

Leichtgemachter Spuk

Erstmals konnte eine Quantenverschränkung von Photonen nur mit Sonnenlicht hergestellt werden

Von Erik Rhea

Die Welt, so sehen es zumindest die Marxisten, ist eine Totalität. Im Grunde kann sie nur in ihrer Gesamtheit völlig korrekt beschrieben werden, jede Betrachtung von etwas Einzelem unterschlägt notwendig einige wichtige Aspekte, so dass scheinbar paradoxe Schlüsse entstehen können. Dies wird nicht zuletzt anhand der Quantentheorie augenfällig. Die Quantenteilchen stellt man sich als einfache Teilchen vor, die eine endliche Menge an Eigenschaften haben. Deren Quantitäten wiederum sind gequantelt, das heißt, die Teilchen können nur bestimmte Werte für Eigenschaften wie etwa Ladung, Drehimpuls, Impuls etc. besitzen. Wenn wir von einem Elementarteilchen alle möglichen Zustände kennen, die es einnehmen könnte, ohne den tatsächlichen aktuellen Zustand zu kennen, befindet sich das Teilchen in einer Superposition, das heißt in einem eigenen Zustand, der die Möglichkeit von jedem genau definierten Zustand enthält. Führen wir eine Messung durch, so kollabiert die Superposition – es wird nur ein Zustand gemessen.

Wie man experimentell zeigen kann, ist der Superpositionszustand kein bloßer Mangel an Information, sondern hat reale physikalische Auswirkungen – wie man zum Beispiel am berühmten Doppelspaltexperiment sieht. Dort wird mit Licht, das durch einen Doppelspalt scheint, ein Interferenzmuster auf einem dahinterliegenden Schirm erzeugt. Das Muster verschwindet aber in dem Moment, in dem eine Messung durchgeführt wird, die bestimmt, durch welchen Spalt welches Lichtteilchen tatsächlich fliegt. Diesen Effekt macht man sich auch in der Quantenkryptographie zunutze, die aktuell zum Beispiel durch die deutschen Satelliten Qube und Qube II erprobt wird ([vgl. junge Welt vom 27.5.2025](#)). Dieses Paradoxon verdeutlicht, dass die Teilchen eben nicht als einzelne, sondern immer nur im Kontext mit der Welt, in dem Fall mit ihrer Messumgebung, verstanden werden können.

Fernwirkung

Elementarteilchen können miteinander verschränkt sein. Das bedeutet, dass mehrere Teilchen einen gemeinsamen Zustand bilden, ohne dass der Zustand jedes einzelnen Teilchens bekannt ist. Das Einstein-Podolsky-Rosen-Gedankenexperiment (EPR) problematisiert diese Verschränkungen: Bei verschränkten Teilchen mit einem gewissen Abstand kann eine Messung an einem Teilchen instantan eine Information über ein anderes Teilchen liefern. Dabei könne, so die Physiker Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen, absurderweise eine Aussage über ein Teilchen getroffen werden,

welches gegebenenfalls zu weit weg ist, um an ihm selbst sofort eine Messung vorzunehmen.

Das kann beispielsweise bezüglich der Polarisierung von Licht der Fall sein. Die Polarisation beschreibt die Richtung der Auslenkung, mit der eine Lichtwelle schwingt. Auch Photonen besitzen eine Polarisationsrichtung. In bestimmten Kristallen kann ein Photon in zwei Photonen mit geringerer Energie und zueinander senkrecht stehenden Polarisationsrichtungen zerfallen. Die beiden resultierenden Photonen sind dann verschränkt. Misst man die Polarisation des einen Photons, so gewinnt man sofort auch eine Information über die Polarisation des anderen Photons. Wenn man einen Filter anlegt, der nur eine bestimmte Polarisationsrichtung durchlässt, kann man durch Messung der Polarisation des einen Photons vorhersagen, ob das andere Photon einen Filter durchqueren würde, selbst wenn dieses sich eigentlich in einem Überlagerungszustand zweier Polarisationsrichtungen befindet und nicht direkt gemessen werden kann. Der Überlagerungszustand des zweiten Photons kollabiert bei Messung des ersten Photons, auch wenn keine Messung am zweiten Photon selbst vorgenommen wird. Einstein nannte dieses Phänomen eine »spukhafte Fernwirkung«. Er hatte zeitlebens Probleme, dieses Paradoxon zu akzeptieren. Er schlug vor, es mit einer verborgenen Variable aufzulösen. Die Quantenmechanik wäre dann nicht vollständig, sondern es gäbe noch eine oder mehrere physikalische Größen, die wir (noch) nicht kennen und die das Verhalten der Teilchen in diesen Fällen genau festlegen.

Im Jahr 1964 hat John Stewart Bell die sogenannte Bellsche Ungleichung formuliert. Dabei ging der irische Physiker davon aus, dass es eine wie auch immer geartete verborgene Variable gibt, und wies nach, dass ein lokales und realistisches physikalisches System einer prinzipiell experimentell überprüfaren Ungleichung genügen muss. Lokal bedeutet, dass es keine Fernwirkungen wie zum Beispiel den instantanen Kollaps eines Quantenzustands ohne direkte Wechselwirkung mit jenem Teilchen gibt; realistisch bedeutet das, dass die physikalischen Aussagen über das System tatsächlich das gesamte System in allen Einzelheiten beschreiben und nicht einfach nur Aussagen über statistische Wahrscheinlichkeiten getroffen werden. Die Bellsche Ungleichung kann nur verletzt werden, wenn die Teilchen sich in tatsächlichen Superpositionszuständen befinden.

Seit den späten 1960er Jahren führt man wiederholt Experimente durch, die auf eine Verletzung der Bellschen Ungleichung abzielen, um damit die Annahmen der Quantenmechanik zu belegen. Zunächst konnte man noch statistische oder Messapparaturfehler für beobachtbare Verletzungen verantwortlich machen. Die Experimente wurden jedoch mit steigender technischer Finesse bis in die heutige Zeit immer wieder wiederholt, und heutzutage ist man sich ziemlich sicher, dass die Bellsche Ungleichung tatsächlich verletzt wird – eine Einsteinsche verborgene Variable also ausgeschlossen ist. Das bedeutet, dass die Physik entweder das Prinzip der Lokalität oder das Prinzip des Realismus aufgeben muss. Der Mainstream unter den Physikern tendiert zu letzterem. Die physikalischen Aussagen werden nicht als Beschreibung der Wirklichkeit aufgefasst, sondern in skeptischer Manier als statistische Aussage über den Ausgang von Experimenten bei häufiger Wiederholung.

Tageslicht reicht

Die Aufgabe des Realismus wird auch Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik genannt oder manchmal auch salopp unter dem Motto »Shut up and calculate!« zusammengefasst. Man kann jedoch auch eine ontologisch stärkere Physik denken, wenn man das Prinzip der Lokalität aufgibt, aber weiterhin an einer verborgenen Variable festhält. Dies macht zum Beispiel die De-Broglie-Bohm-Theorie (auch Führungswellentheorie genannt). Dabei ist die verborgene Variable der genaue Ort des Teilchens zum Zeitpunkt seiner Entstehung. Das Teilchen wird dann nicht nur durch seine Wellengleichung, sondern auch durch die Bewegungsgleichung seiner Flugbahn beschrieben, während die anderen Quanteneigenschaften auf den Ort des Teilchens zurückgeführt werden. Im vergangenen Jahr konnte die ursprüngliche Formulierung der De-Broglie-Bohm-Theorie widerlegt werden ([vgl. *junge Welt* vom 12.8.2025](https://www.jungewelt.de/artikel/528571.quantenphysik-leichtgemachter-spuk.html)). Diese Theorie ist jedoch nicht die einzige nichtlokale Antwort auf das EPR-Paradoxon. Es gibt mittlerweile mehrere Theorien mit ähnlicher Grundlage, aber unterschiedlicher Ausarbeitung.

Die Forschung mit verschränkten Quantenteilchen wird in der Zukunft jedenfalls wohl zu noch besseren und günstigeren Ergebnissen führen. Bisher erzeugt man verschränkte Photonen vor allem mit Lasern. Laser sind jedoch teuer, empfindlich und verbrauchen viel Energie. Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts und der Universität Ottawa gelang es allerdings kürzlich, verschränkte Photonen aus einfachem Sonnenlicht zu erzeugen. Dabei wird das Sonnenlicht stark gebündelt und konzentriert in einen speziellen Kristall geleitet. Die Anzahl an verschränkten Photonen bei diesem Verfahren ist dabei durchaus vergleichbar mit der Anzahl bei laserbasierten Verfahren. Bisher hatten Forscher die Erzeugung von verschränkten Photonen mittels Sonnenlicht nicht für möglich gehalten, da man die Kohärenz (Phasengleichheit) für unerlässlich hielt und das Sonnenlicht zudem für zuwenig intensiv befunden wurde. Ein Lichtstrahl kann jedoch bezüglich verschiedener Dimensionen kohärent sein. Für polarisationsverschränkte Photonen genügt eine Kohärenz bezüglich der Polarisation, die bei hohen Intensitäten in einem Kristall erzeugt werden kann. Die erforderliche Intensität kann man auch durch Bündelung des Lichtes erreichen. Das neue Verfahren ist nicht nur billiger, es ermöglicht auch Verschränkungen von Photonen in Wellenlängenbereichen, für die es bislang keine Laser gibt. Zudem erzeugen Laser Abwärme, die bei manchen Anwendungen, beispielsweise bei Weltraumsatelliten, störend wirken kann. Bei der Sonnenlichtbündelung fällt dieses Problem weg. Dies dürfte nicht nur die Forschung an quantenverschränkten Zuständen vorantreiben, sondern auch die technische Anwendung in größerem Stil als bisher ermöglichen.

<https://www.jungewelt.de/artikel/528571.quantenphysik-leichtgemachter-spuk.html>