

Verschränkung in der Quantenwelt: „Spukhafte Fernwirkung“

- Die drei diesjährigen Physik-Nobelpreisträger haben eines der rätselhaftesten Phänomene der Quantenwelt – die Verschränkung – mit ausgefeilten Experimenten bestätigt.
- Diese Experimente und die Verschränkung legen den Grundstein für eine neue Ära der Quantentechnologie: von Sensoren über Kryptographie bis zu Computern.

In der Physik heißen zwei Objekte korreliert, wenn bloß bestimmte Kombinationen ihrer Eigenschaften auftreten. Nehmen wir der Anschauung halber an, dass Kekse ausschließlich rund oder eckig und knusprig oder weich sein können. Bei einem korrelierten Paar Kekse hätte dann zum Beispiel der zweite Keks immer genau die dem ersten entgegengesetzte Form und Konsistenz: Wäre Keks 1 beispielsweise rund und weich, so wäre Keks 2 eckig und knusprig. Solche korrelierten Paare könnte man leicht bereitstellen, indem man die Kekse passend sortiert.

In der Quantenwelt sieht die Sache anders aus. Dort können gewisse Eigenschaften nicht gleichzeitig exakt bestimmt werden und die Messung der einen Eigenschaft wirkt auf die andere zurück. Übertragen auf unser Keks-Gedankenexperiment würde das bedeuten, dass zum Beispiel ein runder Quanten-Keks vor der Messung keine definierte Konsistenz hat. Er ist gleichzeitig weich und knusprig – man spricht

hier von einem Superpositionszustand. Gleiches gälte analog für die Form eines knusprigen Kekses.

Vor diesem Hintergrund untersuchten Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (EPR) 1935 in einer theoretischen Studie einen sogenannten verschränkten Zustand zweier Quantenteilchen. Wiederum auf die Kekse-Paare übertragen, würden die Korrelationen dieses verschränkten Zustandes erlauben, mit Sicherheit die Form und Konsistenz von Keks 2 vorherzusagen, indem man die entsprechenden Eigenschaften an Keks 1 misst.

Aus dieser Erkenntnis folgerten Einstein, Podolsky und Rosen sinngemäß, dass sowohl die Form als auch die Konsistenz von Keks 2 schon vor ihrer Messung festliegen und damit real existieren. Da die theoretische Beschreibung der Quantenwelt, die Quantenmechanik (QM), das nicht erlaubt, müsse sie also unvollständig sein. Denn ansonsten müsste es eine „spukhafte Fernwirkung“ geben, aufgrund derer sich die korrelierten Eigenschaften von Keks 2 just in dem Augenblick manifestieren, in dem an Keks 1 gemessen wird – eine Vorstellung, die Einstein, Podolsky und Rosen ablehnten.

Die Existenz einer erweiterten Theorie hielten Einstein, Podolsky und Rosen für möglich – und wünschenswert! In dieser wären die Form und Konsistenz von Keks 2 schon vor ihrer Messung durch uns verborgene Parameter festgelegt. Fast 30 Jahre später zeigte dann John S. Bell, dass für



„Die ‚von niemandem verstandene Quantenmechanik‘ (Vermutung von R. Feynman) ist heute ein wichtiges und verlässliches Werkzeug in unserem Alltag: ein Großteil der Produkte, die auf dem Weltmarkt

gehandelt werden, beruht darauf bis hin zur Definition des kg, welches auf dem Marktplatz um die Ecke zum Abwiegen genutzt wird.“

Joachim Ullrich, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

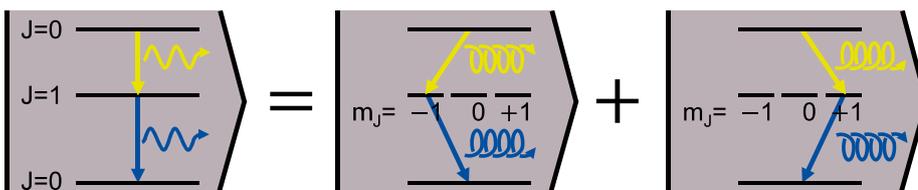
ausgewählte Messeinstellungen die von der QM vorhergesagten Korrelationen zwischen zwei Teilchen (Keks) stärker sind, als man mit verborgenen Parametern – also mit einer klassischen Theorie ohne Quanteneffekte – erklären kann.

Der erste diesjährige Nobelpreisträger, John Clauser, entwickelte diese Idee weiter, um in einem Experiment mit verschränkten Paaren von Lichtteilchen (Photonen, siehe Abb. 1) zu überprüfen, ob die QM prinzipiell durch eine Theorie ersetzt werden kann, die verborgene Parameter verwendet. Seine Messungen bestätigten die Quantenmechanik. Da die Messeinstellungen aber schon vor der Erzeugung der Photonenpaare festlagen, konnte nicht ausgeschlossen werden, dass die Photonenpaare die Messeinstellungen bei ihrer Erzeugung kennen und ihren Zustand entsprechend anpassen.

Der zweite Laureat, Alain Aspect, entwickelte seine Experimente dergestalt weiter, dass er die Messeinstellungen umschalten konnte, nachdem ein korreliertes Photonenpaar die Quelle verlassen hatte: Das korrelierte Photonenpaar konnte also bei seiner Erzeugung die Messeinstellungen nicht kennen und somit konnten diese den Zustand des Paares nicht beeinflussen.

Der dritte Laureat, Anton Zeilinger, begann dann, die bemerkenswerten Eigenschaften verschränkter Quantenzustände zu nutzen. Unter anderem hat er ein Phänomen namens Quantenteleportation demonstriert, mit dem es möglich ist, einen unbekanntem Zustand von einem Quantenteilchen auf ein anderes in beliebiger Ferne zu übertragen – mittels der „spukhaften Fernwirkung“, an die Albert Einstein nicht glauben wollte!

Abb. 1: Erzeugung verschränkter Photonenpaare mittels Zerfallskaskade



Linke Tafel: Regt man ein Kalzium-Atom mit einem Laser in ein geeignetes Energieniveau an (hier das obere mit $J=0$ bezeichnete Niveau), so emittiert es nacheinander ein grünes und ein blaues Photon (grüne und blaue Schlangenlinie).

Mittlere und rechte Tafel: Der Zerfall kann über zwei verschiedene Zwischenzustände erfolgen (hier mit $m_j = -1$ und $m_j = +1$ bezeichnet). Im ersten Fall dreht sich das grüne Photon wie eine rechtshändige und das blaue Photon wie eine linkshändige Schraube. Im zweiten Fall verhält es sich genau umgekehrt. Durch die Superposition beider Zerfallsprozesse ist das Photonenpaar daher bezüglich des Schraubensinns verschränkt.

Deutsche **Physikalische** Gesellschaft

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG), deren Tradition bis in das Jahr 1845 zurückreicht, ist die älteste nationale und mit rund 55.000 Mitgliedern auch die größte physikalische Fachgesellschaft weltweit. Sie versteht sich als Forum und Sprachrohr der Physik und verfolgt als gemeinnütziger Verein keine wirtschaftlichen Interessen. Die DPG unterstützt den Gedankenaustausch innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft mit Tagungen und Publikationen. Sie engagiert sich in der gesellschaftspolitischen Diskussion zu Themen wie Nachwuchsförderung, Chancengleichheit, Klimaschutz, Energieversorgung und Rüstungskontrolle. Sie fördert den Physikunterricht und möchte darüber hinaus allen Neugierigen ein Fenster zur Physik öffnen.

In der DPG sind Wissenschaftler:innen, Studierende, Lehrkräfte, in der Industrie tätige oder einfach nur an Physik interessierte Personen ebenso vertreten wie Patentanwältinnen oder Wissenschaftsjournalisten. Gegenwärtig hat die DPG acht Nobelpreisträger in ihren Reihen. Weltberühmte Mitglieder hatte die DPG immer schon. So waren Albert Einstein, Hermann von Helmholtz und Max Planck einst Präsidenten der DPG.

Die DPG finanziert sich im Wesentlichen aus Mitgliedsbeiträgen. Ihre Aktivitäten werden außerdem von Bundes- und Landesseite sowie von gemeinnützigen Organisationen gefördert. Besonders eng kooperiert die DPG mit der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung.

Die DPG-Geschäftsstelle hat ihren Sitz im Physikzentrum Bad Honnef in unmittelbarer Nähe zur Universitäts- und Bundesstadt Bonn. Das Physikzentrum ist nicht nur ein Begegnungs- und Diskussionsforum von herausragender Bedeutung für die Physik in Deutschland, sondern auch Markenzeichen der Physik auf internationalem Niveau. Hier treffen sich Studierende und Spitzenwissenschaftler:innen bis hin zum Nobelpreisträger zum wissenschaftlichen Gedankenaustausch. Auch Lehrkräfte reisen immer wieder gerne nach Bad Honnef, um sich in den Seminaren der DPG fachlich und didaktisch fortzubilden.

In der Bundeshauptstadt Berlin ist die DPG ebenfalls präsent. Denn seit ihrer Vereinigung mit der Physikalischen Gesellschaft der DDR im Jahre 1990 unterhält sie dort das Magnus-Haus. Dieses 1760 vollendete Stadtpalais, das den Namen des Naturforschers Gustav Magnus trägt, ist eng mit der Geschichte der DPG verbunden: Aus einem Gelehrtentreffen, das hier regelmäßig stattfand, ging im Jahre 1845 die „Physikalische Gesellschaft zu Berlin“, später die DPG hervor. Heute finden hier Kolloquien und Vorträge zu physikalischen und gesellschaftspolitischen Themen statt. Gleichzeitig befindet sich im Magnus-Haus Berlin auch das historische Archiv der DPG.

Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V.

Geschäftsstelle Tel.: 02224 / 92 32 - 0
Hauptstraße 5 Fax: 02224 / 92 32 - 50
53604 Bad Honnef E-Mail: dpg@dpg-physik.de

Redaktion: Gerhard Samulat

Die DPG dankt ihrem Autor Arno Rauschenbeutel von der Humboldt-Universität zu Berlin für die wissenschaftliche Beratung.

