

Anmerkungen zu einem neuen Konzept zur Teleportation von Bewegungszuständen

Birgit Bomfleur, ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR,
Camerloherstr. 19, D-85737 Ismaning
www.ScienceUp.de

Was bedeutet eigentlich Teleportation von Quanten-Zuständen? Zunächst sei hier angemerkt, dass nicht die Teilchen selbst "gebeamt" werden, sondern nur bestimmte Eigenschaften der Teilchen. So kann z.B. der Spin-Zustand eines Atoms vollständig auf ein weit entferntes Empfänger-Teilchen übertragen werden.

Sender und Empfänger erhalten je ein Teilchen (Sender- und Empfängerteilchen), die in einem so genannten quantenmechanisch verschränkten Zustand vorliegen. Das bedeutet, diese Teilchen befinden sich in einem kohärenten Überlagerungszustand und besitzen keine Einteilchen-Eigenschaften mehr. Sie werden durch eine gemeinsame Wellenfunktion beschrieben. Eine Manipulation eines dieser Teilchen wirkt sich sofort auf das andere Teilchen aus, auch wenn diese räumlich voneinander getrennt sind (quantenmechanische Fernwirkung). Ein solcher verschränkter Zustand kommt in der klassischen Physik nicht vor.

Dann bringt man den zu teleportierenden, unbekanntem Zustand T mit dem Sender-Teilchen in einen verschränkten Überlagerungszustand und misst diesen. Zum einen verliert der Zustand T dadurch seine Einteilchen-Eigenschaften. Er ist verschwunden. Zum anderen hat die Messung aufgrund der Quantenkorrelation zwischen Sender- und Empfänger-Teilchen einen Einfluss auf das Empfänger-Teilchen. Letzteres ist nun nicht mehr mit dem Sender-Teilchen verschränkt und unter gewissen Umständen hat es die Einteilchen-Eigenschaften des zu teleportierenden Teilchens T angenommen. Die Teleportation war erfolgreich.

Bisher wurden die Experimente zur Teleportation nur mit "internen" Größen, wie der Polarisation von Photonen oder dem Spin von Atomen durchgeführt. In einem kürzlich erschienenen Artikel des Fachblattes Physical Review Letters [T. Opatrny und G. Kurizki, Physical Review Letters, 86, Seite 3180 - 3183, 2001] wurde eine Methode vorgestellt, den Bewegungszustand eines Atoms ("externe" Größen), also Ort und Impuls, zu teleportieren. Dazu benötigen die Autoren drei gleichartige Atome. Zwei Atome (Sender und Empfänger) befinden sich in einem verschränkten Zustand. Dieser wird durch Dissoziation eines zweiatomigen Moleküls bei sehr tiefen Temperaturen präpariert. Ein drittes Atom, dessen Zustand teleportiert werden soll, kollidiert mit dem Sender-Atom. Durch die quantenmechanische Verschränkung kann die ursprüngliche Bewegung des zu teleportierenden Teilchens auf das Empfänger-Atom übertragen werden.

Wohlgemerkt ist dies bisher nur ein theoretisches Konzept, das noch nicht experimentell umgesetzt wurde. Im Folgenden soll die Teleportation etwas genauer diskutiert werden:

Voraussetzungen zum „Beamen“

Eine grundlegende Voraussetzung für das „Beamen“ eines Teilchens ist die genaue Beschreibung aller Eigenschaften des Teilchens. Nach der Heisenbergschen Unschärferelation können wir jedoch nicht gleichzeitig die Ortskoordinate q ($q = x, y$ oder z) und den Impuls p_q eines Teilchens exakt wissen. Das Produkt aus Ortsunschärfe, Δq , und Impulsunschärfe, Δp_q , muss in der Größenordnung des Planckschen Wirkungsquantum h sein:

$$\Delta q \cdot \Delta p_q \geq h/4\pi.$$

Je mehr wir über den Ort des Teilchens erfahren, desto weniger können wir über den Impuls wissen, und umgekehrt.

Um auf klassischem Weg eine Kopie des Teilchens zu erstellen, würden wir versuchen, Ort und Impuls zu übermitteln. Die exakte Bestimmung der einen Größe bedingt aber gleichzeitig unsere Unkenntnis über die andere. Bestimmen wir beide Größe nur „ungefähr“ (so dass $\Delta q \cdot \Delta p_q \geq h/4\pi$ gilt), so können wir bestenfalls eine „unscharfe“ Kopie des Teilchens erstellen.

EPR-Paradoxon

Ein Ausweg aus diesem Dilemma scheint das EPR-Paradoxon zu sein. Dieses Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen (1935) sollte eigentlich die Unvollständigkeit der Quantenphysik darlegen. Nach ihrer Auffassung sollte das Resultat einer Messung an einem Teilchen völlig unabhängig vom Messvorgang bei einem anderen, weit entfernten Teilchen sein.

Das Gedankenexperiment lautet folgendermaßen: Zu einem bestimmten Zeitpunkt werden zwei Teilchen, zum Beispiel zwei Elektronen, an einem Ort erzeugt. Diese Teilchen sind jedoch nicht unabhängig, sondern „verschränkt“, d.h., sie werden zusammen durch dieselbe Wellenfunktion beschrieben und befinden sich in einem Überlagerungszustand. Betrachten wir eine Eigenschaft X (zum Beispiel den Impuls) der Teilchen, welche die Werte a und b annehmen kann. Die Teilchen werden so erzeugt, dass, wenn Teilchen 1 den Wert a besitzt, Teilchen 2 den Wert b annimmt, und umgekehrt. Es ist aber nicht klar, welches beider Teilchen sich in dem Zustand a bzw. b befindet. Der Zustand wird also durch $(|a\rangle_1|b\rangle_2 - |b\rangle_1|a\rangle_2)$ beschrieben (ohne Normierung).

Nach ihrer Erzeugung fliegen die Teilchen in verschiedene Richtungen, sie werden also räumlich getrennt. Wird nun an dem Teilchen 1 die Größe X mit dem Resultat a gemessen, so „entscheidet“ sich Teilchen 2 in diesem Moment, bei einer Messung seiner Größe X den Wert b anzunehmen. Diese instantane „Fernwirkung“ wollten Einstein, Podolski und Rosen jedoch nicht akzeptieren. Nach der Relativitätstheorie kann nichts schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden, was sie zu der Schlussfolgerung bewegte, die Quantentheorie sei unvollständig.

Durchführung des EPR-Experiments

Die beschriebene Fernwirkung zwischen den verschränkten Teilchen konnte jedoch nachgewiesen werden. Mitte der sechziger Jahre schlug Bell ein Experiment zum Nachweis dieser Fernwirkung vor. Das Experiment wurde 1982 von Aspect durchgeführt, welcher statt Elektronen Photonen einsetzte. In einer EPR-Quelle werden aus einem Photon zwei verschränkte Photonen mit größerer Wellenlänge erzeugt, welche sich danach in unterschiedliche Richtungen bewegen. Sie unterscheiden sich dadurch, dass ihre Polarisationsrichtungen (Schwingungsrichtung) zueinander senkrecht stehen. Ein Photon ist horizontal $|h\rangle$ polarisiert, das andere vertikal $|v\rangle$. Man kann jedoch nicht sagen, welches Photon in welche Richtung polarisiert ist. Sie befinden sich in einer Überlagerung, ($|h\rangle_1|v\rangle_2 - |v\rangle_1|h\rangle_2$), welche erst durch die Messung der Polarisation eines Photons aufgehoben wird („Kollaps der Wellenfunktion“). Misst man nun an einem Photon eine bestimmte Schwingungsrichtung, so ist in diesem Moment automatisch die Polarisation des zweiten Photons festgelegt, auch wenn dieses kilometerweit vom ersten entfernt ist.

Vereinfacht kann man sich Folgendes vorstellen. Zwei Personen stecken je eine identische Münze ein und begeben sich an verschiedene Orte. Wenn nun beide gleichzeitig ihre Münze werfen, so erwartet man, dass jede einzelne Münze mit je einer Wahrscheinlichkeit von 50% Kopf oder Zahl anzeigt. Das Ergebnis der einen Münze sollte aber vollkommen unabhängig von dem der zweiten sein. Wenn diese Münzen nun aber verschränkte „Quantenmünzen“ sind in dem Sinne, dass bei einem Wurf eine Münze immer Kopf und die andere Zahl anzeigt, so passiert Folgendes: Wenn beide Münzen geworfen werden, sind die Wahrscheinlichkeiten, Kopf oder Zahl zu erhalten, für beide Münzen 1 : 1. Aufgrund ihrer Verschränkung zeigen sie jedoch immer unterschiedliche Resultate – wenn Münze 1 Kopf liefert, so liefert Münze 2 Zahl, und umgekehrt.

Die nun nachgewiesene Fernwirkung steht jedoch nicht im Widerspruch zur Relativitätstheorie, wenn man beachtet, dass die Korrelation der Teilchen-Eigenschaften schon bei der Erzeugung des verschränkten Teilchenpaares festgelegt wurde. Diese Korrelation bleibt eben auch bestehen, wenn die einzelnen Teilchen voneinander getrennt werden, solange diese nicht in irgendeiner Art gestört wird. Es hat also gar keine Informationsübertragung stattgefunden.

Quanten-Teleportation interner Größen

Die Eigenschaften verschränkter Photonen wurde 1997 von A. Zeilinger und seinen Kollegen (<http://bozon.uibk.ac.at/sfb/>) zur Teleportation der Polarisations-eigenschaft eines Photons (und nicht des Photons selbst) ausgenutzt. Dabei wird der Polarisationszustand eines Photons gemeinsam mit dem eines Photons aus einem verschränkten Photonenpaar gemessen. Der Zustand des Original-Photons wird nicht verschickt, sondern auf das zweite Photon des verschränkten Paares übertragen. Das Original-Photon selber „verschwindet“ dabei.

Sender (Alice) und Empfänger (Bob) erhalten je ein Photon (Photonen 1 und 2) eines verschränkten Photonenpaares, deren Polarisierungen senkrecht zueinander sind (horizontal und vertikal). Alice bringt ihr Photon nun in eine Wechselwirkung mit einem dritten Photon T, welches ebenfalls horizontal oder vertikal polarisiert ist. Führt Alice nun eine Messung der relativen Polarisierungen der Photonen 1 und T durch, so existieren 4 mögliche Ergebnisse (Bell-

Zustände). Im gleichen Moment wird durch die Messung aber Photon 2 beeinflusst, dass stets senkrecht zu 1 polarisiert ist.

Stellt Alice durch ihre Messung fest, dass die Photonen 1 und T sich in dem verschränkten Zustand $|h\rangle_1|v\rangle_T - |v\rangle_1|h\rangle_T$ befinden, so ist T senkrecht zu 1 polarisiert. Da aber 2 senkrecht zu 1 polarisiert ist, ist 2 genauso polarisiert wie das ursprüngliche Photon T. Dessen Polarisationszustand wurde durch die Teleportation ohne Zeitverlust übertragen. Allerdings weiß Bob nichts von der erfolgreichen Teleportation. Diese Information kann Alice nur über einen klassischen Weg (zum Beispiel ein Telefonat) und somit nicht ohne Zeitverzögerung übermitteln.

Durch die Messung von Alice wird das Ausgangsteilchen T zusammen mit dem Sendephoton 1 „vernichtet“, da Alice T und 1 nicht unterscheiden kann. T verliert dadurch seine ursprüngliche Identität und ist nun mit 1 verschränkt. Die Verschränkung von 1 und 2 ist gleichzeitig verloren gegangen. Photon 2 besitzt nun die Einteilchen-Eigenschaft (Polarisation) von T vor der Teleportation. Die Wahrscheinlichkeit, dass 1 und T sich in dem oben angegebenen verschränkten Zustand befinden und somit eine Teleportation erfolgreich war, beträgt 25%.

Erhält Alice eines der anderen drei mögliche Ergebnisse, so kann Bob durch eine einfache Operation Photon 2 in den gleichen Zustand wie T (vor der Teleportation) versetzen. Hierzu muss jedoch Alice Bob ihr Messergebnis „klassisch“ mitteilen, die Teleportation kann also nicht ohne Zeitverzögerung stattfinden.

Konzept zur Quanten-Teleportation externer Größen

Bisher wurden nur interne Observablen wie zum Beispiel die beschriebene Polarisation von Photonen oder der Spinzustand von Atomen übertragen.

Um eine externe Observable wie den translatorischen Quanten-Zustand eines Teilchens über eine Distanz zu teleportieren, muss sowohl die Ortskoordinate als auch der Impuls übermittelt werden.

Neulich wurde ein theoretisches Konzept zur Realisation der Teleportation von Atomen vorgestellt [T. Opatrny und G. Kurizki, Physical Review Letters, 86, Seite 3180 - 3183, 2001]. Dazu benötigt man ein verschränktes Teilchenpaar, welches dem von Einstein, Podolsky und Rosen vorgeschlagenen Zustand (perfekter EPR-Zustand) möglichst genau entspricht, deren Ort und Impuls also perfekt korreliert bzw. verschränkt sind. Dieses soll durch Dissoziation mit Hilfe eines Laser-Pulses von kalten zweiatomigen Molekülen hergestellt werden, die sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit in z-Richtung bewegen.

Ein perfekter EPR-Zustand der Teilchen 1 und 2 zeichnet sich dadurch aus, dass Position und Impuls der beiden Teilchen entlang der x-Achse komplett unbestimmt, also perfekt korreliert (verschränkt) sind: $x_1 = x_2$ und $p_{x1} = -p_{x2}$. Wird der Impuls oder die Position von Teilchen 1 gemessen, so nimmt die entsprechende Variable von Teilchen 2 sofort einen definierten Wert an. Es gilt also $\Delta x_{12} = x_1 - x_2 = 0$ und $\Delta p_x = p_{x1} + p_{x2} = 0$. Inwiefern man einem perfektem EPR-Zustand wirklich nahe kommt, wird also durch die Größen Δx_{12} und Δp_x beschrieben.

Die Teleportation wird durch eine Kollision des zu teleportierenden Teilchens T mit dem Teilchen 1 bewerkstelligt. T bewegt sich dabei in x-Richtung. Folgende Größen werden gemessen und an Teilchen 2 übermittelt:

$$x_{1T} \equiv x_1 - x_T \quad \text{und} \quad p_{1T} \equiv p_{x1} + p_{xT}$$

Da diese Größen kommutieren, können beide mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann Teilchen 2 so manipuliert werden, dass es Impuls und Koordinate von T annimmt:

$$x_2 \rightarrow x_2' = x_2 - x_{1T} \quad \text{und} \quad p_{x2} \rightarrow p_{x2}' = p_{x2} + p_{1T}$$

Durch Einsetzen der EPR-Beziehungen $x_1 = x_2$ und $p_{x1} = -p_{x2}$ lässt sich leicht nachvollziehen, dass Teilchen 2 die Koordinate und den Impuls des Teilchens T (vor der Kollision) angenommen hat:

$$x_2' = x_T \quad p_{x2}' = p_{xT}$$

Neben den oben genannten Größen Δx_{12} und Δp_x spielen jedoch auch die Ungenauigkeiten in den Messungen von x_{1T} und p_{1T} , Δx_{1T} und Δp_{1T} , sowie bei der Verschiebung der x-Koordinate und des Impulses von 2, Δx_{shift} und Δp_{shift} eine Rolle, wie exakt Teilchen 2 die translatorischen Eigenschaften von T annimmt. Fasst man alle Ungenauigkeiten in Δx_T und Δp_T zusammen, so lassen sich die Abweichungen folgendermaßen formulieren

$$x_o' = x_2 \pm \Delta x_T$$

$$p_{x_o}' = p_{x2} \pm \Delta p_T$$

Um die Teleportation durchzuführen, müssen x-Koordinate und Impuls von Teilchen 2 manipuliert werden. Dadurch ist zuvor ein „klassischer“ Anruf nötig. Dies bedeutet, dass die Teleportation nicht ohne Zeitverzögerung stattfindet.

Birgit Bomfleur

© 2001 ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, Alle Rechte vorbehalten. Nichtkommerzieller Nachdruck und Wiedergabe gestattet bei Quellenangabe ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, www.ScienceUp.de.