

Verschränkte Photonen – Phänomen ausserhalb von Raum und Zeit

Alain Aspect, John F. Clauser und Anton Zeilinger ist es gelungen, ein Phänomen der Quantenphysik experimentell zu beweisen, dessen Existenz Albert Einstein als unmöglich erachtete, obschon es durch die erfolgreiche Quantentheorie seit 1926 vorhergesagt wurde. Verschränkung ist das einzige im Bereich der Naturwissenschaften bekannte Phänomen, das sich nicht in Raum und Zeit abspielt. Dieses Erkenntnis bedeutet eine Revolution des physikalischen Weltbildes, analog etwa zur Vereinigung von Raum und Zeit durch Einsteins Relativitätstheorie.

Kontroversen um den berühmten EPR-Artikel von 1935

In der heute immer noch oft zitierten Publikation von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (abgekürzt EPR) diskutierten die Autoren ein Gedankenexperiment mit zwei Elementarteilchen, die beim Zerfall eines Vorgängerteilchens entstehen und diametral auseinanderlaufen. Gemäss der Quantentheorie werden beide Teilchen durch eine einzige Zustandsfunktion beschrieben, weshalb die Heisenbergsche Unschärferelation gelten muss: Man kann nicht am einen Teilchen den Ort und am anderen den Impuls (Impuls = Masse mal Geschwindigkeit) gleichzeitig genau messen.

Einstein hat dies als Unsinn betrachtet und als «spukhafte Fernwirkung» bezeichnet. Wie sollte denn nur eine Messung am einen Teilchen das entfernte Teilchen instantan beeinflussen können? Er vermutete, dass die Quantentheorie unvollständig sei und durch bislang unbekannte «versteckte Variablen» ergänzt werden müsse. Er hoffte, dass dadurch auch die Unschärferelation und weitere schwer verständliche Eigenschaften der Quantentheorie verschwinden würden.

Erwin Schrödinger hat für die rätselhafte durch die Quantentheorie vorhergesagte Korrelation zweier voneinander entfernter Teilchen den Begriff «Verschränkung» geprägt. Heftige Diskussionen haben über lange Zeit zu keinem Ergebnis geführt, da man

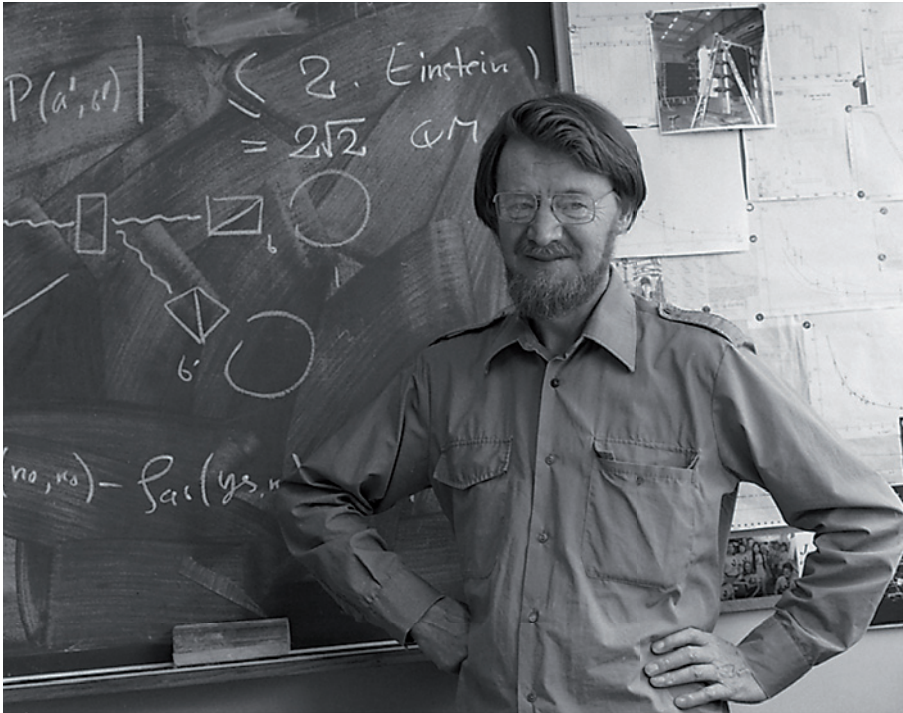
weit davon entfernt war, die Kontroverse durch ein überzeugendes Experiment zu entscheiden. Schliesslich hat man in Anbetracht der Erfolge der Quantentheorie jede weitere Beschäftigung mit dieser Frage dogmatisch als «junk science» diffamiert und Physiker, die sich dennoch darum kümmerten, als nicht ernst zu nehmende Aussenseiter stigmatisiert: «*shut up and calculate!*»

Der Durchbruch von Bell 1964

Der irische Physiker John Stewart Bell (1928-1990) arbeitete am CERN und benutzte ein Sabbatical im Jahr 1964 an der Stanford University, um sich in das ungelöste Problem der Quantentheorie betreffend die «versteckten Variablen» zu vertiefen. Er erkannte nebst anderen Physikern, dass es sich um einen sehr grundlegenden Unterschied zwischen den klassischen Theorien (Relativitätstheorie, Maxwellsche Elektrodynamik) und der Quantentheorie handelt. Erstere basieren auf dem Einsteinschen Konzept des «lokalen Realismus». Dabei bedeutet «lokal», dass sich Signale, Information oder sonstige Wirkungen maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten können und deshalb eine gegenseitige Beeinflussung zweier Teilchen erst nach einer gewissen Zeit auftreten kann. «Realismus» bedeutet, dass physikalische Variablen eines Teilchens einen definierten Wert besitzen, auch bevor sie gemessen werden.

Für makroskopische Körper sind beide Forderungen klar erfüllt: Elementarteilchen und sogar Moleküle bis etwa C₆₀, die durch die Quantentheorie beschrieben werden, können sich jedoch «nicht-lokal» und «nichtrealistisch» verhalten, d.h. sie können gleichzeitig an mehreren Orten sein und ihre Variablen können gleichzeitig inkompatible Werte annehmen. So kann beispielsweise die Polarisation von Photonen gleichzeitig horizontal und vertikal sein; man spricht von einem überlagerten Zustand.

Bei seiner Suche nach einem Gedankenexperiment, das nach Umsetzung in ein reales Experiment klar entscheiden könnte, ob versteckte Variablen das Problem lösen könnten, stiess Bell auf eine Publikation des US-amerikanischen Quantenphysikers



John Bell am CERN 1982. Auf der Tafel sieht man den letzten Term der Bellschen Ungleichung von 1964: ... $P(a', b') \leq 2$ mit dem Vermerk «Einstein)» um anzudeuten, dass es sich um eine «versteckte Variablen»-Theorie handelt. Darunter dasselbe Gedankenexperiment mit der Quantentheorie berechnet ergibt $= 2\sqrt{2}$, das mit dem Wert 2,828 die Ungleichung verletzt. Darunter ist ein Teil der Skizze für ein Gedankenexperiment mit verschränkten Photonen ersichtlich. Ein analoges reales Experiment würde Klarheit schaffen, ob Einstein oder die Quantentheorie Recht hat. Diese Kontroverse wurde durch die Träger des Physik-Nobelpreises 2022 zu Gunsten der Quantentheorie entschieden. (Bild: CERN, CC BY 4.0)

David Bohm (1917-1992) aus dem Jahr 1957 (siehe auch VJS 4|2021: 25-27). Darin schlug der Autor vor, die versteckten Variablen, von deren Existenz dieser wie Einstein überzeugt war, mit Hilfe von Experimenten mit Photonen zu finden. Weiter fand sich auch ein Hinweis auf die Annihilations-Experimente der chinesisch-stämmigen Physikerin Chien-Shiung Wu (1912-1997) von 1949 an der Columbia University in New York, bei denen senkrecht zueinander polarisierte Zwillingsphotonen entstanden (s. Kasten auf Seite 8). Rückblickend stuft man diese Experimente als die erste Beobachtung von Verschränkung ein (Frank 2023).

Dies inspirierte Bell, ein Gedankenexperiment mit verschränkten Photonen vorzuschlagen, das die Kontroverse betreffend versteckte Variablen entscheiden sollte, wenn es dann einmal realisiert werden könnte. Er entwickelte eine sehr allgemeingültige Ungleichung, die für jedes mögliche Experiment mit jeder möglichen auf versteckten Variablen beruhen-

den lokalen Theorie erfüllt sein muss.

Bell fand interessanterweise Gedankenexperimente mit Photonen, die seine Ungleichung gemäss der Quantentheorie verletzen. Könnte man also solche Experimente durchführen und würden die Ergebnisse mit den durch die Quantentheorie vorhergesagten übereinstimmen, wäre bewiesen, dass die Quantentheorie durch keine lokale Theorie mit versteckten Variablen ersetzt werden kann und dass Verschränkung und Nichtlokalität im Mikrokosmos real sind.

Clauser setzt Bells Idee 1972 in ein reales Experiment um

Der US-amerikanische Experimentalphysiker John Francis Clauser (geb. 1942) leitete zusammen mit Mike Horne, Abner Shimony und George Holt (CHSH) 1969 die erste experimentell testbare Bell-Ungleichung ab. Auf dieser Grundlage führte er zusammen mit Stuart Freedman 1972 ein Experi-

Eine unterschätzte Pionierin

Chien-Shiung Wu (1912-1997) wurde in der Nähe von Shanghai geboren und wanderte nach den USA aus, um Physik zu studieren und fiel dort als brillante Studentin auf. Im November 1949 untersuchte sie zusammen mit ihrem Doktoranden Irving Shakhov an der Columbia University in New York die Reaktion zwischen Elektronen und ihren Antiteilchen, den Positronen. Dabei wandelt sich die Masse nach der berühmten Einsteinschen Formel $E = mc^2$ vollständig in Energie um und es entstehen zwei diametral auseinanderfliegende Photonen mit einer Energie von je 511 kilo-Elektronenvolt (Gammastrahlung). Da die Masse verschwindet, wird der Vorgang «An-nihilation» genannt. Der Physiker John Wheeler hatte einige Jahre zuvor theoretisch begründet, dass die beiden Photonen zueinander senkrecht polarisiert sein müssten und Wu suchte nach einem experimentellen Beweis für Wheelers «Paartheorie».

Mit ihrem meisterhaften experimentellen Aufbau konnte Wu wesentlich mehr Paare messen als frühere Experimentatoren. Rückblickend besteht wenig Zweifel, dass Wu die rätselhafte Korrelation der senkrecht zueinander polarisierten Photonen, die wir heute «Verschränkung» nennen, bemerkt haben muss. Im Letter an die *Physical Review* am Neujahrstag 1950 hat sie jedoch nur die experimentelle Bestätigung der «Paartheorie» erwähnt. Aus gutem Grund musste sie befürchten, dass sie als Chinesin und Frau die Stelle an der Universität verlieren würde, wenn sie sich auf eine Diskussion um «Verschränkung» einlassen würde (Frank 2023).



Chien-Shiung Wu an der Columbia University 1963. Rückblickend hat Wu 1949 zum ersten Mal experimentell verschränkte Photonen nachgewiesen. Ihr Experiment war jedoch zu wenig beiweiskräftig, um versteckte Variablen auszuschließen, weil sie nur mit senkrecht zueinander eingestellten Polarisatoren experimentierte und nur knapp jedes zweite Photon registrieren konnte. Diese Ausbeute von weniger als 50% war 1949 jedoch eine ausserordentliche Leistung. Warum wurde es versäumt, sie bei der Vergabe der Nobelpreise am 10. Dez. 2022 zu erwähnen? (Bild: Flickr's The Commons)

ment durch, das die modifizierte Bell-Ungleichung deutlich verletzte und die Quantentheorie bestätigte. Es war ein Experiment mit einer Zwei-Photonen-Kaskade in Kalzium, bei der die beiden erzeugten Photonen eine verschränkte Polarisation aufweisen.

Dieses Experiment löste Erstaunen aus und gab den Anstoss für weitere Untersuchungen, die notwendig waren, um die Argumente der «lokalen Realisten» zu widerlegen, die im Sinne Einsteins beharrlich weiter für ihre Weltanschauung kämpften.

Sie lieferten zwei wichtige Argumente, warum die durchgeführten Bell-Tests dennoch ungenügend sein könnten: das sog. «Lokalitäts-Schlupfloch» und

das «Detektions-Schlupfloch». Ersteres bedeutete, dass vielleicht die Polarisatorstellungen irgendwie in versteckten Variablen beider Photonen bekannt sein könnten und es deshalb trivial ist, dass sich beide gleich benehmen würden.

Das zweite Argument zielte darauf ab, dass nicht alle Photonen detektiert werden und vielleicht die Auswahl der detektierten aus irgendwelchen Gründen gerade so wäre, dass die rätselhaften Korrelationen vorgetäuscht würden, indem die Statistik durch die nicht beobachteten Photonen verfälscht würde (analog wie politische Abstimmungen durch «verlorene» Stimmzettel verfälscht werden können).



Oben: Alain Aspect im Jahr 2013 (Bild: Thaler CC BY-SA 3.0)

Links: John Francis Clauser (Bild: Lyons CC BY-SA 4.0)

Die präzisen Experimente von Aspect 1981-82

Der junge Physiker Alain Aspect (geb. 1947) war von den Bell-Ungleichungen derart fasziniert, dass er beschloss, seine Dissertation diesem Thema zu widmen. Er besuchte deshalb Bell am CERN, um seine Ideen für Experimente mit ihm zu besprechen (vgl. SPG 2023). 1974 begann er mit Experimenten am Institut d'Optique an der Université d'Orsay (Paris) und schloss damit seine Thèse d'Etat 1983 erfolgreich ab. Zuvor publizierte er ein Experiment mit einer enorm hohen statistischen Genauigkeit, wobei die Verletzung der entsprechenden Bell-Ungleichung über 40 Standard-Abweichungen nach einer Messzeit von nur wenigen Minuten betrug. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, dass das Resultat bloss per Zufall entstand, kleiner ist als die Wahrscheinlichkeit, 800 mal hintereinander eine Sechs zu würfeln.

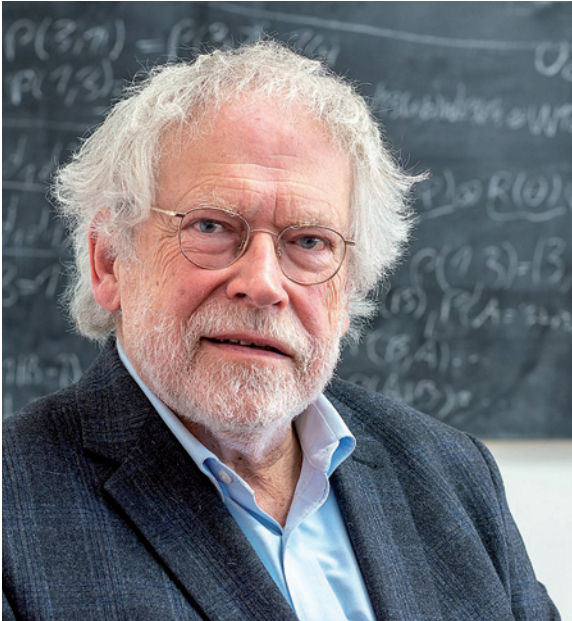
Wichtig war, dass Aspect bei diesen Experimenten auch dafür sorgte, dass die Polarisations Ebenen der Photonen vor dem Eintritt in die polarisierenden Strahlteiler um verschiedene Winkel gedreht wurden (vgl. dazu den Artikel über die «Bellsche Ungleichung» auf S. 11). Die Entscheidung, welcher der möglichen Drehwinkel gewählt wurde, fiel ein Computer auf der Basis von Zufallszahlen, nachdem die Zwillingsphotonen erzeugt wurden. Dann folgten die Messungen der Photonen so rasch, dass auch

Signale mit Lichtgeschwindigkeit zu wenig Zeit gehabt hätten, um Information zwischen den beiden Messstellen auszutauschen.

So wurde das «Lokalitäts-Schlupfloch» auf überzeugende Weise eliminiert und den «lokalen Realisten» blieb nur noch ein dünner Hoffnungsfaden mit dem immer noch offenen «Detektions-Schlupfloch», das am schwierigsten zu überwinden war, weil einzelne Photonen leicht verloren gehen.

Glücklicherweise entwickelten sich auch die experimentellen Möglichkeiten in grossem Tempo weiter. 1960 wurde der Laser erfunden und 1967 wurde an nichtlinearen, doppelbrechenden Kristallen der «Spontaneous Parametric Downconversion»-Effekt experimentell entdeckt und auch theoretisch verstanden.

Solche Kristalle produzieren aus eingestrahlenen Photonen in genau bestimmten Richtungen fliegende Zwillingsphotonen niedrigerer Energie, deren Polarisationen verschränkt sind. Die Ausbeute ist nur ein verschränktes Paar auf etwa 10 Millionen bis 1 Milliarde eingestrahelter Photonen, was für Experimente aber ausreicht. Auch waren die dafür notwendigen Kristalle nicht aussergewöhnlich: zum Beispiel leistet KH_2PO_4 (Kaliumdihydrophosphat) gute Dienste; ein Kristall, der einfach herzustellen ist und als Zusatz für Energy-Drinks oder als Dünger für Aquariumpflanzen verwendet wird. Zusammen mit Laserdioden können damit



Anton Zeilinger im Jahr 2021 (Bild: Godany CC BY-SA 4.0)

kleine und billige Verschränkungs-Photonenquellen gebaut werden. Ab etwa 1986 wurde Downconversion das Arbeitspferd für Verschränkungsexperimente (vgl. auch Vorträge von Gassmann 2021).

Die spektakulären Experimente von Zeilinger ab 1990

Als Anton Zeilinger (geb. 1945) an der Universität Innsbruck zum Professor ernannt wurde, wechselte er von der Neutronenphysik auf die Photonenphysik, dessen Zukunftspotenzial er damals erahnte. Bereits 1993 entdeckte er zusammen mit seiner Forschungsgruppe das Phänomen des «Verschränkungs-Austausches» (entanglement swapping), das bald im Zusammenhang mit Quantencomputern zentrale Bedeutung erlangte. 1999 wurde ihm ein Lehrstuhl für Experimentalphysik an der Universität Wien angeboten und die ganze Gruppe zügelte nach Wien.

Zeilinger verstand es, seine Experimente publikumswirksam zu inszenieren, was ihm bald den Spitznamen «Mister Beam» einbrachte. So schickte er verschränkte Photonen in einem Glasfaserkabel in einem 400 Meter langen Kanal unter der Donau hindurch oder über 144 Kilometer in der Luft übers Meer zwischen La Palma und Teneriffa und erweiterte schrittweise die Distanz, über welche die «spukhafte Fernwirkung» funktioniert. Jian-Wei

Pan aus China, einer seiner früheren Studenten und später Mitarbeiter in Zeilingers Gruppe, konnte 2020 diesen Rekord auf 1120 Kilometer ausdehnen und via den chinesischen Satelliten «Micius» einen Prototyp eines Quanten-Internet-Links herstellen.

Im Hinblick auf den Nobelpreis von besonderer Bedeutung war, dass Zeilinger mit seiner Forschungsgruppe ein Bell-Experiment aufbauen konnte, das alle Schlupflöcher gleichzeitig (nicht in separaten verschiedenen Experimenten) eliminieren konnte, womit definitiv gezeigt wurde, dass es Phänomene ausserhalb Raum und Zeit gibt. Diese Erkenntnis bedeutet eine Revolution des physikalischen Weltbildes.

Fritz Gassmann

Literatur

Deutschlandfunk 2022. <https://www.deutschlandfunk.de> → Audio-Archiv → Physik-Nobelpreis 2022 → Sendung vom 4.10.2022.

EPN 2023a: Europhysics News 53/5: 8-9.

EPN 2023b: Europhysics News 54/1: 11-31.

Frank M. 2023. The little-known origin story of the science that won the 2022 Nobel Prize in Physics. Scientific American, April 2023: 38-45.

Gassmann F. 2021. Vorträge 22./29. Nov.

SPG 2023: Schweizerische Physikalische Gesellschaft, Mitteilungen 69: 9-17.