

■ Teleportation im Doppelpack

Mit einer technischen Meisterleistung ist es gelungen, Spin- und Bahndrehimpuls eines Photons auf ein anderes zu teleportieren.

Auch wenn nicht in jedem Physiker ein Science-Fiction-Fan schlummert, so werden doch die meisten beim Wort Teleportation hellhörig. Die Meinungen über solche Wortschöpfungen im Zusammenhang mit physikalischen Vorgängen mögen auseinandergehen [1], inzwischen gibt es aber praktische Technologien in der Quantenkommunikation, die einst futuristisch anmuteten. So bieten bereits mehrere Hersteller beispielsweise Geräte zur Quantenverschlüsselung an. Und während derzeitige Quantencomputer noch weit von dem entfernt sind, was wir üblicherweise unter einem Computer verstehen, scheinen Giganten wie Google dieses Konzept sehr ernst zu nehmen und investieren viele Millionen in entsprechende Forschung.

Nehmen wir an, es gäbe Quantencomputer, dann stellt sich die Frage, wie diese sich vernetzen las-

sen. Man könnte als ersten Ansatz einfach die Quanteninformation eines Quantencomputers auf die Reise schicken und hoffen, dass sie heil am Ziel ankommt. Auf kurze Distanzen mag das funktionieren, nicht aber über längere, weil wir ein Quantensignal aufgrund des „no-cloning-Theorems“ prinzipiell nicht rauschfrei verstärken können [2]. Aus dieser Patsche hilft uns die Quantenteleportation. Sie erlaubt es, die Information, also den Zustand eines Quantenteilchens, auf ein anderes, möglicherweise weit entferntes zu übertragen, ohne dabei eine Kopie anzufertigen. Dazu muss das ursprüngliche Trägerteilchen die Information verlieren.

Wir gehen wie folgt vor: Zuerst brauchen wir als Hilfsmittel ein verschränktes Photonenpaar (2, 3; **Abb. 1**), wobei eines der beiden Teilchen an der Quelle, das andere am Ziel ist. An der Quelle führen

wir eine gemeinsame Messung am Informationsträger Photon 1 und am verschränkten Photon 2 durch. Diese Bell-Zustandsmessung, kurz: Bell-Messung, projiziert den Zustand der vorher unabhängigen Photonen zufällig in einen der vier (verschränkten) Bell-Zustände. Durch die Verschränkung des Teilchenpaares (2, 3) ist damit automatisch das Teilchen am Zielort in einem Zustand, der schon fast dem Zustand des ursprünglichen Teilchens entspricht. Wir müssen nur noch abhängig vom Messergebnis eine von vier verschiedenen Drehungen ausführen. Letzteres stellt übrigens auch sicher, dass die Quantenteleportation höchstens mit Lichtgeschwindigkeit ablaufen kann – zum Leidwesen aller Science-Fiction-Fans.

Das erste Experiment zur Quantenteleportation wurde 1997 in Innsbruck unter der Beteiligung

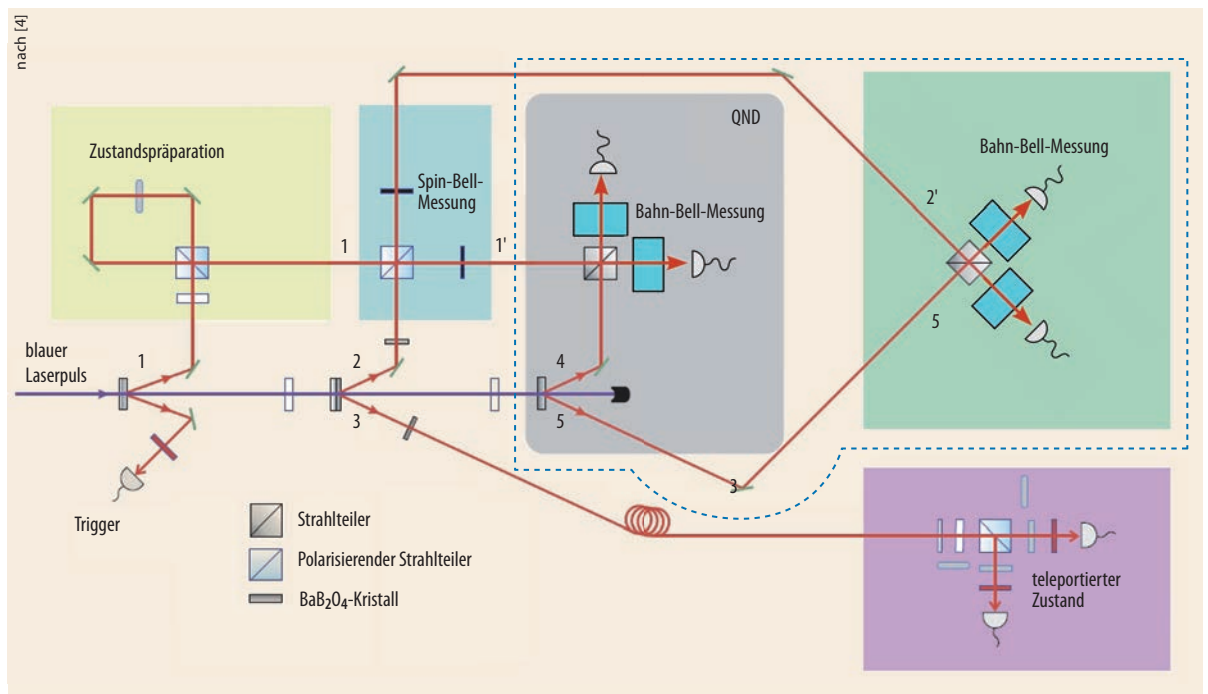


Abb. 1 Die Teleportation mehrerer Freiheitsgrade eines Photons erfordert einen komplexen Aufbau. Drei Photonenpaare werden erzeugt und Photon 1 des ersten Paares in einem beliebigen Zustand präpariert. Das Triggerphoton stellt nur sicher, dass das Experiment richtig initialisiert wurde. Das hyperverschränkte Paar (2, 3) vermittelt die Teleportation der beiden Freiheitsgrade. Die erste Bell-Messung am Spin verläuft herkömmlich. Damit danach die Bell-Messung am Bahndrehim-

puls möglich ist, ist eine zwischengeschaltete zerstörungsfreie Quantenmessung (QND) notwendig. Dabei wird der Bahndrehimpuls eines Photons im Eingang 1' mithilfe des Paares (4, 5) teleportiert, was nur klappt, falls genau ein Photon im Ausgang 1' der Spin-Bell-Messung war. Die Detektion von insgesamt sechs Photonen signalisiert den Erfolg der ganzen Prozedur. Ohne den blau umrahmten Teil entspricht der Aufbau der Teleportation eines Freiheitsgrades.

von Jian-Wei Pan durchgeführt [3], nun hat seine Forschungsgruppe in Heifei (VR China) kräftig draufgelegt [4]. Selbstverständlich gab es seit 1997 viele andere Implementierungen in verschiedensten Systemen. Neu ist jedoch, dass erstmals mehrere Eigenschaften eines Quantenteilchens teleportiert wurden. Das mag zunächst etwas banal klingen, ist es aber bei näherer Betrachtung ganz und gar nicht, und die Lösung stellt sich als technische Meisterleistung heraus.

Konkret betrachteten die Forscher den Spin- und Bahndrehimpuls eines Photons [5]. Auf dem Papier lässt sich das Teleportationsschema sehr leicht auf diese zwei Eigenschaften erweitern, man muss einfach alles doppelt machen. Die Hauptschwierigkeit liegt darin, dass die Bell-Messung mit linearen optischen Methoden nicht einfach zweimal hintereinander möglich ist. Die Messung basiert nämlich auf der sog. Hong-Ou-Mandel-Interferenz zweier Photonen an einem Strahlteiler [6]. Dabei gehen Photonen mit einer antisymmetrischen Ortswellenfunktion – und damit auch einem antisymmetrischen Zustand der übrigen Freiheitsgrade – nach dem Strahlteiler immer getrennte Wege. Um zu überprüfen, ob sie das auch tatsächlich tun, muss man die Photonen in den beiden Ausgängen des Strahlteilers nachweisen. Weil die Forscher hier die Photonen noch für die zweite Bell-Messung brauchen, muss das geschehen, ohne diese zu absorbieren – durch eine zerstörungsfreie Quantenmessung (Quantum Non-Demolition, QND).

Leider gibt es so einen speziellen Detektor nicht im Fachhandel. Daher wandte die Pan-Gruppe eine der beliebtesten Techniken der Quanteninformationsverarbeitung mit Photonen an: Sie baute eine probabilistische Version des Ganzen, da eine Apparatur, die nur manchmal, dann aber richtig funktioniert, besser ist als ständig schlechte Performance. Und was braucht man dazu noch als Zutat? Quantenteleportation! Tatsächlich haben Wang et al. in ihrem Experiment noch eine kleine Unterteilungseinheit, welche

die zerstörungsfreie Quantenmessung realisiert. Dazu überträgt sie die Eigenschaften des Photons bei 1' auf das Photon 5 und stellt dabei fest, dass tatsächlich genau ein Photon in Eingang 1' der Bell-Messung für den Bahndrehimpuls war (Abb. 1).

Insgesamt haben die Forscher also zunächst drei Photonenpaare erzeugt. Das zu teleportierende Photon 1 aus dem ersten Paar lässt sich in den genannten zwei Freiheitsgraden beliebig präparieren. Das zweite Paar (2, 3) ist wie im herkömmlichen Fall der Teleportationsvermittler, und dafür – was bislang verschwiegen wurde – „hyperverschränkt“ in Spin- und Bahndrehimpuls. Das dritte Paar (4, 5) schließlich dient der (Unter-) Teleportation des Bahndrehimpulses zur Realisierung der zerstörungsfreien Quantenmessung im Rahmen der Bell-Messung des Spins. Bei genauerer Betrachtung des Aufbaus fällt auf, dass nur ein Ausgang dieser Bell-Messung überprüft wird. Für die andere Seite kann das entfallen, weil die Zahl der Photonen ja erhalten ist. Wenn genau eines herauskommt, muss das andere im zweiten Ausgang sein.

Mit der Bell-Messung des Bahndrehimpulses ist die Teleportation

abgeschlossen. Die eigentlich notwendigen Drehungen von Photon 3 werden nicht durchgeführt, dies setzt lediglich die Effizienz der Quantenteleportation herab, ohne weitere Einschränkungen. Bleibt noch in einer abschließenden Messung an Photon 3 zu überprüfen, ob die Teleportation erfolgreich war, und die schönen Ergebnisse geben den Forschern recht.

Abschließend liegt die Frage nahe, ob sich diese Prozedur auf noch mehr Freiheitsgrade erweitern lässt. Die Antwort ist zumindest theoretisch ja, die Forscher schlagen sogar ein explizites Schema vor. Man muss aber kein Experte sein, um zu sehen, dass noch größere Experimente dieser Art sehr bald unbeherrschbar werden. Schon bei diesem wage ich zu sagen, dass das niemand anderer wirklich nachbauen kann.

Gregor Weihs

- [1] H. G. Hümmler, *Physik Journal*, April 2015, S. 3
- [2] W. K. Wootters und W. H. Zurek, *Nature* **299**, 802 (1982)
- [3] D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter und A. Zeilinger, *Nature* **390**, 575 (1997)
- [4] X.-L. Wang et al., *Nature* **518**, 516 (2015)
- [5] M. Ritsch-Marte, *Physik Journal*, Januar 2015, S. 31
- [6] C. K. Hong, Z. Y. Ou und L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2044 (1987)

KURZGEFASST

■ 3000 auf einen Streich

Einem Team am MIT ist es gelungen, fast 3000 kalte Rubidium-87-Atome in einem optischen Resonator zu verschränken. Dazu hat ein einzelnes polarisiertes Photon ausgereicht, das im Resonator mit den Spins der Atome wechselwirkt. Quantenmechanisch verschränkte Zustände von vielen Atomen sind vielversprechend für Quanteninformation oder -metrologie.
R. McConnell et al., *Nature* **519**, 439 (2015)

■ Massendifferenz präzise berechnet

Die Massen von Neutron und Proton unterscheiden sich zwar nur um 1,4 Promille (939,56 bzw. 938,27 MeV/c²), aber dieser Unterschied ist entscheidend für die Stabilität von Atomkernen und damit für das Universum, wie wir es kennen. Zu dem Unterschied tragen verschiedene Effekte der Quantenelektrodynamik und -chromodynamik bei. Dies haben umfangreiche Gitterrechnungen

gezeigt, die u. a. auf dem Supercomputer JUQUEEN am Forschungszentrum Jülich durchgeführt wurden. Die neuen Simulationsmethoden könnten dazu beitragen, das Standardmodell der Teilchenphysik präziser zu testen.
Sz. Borsanyi et al., *Science* **347**, 1452 (2015)

■ Supraleiter mit Mangan

Unkonventionelle Supraleiter zeichnen sich dadurch aus, dass im Phasendiagramm neben Supraleitung auch eine andere elektronische Ordnung wie Magnetismus auftritt. Ein chinesisches Team hat nun erstmals Supraleitung in einer Mangan-haltigen Verbindung gefunden, indem es die magnetische Ordnung in MnP mit einem Druck von rund 8 GPa unterdrückte. Mangan war das letzte Element mit 3d-Elektronen, für das keine supraleitenden Verbindungen bekannt waren.
J.-G. Cheng et al., *Phys. Rev. Lett.* **114**, 117001 (2015)

Prof. Dr. Gregor Weihs, Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, Technikerstraße 25d, 6020 Innsbruck, Österreich