

Die Wirklichkeit der Quanten

Die Quantenmechanik ist seit 80 Jahren fest etablierter Grundstein der Physik, aber bis heute wird über ihre Deutung debattiert. Immer raffiniertere Experimente zeigen, dass in der Quantenwelt der Begriff Information fundamentale Bedeutung hat – auch für künftige technische Anwendungen.

In Kürze

- ▶ **Verschränkung** ist ein grundlegendes Quantenphänomen, das sich mit unseren gewohnten Vorstellungen über die Wirklichkeit nicht vereinbaren lässt.
- ▶ Verschränkte Quantenobjekte widersprechen dem **lokalen Realismus**: Ihre Eigenschaften sind vor einer Messung nicht eindeutig definiert und danach stärker korreliert, als dies durch eine klassische Wechselwirkung erklärbar wäre.
- ▶ Auf Verschränkung beruhen viel versprechende **Zukunftstechnologien** – insbesondere Quantenkryptografie, Quantenkommunikation und Quantencomputer.

Von Anton Zeilinger

Als 1925/26 die moderne Quantenmechanik geschaffen wurde, entspann sich sofort eine Diskussion über die Bedeutung der neuen physikalischen Theorie. In einer berühmten Debatte zwischen Albert Einstein und Niels Bohr ging es um die Frage: Liefert die Quantenmechanik eine vollständige Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit? Eine zentrale Rolle in diesem Dialog spielten Gedankenexperimente, denn Versuche mit einzelnen Quantensystemen waren damals technisch noch nicht möglich.

Einstein argumentierte zuerst mit einer Quantenversion des aus der Optik wohl bekannten Doppelspaltversuchs: Licht tritt von links durch einen einzelnen Spalt und be-

leuchtet einen Schirm mit zwei Spaltöffnungen, deren eine geschlossen werden kann. Sind beide Spalte offen, beobachtet man auf dem Schirm Interferenzstreifen, entsprechend der Wellennatur des Lichts. Schließt man einen Spalt, treten diese Streifen nicht auf. Nun weiß man aber, dass Licht aus Teilchen – Photonen – besteht, und Einstein stellte die Frage nach dem Weg eines einzelnen Photons. Tritt das Interferenzbild, wie von der Quantenphysik vorhergesagt, auch mit einzelnen Photonen auf, die eines nach dem anderen den Doppelspalt passieren?

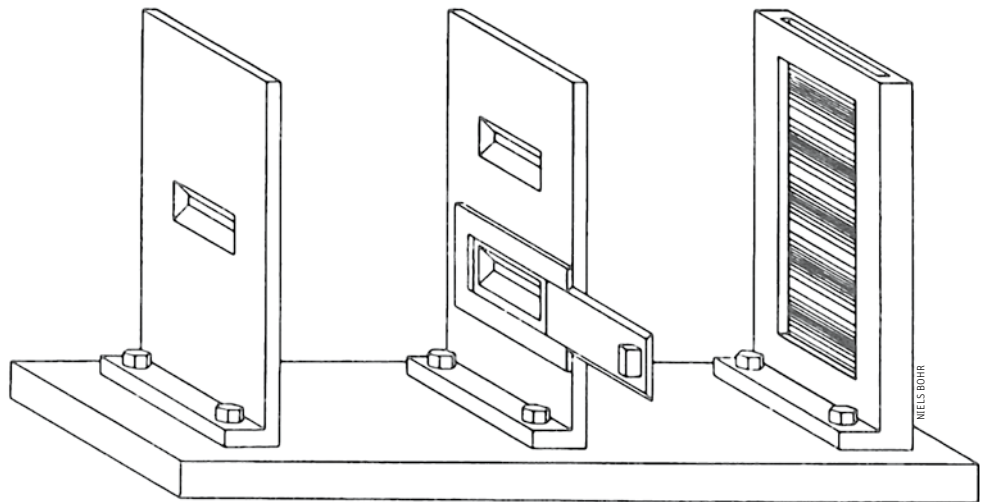
Bohrs Antwort lautete: Es hat keinen Sinn, über den Weg eines Teilchens zu sprechen, ohne diesen – etwa durch Schließen des unteren Spalts – festzulegen oder tatsächlich zu bestimmen. Heute sagt man: Die Interferenzen treten dann und nur dann auf, wenn





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE GRÄFK

In der Quantenphysik herrschen Zusammenhänge, die unserer vertrauten Vorstellung von einer lokal separierbaren Realität fundamental widersprechen. Verschränkte Quantenobjekte verhalten sich zwar wie Würfel, die bei jedem Wurf zufällige Augenzahlen zeigen – aber stets präsentieren alle verschränkten Würfel dieselbe Zahl.



Doppelspaltsskizze von Niels Bohr zu seinen Diskussionen mit Albert Einstein

keine Information vorliegt, welchen Weg das einzelne Teilchen genommen hat.

Seit den 1970er Jahren ist es technisch möglich, die Frage, ob die Interferenzstreifen auch mit einzelnen Teilchen erscheinen, tatsächlich im Labor zu entscheiden. So wurde der Doppelspaltversuch vom Autor und seinem Team mit verschiedenen Arten von massiven Partikeln durchgeführt – etwa mit Neutronen und später auch mit C_{60} -Molekülen, so genannten Fullerenen (Bilder gegenüber).

Wie groß ist die Quantenwelt?

Eine interessante Frage ist, ob dies nur für kleine Teilchen gilt. Wie groß dürfen Systeme sein, an denen sich solche Quanteninterferenzen beobachten lassen? Als Gedankenexperiment hierzu erdachte Erwin Schrödinger 1935 die berühmte nach ihm benannte Katze. In seinen eigenen Worten: »Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man

gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muss): In einem geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, dass im Laufe einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, dass die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiften haben. Die Psi-Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, dass in ihr die lebende und die tote Katze zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind. Das Typische an solchen Fällen ist, dass eine ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung entscheiden lässt.«

Das Beispiel von Schrödingers Katze scheint zu bedeuten, dass es keinen Sinn hat, sich Quantenzustände von sehr großen, komplexen Systemen vorzustellen. Doch wir müssen uns in Erinnerung rufen: Quanteninterferenzen treten nur dann auf, wenn keinerlei Information darüber vorliegt, welchen Weg das Teilchen genommen hat. Es geht nicht darum, ob ein Beobachter tatsächlich diese Information besitzt, sondern ob es im Prinzip überhaupt möglich ist, den Weg zu wissen. Damit Interferenzen beobachtet werden, darf es niemandem – wo immer er sich befindet und welche noch so fortgeschrittene Technologie er besitzt – möglich sein, herauszufinden, welchen der beiden Wege das Teilchen genommen hat. Man muss also das System hinreichend von der Umgebung isolieren. Andernfalls vermag das Teilchen zum Beispiel durch Emission von elektromagnetischer



Strahlung der Umgebung mitzuteilen, welchen Weg es nimmt – und dann gibt es keine Interferenzen.

Es ist eine Herausforderung an den Experimentator, sicherzustellen, dass dieses Phänomen – Dekohärenz genannt – nicht auftreten kann. Immerhin haben wir Quanteninterferenzen von C_{60} -Molekülen demonstriert, und es gibt keinen Grund, warum dies nicht zu viel massiveren Systemen ausgeweitet werden kann. Ob sich Quanteninterferenz eines Tages nach dem Beispiel von Schrödingers Katze an lebenden Systemen beobachten lässt, ist eine offene Frage. Hierzu müsste man das Lebewesen vollkommen von der Umgebung trennen, um Dekohärenz zu vermeiden. Dies könnte vielleicht mit Nanobakterien gelingen; ob es für größere Systeme möglich ist, bleibt eine interessante Frage an die Zukunft.

Parallel zu den Interferenzexperimenten hat sich in den letzten Jahren ein Forschungszweig international entwickelt, bei dem man versucht, kleine mechanische Oszillatoren – Hebel in der Größenordnung von Mikrometern (tausendstel Millimetern) – in quantenmechanische Zustände zu versetzen. Das wäre ein enormer Sprung hinsichtlich Masse und Komplexität der Systeme.

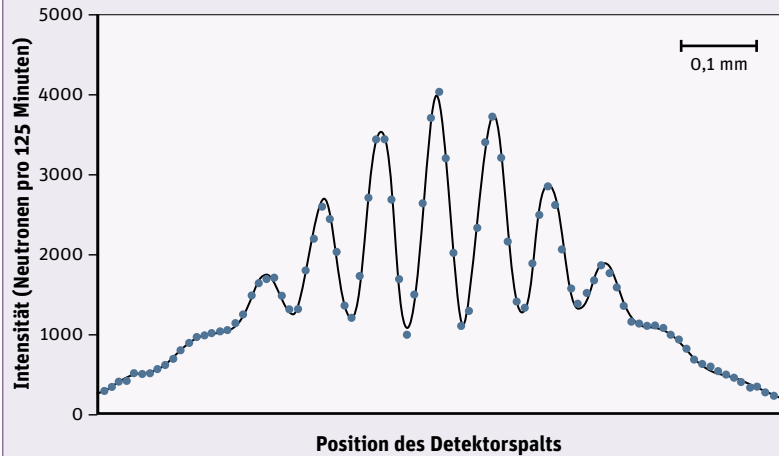
Wie erwähnt kommt es darauf an, ob die Information, durch welchen Spalt ein Teilchen getreten ist, in irgendeiner Form vorliegt oder nicht. Wie garantieren wir, dass es keinerlei Möglichkeit, nicht einmal im Prinzip, geben kann, den Weg zu bestimmen, damit Interferenzen auftreten? Dies wird besonders schön in einem Experiment gezeigt, bei dem man die Doppelspaltinterferenz eines Photons beobachtet, das mit einem anderen eng verbunden ist (siehe Bild auf folgender Seite).

Photonenpaare: Welle oder Teilchen?

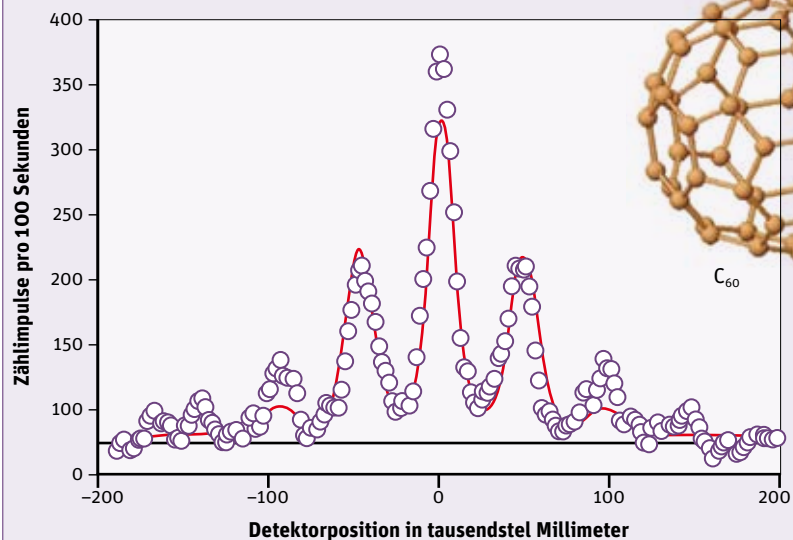
Bei dieser verblüffenden Variante des Doppelspaltversuchs werden in einem nichtlinearen optischen Kristall Photonenpaare erzeugt, die auf sehr enge Weise miteinander zusammenhängen; man nennt dieses Quantenphänomen nach Schrödinger Verschränkung. Keines der beiden Photonen besitzt einen wohl definierten Impuls, ehe dieser gemessen wird. Doch wenn die beiden Impulse gemessen werden, müssen sie sich genau zum Impuls des erzeugenden Pumpphotons aufaddieren. Wegen dieser Verschränkung kann das erste Photon dazu verwendet werden, festzustellen, durch welchen Spalt das zweite Photon getreten ist. Dies ist erst dann nicht mehr möglich, wenn das erste Photon auf eine Weise gemessen wird, die keinerlei Rückschluss – nicht einmal im Prinzip – darüber erlaubt, welchen Weg das zweite Photon nimmt. Wie erreicht man das? Das erste

INTERFERENZ EINZELNER MASSIVER TEILCHEN

Doppelspaltexperiment mit Neutronen am Hochflussreaktor des Instituts Laue-Langevin in Grenoble, durchgeführt 1988 von einem Team um den Autor. Die Intensität war so gering, dass die Neutronen einzeln den Doppelspalt passierten.

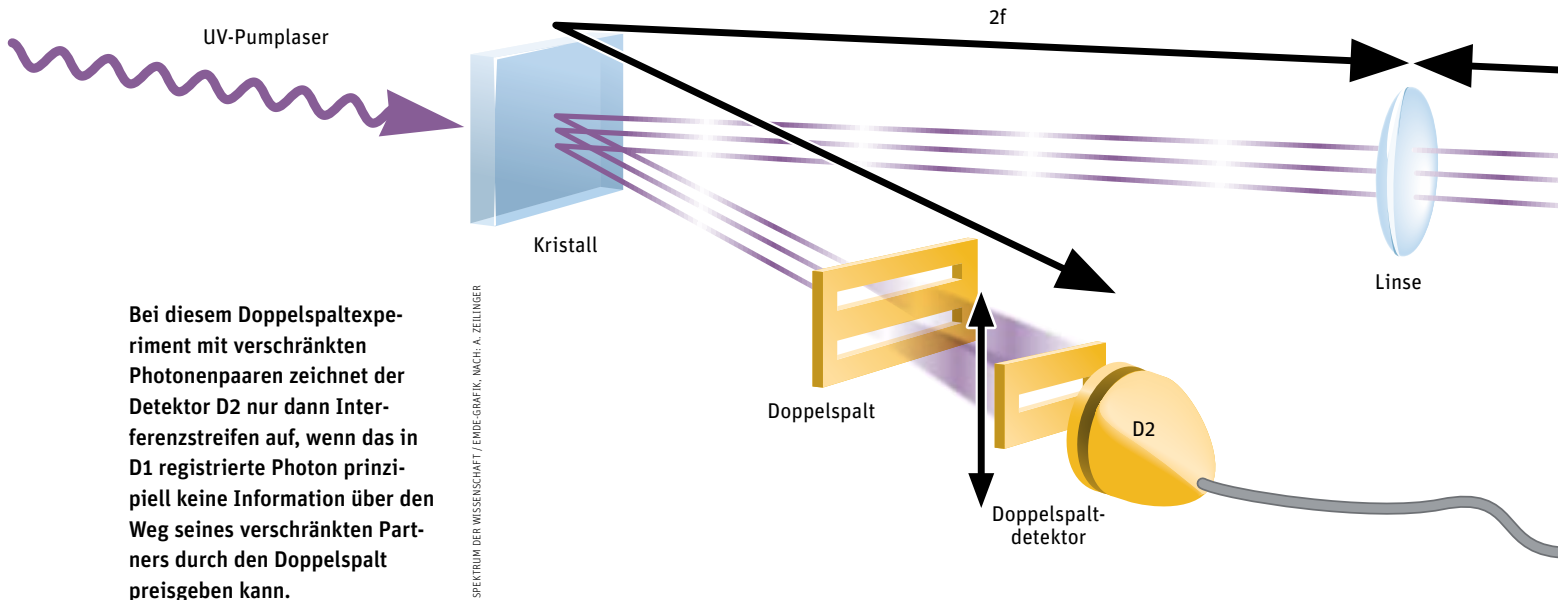


Intensitätsverteilung von C_{60} -Molekülen nach Beugung an einem Absorptionsgitter mit 100 Nanometern (millionstel Millimetern) Gitterkonstante. Auch bei diesem Experiment aus dem Jahr 1999 interferiert jedes Molekül nur mit sich selbst.



Photon wird in einem Detektor registriert, der in der Brennebene einer Linse steht; dadurch werden alle Photonen auf den gleichen Impuls projiziert, das heißt, es gibt keine Information über den Ort. Nur in diesem Fall – wenn jede Ortsinformation ausstrahlt ist – treten die Doppelspaltinterferenzen auf.

Ein Interferenzbild entsteht nur, wenn auf Grund der Messung am ersten Photon keinerlei Information mehr darüber vorhanden ist, welchen Weg das Bruderphoton durch den Doppelspalt genommen hat. Wird das erste Photon nicht registriert, treten keine Doppelspaltinterferenzen auf, denn es könnte ja je-



Bei diesem Doppelspaltexperiment mit verschränkten Photonenpaaren zeichnet der Detektor D2 nur dann Interferenzstreifen auf, wenn das in D1 registrierte Photon prinzipiell keine Information über den Weg seines verschränkten Partners durch den Doppelspalt preisgeben kann.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAFIK: JACHA-A. ZEILINGER

mand das erste Photon so abbilden, dass daraus Weginformation für das zweite Photon gewonnen werden kann.

Dieses Experiment zeigt sehr schön, dass man nicht über Eigenschaften eines Photons sprechen darf, ohne das dazu notwendige Experiment durchgeführt zu haben. Hier kommt es nicht nur darauf an, das Photon registriert zu haben, das durch den Doppelspalt tritt, sondern das ganze Experiment zum Abschluss zu bringen – das heißt, auch das erste Photon zu registrieren. Die Art der Messung entscheidet, ob das zweite Photon als Teilchen durch einen der beiden Spalte tritt oder als Welle zu Interferenzeigenschaften führt. Es hat also keinen Sinn – wie es Einstein gerne gehabt hätte –, von Welle oder Teilchen als einer objektiven Eigenschaft zu sprechen, unabhängig vom tatsächlich durchgeführten Experiment.

Die Art der Messung entscheidet, ob das Photon als Teilchen durch einen der Spalte tritt oder als Welle zu Interferenz führt

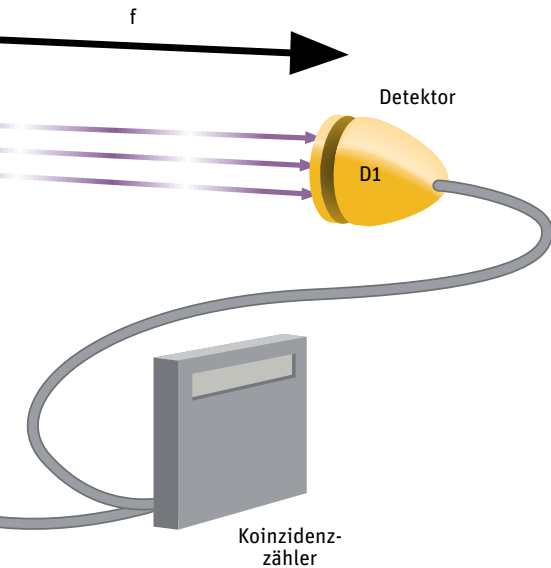
In dem eben diskutierten Experiment spielt die Verschränkung zwischen den beiden Photonen eine zentrale Rolle. Das Phänomen wurde von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen 1935 in die Diskussion um die Quantenphysik eingeführt. Interessanterweise hat man diese Arbeit in den ersten drei Jahrzehnten nur etwa einmal pro Jahr zitiert. Heute wird sie pro Jahr mehr als 200-mal zitiert. Einer, der die Ideen von Einstein, Podolsky und Rosen sofort aufgriff, war Erwin Schrödinger; er prägte den Begriff Ver-

schränkung und meinte, das Phänomen zwingt uns, von allen lieb gewordenen Vorstellungen, wie die Welt beschaffen sei, Abschied zu nehmen.

Verschränkung lässt sich am einfachsten mit Hilfe eines Experiments diskutieren, das tatsächlich jederzeit durchgeführt werden kann: Eine Quelle entsendet Teilchenpaare, in diesem Fall Photonenpaare, zu zwei verschiedenen Messstationen A (Alice) und B (Bob). Man beobachtet die Korrelation der Polarisationen zwischen beiden Photonen (Bild rechts).

Beide Polarisatoren können um die Strahlachse gedreht werden, so dass man die Linearpolarisationen entlang einer beliebigen Richtung messen kann. Das Experiment zeigt: Wenn beide Polarisatoren gleich orientiert sind, erhält man auf beiden Seiten immer das gleiche Resultat. Wird ein Polarisator festgehalten und der zweite gedreht, so variieren die Koinzidenzen mit dem Doppelten des Drehwinkels. Diese Beobachtungen sind, wie der irische Physiker John Bell (1928–1990) gezeigt hat, auf Grund einer so genannten lokal realistischen Theorie nicht verstehbar.

Eine »lokal realistische« Theorie wäre eine Naturbeschreibung, die zwei einfache Annahmen trifft. Die Lokalitätsannahme besagt, dass das Messergebnis auf einer Seite, sagen wir bei A, nicht davon abhängt, was Bob mit seiner Messstation B misst – welche Polarisatorstellung er wählt, ja sogar, ob er überhaupt eine Messung an seinem Photon durchführt. Die Realitätsannahme bedeutet: Das Messergebnis spiegelt vor der Messung existierende Eigenschaften der Teilchen – eventuell unter Einschluss von Eigenschaften des Messapparats – wider.



Eine solche lokal realistische Erklärung mutet sehr plausibel an. Man beobachtet ja: Falls beide Polarisatoren gleich orientiert sind, zeigen sie immer das gleiche Resultat an. In diesem Fall sind also beide Photonen horizontal oder beide vertikal polarisiert. Was würde daher näher liegen als anzunehmen, dass die

Photonen schon mit diesen entsprechenden Polarisierungen »geboren« wurden? Oder wenigstens, dass für beide Photonen in irgendeiner Weise feststeht, welche Polarisierung sie bei der Messung zeigen sollen? Nimmt man dies an und zudem, dass das Messergebnis an einem Photon unabhängig davon ist, was gerade dem anderen weit entfernten Photon zustoßt, so gelangt man zum Bild des lokalen Realismus.

Abschied vom lokalen Realismus

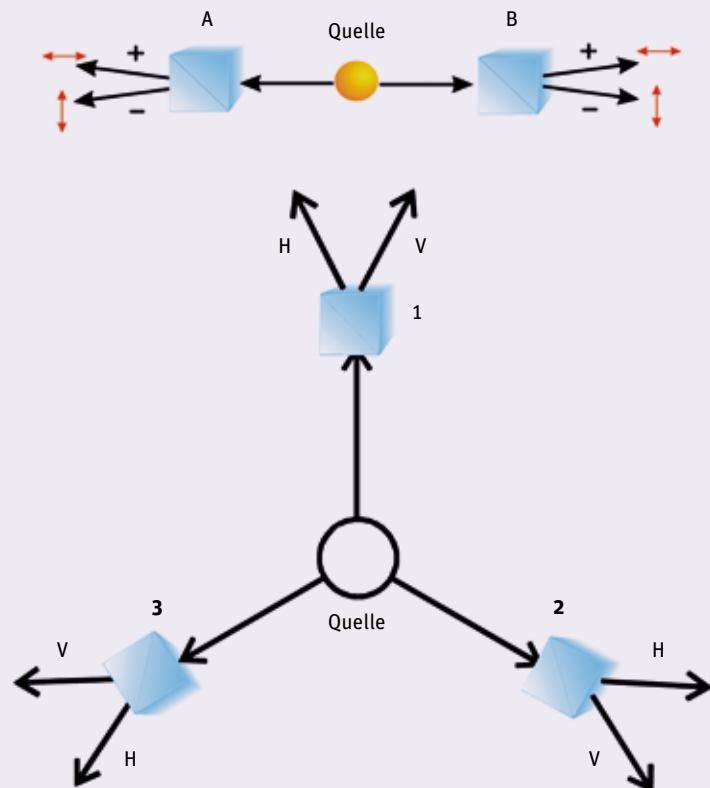
Doch wie John Bell zeigte, stimmen die statistischen Vorhersagen aus einem solchen Bild nicht mit der Quantenphysik überein. Seit den 1970er Jahren bestätigen Experimente mit zunehmender Genauigkeit die Vorhersagen der Quantenphysik und widerlegen das lokal realistische Weltbild. Besonders krass ist der Widerspruch zwischen lokalem Realismus und Quantenmechanik für den Fall der Verschränkung von drei oder mehr Teilchen, wie vom Autor gemeinsam mit Daniel M. Greenberger und Michael A. Horne theoretisch entdeckt und von der Gruppe des Autors experimentell bewiesen wurde (Bild unten).

Man könnte dennoch ein Schlupfloch für den lokalen Realismus vermuten: Vielleicht beeinflusst das Messresultat auf einer Seite in

VON DER PAARVERSCHRÄNKUNG ZU GREENBERGER-HORNE-ZEILINGER-ZUSTÄNDEN

Um die Verschränkung von zwei Photonen zu testen, messen A (Alice) und B (Bob) die Polarisierung »ihres« Photons und vergleichen die Ergebnisse. Beide Polarisatoren können beliebig um die Strahlachse gedreht werden.

Die Verschränkung von drei Teilchen ergibt GHZ-Zustände, benannt nach ihren Entdeckern Greenberger, Horne und Zeilinger. Für bestimmte Polarisator-Orientierungen kann man auf Grund der Messungen an zwei Photonen mit Sicherheit die Polarisierung des dritten Photons vorhersagen – entweder V (vertikal) oder H (horizontal). Interessanterweise ist die Vorhersage der Quantenmechanik in diesem Fall genau entgegengesetzt zu der des lokalen Realismus. Verlangt also die Quantenmechanik, dass ein bestimmtes Photon horizontal polarisiert sein muss, so postuliert der lokale Realist, es habe orthogonal dazu orientiert zu sein, also vertikal. Die Experimente bestätigen eindeutig die quantenmechanische Vorhersage.



FAKULTÄT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄT WIEN

irgendeiner Form, welche Messung auf der anderen Seite stattfindet? Vielleicht teilt ein Signal über einen uns unbekanntem Kommunikationsweg der jeweils anderen Seite mit, welche Art Messung durchgeführt wurde? Doch diese Erklärung kann ausgeschlossen werden. In einem Experiment an der Universität Innsbruck schalteten Gregor Weihs und weitere Mitarbeiter der Gruppe des Autors 1998 die

Die Frage ist also: Welche der beiden Annahmen, die im lokalen Realismus stecken, ist falsch – oder treffen gar beide nicht zu?

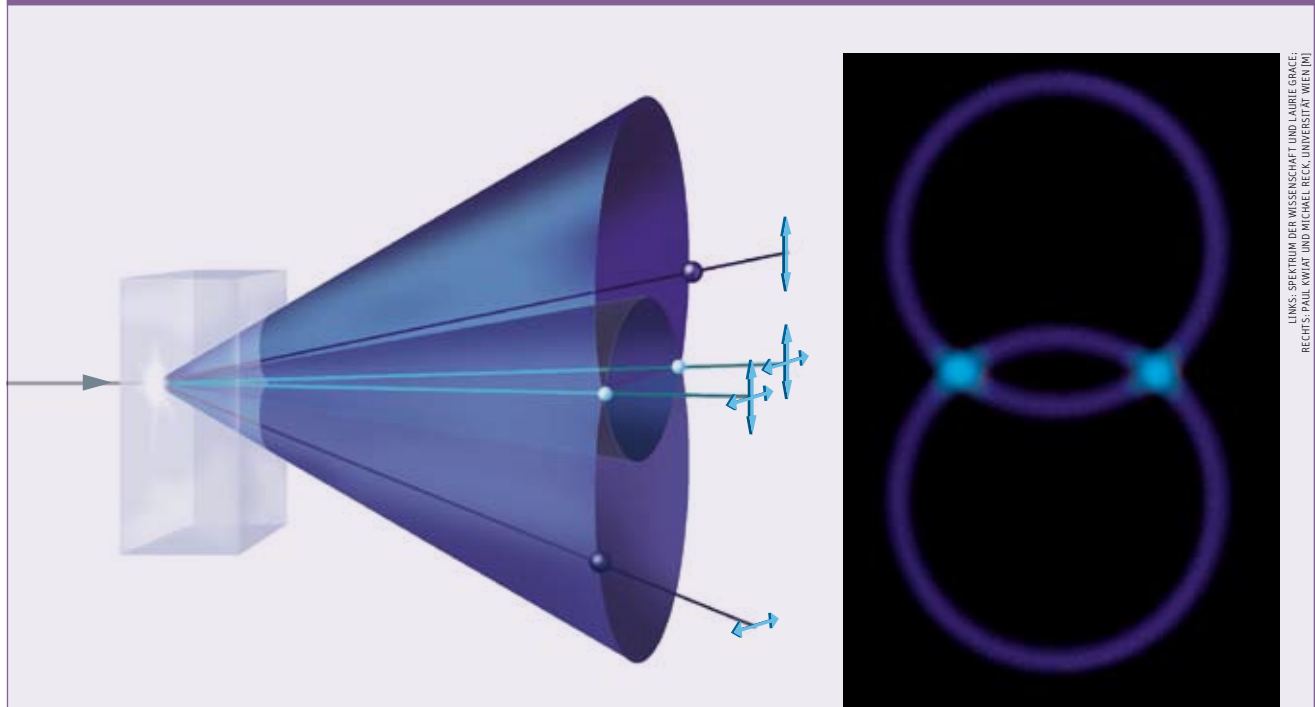
Orientierung der Polarisatoren im allerletzten Moment um – so schnell, dass sogar ein Signal mit Lichtgeschwindigkeit nicht genug Zeit hätte, rechtzeitig vor der Messung am zweiten Photon von einer Seite auf die andere zu gelangen. Wiederum wurden die Vorhersagen der Quantenphysik im Detail bestätigt.

Die Frage ist also: Welche der beiden Annahmen, die im lokalen Realismus stecken, ist

falsch – oder gar beide? Wenn die Lokalität nicht gilt, dann hängen Eigenschaften auf geheimnisvolle Weise instantan, das heißt ohne Zeitverzögerung, über große Entfernungen zusammen. Oder ist die Idee des Realismus falsch – das heißt die Vorstellung, dass die Messergebnisse uns etwas über Eigenschaften der Teilchen sagen, wie sie vor und unabhängig vom Experiment existieren?

Zu dieser Frage hat der britisch-amerikanische Physiker Anthony Leggett 2003 ein Modell vorgestellt, in dem die Photonen mit wohl definierten Polarisierungen erzeugt werden, wie es dem Realismus entspricht. Zugleich lässt Leggett Nichtlokalität zu: Das Messergebnis an einem einzelnen Photon hängt davon ab, in welcher Orientierung der Polarisator für das zweite Photon angeordnet ist – und dies instantan, also ohne Zeitverzögerung, über beliebig große Entfernungen. Interessanterweise führt auch diese Annahme eines nichtlokalen Realismus für bestimmte Messungen zu einem Widerspruch mit den Vorhersagen der Quantenphysik. In diesem Fall wird der Nachweis etwas komplizierter;

WIE ERZEUGT MAN VERSCHRÄNKTE PHOTONEN?



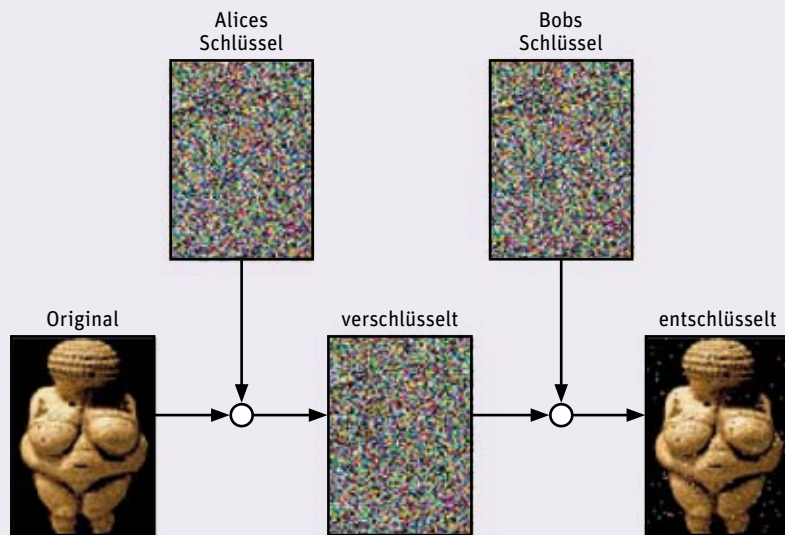
LINKS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND LAURIE GRACE; RECHTS: PAUL UWAT UND MICHAEL BECK, UNIVERSITÄT WIEN (PI)

Wenn ein ultravioletter Laserstrahl einen optisch nichtlinearen Kristall passiert, entstehen im Kristall Lichtfelder bei neuen Frequenzen. Dabei ist die Summe der Frequenzen der beiden neuen Lichtfelder gleich der des Pumpstrahls. Im Teilchenbild bedeutet dies, dass ein Photon des Pumplasers in zwei neue Photonen zerfallen kann, wobei die Summe der Energien der

beiden neuen Photonen gleich der des Originalphotons ist. Die beiden Photonen können in ihrer Polarisation oder auch in ihrem Impuls miteinander verschränkt sein. Im Bild entsteht ein vertikal polarisiertes Photon (auf dem oberen Kegel) und ein horizontal polarisiertes (auf dem unteren). Auf der Schnittlinie (hellblau) sind die Photonen in ihrer Polarisation verschränkt.

QUANTENKRYPTOGRAPHIE MIT VERSCHRÄNKTEN PHOTONEN

Um eine quantenmechanisch verschlüsselte Botschaft zu übermitteln, erzeugt eine Quelle verschränkte Photonenpaare und sendet je ein Photon zu Alice und Bob. Diese messen die Polarisation. Sind ihre Polarisatoren gleich orientiert, so erhalten beide das gleiche Resultat: Beide Photonen sind entweder horizontal oder vertikal polarisiert. Doch für jedes einzelne Photon ist das Resultat zufällig. Auf diese Weise erhalten Alice und Bob die gleiche Zufallsfolge, die sie dann zur Verschlüsselung einer geheimen Nachricht verwenden können. Abhören der Nachricht wird ausgeschlossen, indem Alice und Bob unabhängig voneinander wieder rein zufällig zwischen zwei verschiedenen Stellungen ihrer Polarisatoren hin und her schalten. Im ersten auf Verschränkung basierten Quantenkryptografieexperiment wurde das Bild der Venus von Willendorf von Alice verschlüsselt und von Bob wieder entschlüsselt.



FAKULTÄT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄT WIEN

man muss die Korrelationen zwischen Messungen linearer Polarisation an einem Photon und elliptischer Polarisation an dem anderen beobachten. In unserem Experiment an der Universität Wien konnten Simon Gröblacher und andere 2007 zeigen, dass auch hier die Quantenmechanik stimmt. Selbst ein Realismus à la Leggett, der die Lokalitätsannahme aufgibt, kann nicht gerettet werden.

Eine interessante Frage ist, bis zu welchen Entfernungen sich die Verschränkung aufrechterhalten lässt. Hierzu laufen in der Gruppe des Autors einige Experimente zwischen den Kanarischen Inseln La Palma und Teneriffa. Auf beiden Inseln gibt es Cluster von Teleskopen, die gemeinsam die Europäische Nordsternwarte bilden. In den Experimenten werden auf La Palma verschränkte Photonen erzeugt und eines oder beide dieser Photonen nach Teneriffa geschickt. Dort fängt ein Ein-Meter-Spiegelteleskop die einzelnen von La Palma kommenden Photonen auf, und ihre Polarisation wird gemessen. Das jeweils andere der beiden Photonen wird lokal auf La Palma untersucht. Wie sich zeigt, bleibt auch über diese große Entfernung von 144 Kilometern die Verschränkung bestehen. Das scheint zu bestätigen, dass dieses Quantenphänomen unabhängig von der Entfernung gilt.

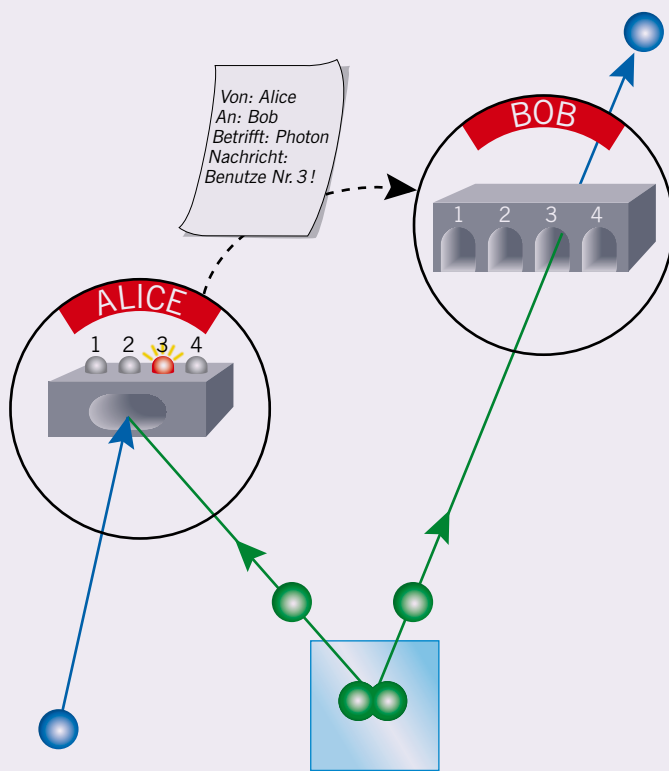
Zusammengefasst bedeutet all dies: Zwar zeigen die Messungen an beiden Photonen perfekte Korrelationen – bei gleich orientierten Polarisatoren wird auf beiden Seiten

Anzeige

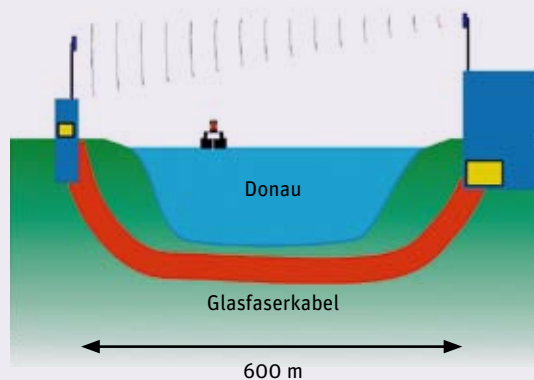
FORTIS
B-42 BLACK

Chronograph Automatik, Titan, Karbon
 Offizieller Ausrüster für Luft- & Raumfahrt
 Erste Uhrenfabrik der Welt für automatische
 Armbanduhren · since 1912 swiss
www.fortis-watches.com

QUANTENTELEPORTATION



Alice und Bob erzeugen zunächst ein Paar verschränkter Photonen (grün). Alice möchte damit den ihr unbekanntem Zustand eines Photons zu Bob übertragen. Sie verschränkt zu diesem Zweck ihr Photon (blau) mit dem einen Photon des verschränkten Paares. Auf diese Weise wird Bobs Photon in einen Zustand versetzt, der eindeutig durch den Originalzustand von Alices Photon definiert ist. In einem Experiment wurde eines der beiden Photonen quer über die Donau zum anderen Ufer geschickt (unten). Da die Glasfaserkabel in einem Abwasserkanal unter der Donau verlaufen, spricht man vom »Experiment des Dritten Mannes« – in Anlehnung an den berühmten Film, der zum Teil im Kanalsystem im Wien der Nachkriegsjahre spielt.



LINKS: LAURE GRACE, RECHTS: FAKULTÄT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄT WIEN

die gleiche Polarisation gemessen –, aber dennoch ist die Annahme falsch, dass die Photonen bereits vor ihrer Messung eine Polarisation tragen. Durch Messung am ersten Photon nimmt dieses spontan eine Polarisation an – und das zweite Photon besitzt, ganz egal, wie weit es entfernt ist, von diesem Moment an ebenfalls eine wohl definierte Polarisation.

Man könnte meinen, dies widerspreche Einsteins Relativitätstheorie, der zufolge sich kein Signal schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten darf. Doch das ist nicht der Fall, denn das Messergebnis an jedem einzelnen der beiden Photonen ist rein zufällig. Das heißt, unabhängig von der Orientierung des Polarisators tritt gleich oft das Ergebnis H (horizontal) oder V (vertikal) auf. Wenn also Alice und Bob jeweils ihre Photonen messen, gewinnen sie aus ihren Daten keinerlei Information über die Orientierung des anderen Polarisators. Dies ist aber der einzige Parameter, den der Experimentator zu beeinflussen vermag. Erst wenn Alice und Bob ihre Orientierungen und ihre Messergebnisse vergleichen, stellen sie die Korrelation fest. Darum lässt sich die Verschränkung nicht zur Übertragung von Information nutzen – obwohl die Mes-

sungen zeigen, dass die Korrelation instantan existiert. Der amerikanische Physiker und Philosoph Abner Shimony hat daher von einer friedlichen Koexistenz zwischen Quantenphysik und spezieller Relativitätstheorie gesprochen.

Vom Quantenpuzzle zur Quanteninformation

Die Experimente zur Verschränkung, die in den 1970er Jahren begannen, wurden durch die Entwicklung des Lasers ermöglicht. Anfangs regte man Atome so an, dass sie ihre Energie unter Aussendung von zwei miteinander verschränkten Photonen wieder abgaben. Bei modernen Experimenten verwendet man den Prozess der so genannten spontanen parametrischen Fluoreszenz (Bild S. 60). Während noch vor zehn Jahren nur wenige Laboratorien die Erzeugung verschränkter Photonen als Spezialität beherrschten, ist dies heute weltweiter Standard. Die Quellen wurden so weit verbessert, dass Zählraten von einer Million Photonenpaaren pro Sekunde keine Seltenheit mehr sind.

Ursprünglich hatten solche Experimente nur zum Ziel, die Quantenphysik zu testen

oder zumindest ihre kontraintuitiven Eigenschaften zu bestätigen. Zur Überraschung aller Beteiligten ergab sich in den 1990er Jahren eine völlig neue Entwicklung. Plötzlich entstand die Idee, die Verschränkung für neue Verfahren der Informationsübertragung und -verarbeitung zu nutzen. Stichworte dafür sind Quantenkryptografie, Quantenteleportation und Quantencomputer.

In der Quantenkryptografie können Alice und Bob, die miteinander kommunizieren möchten, mittels verschränkter Photonen einen geheimen Schlüssel etablieren; damit kodiert Alice ihre Nachricht, und Bob kann sie entschlüsseln (Bild S. 61). Dies ist die heute am weitesten entwickelte Anwendung der Verschränkung in der Informationstechnologie. Die Quantenkryptografie ist die einzige bisher bekannte Methode, die durch Naturgesetze gegen Abhören gesichert ist. Im Oktober 2008 wurde in Wien ein Quantenkryptografie-Netzwerk demonstriert, an dem verschiedene europäische Laboratorien teilnehmen.

Die wohl exotischste Anwendung der Verschränkung ist die Quantenteleportation. Damit lässt sich mit Hilfe verschränkter Photonen der Quantenzustand eines Photons auf ein anderes übertragen – im Prinzip über beliebige Entfernungen (siehe Bild links). Obwohl die Quantenteleportation gern mit dem »Beamen« aus der Fernsehserie »Raumschiff Enterprise« verglichen wird, ist die Teleportation von großen Objekten – genauer die Teleportation von deren Quantenzustand – pure Sciencefiction.

Teleportation gilt aber heute als ein ideales Mittel zur Informationsübertragung zwischen künftigen Quantencomputern. Ein Quantencomputer bildet sozusagen die ultimative Anwendung quantenmechanischer Prinzipien. Die Grundidee: Die Information wird nicht wie in einem herkömmlichen Computer durch klassische Zustände dargestellt, sondern durch quantenmechanische – etwa durch Zustände von Atomen oder Photonen, wobei verschiedene Anregungszustände verschiedenen Bitwerten entsprechen. Dadurch kommen völlig neue Grundprinzipien zur Verarbeitung der Information ins Spiel.

Während das klassische Bit nur entweder die Werte 0 oder 1 annehmen kann, existiert ein Quantenbit, Qubit genannt, in einer Superposition von 0 oder 1. Genau so, wie für ein Teilchen, das durch einen Doppelspalt geht, nicht festgelegt ist, welchen Spalt es passiert, nimmt ein Quantenbit quasi die beiden Zustände 0 oder 1 gleichzeitig ein. Dies scheint auf den ersten Blick einen Verlust an Gewissheit zu bedeuten, eröffnet jedoch ganz neue Möglichkeiten. Die wichtigste ist: Die

Quantenbits in einem Quantencomputer können miteinander verschränkt sein. Das ermöglicht Überlagerungen sehr komplexer Informationsinhalte. Weltweit beteiligen sich viele Laboratorien an einem intensiven Wettrennen um die Entwicklung solcher Geräte. Quantenbits lassen sich auf verschiedene Weise realisieren: als Atome oder Ionen, die in elektromagnetischen Fallen festgehalten werden, als Quantenzustände in einem Festkörper, oder sogar durch Photonen.

Das große Interesse am Quantencomputer rührt daher, dass er wegen der Überlagerung und Verschränkung der Daten einige Probleme viel schneller zu lösen vermag als sein klassisches Gegenstück. Manche Aufgaben, zum Beispiel das Zerlegen von großen Zahlen in Primfaktoren, sind mit einem klassischen Computer nicht innerhalb der Lebensdauer des Universums lösbar, mit einem Quantencomputer jedoch sehr schnell (siehe »Die Grenzen der Quantencomputer« von Scott Aaronson, Spektrum der Wissenschaft 7/2008, S. 90).

Über die Quantenphysik hinaus

Die Experimente zur Quanteninformatik haben die Beherrschung von Quantenzuständen komplexer Systeme gewaltig vorangetrieben. Bisherige Untersuchungen grundlegender Fragen kamen mit einigen wenigen – oft gar nur zwei – Qubits aus, doch die neuen experimentellen Methoden eröffnen den Zugang zu Vielteilchensystemen. Dies wird gewiss wieder zu neuen fundamentalen Resultaten führen.

Künftige Experimente werden neues Licht auf die Frage werfen, wie weit man überhaupt von einer vom Experiment unabhängigen physikalischen Realität sprechen kann. Schrödingers Katze kann sich zwar heute noch sehr sicher fühlen, nicht zu einem Testobjekt der Quantenphysiker zu werden – doch genauso sicher ist zu erwarten, dass in naher Zukunft die Grenze der Quantenphänomene sehr weit in Richtung großer Massen verschoben wird. Offenkundig beschränken sich die Herausforderungen, vor welche die Quantenphysik unseren Alltagsverstand stellt, nicht auf die atomare Welt.

All diese Arbeiten tragen vielleicht dazu bei, den Boden für den nächsten Schritt der physikalischen Theorie zu bereiten. Wie jede Naturbeschreibung, die der Mensch bisher gefunden hat, wird wohl auch die Quantenphysik eines Tages durch eine neue, tiefer gehende Beschreibung ersetzt werden – und die wird uns wohl noch mehr verblüffen als die derzeitige Quantenphysik. Die Experimente zur Realität der Quantenwelt bereiten diese Weiterentwicklung vor. ◀



Anton Zeilinger wurde 1945 in Ried im Innkreis (Österreich) geboren. Er studierte an der Universität Wien Physik und Mathematik und promovierte 1971 mit einer Arbeit über Neutronenphysik. Er ist einer der drei Namenspatrone der Greenberger-Horne-Zeilinger-Zustände. Seine Gruppe war im Jahr 2000 weltweit die erste, die diese GHZ-Zustände mit Photonen experimentell realisierte. Sein Team konnte zudem erstmals Quanteninterferenz an großen Molekülen nachweisen. Seit den 1990er Jahren untersuchte er verschränkte Lichtteilchen und nutzte sie zur Übertragung von Quanteninformation (so genannte Teleportation). Zeilinger hatte Professuren inne am Massachusetts Institute of Technology (Cambridge), an der TU München, TU Wien, Universität Innsbruck, Universität Melbourne sowie am Collège de France in Paris. Derzeit ist er Wissenschaftlicher Direktor am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) sowie Dekan der Fakultät für Physik der Universität Wien.

Arndt, M. et al.: Wave-Particle Duality of C_{60} Molecules. In: Nature 401, S. 680–682, 1999.

Gröblacher, S. et al.: An Experimental Test of Non-Local Realism. In: Nature 446, S. 871–875, 2007.

Springer, M.: Ein Physiker mit Fernwirkung – Anton Zeilinger. In: Spektrum der Wissenschaft 3/2008, S. 38–43.

Ursin, R. et al.: Quantum Teleportation Across the Danube. In: Nature 430, S. 849, 2004.

Zeilinger, A.: Einsteins Spuk. Goldmann, München 2007.

Zeilinger, A.: Einsteins Schleier. Goldmann, München 2005.

Zeilinger, A.: Quanten-Teleportation. In: Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 30–40.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/969246.