

Keine Ausreden mehr!

Drei Experimente schließen durch Verletzung der Bellschen Ungleichungen lokal-realistische Modelle aus.

Wenn zwei Verdächtige bei einem Verhör dieselbe Geschichte erzählen, kann es dafür verschiedene Gründe geben. Der eine kann von der Version des anderen erfahren haben und seine Darstellung des Geschehens danach ausgerichtet haben. Oder es gibt eine gemeinsame Ursache für die Übereinstimmung: Im besten Fall erzählen beide nichts als die Wahrheit; sie können sich aber auch im Vorhinein abgesprochen haben. Finden die Verhöre gleichzeitig an verschiedenen Orten statt, liegt eine gemeinsame Ursache nahe.

Das illustriert, wie natürlich es ist, bei Korrelationen eine gemeinsame Ursache anzunehmen. Das ist auch als Reichenbach-Prinzip bekannt. Gilt dieses Prinzip auch in der Physik? In der Quantenmechanik kann es starke Korrelationen zwischen weit entfernten Teilchen geben, falls sie miteinander verschränkt sind. Möchte man diese durch gemeinsame Ursachen erklären, stößt man auf das Problem, dass dies nicht im Formalismus der Quantenmechanik vorgesehen ist. Muss sie also durch zusätzliche Parameter vervollständigt werden, die die Messresultate im Voraus festlegen? Oder muss man akzeptieren, dass es in der Quantenmechanik so etwas wie eine „spukhafte“ Fernwirkung gibt? Das ist einer der Punkte beim Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen [1]. Sie waren der Meinung, dass der Formalismus der Quantenmechanik durch eine vollständigere Beschreibung ersetzt werden soll.

Vor etwas mehr als fünfzig Jahren hat der irische Physiker John Bell jedoch gezeigt, dass eine solche Komplettierung nicht ohne Weiteres möglich ist [2]. Er betrachtete dabei eine beliebige physikalische Theorie, die folgende Bedingungen erfüllt: Physikalische Effekte breiten sich nicht instantan im Raum aus (Lokalität), physikalische Eigenschaften sind unabhängig von einer Messung und liegen bereits davor fest (Realismus), und ein Experi-



Der irische Physiker John Bell, hier im Jahr 1982 am CERN, zeigte 1964 mathematisch, dass sich die Quantenmechanik

nicht auf eine lokal-realistische Theorie zurückführen lässt, wie es sich beispielsweise Albert Einstein erhofft hatte.

mentator kann frei wählen, welche Messungen er an einem System durchführt. Solche Theorien heißen lokal-realistisch.

Nun wird die Situation betrachtet, bei der zwei Parteien, meist Alice und Bob genannt, Messungen an zwei Teilchen durchführen. Beide haben je zwei Messungen A_1 , A_2 und B_1 , B_2 mit den Resultaten $+1$ oder -1 zur Verfügung. Dann gilt unter den obigen Annahmen die Bellsche Ungleichung

$$\langle B \rangle = \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle \leq 2,$$

die in der Quantenmechanik mit $\langle B \rangle = 2\sqrt{2}$ verletzt werden kann. Deshalb ist in der Quantenmechanik mindestens eine der obigen Annahmen nicht erfüllt.

Wie lässt sich diese Ungleichung experimentell überprüfen? Bisher hat es verschiedene Versuche mit polarisierten Photonen und in Fallen gefangenen Ionen oder neutralen Atome gegeben. Dabei ließ sich eine Verletzung beobachten, aber noch nicht so, dass alle Anhänger des lokalen Realismus ihre Überzeugungen aufgeben mussten. Dabei gibt es im Wesentlichen zwei Schlupflöcher [3]: Zum einen sind in einigen Experimenten die Messungen von Alice und Bob nicht raumartig im Sinne der Relativi-

tätstheorie getrennt. Damit ist es im Prinzip möglich, dass Alice von Bobs Wahl der Messung erfährt und ihr Messergebnis von Bobs Wahl abhängt. Ein anderes Schlupflöcher bilden die Detektoren, die nur einen Bruchteil aller Teilchen nachweisen. Dann muss man annehmen, dass die nicht detektierten Teilchen sich genauso verhalten wie die detektierten. Natürlich sind solche Zusatzannahmen im Rahmen der Quantenmechanik begründbar. Allerdings ist das Ziel eines Bell-Experiments nicht, die Quantenmechanik zu bestätigen, sondern die Klasse aller lokal-realistischen Theorien auszuschließen. Deshalb ist das Schließen aller Schlupflöcher wichtig. In drei aktuellen Experimenten ist das nun gelungen.

Das erste Experiment haben Bas Hensen und Kollegen an der TU Delft durchgeführt [4]. Dabei kamen Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NV-Zentren) in Diamant als Quantensystem zum Einsatz, die sich effektiv wie ein quantenmechanisches Spin-1-System verhalten. Die Energieniveaus $m_s = -1 = |\downarrow\rangle$ und $m_s = 0 = |\uparrow\rangle$ dienen als Quantenbits. Im Experiment waren Alice und Bob 1280 Meter voneinander entfernt und besaßen beide einen Diamantkristall mit NV-Zentrum.

Um die Verschränkung zwischen beiden Parteien herzustellen, be-

nutzen die Forscher einen Trick (Abb. 1). Zuerst wurde der Quantenzustand eines NV-Zentrums mit einem auslaufenden Photon verschränkt. Die beiden Photonen von Alice und Bob wurden zu einem Strahlteiler und Detektoren in der Mitte geschickt. Wenn beide Detektoren nach dem Strahlteiler ein Photon nachweisen, heißt das, dass die beiden NV-Zentren in einem verschränkten Zustand sind. Natürlich ist dieser Prozess nur probabilistisch (im Experiment wurde etwa ein verschränktes Paar pro Stunde erzeugt), er hat aber den Vorteil, dass man nur die Fälle betrachten muss, in denen man durch das Detektorsignal in der Mitte mit Sicherheit weiß, dass Verschränkung produziert wurde.

An den erzeugten Zuständen wurden die Messungen zufällig durchgeführt. Wichtig ist dabei, dass die Wahl der Messung und das Auslesen der Spinzustände durch Fluoreszenz sehr schnell durchführbar ist, damit die Parteien raumartig getrennt sind. Im Experiment gelang es, 245 verschränkte Zustände über einen Zeitraum von 220 Stunden zu beobachten und eine Verletzung $\langle B \rangle$ von $2,42 \pm 0,20$ zu finden.

Wegen der geringen Datenbasis ist eine genaue statistische Analyse nötig. Da sich nicht von der Gültigkeit der Quantenmechanik ausgehen lässt, dürfen dabei nicht viele Annahmen einfließen. So können im Prinzip die Messresultate von vorherigen Messungen abhängen oder die Messrichtungen nicht gleichverteilt gewählt worden sein. Selbst unter Einbeziehung dieser Möglichkeiten konnten die Autoren zeigen, dass unter der Annahme der Hypothese eines lokal-realistischen Modells die Wahrscheinlichkeit der beobachteten Daten durch einen so genannten p -Wert von 0,039 beschränkt ist.^{+) Dies macht eine solche Erklärung unwahrscheinlich, es muss aber betont werden, dass viele Experimente in der Physik eine höhere Signifikanz aufweisen. Bei der geringen Datenmenge können leicht statistische Fluktuationen auftreten. Zum Beispiel sollte aufgrund der raumzeitlichen Tren-}

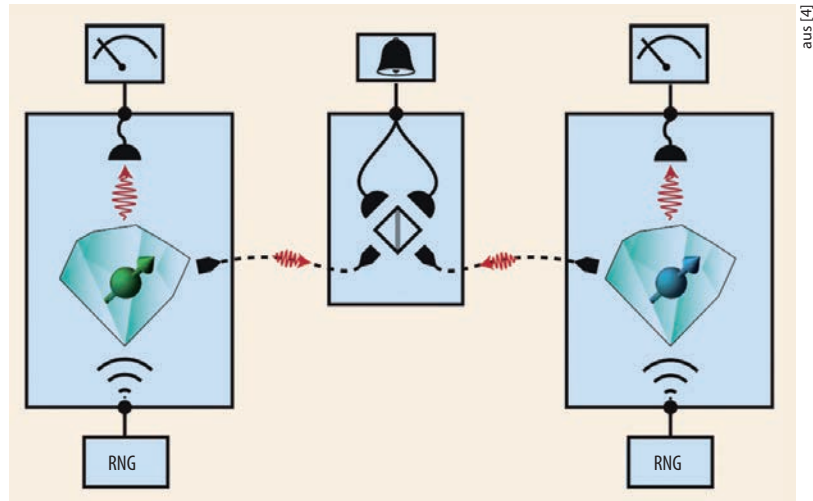


Abb. 1 Das Experiment an der TU Delft nutzt Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamant, die bei Alice und Bob (links und rechts) mit Photonen verschränkt

werden. Die Wahl der Messrichtungen bei Alice und Bob unabhängig voneinander sein. Der p -Wert für diese Hypothese ist jedoch etwas kleiner als derjenige für die Annahme eines lokal-realistischen Modells [5]. Das zeigt, dass hier noch weitere Daten zu einer klaren Aussage nötig sind.

Zwei andere Experimente haben jedoch praktisch gleichzeitig eine signifikante Verletzung der Bellschen Ungleichung nachgewiesen. Beide Experimente benutzten verschränkte polarisierte Photonenpaare, die von einer Quelle in der Mitte zu den beiden Parteien gesandt wurden. Im Experiment des Teams um Marissa Giustina von der Universität Wien waren Alice und Bob 58 Meter voneinander entfernt [6]. Im zweiten Experiment von Lynden K. Shalm und Mitarbeitern aus Boulder (Colorado) waren die Parteien 184 Meter voneinander entfernt [7]. Bei Experimenten mit Photonen kann man eine hohe Rate an verschränkten Teilchen erzeugen, die sich schnell verteilen lassen und bei denen die Messung schnell geschieht. Insofern ist das Lokalitätsschlupfloch leicht zu schließen. Allerdings sind die Detektoren nicht perfekt und weisen nur einen Teil der Teilchen nach. In den Experimenten kamen neuartige auf supraleitenden Nanodrähten basierende Detektoren zum Einsatz, die rund 75 Prozent der einfallenden Photonen messen konnten. Die Bellsche Ungleichung wurde in

werden. Die Photonen werden zu einem Strahlteiler (Mitte) geschickt. Zufallszahlengeneratoren (RNG) bestimmen die Messung der Spins.

einer modifizierten Form gemessen: Ein Resultat „+1“ heißt, dass Teilchen passender Polarisation nachgewiesen wurden und „-1“ bedeutet, dass die Teilchen entweder orthogonal polarisiert waren oder der Detektor nichts nachgewiesen hat. Aufgrund der hohen Zählrate waren in diesen Experimenten die Resultate signifikant, und eine lokal-realistische Beschreibung lässt sich mit p -Werten von $2,3 \times 10^{-7}$ (Boulder) oder $3,74 \times 10^{-31}$ (Wien) ausschließen.

Die neuen Experimente verwenden nicht nur endgültig lokal-realistische Auffassungen von der Natur. Die Technik lässt sich auch zur Erzeugung von Zufallszahlen oder zur Quantenkryptographie verwenden. Zudem gibt es viele Ideen, um NV-Zentren und Photonen für Präzisionsmessungen, z. B. von Magnetfeldern, zu nutzen. Die Experimente belegen eindrucksvoll, welche genaue Kontrolle dieser Quantensysteme mittlerweile möglich ist.

Otfried Gühne

- [1] A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935)
- [2] J. S. Bell, Physics **1**, 195 (1964), J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony und R. A. Holt, Phys. Rev. Lett. **23**, 880 (1969)
- [3] J.-Å. Larsson, J. Phys. A: Math. Theor. **47**, 424003 (2014)
- [4] B. Hensen et al., Nature **526**, 682 (2015)
- [5] J.-Å. Larsson, private Mitteilung
- [6] M. Giustina et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 250401 (2015)
- [7] L. K. Shalm et al. Phys. Rev. Lett. **115**, 250402 (2015)

+) Ein p -Wert von 0,04 bedeutet, dass es bei 25-maliger Wiederholung des Experiments nicht überraschend ist, eine solche Verletzung zu finden, auch wenn die Welt durch ein lokal-realistisches Modell erklärt wird. Je kleiner der p -Wert ausfällt, umso weniger wahrscheinlich wird das.