

# Einsteins Konzept der «lokalen Kausalität» widerlegt

**ETH-Forschenden gelang der Nachweis, dass weit entfernte, quantenmechanische Objekte viel stärker miteinander korreliert sein können als dies bei klassischen Systemen möglich ist. Für dieses Experiment nutzten sie erstmals supraleitende Schaltkreise.**

Eine Forschergruppe um Andreas Wallraff, ETH-Professor für Festkörperphysik, hat mit einem sogenannten schlupflochfreien Bell-Test das Konzept der «lokalen Kausalität» widerlegt, das von Albert Einstein als Antwort auf die Quantenmechanik formuliert wurde. Die Forscher konnten damit nachweisen, dass weit entfernte, quantenmechanische Objekte viel stärker miteinander korreliert sein können, als dies bei klassischen Systemen möglich ist. Das Besondere daran: Den Zürcher Forschenden gelang dieses Experiment zum ersten Mal mit supraleitenden Schaltkreisen. Diese gelten als heisse Kandidaten für den Bau von leistungsfähigen Quantencomputern.

## Ein alter Streit

Ein Bell-Test basiert auf einer Versuchsanordnung, die vom britischen Physiker John Bell in den 1960er-Jahren erdacht wurde (s. Artikel auf S. 6 und S. 11). Bell wollte damit eine Frage klären, über die bereits in den 1930er-Jahren die damaligen Grössen der Physik gestritten haben: Stimmen die Voraussagen der Quantenmechanik, die der Alltagsintuition zuwider laufen, oder gelten im atomaren Mikrokosmos ebenfalls die klassischen Vorstellungen von Kausalität, wovon Albert Einstein überzeugt war? Bell schlug vor, an zwei verschränkten Teilchen gleichzeitig eine zufällige Messung durchzuführen und diese anhand der Bell'schen Ungleichung zu überprüfen. Stimmt Einsteins Konzept der lokalen Kausalität, dann wird die Bell'sche Ungleichung bei diesen Experimenten immer erfüllt. Im Gegensatz dazu sagt die Quantenmechanik voraus, dass die Ungleichung verletzt wird.

Anfang der 1970er-Jahre konnten John Francis Clauser, der letztes Jahr mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde, und Stuart Freedman erstmals konkret mit einem Experiment zeigen, dass die Bell'sche Ungleichung verletzt wird. Allerdings

mussten Clauser und Freedman bei ihren Experimenten gewisse Annahmen machen, damit sie die Versuche überhaupt durchführen konnten. Es hätte theoretisch also immer noch sein können, dass Einstein mit seiner Skepsis richtig lag. Im Laufe der Zeit konnten dann immer mehr dieser sogenannten Schlupflöcher geschlossen werden, bis es schliesslich 2015 gelang, die ersten wirklich schlupflochfreien Bell-Tests durchzuführen.

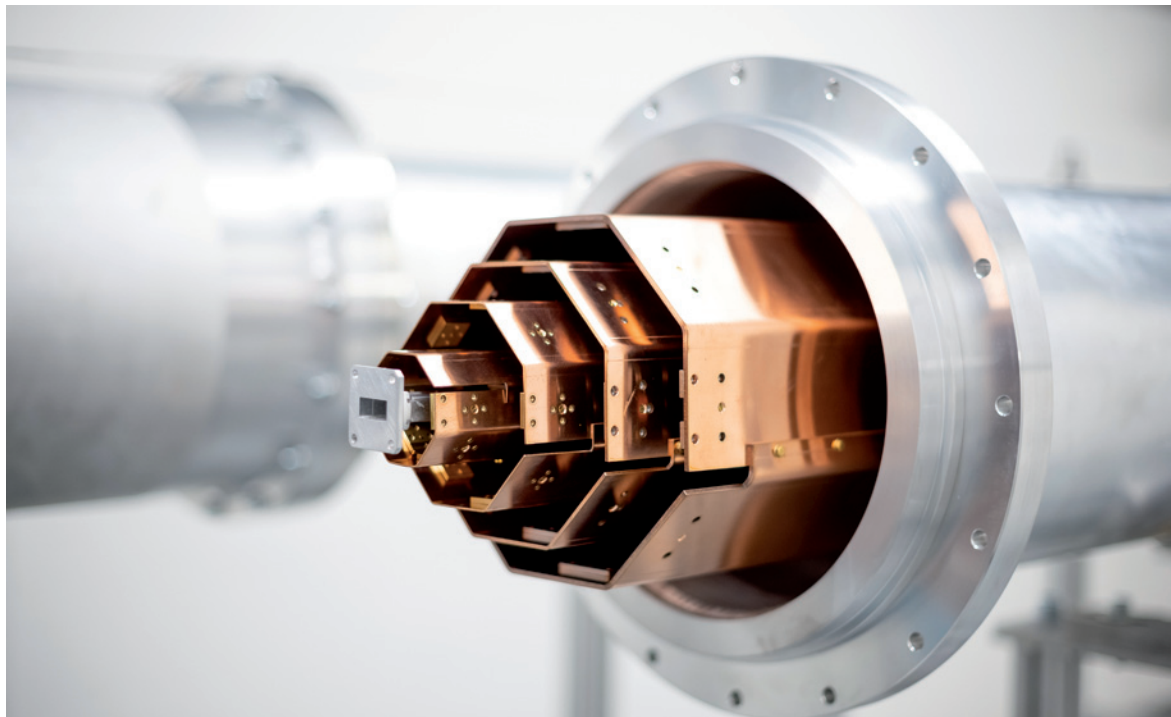
## Vielversprechende Anwendungen

Wallraffs Gruppe kann diese Ergebnisse nun bestätigen. Die in der renommierten Fachzeitschrift «Nature» veröffentlichte Arbeit zeigt, dass das Thema trotz der Bestätigung vor sieben Jahren nach wie vor aktuell ist. Zum einen bestätigt das Experiment der ETH-Forscher, dass supraleitende Schaltkreise ebenfalls nach den Gesetzen der Quantenmechanik funktionieren, obwohl sie im Vergleich zu mikroskopischen Quantenobjekten wie Photonen oder Ionen eine beachtliche Grösse haben.

Zum anderen haben Bell-Tests auch eine praktische Bedeutung. Mit abgeänderten Bell-Tests kann man beispielsweise in der Kryptographie demonstrieren, dass Informationen tatsächlich verschlüsselt übermittelt werden (vgl. dazu Abschnitt auf S. 13).

## Die Suche nach dem Kompromiss

Für ihre Experimente benötigen die Forscher eine aufwändige Versuchsanlage. Damit der Bell-Test tatsächlich schlupflochfrei ist, müssen die Forschenden nämlich sicherstellen, dass vor dem Abschluss der Quantenmessungen keinerlei Informationen zwischen den beiden verschränkten Schaltkreisen ausgetauscht werden können. Da Informationen höchstens mit Lichtgeschwindigkeit übermittelt werden können, muss die Messung deshalb weniger Zeit benötigen als ein Lichtteilchen braucht, um von einem Schaltkreis zum anderen zu gelangen. Es gilt also, einen Kompromiss zu finden: Je grösser die Distanz zwischen den beiden supraleitenden Schaltkreisen, desto mehr Zeit steht für die Messung zur Verfügung – und desto aufwändiger wird die Versuchsanordnung, muss doch das Experiment im Vakuum nahe dem absoluten Nullpunkt durchgeführt werden.



Einblick ins Innere eines Abschnitts der 30 Meter langen Quantenverbindung. Ein Aluminium-Wellenleiter (Mitte), der bis fast zum absoluten Nullpunkt gekühlt ist, verbindet die beiden Quanten-Schaltungen. Mehrere Schichten Kupferschilder schirmen den Leiter vor thermischer Strahlung ab. (Bild: ETH Zürich / D. Winkler)

Die kürzeste Distanz zur erfolgreichen Durchführung eines schlupflochfeien Bell-Tests beträgt etwa 33 Meter: Ein Lichtteilchen benötigt im Vakuum rund 110 Nanosekunden, um diese Distanz zu überwinden – ein paar Nanosekunden mehr, als die Forscher für die Durchführung des Experiments benötigen.

### 30 Meter Vakuum

Wallraffs Team hat in einem Keller auf dem ETH-Campus eine eindruckliche Anlage aufgebaut. An beiden Enden steht ein Kryostat, in dem sich ein supraleitender Schaltkreis befindet. Die beiden Kühlapparaturen sind über eine 30 Meter lange Röhre miteinander verbunden, deren Innerstes auf eine Temperatur knapp über dem absoluten Nullpunkt (–273,15 Grad Celsius) abgekühlt wurde.

Vor Beginn jeder Messung wird von einem der beiden supraleitenden Schaltkreise ein Mikrowellen-Photon zum anderen übermittelt, so dass die beiden Schaltkreise fortan verschränkt sind. Zufallsgeneratoren entscheiden dann, welche Messungen an den beiden Schaltkreisen im Rahmen des Bell-Tests durchgeführt werden. In einem nächsten Schritt werden die Messergebnisse auf beiden Seiten miteinander verglichen.

### Grossräumige Verschränkung

Die Auswertung von mehr als einer Million Messungen zeigt, dass die Bell'sche Ungleichung mit einer sehr hohen statistischen Sicherheit verletzt wird. Damit bestätigt sich: Die Quantenmechanik lässt auch bei makroskopischen elektrischen Schaltungen nicht-lokale Korrelationen zu und supraleitende Schaltkreise lassen sich auch über eine grosse Distanz miteinander verschränken. Das eröffnet interessante Anwendungsmöglichkeiten im Bereich verteiltes Quantencomputing und Quantenkryptographie.

Für den Bau und Test der Anlage benötigten die Forscher über sechs Jahre und der Aufwand, um die gesamte Versuchsanordnung auf eine Temperatur nahe beim absoluten Nullpunkt zu kühlen, war beträchtlich. Doch im Prinzip, so ist Wallraff überzeugt, könnte man auf gleiche Weise auch Anlagen bauen, die noch grössere Distanzen überwinden. Das wäre zum Beispiel interessant, um weit voneinander entfernte Quantencomputer zu verbinden.

Felix Würsten

Literatur

Storz S. et.al. 2023. Loophole-free Bell inequality violation with superconducting circuits. *Nature* 617, 265–270. doi: 10.1038/s41586-023-05885-0