Quantenverschränkung

GRUNDLAGEN · DAS SELTSAMSTE PHÄNOMEN DER QUANTENPHYSIK

Albert Einstein hatte für sie eine Formulierung, die bis heute zitiert wird: „spukhafte Fernwirkung“. So schrieb er es 1947 in einem Brief an Max Born [1], und er meinte es nicht als Kompliment. Für ihn war die Quantenverschränkung ein Zeichen, dass mit der Quantenmechanik etwas nicht stimmt. Inzwischen ist sie einer der am besten geprüften Effekte der Physik, Grundlage einer neuen Technologie und Gegenstand des Physik-Nobelpreises 2022 [2]. Was ist da los?

Zwei Teilchen, ein Zustand

Normalerweise beschreibt man zwei Teilchen getrennt: Dieses hat jenen Spin, jenes hat diesen Spin. Bei verschränkten Teilchen geht das nicht mehr. Sie haben nur noch einen gemeinsamen Zustand, und die Einzelteile für sich genommen sind unbestimmt. Ein typisches Beispiel sind zwei Photonen, deren Polarisationen garantiert gleich sind, obwohl keine der beiden vor der Messung eine bestimmte Polarisation hat.

Misst man nun das eine Photon, kommt zufällig waagrecht oder senkrecht heraus. Misst man danach das andere in derselben Richtung, kommt mit Sicherheit dasselbe heraus, egal ob es einen Meter oder tausend Kilometer entfernt ist. Erwin Schrödinger, der dem Phänomen 1935 den Namen Verschränkung gab [3], nannte es im selben Jahr nicht einen, sondern den charakteristischen Zug der Quantenmechanik [4].

Einsteins Einwand

Im selben Jahr hatten Einstein und seine jungen Kollegen Boris Podolsky und Nathan Rosen genau diese Situation benutzt, um die Quantenmechanik anzugreifen [5]. Ihr Argument, nach den Anfangsbuchstaben EPR genannt, war bestechend. Wenn ich durch eine Messung hier sicher vorhersagen kann, was dort herauskommt, ohne dort irgendetwas zu stören, dann muss das Ergebnis dort schon vorher festgelegen haben. Die Quantenmechanik beschreibt es aber als unbestimmt. Also, so Einstein, ist sie unvollständig. Es muss zusätzliche, verborgene Eigenschaften geben, die das Ergebnis von Anfang an festlegen.

Das klingt nach gesundem Menschenverstand, und es passt zu dem Bild, das man oft liest: zwei Handschuhe in zwei Schachteln. Öffne ich meine und finde den linken, weiß ich, dass in der anderen der rechte liegt, und zwar schon die ganze Zeit. Nichts Spukhaftes daran. Fast dreißig Jahre lang hielten die meisten Physiker das für eine philosophische Frage, die sich nicht entscheiden lässt.

Bells Idee: Man kann es messen

1964 zeigte der nordirische Physiker John Bell, der am CERN eigentlich Teilchenphysik betrieb, dass man die Frage doch entscheiden kann [6]. Der Trick: Man misst nicht immer in derselben Richtung, sondern wählt auf beiden Seiten zufällig zwischen verschiedenen Messrichtungen. Wenn die Ergebnisse von Anfang an in den Teilchen festgelegt wären wie bei den Handschuhen, dann dürften die Übereinstimmungen über alle Kombinationen hinweg eine bestimmte Grenze nicht überschreiten. Die Quantenmechanik sagt voraus, dass sie es doch tun.

Man kann sich das als Spiel vorstellen. Zwei Mitspieler sitzen in getrennten Räumen und bekommen jeweils zufällig eine von zwei Fragen gestellt, auf die sie mit Ja oder Nein antworten. Sie gewinnen, wenn ihre Antworten nach einer festen Regel zueinander passen. Absprechen dürfen sie sich nur vorher, nicht während des Spiels. Mit jeder denkbaren Strategie gewinnen sie höchstens in 75 Prozent der Fälle. Teilen sie sich aber vorher ein verschränktes Teilchenpaar und richten ihre Antworten nach Messungen daran, kommen sie auf gut 85 Prozent. Kein Handschuh, kein vorher vereinbarter Zettel, keine geheime Absprache schafft das.

In der Form, die John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony und Richard Holt 1969 dafür angegeben haben, lautet die Grenze [7]:

$$S = \left| E(a,b) - E(a,\mathrm{b}') + E(\mathrm{a}',b) + E(\mathrm{a}',\mathrm{b}') \right| \leq 2 \qquad (1)$$

Dabei sind a, a' die beiden möglichen Messrichtungen auf der einen Seite, b, b' die auf der anderen, und E misst, wie stark die Ergebnisse jeweils übereinstimmen. Jede Theorie mit vorab festgelegten, lokalen Eigenschaften muss $S \leq 2$ einhalten. Die Quantenmechanik erlaubt bis zu $2\sqrt{2}$, also etwa 2,83, und mehr geht auch in der Quantenwelt nicht, wie Boris Tsirelson 1980 bewiesen hat [8].

Die Experimente

John Clauser und Stuart Freedman in Berkeley machten 1972 den ersten Test mit verschränkten Photonen aus Kalziumatomen. Die Bellsche Grenze wurde verletzt, genau wie die Quantenmechanik es verlangt [9]. Alain Aspect und seine Kollegen in Orsay verbesserten den Aufbau Anfang der 1980er-Jahre erheblich und maßen 1982 einen Wert von $S = 2{,}697$, fast genau die quantenmechanische Vorhersage für ihren Aufbau und weit über der Grenze von 2 [10].

Skeptiker fanden trotzdem Schlupflöcher. Vielleicht wurden nicht alle Photonen gezählt, und die übersehenen hätten das Ergebnis verändert. Vielleicht konnten die beiden Messstationen sich doch irgendwie verständigen, weil sie zu nah beieinander lagen. 2015 schloss eine Gruppe in Delft beide Lücken gleichzeitig, mit Elektronenspins in zwei Labors,

die 1,3 Kilometer voneinander entfernt waren. Ergebnis: $S = 2{,}42$, mit einer Unsicherheit von 0,20 klar über der Grenze [11] (Abb. 1).

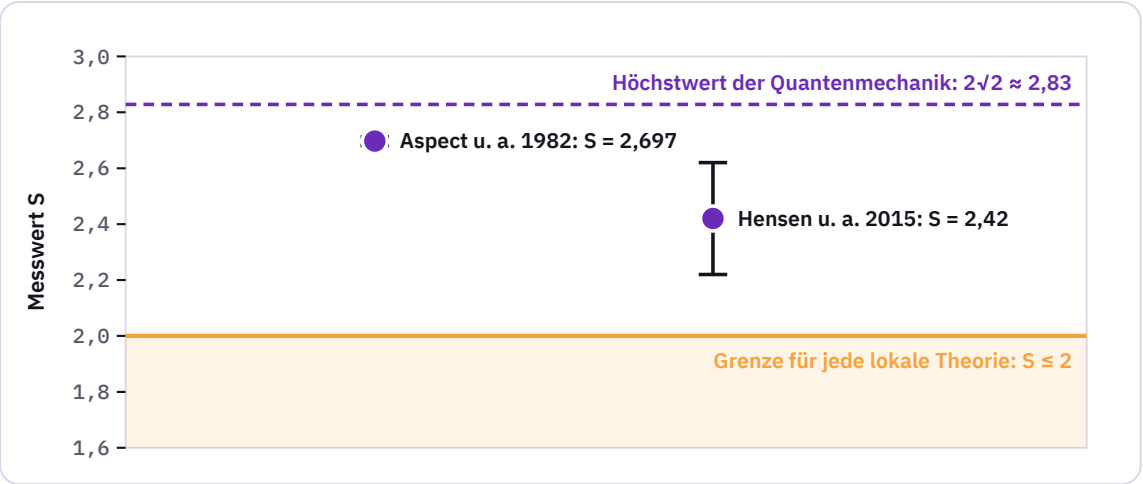


Abb. 1: Zwei Messungen der Größe S aus Gleichung (1). Beide liegen über der Grenze, die jede Theorie mit vorab festgelegten Eigenschaften einhalten müsste. Eigene Darstellung nach [10], [11], [8].

Eine letzte Lücke ist grundsätzlicher Art: Was, wenn die Zufallsgeneratoren, die die Messrichtungen auswählen, gar nicht zufällig sind, sondern irgendwie mit den Teilchen zusammenhängen? 2018 ließ man deshalb Menschen entscheiden. Beim BIG Bell Test erzeugten rund 100 000 Freiwillige aus aller Welt über ein Onlinespiel Ketten von Nullen und Einsen, mit denen zwölf Labore auf fünf Kontinenten ihre Messrichtungen festlegten. Auch mit menschlichem Zufall war die Bellsche Grenze verletzt [12].

Was Verschränkung nicht ist

Bedeutet das, dass sich die Teilchen über tausend Kilometer hinweg augenblicklich Nachrichten schicken? Nein, und das ist der Punkt, an dem viele populäre Darstellungen danebenliegen. Wer an seinem Teilchen misst, bekommt ein zufälliges Ergebnis und kann nicht beeinflussen, welches. Die Übereinstimmung mit der anderen Seite zeigt sich erst, wenn man die Ergebnislisten vergleicht, und dafür braucht es einen gewöhnlichen Übertragungsweg. Signale schneller als das Licht gibt es also nicht, die Relativitätstheorie bleibt unangetastet.

Was die Experimente zeigen, ist subtiler: Die Welt lässt sich nicht so beschreiben, als hätten die Teilchen ihre Messwerte von Anfang an in der Tasche und als würde nur in der Nähe Einfluss genommen. Wie man das deuten soll, ist nach wie vor umstritten. Manche sprechen von Nichtlokalität, andere davon, dass Messwerte vor der Messung schlicht nicht existieren. Einen Überblick über die Deutungen gibt unsere Seite Quantenphilosophie.

Verschränkung als Werkzeug

Aus dem philosophischen Streit ist eine Technologie geworden. 2017 verteilte der chinesische Satellit Micius verschränkte Photonenpaare an zwei Bodenstationen, die 1200 Kilometer auseinanderlagen, und die Bellsche Ungleichung war auch über diese Entfernung verletzt [13]. Verschränkte Paare sind die Grundlage für Quantenteleportation und für eine Form der Quantenkryptographie, bei der man die Sicherheit mit einem Bell-Test überprüfen kann. Und in jedem Quantencomputer ist Verschränkung zwischen den Qubits die Ressource, ohne die er nicht schneller wäre als ein gewöhnlicher Rechner.

Einstein hat die Experimente nicht mehr erlebt. Ob er sich hätte überzeugen lassen, weiß niemand. Seine Frage war jedenfalls die richtige, und dass sie sich am Ende im Labor beantworten ließ, hätte ihm vermutlich gefallen.

Zum Weiterlesen

Einsteins Spuk. Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik

Anton Zeilinger · Pantheon, 2024 · ISBN 978-3-570-55502-6

Der Nobelpreisträger von 2022 erzählt aus erster Hand, wie aus Einsteins Einwand ein Experiment und dann eine Technologie wurde.

Bei Amazon ansehen*

Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics

John S. Bell · Cambridge University Press (englisch) · ISBN 978-0-521-52338-7

Bells gesammelte Aufsätze, darunter die berühmte Arbeit von 1964 und der launige Text über „Bertlmanns Socken“.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. A. Einstein, H. und M. Born: *Briefwechsel 1916–1955.* Kommentiert von Max Born. Nymphenburger, München 1969.

2. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 2022.* nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary.
3. E. Schrödinger: *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik.* In: Die Naturwissenschaften 23 (1935), S. 807–812, doi:10.1007/BF01491891.
4. E. Schrödinger: *Discussion of Probability Relations between Separated Systems.* In: Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 31 (1935), S. 555–563, doi:10.1017/S0305004100013554.
5. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* In: Physical Review 47 (1935), S. 777–780, doi:10.1103/PhysRev.47.777.
6. J. S. Bell: *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox.* In: Physics 1 (1964), S. 195–200, doi:10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195.
7. J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, R. A. Holt: *Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories.* In: Physical Review Letters 23 (1969), S. 880–884, doi:10.1103/PhysRevLett.23.880.
8. B. S. Cirel'son: *Quantum generalizations of Bell's inequality.* In: Letters in Mathematical Physics 4 (1980), S. 93–100, doi:10.1007/BF00417500.
9. S. J. Freedman, J. F. Clauser: *Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories.* In: Physical Review Letters 28 (1972), S. 938–941, doi:10.1103/PhysRevLett.28.938.
10. A. Aspect, P. Grangier, G. Roger: *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities.* In: Physical Review Letters 49 (1982), S. 91–94, doi:10.1103/PhysRevLett.49.91.
11. B. Hensen u. a.: *Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres.* In: Nature 526 (2015), S. 682–686, doi:10.1038/nature15759.
12. The BIG Bell Test Collaboration: *Challenging local realism with human choices.* In: Nature 557 (2018), S. 212–216, doi:10.1038/s41586-018-0085-3.
13. J. Yin u. a.: *Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers.* In: Science 356 (2017), S. 1140–1144, doi:10.1126/science.aan3211.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: Quantenverschränkung. Stand: Oktober 2026. URL:
https://quanten.de/quantenverschraenkung.html (PDF:
https://quanten.de/pdf/quantenverschraenkung.pdf)
```

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Beamen und Quantenteleportation · Quantenkryptographie · Schrödingers Katze · Quantenphilosophie

---

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/quantenverschraenkung.html