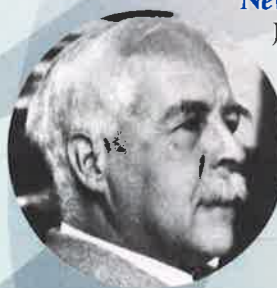
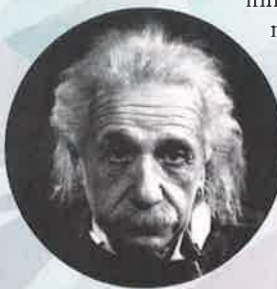


Physik der Photonen

Von Markus Aspelmeyer, Thomas Jennewein, Gregor Weihs und Anton Zeilinger

Dass Licht aus Teilchen bestehe, den Photonen, hielt Einstein für seine revolutionärste Idee. Heute, genau 100 Jahre nach ihrer Veröffentlichung, ist diese Annahme durch Experimente mit Photonen gut bestätigt. Die Laborphysik hat aber nicht nur ein besseres Verständnis der Quantentheorie ermöglicht, sondern auch zu einer ganz neuen Informationstechnologie, der Quantenkommunikation geführt.

Der wohl größte Physiker des 20. Jahrhunderts, **Albert Einstein** (1879 bis 1955), erhielt den Nobelpreis für Physik im Jahr 1921 für seine Arbeit von 1905 zuteil, seinem persönlichen *annus mirabilis*, dem Wunderjahr. Doch die Ehrung erhielt er nicht, wie man wohl glauben könnte, wegen seiner bahnbrechenden Arbeiten zur Speziellen Relativitätstheorie, sondern für die Einführung der **Photonen** in die Physik. Der Name »Photon« für ein kleinstes Teilchen, ein Quantum des Lichts geht jedoch auf einen Vorschlag des amerikanischen Physikochemikers **Gilbert Newton Lewis** (1875 bis 1946) aus dem Jahr 1926 zurück.



Einsteins Originalarbeit heißt »Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt«. Die wissenschaftliche Methode der **Heuristik** (heurisko, griechisch, ichfinde) verwendet plausible Arbeitshypothesen, die am Ende jedoch bewiesen werden müssen. Manchmal wird Einsteins Arbeit heutzutage irreführend dargestellt, als wäre der geniale Forscher durch Diskussion des **photoelektrischen Effekts** (siehe unten) zur

Photonenidee gelangt. Den Photoeffekt behandelte Einstein aber nur im letzten von acht Kapiteln, wo er weitere Argumente für seine Lichtquantenhypothese und deren Konsequenzen diskutiert.

Ein Blick in die Veröffentlichung zeigt vielmehr, dass Einstein in erster Linie einen viel spannenderen und tiefergreifenden Gedankengang dargelegt hat: Er führte das Photonenkonzept mit Hilfe des sehr raffinierten Vergleichs von Licht mit einem »idealen Gas« ein. Er verglich zunächst die **Entropie von Licht und von Gas**.

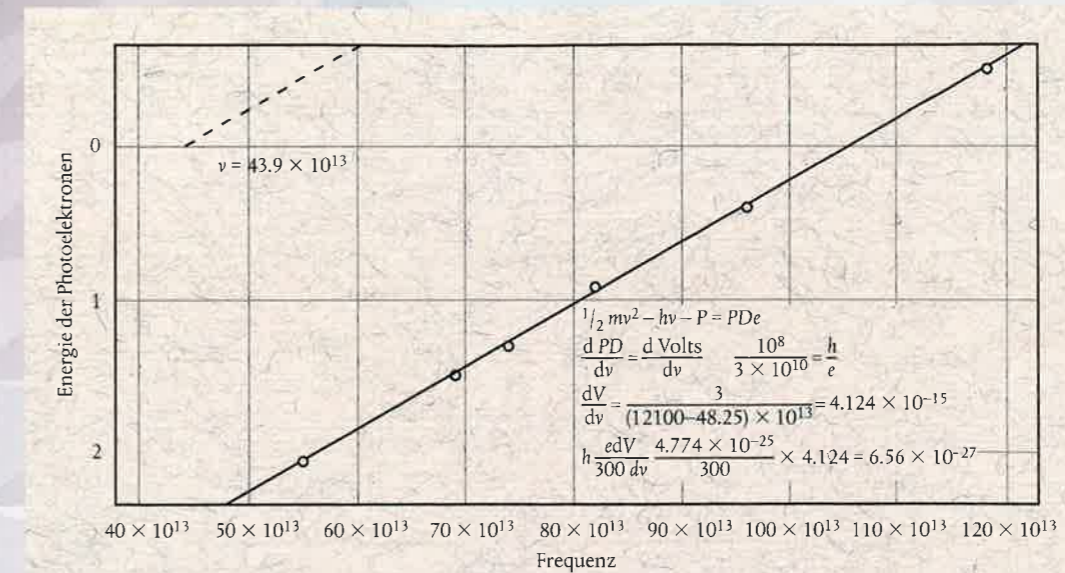
Die Entropie eines Systems ist ein Maß für dessen Komplexität. Sie ist um so größer, je mehr Möglichkeiten das System hat, einen betrachteten Zustand einzunehmen. Für eine gegebene Menge eines idealen Gases, das man sich aus punktförmigen Teilchen zusammengesetzt denkt, ist die Entropie um so größer, je größer das vom Gas erfüllte Volumen ist. Denn in einem größeren Volumen haben die Teilchen mehr Möglichkeiten sich auf unterschiedliche Art zu verteilen. (Genaugenommen besteht ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der Entropie und dem Volumen des Gases.)

Das ideale Gas verglich Einstein mit der so genannten **Schwarzkörperstrahlung**. Diese Strahlungsart entsteht zum Beispiel innerhalb eines Hohlraums mit heißen Wänden. Bereits einige Zeit vor Einsteins Arbeit hatten die Physiker die Intensitätsverteilung der Schwarzkörperstrahlung bestimmt, indem sie die die Strahlung aufzeichneten, die aus einem kleinen Loch solch eines Hohlraums austritt.

Einstein stellte nun fest, dass die Entropie der Schwarzkörperstrahlung exakt auf gleiche Art vom Volumen abhängt wie die Entropie eines idealen Gases. Es sei daher, so Einstein, eine natürliche An-

Einsteins Originalarbeit wird oft irreführend dargestellt.

Photonen der Wärmestrahlung und Atome eines Gases verhalten sich ähnlich.



nahme, dass Licht aus Lichtteilchen bestehe, so wie das ideale Gas aus Gasteilchen besteht. Im achten Kapitel diskutierte er neben dem Photoeffekt auch die **Photolumineszenz**, also die Strahlung von Atomen, die Licht zuvor in einen angeregten Zustand versetzt hat (die Astronomen sagen statt »Lumineszenz« meistens »Linienemission«, sie wird im Weltall bei einer Photoionisation von Gaswolken durch das UV-Licht von Sternen oder Quasaren beobachtet, siehe Seite 20).

Die Beobachtung dieses Effekts im Labor hatte bereits vor Einsteins Veröffentlichung gezeigt, dass die Wellenlänge der Lumineszenzstrahlung stets größer oder gleich der Wellenlänge des anregenden Lichts ist. Die emittierten Lichtquanten haben also niemals eine höhere Energie als die absorbierten Photonen. Mit der Teilchenhypothese lässt sich das leicht erklären, wenn ein Atom zur Anregung jeweils ein einzelnes Lichtteilchen absorbiert und die Reemission aus einem oder mehreren Photonen bestehen kann.

Was den **photoelektrischen Effekt** angeht, stellte Einstein fest, dass die von dem deutschen Physiker **Philip Lenard** (1862 bis 1947, Nobelpreis für Physik 1905) im Jahr 1902 gemessene Energie der Photoelektronen quantitativ sehr gut mit Hilfe der Lichtquanten verstanden werden könne. Darauf aufbauend sagte Einstein vorher, dass die maximale Energie der Elektronen proportional zur Frequenz des einfallenden Lichtes sein würde. Diese Vermutung bestätigte im Jahr 1915 der amerikanische Physiker Robert Andrews Millikan (1868 bis 1953) sehr exakt im Experiment (Graphik oben). Millikan erhielt aus der Steigung seiner gemessenen Geraden einen Wert für das **Plancksche Wirkungsquantum**, der sehr



Auch die Linienemission von Atomen stützt Einsteins Photonenhypothese.

Millikans Originalmessungen: Energie der Photoelektronen in Abhängigkeit von der Frequenz der einfallenden Strahlung. Der lineare Verlauf bestätigt eindrucksvoll Einsteins Vorhersage aufgrund der Photonenhypothese. (Quelle: Millikan 1915, Phys. Rev. 7, S.355)

genau mit unabhängig erhaltenen Werten von Messungen der Schwarzkörperstrahlung übereinstimmte, ein bis heute überzeugender Beweis für die Korrektheit des Quantenmodells für Licht. Für **Robert Andrews Millikan** selbst, der unter anderem für diese Arbeit im Jahr 1923 den Nobelpreis erhielt, war die Idee von vornherein alles andere als überzeugend. Rückblickend schrieb er: »Ich habe zehn Jahre meines Lebens damit verbracht, Einsteins Gleichung aus dem Jahr 1905 zu testen, und entgegen meinen Erwartungen war ich 1915 gezwungen, ihre eindeutige Gültigkeit im Experiment anzuerkennen – trotz der Unvernünftigkeit der Annahme, die allem zu widersprechen schien, was wir bis dahin über die Interferenz von Licht wussten.«

Im Jahr 1923 entdeckte der amerikanische Physiker Arthur Holly Compton (1892 bis 1962) den **Compton-Effekt**, indem er Röntgenstrahlung durch Materie schickte: Der energiereiche Lichtstrahl fächerte sich auf. Und je größer der Ablenkwinkel war, desto stärker verringerte sich die Photonenfrequenz – und damit die Energie der Lichtquanten.

Einsteins Lichtquantenhypothese erlaubte eine simple Erklärung dieses Phänomens: Einzelne Photonen streuen elastisch an den freien Elektronen der Materie und verlieren daher Energie – und zwar abhängig von der Streurichtung. Damit war



Comptons Effekt machte aus Einsteins Hypothese ein akzeptiertes Modell.

der experimentelle Nachweis der Energie- und der Impulserhaltung von Lichtteilchen gelungen, und viele Zeitgenossen akzeptierten nun endgültig, dass Einsteins Lichtquanten weit mehr als nur ein »heuristischer Gesichtspunkt« waren.

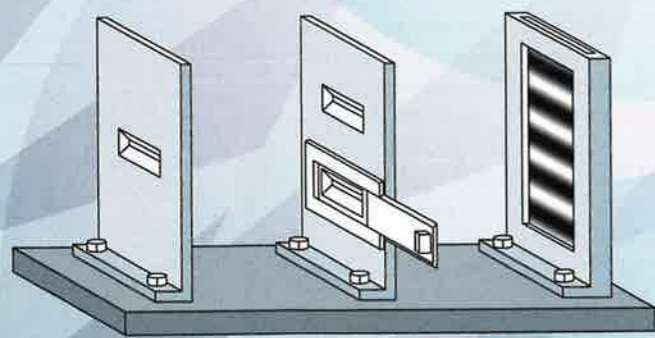
Quantenelektrodynamik Anfangs stand die Teilchentheorie des Lichts mit dem Auftreten von wellenartigen Interferenzerscheinungen in einem scharfen konzeptionellen Konflikt, den die Physiker erst mit der Entwicklung der Quantentheorie auflösen konnten. Alternative Formulierungen der Theorie entwickelten der österreichische Physiker **Erwin Schrödinger** (1887 bis 1961) und sein deutscher Kollege **Werner Heisenberg** (1901 bis 1976).

Danach war offensichtlich, dass man diese Theorie auch auf das elektromagnetische Feld anwenden sollte. So entstand die **Quantenelektrodynamik (QED)**, welche die Quantennatur und die Interferenz schließlich zugleich erklärte.

Ein Dreivierteljahrhundert zuvor hatte der schottische Physiker **James Clerk Maxwell** (1831 bis 1879) das Licht durch elektrische und magnetische Felder erklärt, die miteinander verwoben sind und sich wellenartig ausbreiten. Die QED bestreitet die Existenz solcher elektromagnetischen Felder nicht, sondern ersetzt lediglich die kontinuierlichen Felder Maxwells durch quantisierte Felder, deren Quanten die Photonen sind. Die QED erklärt auch die grundlegenden Eigenschaften des Photons: Es

ist masselos, trägt auch keine elektrische Ladung, und es bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit. Jede von Null verschiedene Ruhemasse würde im Widerspruch zu Einsteins Spezieller Relativitätstheorie stehen, die ebenfalls in die QED integriert ist.

Die Experimentalphysiker haben bis heute versucht, diese Eigenschaften des Photons so genau



Das Doppelspalt-Gedankenexperiment von Bohr. Ein von links einfliegendes Teilchen kann nach klassischer Anschauung nur entweder den oberen oder den unteren Spalt passieren. Die Quantenphysik aber sagt aus, dass beide dieser Möglichkeiten zum Ergebnis, dem Interferenzbild beitragen. (Quelle: Niels Bohr)

wie möglich zu überprüfen: Messungen mit Torsionswaagen ergaben eine Obergrenze für die Masse des Photons von 10^{-50} Kilogramm – zum Vergleich: Ein ruhendes Elektron hat eine Masse von 9.1094×10^{-31} Kilogramm. Andere Experimente legen die elektrische Ladung des Photons auf weniger als das 10^{-17} fache der Elektronenladung fest.

Ein letztes Aufbäumen Eine faszinierende Ironie der Geschichte ist, dass der photoelektrische Effekt zu Einsteins Zeit auch ohne die Annahme von Lichtquanten hätte verstanden werden können – und zwar durch eine der so genannten **semiklassischen Theorien**: Sie beschreiben das elektromagnetische Feld weiterhin klassisch und weisen nur dem materiellen Absorber Quanteneigenschaften zu. Erstaunlicherweise lassen sich viele Phänomene, die man der Quantennatur des Lichts zuschreibt, semiklassisch erklären. Im Fall des Photoeffekts zum Beispiel wäre es ausreichend gewesen anzunehmen, dass die Oberfläche der Photokathode Licht lediglich in quantisierten Energieeinheiten absorbiert oder emittieren kann.

Zu den Befürwortern der semiklassischen Theorien gehörten so große Physiker wie der Däne **Niels Bohr** (1885 bis 1962) und der Deutsche **Max Planck** (1858 bis 1947). Beide hatten sich nicht mit Einsteins revolutionärem Gedanken eines quantisierten elektromagnetischen Feldes anfreunden können und suchten daher nach alternativen Erklärungen. Bohr hat sogar eine Theorie zur Erklärung des Compton-Effekts vorgeschlagen, die rein auf dem Wellenmodell des Lichtes beruht. Allerdings konnten andere Forscher die »Bohr-Kramers-Slater-Theorie« später experimentell widerlegen.

Dennoch fragten sich die Physiker, ob es prinzipiell ausgeschlossen sei, eine semiklassische Erklärung für alle Lichtphänomene zu finden. Als klare Antwort ergab sich ein Ja. Denn es zeigte sich zum Beispiel beim Photoeffekt, dass die Emission der Photoelektronen nach dem Auftreffen von Strahlung spontan einsetzte. Wäre eine semiklassische Theorie richtig gewesen, dann hätte sich die Energie aus dem Feld zunächst einige Zeit akkumulieren müssen, bevor erste Ladungen freigesetzt werden konnten. In der QED hingegen bringt jedes Photon, sobald es absorbiert wurde, sofort die notwendige Energie zur Freisetzung eines Elektrons auf.

Auch Experimente zur **quantenmechanischen Verschränkung** lassen sich nicht semiklassisch deuten, wie die Physiker in den 1970er Jahren zeigen konnten.

In der Quantentheorie ist Licht eine Welle und ein Teilchenstrom

Spontane Photonenemission ist ein reiner Quanteneffekt

Interessanterweise haben Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (EPR) genau diese Korrelationen im Jahr 1935 unter ganz anderen Gesichtspunkten diskutiert (siehe unten). Einstein konnte zu der Zeit aber nicht ahnen, dass diese berühmte Arbeit einen weiteren unabhängigen Beweis für die Photonenhypothese liefern würde.

Das **Photonenkonzept** ist heute weit mehr als nur akzeptiert: In Labors von Experimentalphysikern weltweit lassen sich einzelne Photonen, Photonenpaare und sogar quantenmechanisch verschränkte Photonen erzeugen. Kommerzielle Anwendungen der Quantenphysik wie die Quantenkryptographie beruhen allein auf dem Verschieben und Detektieren von einzelnen Photonen.

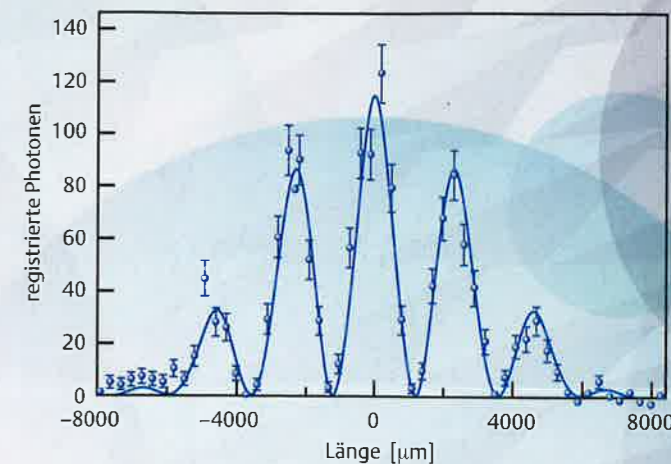
Der erste Nachweis von echten Einzelphotonen ist **John Clauser** im Jahr 1974 gelungen. Er wies nach, dass ein Photon sich an einem Strahlteiler nicht aufspalten kann, sondern stattdessen entweder aus dem einen oder dem anderen Ausgang hervortritt, was den Teilchencharakter des Photons unterstreicht. Als Lichtquelle diente Clauser dabei ein atomarer Kaskadenübergang, der Paare von Einzelphotonen produziert. Wenn eines der Photonen bereits registriert worden war, dann konnte er sich sicher sein, dass das zweite für sein Experiment zur Verfügung stand.



John Clausers Experiment zum Nachweis von Einzelphotonen. (Quelle: Autoren)

Heute benutzen die Forscher zur Erzeugung solcher Photonenpaare statt eines atomaren Übergangs wie Clauser die **spontane Fluoreszenz** in Kristallen. Mit den so erzeugten Einzelphotonen lässt sich auch ein traditioneller Doppelspaltversuch durchführen: Bereits Anfang des 19. Jahrhunderts konnte

Thomas Young (1773 bis 1829) beobachten, dass Licht, das auf einen Doppelspalt trifft, zu einem Interferenzmuster hinter den Spalten führen kann. Dies liess sich leicht im Einklang mit der damals vorherrschenden Wellentheorie des Lichtes erklären. Wie sieht es aber mit Teilchen, mit Einzelphotonen aus? In der Tat findet man im Experiment das von der Quantenphysik vorhergesagte perfekte Interferenzbild, selbst wenn nur einzelne Photonen nacheinander durch den



Quanteninterferenz einzelner Photonen am Doppelspalt. In diesem Experiment ist sichergestellt, dass sich zu jeder Zeit nur jeweils ein Photon zwischen Quelle und Detektor befinden konnte. Dennoch ergibt sich das bekannte Interferenzbild, wenn über viele Detektionen summiert wird. (Birgit Dopfer und Anton Zeilinger)

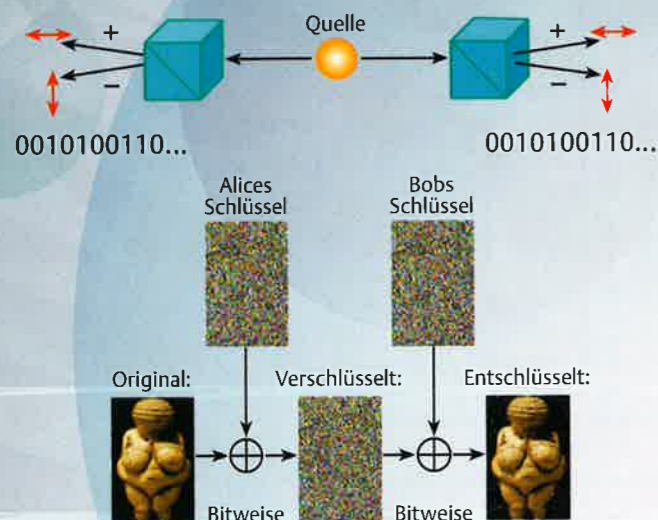
Doppelspalt fliegen (Diagramm oben). Die Tatsache, dass jedes Photon zu »wissen« scheint, dass es nicht in einem Interferenzminimum landen darf, zeigt, dass die Quantenphysik ebenfalls für einzelne Teilchen gilt, nicht nur für ein Ensemble von Lichtteilchen.

Verschränkung: Quantenspuk? Einstein hatte die Rolle des Zufalls in der Quantenmechanik stets kritisiert. Seine Kritik war jedoch keineswegs oberflächlich: Einstein bestand darauf, dass die Physik eine reale, faktische Welt beschreiben sollte und nicht nur unser Wissen darüber. Diese Meinung bildete den Kern der EPR-Veröffentlichung (siehe oben). Die Schlussfolgerung der Autoren war, dass die Quantenphysik die physikalische Realität nur unvollständig wiedergibt. Heute wissen wir aus Experimenten an verschränkten Photonen, dass es vielmehr unsere Vorstellung der physikalischen Realität ist, die wir ganz oder teilweise aufgeben müssen.

Den Begriff der quantenphysikalischen Verschränkung führte Erwin Schrödinger ein, indem er zwei auf besondere Art gekoppelte Quantensysteme beschrieb: Zwei verschränkte Teilchen sind allein durch ihre gemeinsamen Eigenschaften, wie etwa die gemeinsame Ausrichtung ihrer Spins oder ihrer Polarisation, charakterisiert – aber nicht durch ihre individuellen Eigenschaften. Die einzelnen Teilchen selbst besitzen zunächst keine tatsächliche Realität – entgegen der Einsteinschen Vorstellung einer physikalischen Realität für jedes Einzelteilchen eines Systems. Erst eine Messung legt eine Eigenschaft des einzelnen Teilchens fest.

Aufgrund der Verschränkung ist durch die Messung an dem einen Teilchen auch die Eigenschaft des zweiten Teilchens eindeutig bestimmt. Einstein nannte diese Konsequenz der Verschränkung eine

Die Realität ist nur das, was bereits beobachtet wurde.



Oben: Bell-Experiment und Quantenkryptographie. Verschränkte Photonen werden zu den Kommunikationspartnern Alice und Bob gesendet, die unabhängig voneinander Messungen an den Photonen in der gleichen Reihenfolge durchführen. Aufgrund der Quantenkorrelation sind die Messwerte strikt korreliert: Alice und Bob ermitteln auf diese Art identische Zufallszahlen. Ein Lauschangriff wäre eine vorzeitige Messung, die sich zwangsläufig verrät. Darunter: Schema der Übertragung eines Bildes der Venus von Willendorf über 350 Meter mit Hilfe von Quantenkryptographie. (Gruppe Zeilinger)



«geisterhafte Fernwirkung». Der Physiker **John Stewart Bell** konnte aber schließlich zeigen, dass die Korrelationen von verschränkten Quantenzuständen im Widerspruch zu mindestens einer von zwei Annahmen der klassischen Physik stehen sollten: zu der Annahme einer physikalischen Realität unabhängig von den durchgeführten Messungen, oder zu der Möglichkeit «geisterhafter Fernwirkung», die so genannte Einsteinsche Lokalität.

Kurz nach Bells Entdeckung haben die experimentellen Aktivitäten in dieser Richtung eingesetzt. Dabei kommen, ähnlich wie in den anfänglichen Experimenten, Atomkaskaden oder spontane Fluoreszenz zum Einsatz, um Photonenpaare zu erzeugen, die in ihrer Polarisation verschränkt sind. In den so genannten Bell-Experimenten lassen die Forscher verschränkte Paare in getrennte Richtungen von der Quelle fortfliegen. Dann werden mit weit voneinander entfernten Detektoren Polarisationsmessungen durchgeführt (siehe Graphik oben). Die Messreihenfolge in den beiden Detektoren ist dabei völlig belanglos. Denn ein entscheidender Aspekt der Quantenphysik ist die perfekte Zufälligkeit des Resultats einer Einzelmessung. Dies ist eine logische Konsequenz der **eigenschaftslosen Einzelteilchen vor der Messung**. Die gemessenen Korrelationen bestätigen eindrucksvoll die quantenmechanischen Vorhersagen.

Die Codes der Quantenkryptographie sind nicht zu knacken!

Bis heute haben die Physiker die Experimente immer weiter verfeinert, um auch die letzten Zweifel an einer verschwörerischen Natur auszumerzen. Bei Messungen an verschränkten Zuständen von mehr als zwei Teilchen treten die Widersprüche zwischen dem klassischen Weltbild und der Quantentheorie besonders frappierend hervor. Nach ihren Erfindern Greenberger, Horne und Zeilinger (GHZ) benannt, führen solche Zustände sogar zu Widersprüchen bei der Vorhersage einzelner Messergebnisse. Genauso wie im Zweiteilchenfall bestätigten auch hier die Experimente die Quantenmechanik.

Mehr als zwei Teilchen können auch miteinander verschränkt sein.

Inzwischen hat die Verschränkung einen ganz neuen Stellenwert erlangt: Durch die Entwicklung der Quanteninformationsverarbeitung wurde sie vom theoretischen Ärgernis Einsteins zu einer kostbaren technischen Ressource.

Quantenkommunikation Heutzutage gehört die Photonenphysik auf vielfältige Art zum Alltagsleben, ohne dass es den meisten Menschen bewusst ist. Sobald jemand seine Lieblings-CD anhört oder Computerdaten speichert, wenn er einen Cousin in Australien anruft oder mit einer Digitalkamera ein Foto schießt, kommen Photonen ins Spiel. Und auf ganz natürliche Art spielen sie eine Rolle, wenn menschliche Augen Licht wahrnehmen, das von der Umgebung reflektiert, gestreut oder emittiert wird. Alle diese Vorgänge lassen sich problemlos durch die Photonenphysik verstehen, auch wenn die Wellentheorie ebenfalls Erklärungen liefert.

Klassische Beschreibungen gibt es allerdings nicht für einige Zukunftstechnologien der Informationsverarbeitung, die sich gerade auf die quantentheoretischen Eigenschaften der Photonen stützen. Am weitesten fortgeschritten ist die Quantenschlüsselverteilung, auch **Quantenkryptographie** genannt (Graphik links). Die Idee dabei ist, dass zwei Kommunikationspartner, hier Alice und Bob genannt, einzelne Quantensysteme als Informationsträger verwenden. Im Gegensatz zu klassischen »Bits« spricht man dann von »Quanten-bits«, oder kurz **Qubits**.

Eine elegante Methode zur Erzeugung eines kryptographischen Schlüssels basiert auf der Verschränkung. Alice und Bob können dabei Messungen an verschränkten Qubits (z.B. Photonen) durchführen, die aufgrund der Quantenkorrelation identische Messreihen bei Alice und Bob ergeben werden. Diese Messreihen sind zudem perfekt zufällig und lassen sich bestens als kryptographische Schlüssel einsetzen. Da nun jedes Qubit, beziehungsweise jedes einzelne Quantensystem extrem sensitiv ist, ist jeder Angriff auf den Inhalt des Qubits identisch mit einer Messung des Quantensystems, wodurch die Qubits unwiederbringlich gestört werden. Diese Störung führt zu Übertragungsfehlern für die legitimen Kommunikationspartner, wodurch der Lauschangriff sich verrät.

Die Sicherheit der Schlüsselübertragung wird bei der Quantenkryptographie also durch die Ge-

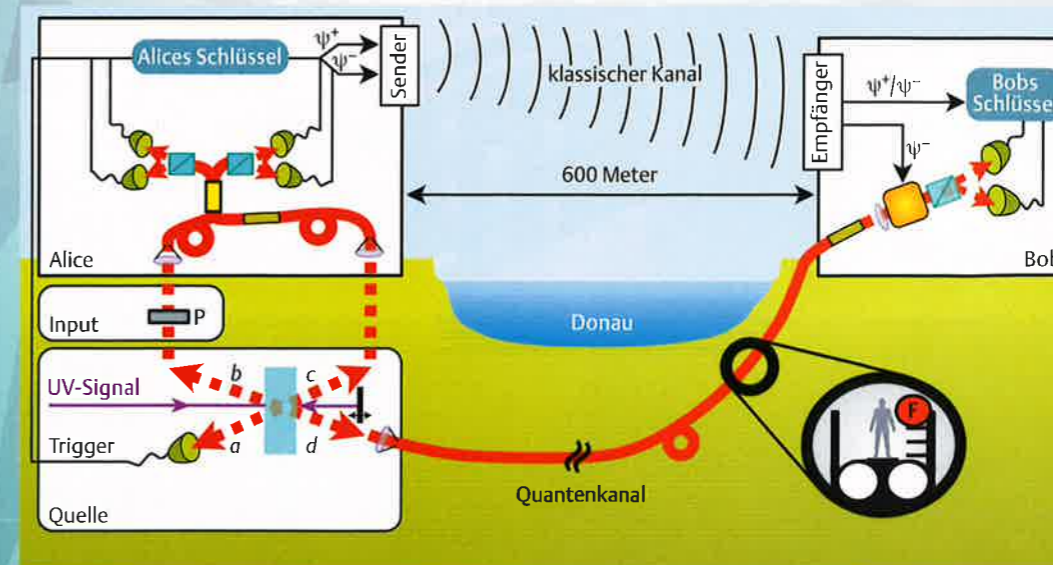
setze der Quantenphysik gewährleistet – anders als in der klassischen Kryptographie, deren Sicherheit immer auf der Annahme beruht, dass der Angreifer nicht über genügend Computerleistung zum Knacken des Schlüssels verfügt.

Eine weitere wichtige Anwendung der Quantenkommunikation ist die **Quantenteleportation** (Graphik rechts unten), welche die Übertragung von Quantenzuständen über beliebige Distanzen ermöglicht, ohne dabei den Träger selbst transportieren zu müssen. Die Teleportation ist nicht nur eine der faszinierendsten Konsequenzen der quantenphysikalischen Verschränkung, sondern auch ein wichtiges Instrument zur Übertragung von Verschränkung in Quantennetzwerken und zur Kommunikation zwischen Quantencomputern.

Die Realisierung der Qubits, den wichtigsten Grundelementen der Quanteninformation, basiert zum Beispiel auf Photonen. Diese Teilchen haben den Vorteil sich schnell und über große Distanzen übertragen zu lassen. In Experimenten wurde bereits Quantenkryptographie in optischen Glasfasern über Distanzen von über 100 Kilometern demonstriert, und in der Freiraumübertragung sind bereits 23 Kilometer erreicht worden.

Als langfristiges Ziel soll die Übertragung der Photonen auch in den Weltraum auf Satelliten verlagert werden. Nur dort lassen sich aufgrund des luftleeren Raums genügend große Distanzen erzielen, um eine globale Quantenvernetzung mit verschränkten Photonen zu ermöglichen (Graphik oben rechts). Ein weiterer faszinierender Aspekt des Weltraums ist die einzigartige Möglichkeit, Quantenkorrelationen über Entfernungen zu testen, die erdgebundene Experimente nicht erzielen können. Ein erster Schritt in diese Richtung kann sein, eine Quelle für verschränkte Photonen an der Internationalen Raumstation ISS anzubringen und zwischen zwei weit entfernten Bodenstationen erstmals Quantenkorrelationen über mehrere tausend Kilometer zu beobachten.

Quantenphysik und Teleportation: vom Traum zur Realität



Oben: Quantenkommunikation via Satelliten. Mit Unterstützung der ESA wurden bereits Studien und Tests durchgeführt. Das Fernziel ist eine weltumspannende Kommunikation, etwa unter Anwendung der Quantenkryptographie. (Konzept: Autoren, Universität Wien)

Unten: Experiment der Autoren zur Teleportation über die Donau im Jahr 2004. Ein verschränktes Photonenpaar dient als Quantenkanal und ein elektrischer Puls als klassisches Signal. Das verschränkte Paar wird aufgeteilt auf die Sendestation Alice und die Empfangsstation Bob. Dabei gelingt es, den gesamten Quantenzustand eines einzelnen Qubits von einem Teilchen auf ein anderes zu übertragen, ohne dass die beiden jemals in direkte Wechselwirkung kamen. Zunächst kombiniert Alice das Input-Photon mit einem der verschränkten Photonen, damit die beiden Photonen einen zufälligen verschränkten Zustand annehmen. Durch die Korrelation mit dem zweiten Photon bei Bob wird dieses dabei in einen Zustand projiziert, der weitgehend dem ursprünglichen entspricht. Exakt in den ursprünglichen kann er erst durch die Nachricht gebracht werden, die über den klassischen Kanal kommt. (Ursin et al. Nature)