

Quanten-Teleportation

Beamens – die blitzschnelle Fernübertragung von Objekten in Form purer Information – ist kein Science-Fiction-Traum mehr. Zumindest an einzelnen Lichtquanten ist das Kunststück jetzt demonstriert worden; dabei kommen exotische Quanteneffekte ins Spiel.

Von Anton Zeilinger

Für die Crew von „Raumschiff Enterprise“ ist Beamens (von englisch *beam* für Strahl) längst Routine: Um einen fremden Planeten zu erkunden, betritt ein Team die Transportkammer. Lichter pulsieren, seltsame Klänge ertönen, die Gestalten der kühnen Raumfahrer lösen sich auf – und erscheinen augenblicklich auf der Planetenoberfläche wieder. Ließe sich dieser Traum von der so genannten Teleportation realisieren, so wären langwierige Flugreisen mit mehreren Zwischenmahlzeiten überflüssig. Zwar wird das Beamens großer Objekte oder gar lebender Menschen wohl auch weiterhin reine Utopie bleiben. Doch die Quanten-Teleportation einzelner Photonen ist im Labor bereits gelungen.

Die Quanten-Teleportation nutzt gewisse grundlegende – und äußerst seltsame – Eigenheiten der Quantenmechanik, eines Zweiges der Physik, der im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts entwickelt wurde, um Prozesse im Bereich der Atome zu erklären. Von Anfang an erkannten die Theoretiker, dass die Quantenphysik zu einer Vielzahl neuartiger Phänomene führt, die der Alltagserfahrung oft diametral zuwiderlaufen. Auf Grund technischer Fortschritte gegen Ende des 20. Jahrhunderts konnten die Forscher Experimente ausführen, die nicht nur fundamentale und oft bizarre Aspekte der Quantenmechanik demonstrieren, sondern auch vordem unvorstellbare „Kunststücke“ ermöglichen.

In Science-Fiction-Geschichten erlaubt die Teleportation häufig das momentane Überwinden beliebiger Entfernungen und verletzt somit ein Grundprinzip der Einsteinschen Relativitätstheorie, wonach sich nichts schneller bewegen kann als das Licht (siehe „Schneller als Licht?“ von Raymond Y. Chiao et al., Spektrum der Wissenschaft 10/1993, S. 40). Die Teleportation ist je-

denfalls weniger umständlich als die üblichen Mittel der Raumfahrt. Angeblich erfand Gene Roddenberry, der Schöpfer der Fernsehserie „Star Trek“ („Raumschiff Enterprise“) den Transporterstrahl, um die Kosten für das filmische Darstellen von Start- und Landemanövern auf fremden Planeten einzusparen.

In der Science-Fiction variiert die Prozedur des Beamens zwar von einer Geschichte zur anderen, aber das Prinzip geht so: Ein Apparat analysiert das betreffende Objekt vollständig und sammelt dabei die gesamte zu dessen Beschreibung nötige Information. Ein Sender überträgt diese Daten zur Empfangsstation, wo daraus ein neues Original hergestellt wird. Manchmal wird auch das Material, aus dem das Original bestand, zur Empfangsstation transportiert, vielleicht in Form von Energie; in anderen Fällen entsteht die Kopie aus am Empfangsort bereits vorhandenen Atomen und Molekülen.

Nur die Verschränkung macht's möglich

Freilich scheint die Quantenmechanik ein derartiges Verfahren prinzipiell zu verbieten. Das Heisenbergsche Unbestimmtheitsprinzip besagt, dass man niemals zugleich den exakten Ort und den exakten Impuls eines Objekts festzustellen vermag. Somit lässt sich der Gegenstand, der teleportiert werden soll, auch nicht völlig exakt analysieren; Ort und Geschwindigkeit jedes Atoms und Elektrons sind stets mit einer gewissen Unbestimmtheit behaftet. Heisenbergs Prinzip gilt auch für andere Paare von Messgrößen und verbietet alles in allem, den gesamten Quantenzustand eines Objekts vollständig und exakt zu messen. Doch gerade das wäre nötig, um sämtliche zur genauen Beschreibung des Originals erforderlichen Daten zu erhalten.

Im Jahre 1993 warfen einige Physiker diese Lehrmeinung über den Haufen,

indem sie einen Weg entdeckten, die Quantenmechanik selbst für die Teleportation einzuspannen. Charles H. Bennett von IBM, Gilles Brassard, Claude Crépeau und Richard Josza von der Universität Montreal (Kanada), Asher Peres vom Technion, dem israelischen Technologie-Institut, und William K. Wootters vom Williams College (Massachusetts) fanden heraus, dass eine seltsame, aber grundlegende Eigentümlichkeit der Quantenmechanik – die so genannte Verschränkung – dazu dienen kann, die von Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip auferlegten Beschränkungen zu umgehen, ohne es zu verletzen.

Zwei quantenmechanisch verschränkte Teilchen gleichen einem Paar von Würfeln, bei dem zwar keiner der beiden Würfel für sich genommen gezinkt ist – bei jedem Wurf liegt rein zufällig einmal 1, ein andermal 3, dann wieder 6 oben – und bei dem trotzdem bei jedem Doppelwurf beide Würfel die gleichen Augenzahlen zeigen: zweimal 1, zweimal 3, zweimal 6 und so weiter. Ein entsprechendes Verhalten ist an verschränkten Partikeln tatsächlich nachgewiesen und intensiv untersucht worden. Bei typischen Experimenten spielen Paare von Atomen, Ionen oder Photonen die Rolle der Würfel, und Eigenschaften wie die Polarisation stehen für die verschiedenen Seiten eines Würfels.

Betrachten wir zwei verschränkte Photonen, deren Polarisationen zwar zufallsverteilt, aber stets identisch sind. Lichtstrahlen und sogar einzelne Photonen entsprechen elektromagnetischen Feldschwingungen, und die Polarisation bezeichnet die Ausrichtung der elektrischen Schwingungskomponente (siehe

Diese Ankunft von Fernreisenden in einem fiktiven New Yorker Teleport-Terminal wird wohl Science-Fiction bleiben. Zwar ist kürzlich die Teleportation elementarer Quantenzustände im Labor gelungen, aber das „Beamens“ großer Objekte – von Lebewesen ganz zu schweigen – bleibt nach wie vor ausgeschlossen.

Seite 24 oben). Angenommen, Alice besitzt eines der verschränkten Photonen und Bob das andere. Wenn Alice ihr Photon misst, um festzustellen, ob es horizontal oder vertikal polarisiert ist, beträgt die Wahrscheinlichkeit für jedes der beiden Resultate 50 Prozent. Bobs Photon hat an sich die gleichen Wahrscheinlichkeiten, aber die Verschränkung garantiert, dass er exakt dasselbe Ergebnis erhält wie Alice. Sobald Alice

das Resultat „horizontal“ beobachtet, weiß sie, dass auch Bobs Photon horizontal polarisiert sein muss. Vor Alices Messung besitzen die beiden Photonen keine individuellen Polarisierungen; der verschränkte Zustand legt nur fest, dass jede Messung für beide denselben Wert ergeben wird.

Verblüffend an diesem Vorgang ist, dass es keine Rolle spielt, wie weit Alice und Bob voneinander entfernt sind, so-

lange nur ihre Photonen verschränkt bleiben. Selbst wenn Alice sich Lichtjahre entfernt von Bob aufhält, werden beide beim Vergleich ihrer Messresultate stets Übereinstimmung feststellen. Jedes Mal ist es, als würde der Quantenzustand von Bobs Photon durch Alices weit entfernte Messung auf magische Weise umgekehrt.

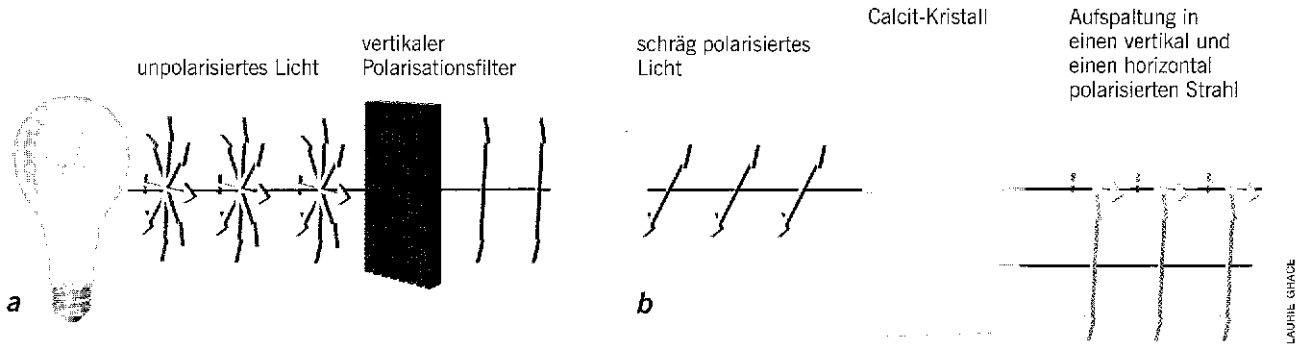
Können wir die Verschränkung vielleicht erklären, indem wir uns vorstellen, ▶



STACEY STERNBERG / PHOTOFEST



QUANTEN-TELEPORTATION



Unpolarisiertes Licht besteht aus Photonen beliebiger Schwingungsrichtung; in polarisiertem Licht schwingen die elektrischen Feldkomponenten (durch Pfeile symbolisiert) aller Photonen nur in einer einzigen Richtung (a). Ein Calcit-Kristall spaltet einen Lichtstrahl durch Doppelbrechung so in zwei Strahlen auf, dass der eine nur parallel zur Kristallachse polarisierte Photonen

enthält, der andere nur dazu senkrecht polarisierte (b). Dazwischen liegende Winkel bilden eine Quantensuperposition beider Strahlen. Jedes Photon kann in dem einen oder dem anderen Strahl mit einer vom Polarisationswinkel abhängigen Wahrscheinlichkeit nachgewiesen werden. Darum können wir die unbekannte Polarisation eines einzelnen Photons nicht mit Sicherheit messen.

jedes Teilchen trage in sich irgendwelche vorweg gespeicherte Instruktionen? Vielleicht synchronisieren wir beim Verschränken der beiden Partikel irgendeinen verborgenen Mechanismus, der festlegt, welche Werte im Falle einer Messung herauskommen werden? Das würde den mysteriösen Effekt erklären, den Alices Messung auf Bobs Teilchen ausübt. Doch in den 60er Jahren bewies der irische Physiker John Bell ein Theorem, dem zufolge in bestimmten Situationen jede solche Erklärung der Quantenverschränkung mittels „verborgener Variablen“ zu Resultaten führen müsste, die sich von den Vorhersagen der normalen Quantenmechanik unterscheiden. Entsprechende Experimente haben die Quantenmechanik bestätigt und gezeigt, dass verborgene Variable unmöglich sind.

Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger, einer der Begründer der Quantenmechanik, kreierte die Bezeichnung „Verschränkung“ und nannte sie das wesentlichste Merkmal der Quantenphysik. Oft spricht man in diesem Zusammenhang

nach den Initialen von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen, die 1935 die mit Verschränkung zusammenhängenden fundamentalen Fragen untersuchten – vom EPR-Effekt und nennt die verschränkten Teilchen EPR-Paare. Einstein sprach von „spukhafter Fernwirkung“. Würde man versuchen, die Ergebnisse durch Signalaustausch zwischen den Photonen zu erklären, so müssten die Signale sich schneller als Licht ausbreiten. Natürlich haben sich viele gefragt, ob dieser Effekt sich nutzen ließe, um Daten mit Überlichtgeschwindigkeit zu übertragen.

Doch die Quantengesetze verbieten das. Jede lokale Messung eines isoliert betrachteten Photons liefert ein völlig zufallsverteiltes Resultat und vermag darum keine Information von dem anderen, weit entfernten Ort zu gewinnen. Die Messung sagt uns nur, welche Wahrscheinlichkeiten die weit entfernten Messungen hätten – je nachdem, was dort gemessen würde. Dennoch können

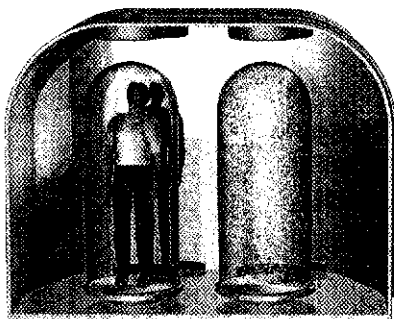
wir die Verschränkung auf raffinierte Weise einsetzen, um Quanten-Teleportation zu erreichen.

Wie Alice und Bob ein Photon teleportieren

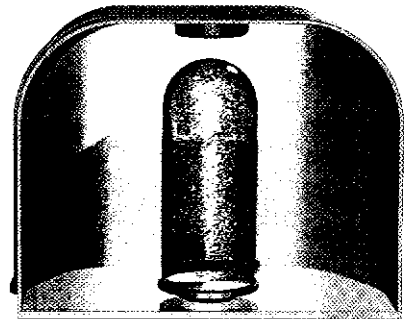
Alice und Bob haben vor, ein Photon zu teleportieren. Als Vorbereitung teilen sie ein verschränktes Hilfspaar von Photonen untereinander auf: Alice bekommt Photon A, und Bob erhält Photon B. Statt die Polarisationen zu messen, heben beide ihr Photon auf, ohne den empfindlichen verschränkten Zustand zu stören (siehe Bild auf Seite 26 oben).

Zusätzlich besitzt Alice ein drittes Photon – nennen wir es X –, das sie zu Bob teleportieren möchte. Sie kennt den Zustand von Photon X nicht, aber sie möchte, dass Bob ein Photon mit genau dieser Polarisation bekommt. Sie kann nicht einfach die Polarisation des Photons messen und Bob das Ergebnis senden. Im Allgemeinen wäre ihr Messresultat nicht identisch mit dem ursprüngli-

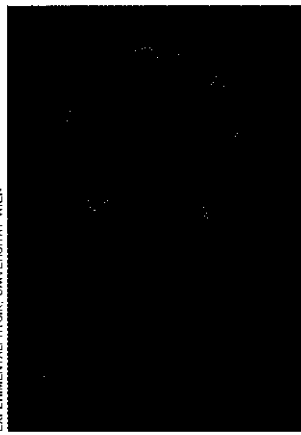
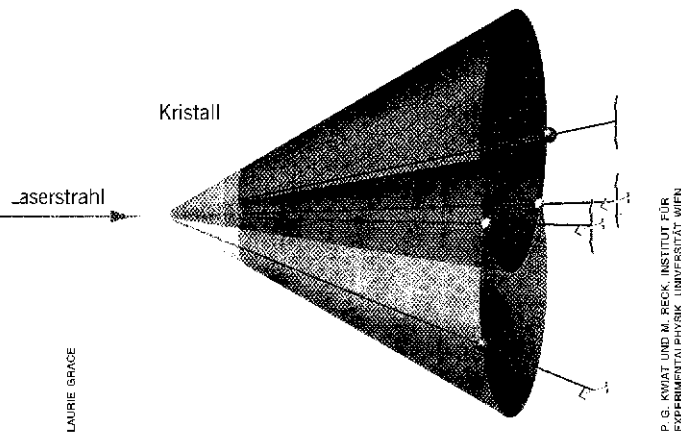
Vorbereitung einer Quanten-Teleportation ...



In diesem rein fiktiven Szenario wird das Teleportieren an einem lebenden Menschen durchgespielt. Er betritt eine Analyse-Kammer (links) neben einer gleichartigen Kammer, die



mit einer gleich großen Masse von Hilfsmaterial gefüllt ist (grün). Es ist zuvor mit seinem Gegenstück verschränkt worden, das sich in der weit entfernten Empfangsstation befindet (rechts).



Wenn ein Laserstrahl einen optisch nichtlinearen Kristall – etwa Beta-Bariumborat – passiert, entstehen verschränkte Photonenpaare. Gelegentlich konvertiert der Kristall ein einzelnes Ultraviolett-Photon in zwei Photonen geringerer Energie, ein vertikal polarisiertes (auf dem roten Kegel) und ein horizontal polarisiertes (auf dem blauen Kegel). Wenn die Photonen sich zufällig längs der zwei Schnitlinien beider Kegel fortpflanzen (grün), hat keines der beiden eine eindeutig definierte Polarisation, aber ihre relativen Polarisationen sind stets komplementär zueinander: Die Photonen sind verschränkt. Rechts eine nachträglich mit Falschfarben kolorierte Fotografie von konvertiertem Licht.

chen Zustand des Photons. Daran ist das Heisenbergsche Unbestimmtheitsprinzip schuld. Um Photon X zu teleportieren, muss Alice darum anders vorgehen: Sie misst es zusammen mit Photon A, ohne die individuellen Polarisationen der beiden zu bestimmen. Beispielsweise findet sie, dass die Polarisationen „senkrecht“ aufeinander stehen – ohne jedoch die absolute Polarisation eines der beiden zu kennen. Die gemeinsame Messung verschränkt Photon A und Photon X; sie heißt in der Fachsprache Bell-Zustandsmessung.

Alices Messung erzeugt einen subtilen Effekt: Dieser Messvorgang verändert Bobs Photon so, dass es mit einer Kombination ihres Messresultats und des ursprünglichen Zustands von Photon X korreliert wird. Tatsächlich trägt Bobs Photon jetzt den Zustand ihres Photons X – entweder exakt oder in einer einfachen Abwandlung.

Um die Teleportation zu vollenden, muss Alice Bob nun eine Botschaft auf konventionellem Weg senden – etwa per Telefon oder auf einem Blatt Papier. Nach Erhalt dieser Nachricht kann Bob,

falls nötig, sein Photon B so transformieren, dass es sich schließlich in ein Photon verwandelt, das exakt denselben Zustand hat wie das ursprüngliche Photon X.

Welche Transformation Bob anwenden muss, hängt von dem Ergebnis von Alices Messung ab. Es gibt vier Möglichkeiten, die vier Quantenrelationen zwischen Alices Photonen A und X entsprechen. Zwei Relationen sind „total“ parallel oder senkrecht; das heißt, die Relation gilt für Polarisationsmessungen in jeder beliebigen Richtung. Bei den zwei anderen Relationen hängt das Ergebnis – parallel oder senkrecht – davon ab, ob die Polarisationen längs vertikaler und horizontaler Richtungen oder längs der beiden 45-Grad-Diagonalen gemessen werden. Eine typische Transformation, der Bob sein Photon unterziehen muss, ist eine Drehung der Polarisation um 90 Grad – indem er es zum Beispiel durch einen Kristall mit passenden optischen Eigenschaften schiebt.

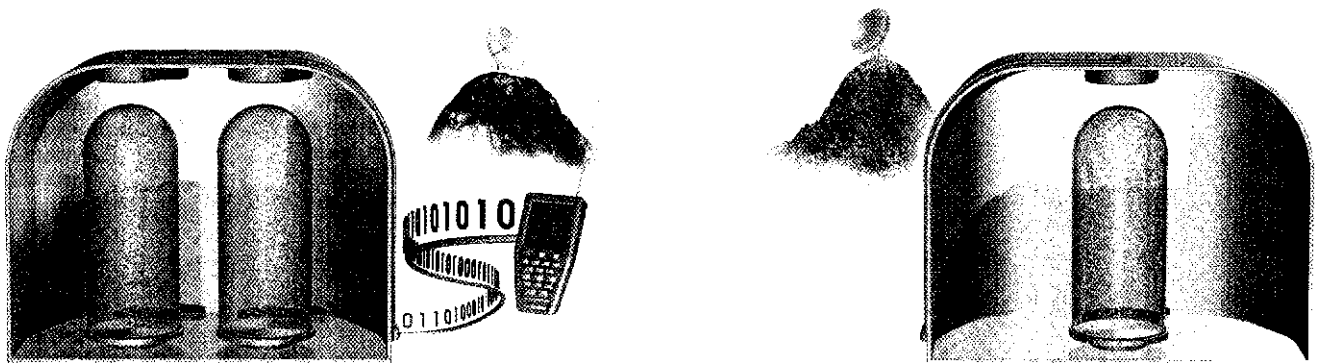
Welches der vier möglichen Resultate Alice erhält, ist völlig zufällig und unabhängig vom ursprünglichen Zustand des Photons X. Darum weiß Bob nicht,

wie er mit seinem Photon umgehen muss, bis er das Ergebnis von Alices Messung erfährt; das ist der Grund, warum Alice ihm eine gewöhnliche Botschaft schicken muss, um die Teleportation zu vollenden. Man könnte sagen, dass Bobs Photon auf quantenmechanischem Wege augenblicklich die gesamte Information von Alices Original erwirbt. Aber um zu wissen, wie diese Information zu lesen ist, muss Bob auf die klassische Nachricht warten, bestehend aus zwei Bits, die sich nicht schneller als Licht übertragen lassen.

Warum Teleportieren nicht Klonieren bedeutet

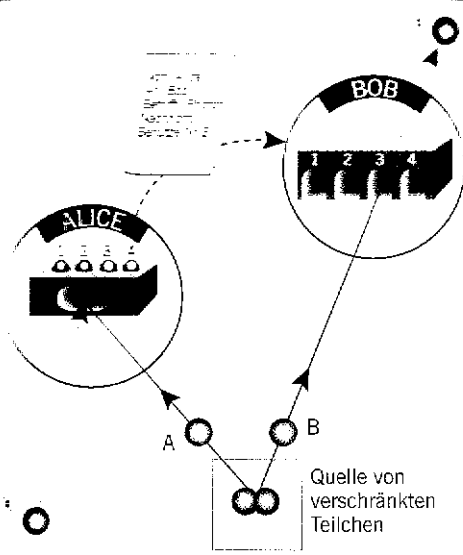
Ein Skeptiker mag einwenden, dass hier nur der Polarisationszustand des Photons übertragen wurde, oder allgemeiner, sein Quantenzustand, aber nicht das Photon „selbst“. Doch da ein Photon vollständig durch seinen Quantenzustand charakterisiert wird, ist die Teleportation seines Zustands völlig äquivalent zur Teleportation des Teilchens (siehe Kasten auf Seite 29).

... eine Quantenmessung ...



Eine Messung, die gleichzeitig am Hilfsmaterial und an dem Menschen ausgeführt wird, erzeugt einen zufälligen Quantenzustand und eine riesige Menge zufälliger – aber signifikanter –

Daten: zwei Bits pro elementarem Zustand (links). Durch „spukhafte Fernwirkung“ verändert die Messung zudem augenblicklich den Quantenzustand des Gegenstücks (rechts).



In dieser Szene spielt Alice den Sender und Bob den Empfänger einer Quantenteleportation. Sie teilen sich ein Paar verschränkter Teilchen 1 und 2 grün. Alice hat außerdem ein Teilchen in einem unbekannter Quantenzustand χ blau. Alice führt nun an den Teilchen 1 und 2 eine Bell-Zustandsmessung durch und erhält eines von vier möglichen Resultaten. Sie teilt Bob dieses Ergebnis auf konventionellem Weg mit. Je nach Alices Resultat lässt Bob sein Teilchen unverändert (1) oder dreht dessen Polarisationsrichtung (2, 3, 4). In jedem Fall wird daraus ein Photon mit exakt den Eigenschaften des ursprünglichen Teilchens χ .

Außerdem ist der Zustand des Photons χ zu Bob übertragen worden, ohne dass Alice oder Bob irgendetwas über diesen Zustand erfahren haben. Alices Messergebnis ist völlig zufällig und teilt den beiden nichts über den Zustand mit. Auf diese Weise umgeht die Prozedur das Heisenberg-Prinzip, welches uns zwar daran hindert, den vollständigen Quantenzustand eines Teilchens zu bestimmen, aber nicht daran, den kompletten Zustand zu teleportieren – so lange wir nicht versuchen, den Zustand zu bestimmen.

Übrigens wandert die teleportierte Quanteninformation nicht materiell von Alice zu Bob. Alles, was materiell übertragen wird, ist die Botschaft über Alices Messergebnis; daraus erfährt Bob nur, wie er sein Photon behandeln muss, aber nichts über den Zustand von Photon χ selbst.

In einem von vier Fällen hat Alice mit ihrer Messung Glück – die spezielle zwischen A und X gefundene Relation ist identisch mit dem der ursprünglichen Verschränkung von A und B –, und Bobs Photon wird augenblicklich identisch mit Alices Original. Man könnte meinen, hier sei Information augenblicklich von Alice zu Bob gelangt, unter Verletzung des Einsteinschen Verbots einer Signalübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit. Doch dieser seltsame Einzelfall lässt sich nicht zur Informationsübertragung nutzen, denn Bob kann nicht wissen, dass sein Photon bereits identisch

mit Alices Original ist. Erst wenn er das Resultat von Alices Bell-Zustandsmessung erfährt, das auf klassischem Wege zu ihm gelangt ist, vermag er die im teleportierten Quantenzustand steckende Information zu nutzen.

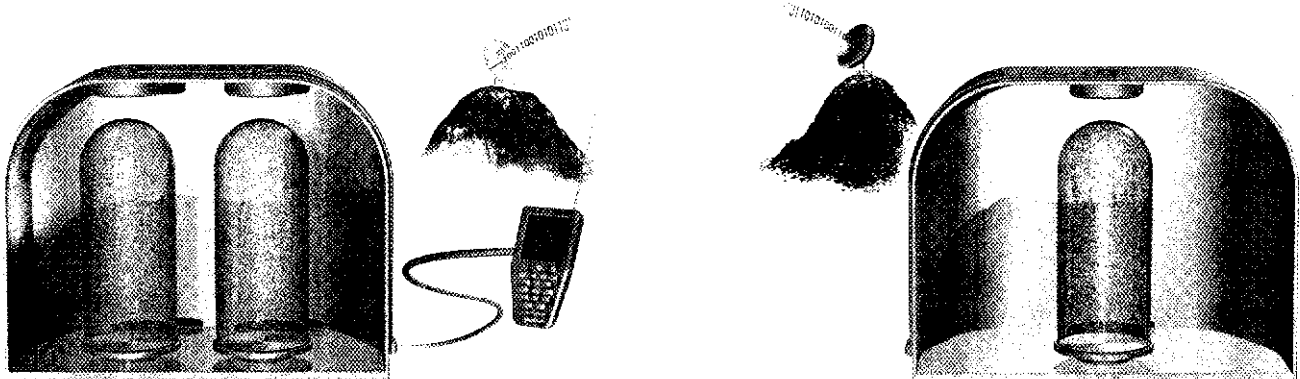
Angenommen, Bob versucht zu erraten, in welchen Fällen die Teleportation augenblicklich erfolgreich war. Er wird sich in 75 Prozent aller Fälle irren und nicht wissen, wann er richtig geraten hat. Wenn er die Photonen auf Grund solcher Vermutungen benutzt, werden die Resultate so ausfallen, als hätte er einen Strahl von Photonen mit zufallsverteilten Polarisationen verwendet. Auf diese Weise bleibt das Einsteinsche Verbot gültig: Sogar die instantane „spukhafte Fernwirkung“ der Quantenmechanik ist nicht im Stande, brauchbare Information mit Überlichtgeschwindigkeit zu senden.

Wir bauen eine Teleportationsmaschine

Man könnte meinen, der beschriebene theoretische Vorschlag liefere geradewegs den Bauplan für einen Photonenteleportierer – doch weit gefehlt: Die praktische Realisierung im Labor wirft enorme Probleme auf. Zwar ist das Erzeugen verschränkter Photonenpaare im vergangenen Jahrzehnt Routine geworden, aber noch nie zuvor hatte jemand eine Bell-Zustandsmessung an zwei unabhängigen Photonen durchgeführt.

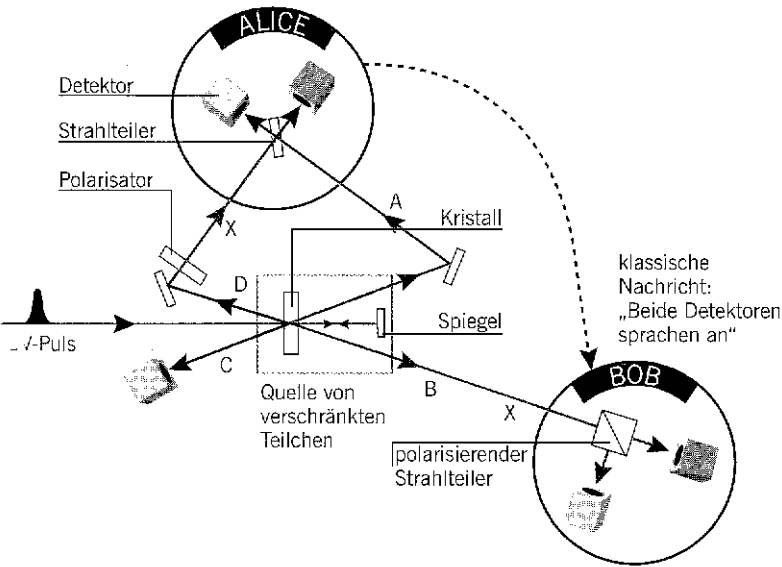
Wohlgemerkt: Die Quantenteleportation erzeugt nicht zwei Versionen von Photon χ . Klassische Information lässt sich beliebig oft kopieren, aber das Kopieren von Quanten-Information ist unmöglich; dieses Resultat, das so genannte Nicht-Klonierungstheorem, wurde 1982 von Wootters und Wojciech H. Zurek vom Los Alamos National Laboratory bewiesen. Wären wir im Stande, einen Quantenzustand zu klonieren, so könnten wir die Klone benutzen, um das Heisenberg-Prinzip zu verletzen. Alices Messung verschränkt tatsächlich ihr Photon A mit Photon χ , und Letzteres verliert gleichsam all seine Erinnerung an den ursprünglichen Zustand. Als Mitglied eines verschränkten Paares hat es keinen individuellen Polarisationszustand. Darum verschwindet der ursprüngliche Zustand von Photon χ aus Alices Bereich.

... Übertragung der Zufallsdaten ...



Die Messdaten müssen auf herkömmlichem Weg zur entfernten Empfangsstation gesendet werden. Da dies auf Grund der Gesetze der Einsteinschen Relativitätstheorie

höchstens mit Lichtgeschwindigkeit geschehen kann, ist es prinzipiell unmöglich, eine Teleportation mit Überlichtgeschwindigkeit durchzuführen.



Das Innsbrucker Experiment beginnt mit einem Puls ultravioletter Laserstrahlung. Beim Durchgang durch einen Kristall entstehen daraus die verschränkten Photonen A und B, die zu Alice beziehungsweise zu Bob wandern. Der reflektierte Puls erzeugt auf seinem Rückweg durch den Kristall zwei weitere Photonen C und D. Ein Polarisator versetzt Photon D in den definierten Zustand X. Photon C wird im Detektor nachgewiesen und bestätigt dadurch, dass Photon X zu Alice gesandt wurde. Alice kombiniert die Photonen A und X mit Hilfe eines Strahlteilers (siehe Grafik auf Seite 28). Wenn sie in jedem ihrer Detektoren ein Photon findet – was in 25 Prozent aller Fälle eintritt –, ist die Teleportation erfolgreich, und Alice setzt Bob davon auf herkömmliche Weise in Kenntnis. Er benutzt einen polarisierenden Strahlteiler, um zu bestätigen, dass sein Photon nun die Polarisation von X hat.

Eine wirksame Methode zur Produktion verschränkter Photonenpaare ist die spontane parametrische Konversion: Ein einzelnes Photon erzeugt beim Durchgang durch einen optisch nichtlinearen Kristall mitunter zwei neue Photonen, welche so verschränkt sind, dass sie sich bei einer Messung als entgegengesetzt polarisiert erweisen (Bild auf Seite 25).

Viel schwieriger ist es, zwei bereits existierende unabhängige Photonen zu verschränken. Doch genau dies muss ein Bell-Zustandsmessgerät leisten, wenn es die beiden Photonen A und X ihrer individuellen Eigenschaften beraubt. Im Jahre 1997 hat meine Gruppe – Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle,

Manfred Eibl und Harald Weinfurter – bei unserem Teleportationsexperiment an der Universität Innsbruck (Österreich) eine Lösung für dieses Problem verwendet (siehe Grafik oben).

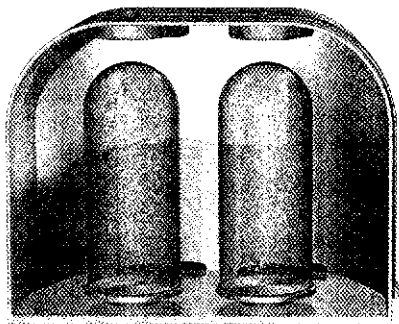
Bei unserem Experiment passiert ein kurzer ultravioletter Laserpuls einen Kristall und erzeugt die verschränkten Photonen A und B. Das eine wandert zu Alice, das andere zu Bob. Ein Spiegel wirft den Ultraviolettimpuls wieder durch den Kristall zurück, wobei mitunter ein weiteres Photonenpaar – C und D – entsteht. Diese beiden sind zwar auch verschränkt, aber diesen Umstand nutzen wir nicht aus. Photon C wandert zu einem Detektor, der uns meldet, dass sein

Partner D für eine Teleportation zur Verfügung steht. Photon D passiert einen Polarisator, den wir ganz beliebig einstellen können. Das so entstehende polarisierte Photon ist unser Photon X, das teleportiert werden soll; es wandert zu Alice. Nachdem X den Polarisator passiert hat, ist es ein unabhängiges, nicht mehr verschränktes Photon. Zwar kennen wir – auf Grund der von uns gewählten Einstellung des Polarisators – die Polarisation von Photon X, aber Alice weiß nichts davon. Wir verwenden denselben Ultraviolettimpuls auf diese Weise doppelt, um sicherzustellen, dass Alice gleichzeitig die Photonen A und X erhält.

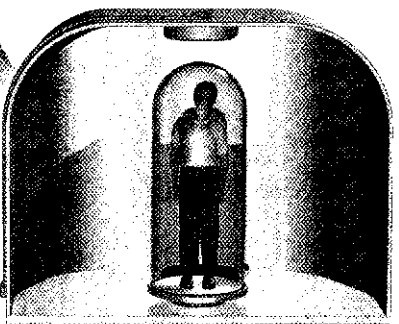
Nun stehen wir vor der Aufgabe, die Bell-Zustandsmessung auszuführen. Zu diesem Zweck kombiniert Alice ihre beiden Photonen A und X mittels eines halbdurchlässigen Spiegels, der ein auftreffendes Photon mit einer Chance von 50 zu 50 durchlässt oder reflektiert. Quantenphysikalisch ausgedrückt geht das Photon nun in eine Superposition dieser zwei Möglichkeiten über (siehe Grafik a auf Seite 28).

Nehmen wir nun an, dass zwei Photonen auf entgegengesetzte Seiten des Spiegels treffen, wobei ihre Pfade exakt so ausgerichtet sind, dass sie sich decken, wenn jeweils das eine Photon reflektiert und das andere durchgelassen wird (siehe Grafik b auf Seite 28). Am Ende jedes Pfades liegt ein Detektor. Normalerweise werden die zwei Photonen unabhängig voneinander reflektiert und gelangen mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit in separate Detektoren. Doch wenn die Photonen ununterscheidbar sind und genau gleichzeitig den Spiegel erreichen, findet Quanteninterferenz statt: Manche Möglichkeiten löschen einander aus und treten nicht ein, während andere einander verstärken und öf-

... Rekonstruktion des Reisenden



Die Empfangsstation erschafft den Reisenden neu – bis zum Quantenzustand jedes einzelnen Teilchens exakt –, indem die Zustände des Gegenstücks gemäß den zufälligen Messdaten,



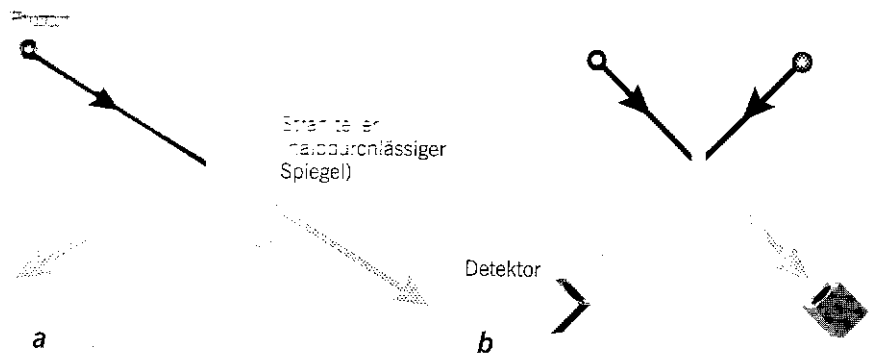
welche die Analyse-Station gesendet hat, angepasst werden. Dieses Kopieren ist kein Klonieren: Im Sender bleibt keine Version des Reisenden zurück.

DAVID FIERSTEIN

Die Teilchen "A" und "B" sind in einem gemeinsamen Zustand, dem Bell-Zustand, verschränkt. Wenn Alice ein Photon misst, wird die Wellenfunktion des Systems kollabiert. In 25 Prozent aller Fälle werden beide Photonen in entgegengesetzten Detektoren gefunden, was als "Huckepack-Zustand" bezeichnet wird. In den übrigen 75 Prozent aller Fälle werden beide Photonen in demselben Detektor gefunden, was als "Ein-Teilchen-Messung" bezeichnet wird.

Wenn Alice in beiden Detektoren gleichzeitig ein Photon entdeckt, erhält Bobs Photon augenblicklich die Eigenschaften von Alices ursprünglichem Photon X. Wir wiesen in Innsbruck experimentell nach, dass diese Teleportation geschah, indem wir zeigten, dass Bobs Photon die Polarisation besaß, die wir dem Photon X aufgezwungen hatten. Unser Experiment war nicht perfekt, aber immerhin maßen wir die korrekte Polarisation in 80 Prozent aller Fälle – mit zufallsverteilten Photonen wäre die Trefferquote nur 50 Prozent gewesen. Wir demonstrierten das Verfahren mit unterschiedlichen Polarisationen: vertikal, horizontal, linear unter 45 Grad und sogar zirkular polarisiert.

Das Schwierigste bei unserer Bell-Zustandsanalyse ist, die Photonen A und X ununterscheidbar zu machen. Selbst der Zeitpunkt, zu dem die Photonen ankommen, könnte benutzt werden, die Photonen zu unterscheiden; darum ist es wichtig, die von den Teilchen mitgeführte zeitliche Information „auszuradiieren“. In unserem Experiment verwendeten wir einen schlaunen Trick, auf den zuerst Marek Zukowski von der Universität



Ein Strahlteiler reflektiert die Hälfte des auftreffenden Lichts und lässt die andere Hälfte durch (a). Ein einzelnes Photon wird mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit reflektiert oder durchgelassen. Wenn zwei identische Photonen den Strahlteiler gleichzeitig von entgegengesetzten Seiten treffen, interferieren die reflektierten und durchgelassenen Teile, und die Photonen verlieren ihre separate Identität (b). Darum beobachten wir nur in 25 Prozent aller Fälle in jedem Detektor ein Photon.

Gdansk (Polen) gekommen war: Wir schickten die Photonen durch Wellenlängendifter sehr schmaler Bandbreite. Dadurch entstanden äußerst scharf definierte Wellenlängen, und dafür wurden die Photonen infolge der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation zeitlich verschmiert.

Ein verblüffender Fall tritt ein, wenn das teleportierte Photon seinerseits mit einem anderen verschränkt worden ist und darum keine individuell definierte Polarisation besitzt. Im Jahre 1998 hat mein Innsbrucker Team diesen Vorgang realisiert, indem Alice das Photon D ohne vorherige Polarisierung erhielt, sodass es noch immer mit Photon C verschränkt war. Wie wir zeigten, ist nach erfolgreicher Teleportation Bobs Photon B mit C verschränkt. Somit ist tatsächlich die Verschränkung mit C von D auf B übertragen worden.

könnte huckepack auf Alices Hilfsphoton A reiten. Die Gruppe um Francesco De Martini an der Universität Rom I „La Sapienza“ hat diese Idee 1997 erfolgreich in die Tat umgesetzt. Das Photonen-Hilfspaar wurde bezüglich der Photon-Positionen verschränkt: Photon A wurde aufgespalten – ähnlich wie durch einen Strahlteiler – und zu zwei verschiedenen Teilen von Alices Apparat geschickt, wobei die beiden Alternativen durch Verschränkung an ein gleichartiges Aufspalten von Bobs Photon B gekoppelt wurden. Der Zustand, der teleportiert werden sollte, wurde ebenfalls von Alices Photon A getragen, und zwar als dessen Polarisationszustand. Indem ein Photon beide Rollen übernimmt, wird das Entdecken aller vier Bell-Zustände zu einer gewöhnlichen Ein-Teilchen-Messung: Es gilt, Alices Photon an einem von zwei möglichen Orten mit einer von zwei möglichen Polarisierungen zu entdecken. Der Nachteil des Verfahrens ist, dass Alice, wenn sie einen separaten unbekanntem Zustand X teleportieren soll, ihn irgendwie auf die Polarisation ihres Photons A übertragen muss; niemand weiß, wie sich das praktisch durchführen lässt – außer durch unser Verfahren der Teleportation.

Die Polarisation eines Photons – die Eigenschaft, die sowohl beim Innsbrucker als auch beim römischen Experiment verwendet wird – ist insofern ein diskreter Zustand, als jeder Polarisationszustand sich als Superposition von nur zwei diskreten Zuständen ausdrücken lässt, etwa von vertikaler und horizontaler Polarisation. Das elektromagnetische Feld als Träger des Lichts hat aber auch kontinuierliche Eigenschaften, die Superpositionen von un-

Literaturhinweise

- Quantenmechanik verstehen. Von Herbert Pietschmann, Springer Verlag 2002
- Entanglement. The Greatest Mystery in Physics. Von Amir D. Aczel, John Wiley and Sons 2002
- Einsteins Schleier. Von Anton Zeilinger, Beck Verlag 2003
- Quantum Theory: Weird and Wonderful. Von A. J. Leggett in: Physics World, Bd. 12, S. 73 (1999).
- Quantum Information. Sonderheft von Physics World, Bd. 11, Heft 3 (1998).
- Experimental Quantum Teleportation. Von D. Bouwmeester et al. in: Nature, Bd. 390, S. 575 (1997).
- Quantum Information and Computation. Von Charles H. Bennett in: Physics Today, Bd. 48, S. 24 (1995).
- Weblink: www.quantum.at

Huckepack-Zustände, die auf Photonen reiten

Zwar demonstrierte unser Experiment deutliche Teleportation, aber die Erfolgsquote lag niedrig. Da wir nur einen Bell-Zustand zu identifizieren vermochten, konnten wir Alices Photon nur in 25 Prozent der Fälle teleportieren – immer nur dann, wenn dieser Zustand eintrat. Es gibt keinen vollständigen Bell-Zustandsanalysator für unabhängige Photonen oder ein anderes Paar separat erzeugter Quantenteilchen, und darum gibt es derzeit auch keine experimentell überprüfte Methode, den Wirkungsgrad unseres Verfahrens auf 100 Prozent zu erhöhen.

Im Jahre 1994 schlug Sandu Popescu, damals an der Universität Cambridge, einen Ausweg vor: Der Quantenzustand, der teleportiert werden soll,

Anton Zeilinger zu Fragen der Teleportation

Ist es nicht übertrieben, hier von Teleportation zu sprechen? Schließlich wird nur ein Quantenzustand teleportiert, nicht ein echtes Objekt.

Dieser Einwand wirft die philosophische Frage auf, was wir mit Identität meinen. Wann wissen wir, dass ein Objekt – etwa das Auto, das wir morgens in unserer Garage vorfinden – dasselbe ist wie am Vorabend? Wenn es all die richtigen Eigenschaften hat! Die Quantenphysik treibt dieses Argument auf die Spitze: Teilchen desselben Typs im selben Quantenzustand sind prinzipiell ununterscheidbar. Könnte man sämtliche Eisenatome des Autos sorgfältig mit denen eines Erzklumpens vertauschen und die Atomzustände exakt reproduzieren, so wäre das Endergebnis völlig identisch mit dem ursprünglichen Auto. Identität kann nicht mehr bedeuten als eben dies: hinsichtlich aller Eigenschaften gleich sein.

Handelt es sich nicht eher um ein „Quanten-Faxgerät“?

Ein Fax lässt sich leicht vom Original unterscheiden, während ein teleportiertes Objekt prinzipiell ununterscheidbar ist. Außerdem muss bei der Quanten-Teleportation das Original zerstört werden.

Wird es je gelingen, ein kompliziertes Objekt zu teleportieren?

Es gibt viele prinzipielle Hindernisse. Erstens muss das Objekt in einem reinen Quantenzustand sein, und solche Zustände sind äußerst fragil. Photonen wechselwirken kaum mit Luft, darum lässt unser Experiment

sich im Freien durchführen; aber Versuche mit Atomen und noch größeren Objekten müssen im Vakuum stattfinden, um Kollisionen mit Gasmolekülen zu vermeiden. Und je größer das Objekt wird, desto leichter lässt sich sein Quantenzustand stören. Ein winziger Klumpen Materie würde sogar durch die Wärmestrahlung der Apparatwände gestört. Dies ist der Grund, warum wir im Alltag keine isolierten Quanteneffekte beobachten.

Leichter als Verschränkung oder Teleportation lässt sich Quanteninterferenz erzeugen; sie ist mit Fullerenen – Hohlkugeln aus 60 Kohlenstoffatomen – bereits demonstriert worden. Solche Versuche werden zu größeren Objekten fortschreiten, vielleicht sogar bis zu kleinen Viren – aber wohl kaum je bis zu gewöhnlichen Fußballen!

Ein weiteres Problem ist die Bell-Zustandsmessung. Was würde es bedeuten, sie an einem Virus durchzuführen, der aus rund 10^7 Atomen besteht? Wie gewinnen wir die 10^8 oder mehr Bits an Information, die eine solche Messung erzeugt? Bei einem Objekt von bereits wenigen Gramm wachsen die Zahlen ins Ungeheure: mindestens 10^{24} Bits an Daten.

Würde die Teleportation eines Menschen Quantengenauigkeit erfordern?

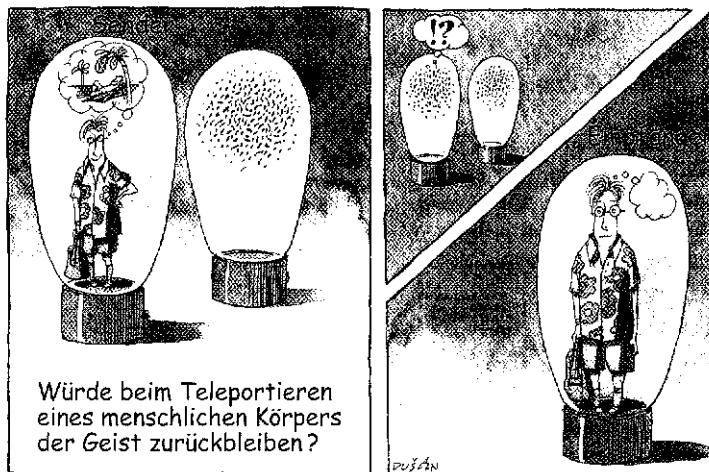
Um dieselbe Person zu sein, ist es anscheinend nicht nötig, im selben Quantenzustand zu sein. Wir ändern unseren Zustand fortwährend und bleiben doch dieselben Menschen – zumindest soweit wir das feststellen können. Andererseits sind eineiige Zwillinge oder biologische Klone nicht „dieselben Menschen“, denn sie haben unterschiedliche Erinnerungen. Verbieta uns die Heisenbergsche Unbestimmtheit, einen Menschen so präzise zu replizieren, dass er meint, er sei derselbe wie das Original? Wer weiß. Jedenfalls ist es interessant, dass das quantenmechanische Nicht-Klonierungstheorem uns daran hindert, das perfekte Double eines Menschen herzustellen.

endlich vielen Basiszuständen entsprechen. Zum Beispiel lässt sich ein Lichtstrahl durch so genanntes Quetschen, durch Rauschunterdrückung so manipulieren, dass eine seiner Eigenschaften extrem präzise und nahezu frei von Rauschen wird – freilich um den vom Heisenberg-Prinzip diktierten Preis, dass eine andere Eigenschaft desto stärker verrauscht und zufälliger wird. Jeffrey Kimbles Gruppe hat am California Institute of Technology in Pasadena einen solchen rauschunterdrückten, gequetschten Zustand (*squeezed state*) verwendet, um die Schwingungsweise eines Lichtstrahls zu einem anderen zu teleportieren, und damit die Teleportation einer kontinuierlichen Eigenschaft vorgeführt.

So erstaunlich all diese Experimente sind, sie kommen nicht im Entferntesten an die Quanten-Teleportation großer Objekte heran. Das liegt an zwei grundlegenden Problemen: Erstens braucht man ein verschränktes Paar gleichartiger Objekte. Zweitens müssen das zu teleportierende Objekt und die verschränkten Paare genügend isoliert von der Umgebung sein. Falls zuviel Information durch unerwünschte Wechselwirkungen aus der Umwelt einsickert oder in sie hinausgelangt, zerfallen die Quantenzustände des Objekts durch so genannte Dekohärenz. Es ist kaum vorstellbar, wie wir ein großes Objekt so total isolieren könnten – ganz zu schweigen von einem Lebewesen, das Luft atmet und Wärme abstrahlt. Aber wer weiß, wie rasch die Entwicklung künftig fortschreiten wird?

Gewiss könnten wir mittels heutiger Technik elementare Zustände wie die der Photonen in unserem Experiment über einige Kilometer oder vielleicht gar zu Satelliten übertragen. Die Technik zur Teleportation von Zuständen einzelner Atome ist bereits verfügbar: Die Gruppe um Serge Haroche an der École Normale Supérieure in Paris hat die Verschränkung von Atomen demonstriert. Das Verschränken von Molekülen und ihre anschließende Teleportation ist wohl innerhalb des nächsten Jahrzehnts zu erwarten. Darüber hinaus bleibt man auf Spekulation angewiesen.

Wichtiger könnte die Teleportation für künftige Quantencomputer werden; statt mit herkömmlichen Bits aus Nullen und Einsen arbeiten sie mit Quantenbits – kurz ▶



Teleportation mit Qubits?

Am ehesten kommt eine Anwendung der Quanten-Teleportation – abgesehen von reiner Grundlagenforschung – für künftige Quantencomputer in Frage. Während ein herkömmlicher Digitalrechner mit Bits arbeitet, die nur entweder die Werte 0 oder 1 annehmen, benutzt ein Quantencomputer Quantenbits oder kurz Qubits (siehe „Flüssige Quantencomputer“ von Neil Gershenfeld und Isaac L. Chuang, Spektrum der Wissenschaft 8/1998, S. 54). Qubits können als Quantensuperpositionen von 0 und 1 existieren – genau wie ein Photon, das als Überlagerung horizontaler und vertikaler Polarisation existiert. Tatsächlich überträgt der einfache Quanten-Teleportierer ein Qubit, indem er ein einzelnes Photon sendet.

Superpositionen von Zahlen muten vielleicht seltsam an, aber wie der kürzlich verstorbene Roif Landauer von IBM formulierte: „Als wir kleine Jungen waren und mit unseren klebrigen klassischen Fingern zählen lernten, wussten wir nichts von Quantenmechanik und Superposition. Wir gewannen den falschen Eindruck, Information sei klassisch. Wir meinten, wir könnten erst drei Finger ausstrecken, dann vier. Wir erkannten nicht, dass es eine Superposition von beidem geben kann.“

Ein Quantencomputer vermag eine Überlagerung vieler verschiedener Inputs auf einmal zu bearbeiten. Zum Beispiel könnte er einen Algorithmus simultan auf einer Million Inputs laufen lassen und dafür nur so viele Qubits brauchen, wie ein konventioneller Computer an Bits benötigen würde, um mit demselben Algorithmus einmal einen einzigen Input zu bearbeiten. Theoretisch wurde nachgewiesen, dass Algorithmen auf Quantencomputern bestimmte Probleme schneller – das heißt, in weniger Rechenschritten – zu lösen vermögen als jeder bekannte Algorithmus, der auf einem klassischen Computer läuft. Zu solchen Problemen gehört das Auffinden von Eintragungen in einer Daten-

bank oder das Faktorisieren großer Zahlen, das für das Brechen von Codes sehr interessant ist.

Bislang sind nur die einfachsten Elemente eines Quantencomputers gebaut worden: logische Gatter, die ein oder zwei Qubits verarbeiten können. Sogar die Realisierung eines kleinen Quantenrechners liegt noch in weiter Ferne. Ein Grundproblem ist das zuverlässige Übertragen von Quantendaten zwischen verschiedenen logischen Gattern oder Prozessoren – ob innerhalb eines einzelnen Quantencomputers oder durch Quantennetzwerke. Eine Lösung wäre die Quanten-Teleportation.

Außerdem haben Daniel Gottesman von Microsoft und Issac Chuang von IBM kürzlich bewiesen, dass ein Quantencomputer sich aus drei Grundelementen bauen lässt: verschränkte Teilchen, Quanten-Teleportierer und Gatter, die ein Qubit nach dem anderen verarbeiten. Dieses Ergebnis ist wichtig, weil Einzel-Qubit-Gatter technisch viel einfacher sind als Zwei-Qubit-Gatter. Der Trick, mit Hilfe eines Teleportierers ein Zwei-Qubit-Gatter zu erzeugen, geht so: Man teleportiert mittels sorgfältig modifizierter verschränkter Paare zwei Qubits vom Input des Gatters zu dessen Output. Die verschränkten Paare werden gerade so modifiziert, dass der Output des Gatters die passend verarbeiteten Qubits empfängt.

Auf diese Weise wird die komplizierte Aufgabe, beliebige quantenlogische Operationen an zwei unbekanntem Qubits durchzuführen, an zwei einfachere Aufgaben delegiert: das Präparieren spezifischer vordefinierter verschränkter Zustände sowie die Teleportation. Freilich ist die komplette Bell-Zustandsmessung, die zum Teleportieren erforderlich ist, ihrerseits eine rudimentäre Form der Zwei-Qubit-Verarbeitung.

bausteine eines Quantencomputers dienen (siehe Kasten oben).

Die Quantenmechanik ist wahrscheinlich eine der tiefgründigsten physikalischen Theorien überhaupt. Die Probleme, vor die sie unseren Alltagsverstand stellt,

veranlassten Einstein, diese Theorie scharf zu kritisieren. Er bestand darauf, dass die Physik versuchen müsse, eine Realität zu erfassen, die unabhängig von ihrer Beobachtung existiere. Zugleich erkannte er, dass wir auf grundlegende Probleme stoßen, wenn wir versuchen, den einzelnen Mitgliedern eines verschränkten Paares eine solche unabhängige physikalische Realität zuzuschreiben. Sein großer Gegenspieler, der dänische Physiker Niels Bohr, bestand darauf, dass man das gesamte System in Betracht ziehen muss – im Falle eines verschränkten Paares die Gesamtheit beider Teilchen. Einsteins Forderung nach einem unabhängigen realen Zustand für jedes der beiden Teilchen ist bei verschränkten Quantensystemen ohne physikalischen Sinn.

LAURIE GRINCE



Die Quanten-Teleportation ist ein direkter Abkömmling der Gedankenexperimente von Einstein und Bohr. Bei der Analyse unseres Laborexperiments kämen wir auf keinen grünen Zweig, wenn wir uns fragen würden, welche Eigenschaften die einzelnen Teilchen denn nun wirklich haben, während sie verschränkt sind. Wir müssen sorgfältig analysieren, was es heißt, eine Polarisation zu „haben“. Wir kommen nicht um die Schlussfolgerung herum, dass wir nur über bestimmte experimentelle Ergebnisse sprechen können, die auf Messungen beruhen. Bei unserer Polarisationsmessung löst ein Klicken des Detektors in unserem Geist die Konstruktion eines Bildes aus, in dem das Photon tatsächlich zum Zeitpunkt der Messung eine bestimmte Polarisation „hatte“. Doch wir dürfen nie vergessen, dass dies nur eine erfundene Geschichte ist: Sie gilt nur, solange wir über dieses spezielle Experiment sprechen, und wir müssen uns hüten, sie in anderen Situationen zu verwenden.

In der Tat würde ich wie Bohr argumentieren, dass wir die Quantenmechanik verstehen können, wenn wir anerkennen, dass die Wissenschaft nicht beschreibt, wie die Natur an sich ist, sondern nur ausdrückt, was wir über die Natur zu sagen vermögen. Darin liegt gegenwärtig der Wert fundamentaler Experimente wie der Teleportation: Solche Versuche helfen uns, zu einem tieferen Verständnis unserer mysteriösen Quantenwelt zu gelangen.

Anton Zeilinger arbeitet seit 1999 am Institut für Experimentalphysik der Universität Wien. Zuvor war er neun Jahre lang an der Universität Innsbruck tätig.

Qubits – die als Superpositionen und Verschränkungen von Nullen und Einsen existieren können. Mittels Teleportation könnte Quanteninformation zwischen Quantenprozessoren übertragen werden. Quanten-Teleportierer können sogar als Grund-

Teleportation von Quantenzuständen zu einem Erdsatelliten?

Von Anton Zeilinger

Seit dem ersten Erscheinen dieses Artikels hat eine Reihe wichtiger neuer Entwicklungen stattgefunden. Im Jahr 2002 hat die Gruppe von Ping Koy Lam in Canberra, Australien, eine Teleportation von kontinuierlichen Variablen eines Laserstrahls nach dem Prinzip der erwähnten Arbeit von Jeffrey Kimble, California Institute of Technology in Pasadena, mit außergewöhnlich hoher Qualität durchgeführt.

Ebenfalls 2002 konnten Eugene Polzik und sein Team an der Universität Aarhus die Verschränkung von Billionen von Atomen miteinander demonstrieren. Die verschränkte Eigenschaft in diesen Experimenten war der kollektive Spin der Atome, das quantenphysikalische Analogon des Drehimpulses. Dieses Experiment eröffnet den Weg für die Teleportation der Quantenzustände von ganzen Ensembles von Atomen.

In meiner Gruppe, jetzt an der Universität Wien, gibt es auch einige neue Resultate. Zum einen konnten wir die Teleportation von verschränkten Photonen zu so hoher Präzision treiben, dass die Entwicklung von Quanten-Repeaterstationen möglich wird. Eine der möglichen Anwendungen der Quantenteleportation wäre ja

die direkte Verbindung von künftigen Quantencomputern. Allerdings besteht ein wesentliches Problem in der Tatsache, dass die verschränkten Photonen auf ihrem Weg gestört werden können oder überhaupt verloren gehen. Dieses Problem kann durch Repeaterstationen umgangen werden.

Wie erwähnt hatten unsere früheren Experimente zwei Einschränkungen. Zum einen konnte Alice nur einen Bell-Zustand durch Messung identifizieren, wodurch unsere Teleportation nur in maximal einem Viertel der Fälle erfolgreich war. Andererseits mussten die teleportierten Photonen tatsächlich gemessen und damit zerstört werden, um zu wissen, dass die Teleportation tatsächlich stattgefunden hatte.

In einem Experiment, das Thomas Jennewein und andere kürzlich durchführten, konnten wir nun wenigstens zwei verschiedene Bell-Zustände experimentell beobachten. Dies geschah dadurch, dass Alice am halbreflektierenden Spiegel auch diejenigen Fälle berücksichtigt, wo beide Photonen auf der gleichen Seite ankommen. Haben sie dann verschiedene Polarisation, ist eindeutig ein zu-

sätzlicher Bell-Zustand identifiziert. Damit konnte die Effizienz unserer Methode auf 50 Prozent gesteigert werden.

Im zweiten Experiment, das Jian-Wei Pan und Kollegen durchführten, wurde das zwischen Alice und Bob aufgeteilte verschränkte Hilfspaar viel öfter produziert als das zu teleportierende Photon. Dadurch wurde erreicht, dass immer, wenn Alices Bell-Zustandsmessung ansprach, ein teleportiertes Photon vorhanden ist. Dieses Experiment ist sehr wichtig, denn es eröffnet die Möglichkeit, die teleportierten Photonen weiter einzusetzen.

Die interessanteste derzeit diskutierte Entwicklung ist die Teleportation von Quantenzuständen zu einem Erdsatelliten. Auch könnte ein Satellit, der mit einer Quelle für verschränkte Photonen ausgestattet ist, Teleportation zwischen zwei auch weit voneinander entfernten Punkten auf der Erde ermöglichen. Solche Experimente sind im Prinzip heute technisch möglich, und es ist zu hoffen, dass die dafür notwendigen experimentellen Anordnungen in naher Zukunft auf einem Satelliten in eine Erdumlaufbahn geschossen werden.

Artikelnachweise:

100 Jahre Quantentheorie, SdW 4/2001, S. 68 – Der geheimnisvolle Spin des Nukleons, SdW 9/1999, S. 28 – Quanten-Teleportation, SdW 6/2000, S. 30 – Das kälteste Gas im Universum, SdW 2/2001, S. 50 – Eine Theorie für alles? SdW Spezial 1/2001, S. 12 – Supersymmetrie in Atomkernen, SdW 9/2002, S. 34 – Die unsichtbaren Dimensionen des Universums, SdW 10/2000, S. 44 – Der Neutrinomasse auf der Spur, SdW 10/1999, S. 44 – Ende einer unendlichen Geschichte, SdW 10/2002, S. 21 – Die Quintessenz des Universums, SdW 3/2001, S. 326 – Gibt es Dunkle Materie? SdW 10/2002, S. 34 – Auf der Suche nach dem Quanten-Ursprung der Zeit, SdW 12/2002, S. 28

Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stellv. Hersteller)

Redaktionsassistenten: Eva Kahlmann, Ursula Wessels

Redaktionsanschrift: Postfach 104 840, 69038 Heidelberg
Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 25-729

Produktentwicklung: Dr. Carsten Könniker
Tel. (0 62 21) 91 26-770

Redaktion für diese Ausgabe: Dieter Beste, Marion Kälke, Mediakonzep, Graf-Recke-Str. 41, 40239 Düsseldorf, Tel. (02 11) 90 83 359, E-Mail: m.kaelke@medakonzep.com

Übersetzung: Es wirkten mit: Dr. Michael Springer, Dr. Johannes Classen, Dr. Gunnar Radors, Dr. Olivia Meyer-Streng, Dr. Rainer Riemann, Stephen Koszudowski

Layout dieser Ausgabe: H&S Team für Fotosatz GmbH, Schönlauer Str. 12, 68775 Ketsch, Tel. (0 62 02) 69 52-0, Fax (0 62 02) 69 52-10, E-Mail: HuSTeam@aol.com

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (0 62 21) 91 26-733

Marketing: Annette Baumäusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.) Tel. (0 62 21) 91 26-744

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104 840, 69038 Heidelberg
Herausgeber: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg
Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751

Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossie

Leser-Service: Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, 69469 Weinhaim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94

Bezugspreise: Einzelheft „Dossier“: € 8,90/SFr 17,40/
Österreich € 9,70, Luxemburg € 10,-

Bei Versand ins Ausland werden die Mehrkosten berechnet.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 00); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wants

Anzeigenleitung: Sybille Roth, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Stefan Sakt, Postfach 102 663, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46

Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55

Anzeigenpreise: Zurzeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 23 vom 1. Januar 2002.

Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69126 Heidelberg, Januar 2003.

Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder in eine von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Form oder Sprache übertragen oder übersetzt werden.

ISSN 0947-7934 / ISBN 3-936278-28-8

SCIENTIFIC AMERICAN

415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111

Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Bradford,

Associate Publishers: William Sherman (Production),

Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach,

President and Chief Executive Officer: Gretchen Teicgraaber,

Vice President: Frances Newburg

Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt.

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)

Stellvertretende Chefredakteure:

Dr. Inge Hofer (Soncerhefte), Dr. Gerhard Trageser

Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Poppe (Online Koordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelfeid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer

Schlussredaktion: Christina Peiberg, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann

Art Direction: Karsten Kramarczyk