

Quantenradierer

In der Mikrowelt hat jedes Ereignis sowohl einen Wellen- als auch einen Teilchenaspekt – aber nur einer von beiden lässt sich zu gegebener Zeit beobachten. Ausgetüftelte Experimente zeigen, wie durch Löschen des einen Aspekts der andere erscheinen kann.

Von Stephen P. Walborn, Marcelo O. Terra Cunha, Sebastião Pádua und Carlos H. Monken

Ein englischer Gelehrter führte im Jahre 1801 eines der berühmtesten Experimente in der Geschichte der Physik durch. Zwei Jahre später beschrieb er es in einem Vortrag vor der Londoner Royal Society:

»Ich bohrte ein kleines Loch in eine Jalousie und bedeckte es mit einem dicken Stück Papier, das ich mit einer feinen Nadel durchstochen hatte ... Ich brachte in den Sonnenstrahl einen Kartenstreifen, der nur ein dreißigstel Inch [0,8 Millimeter] breit war, und beobachtete seinen Schatten, entweder an der Wand oder auf anderen Karten, die ich in verschiedenen Abständen hielt.«

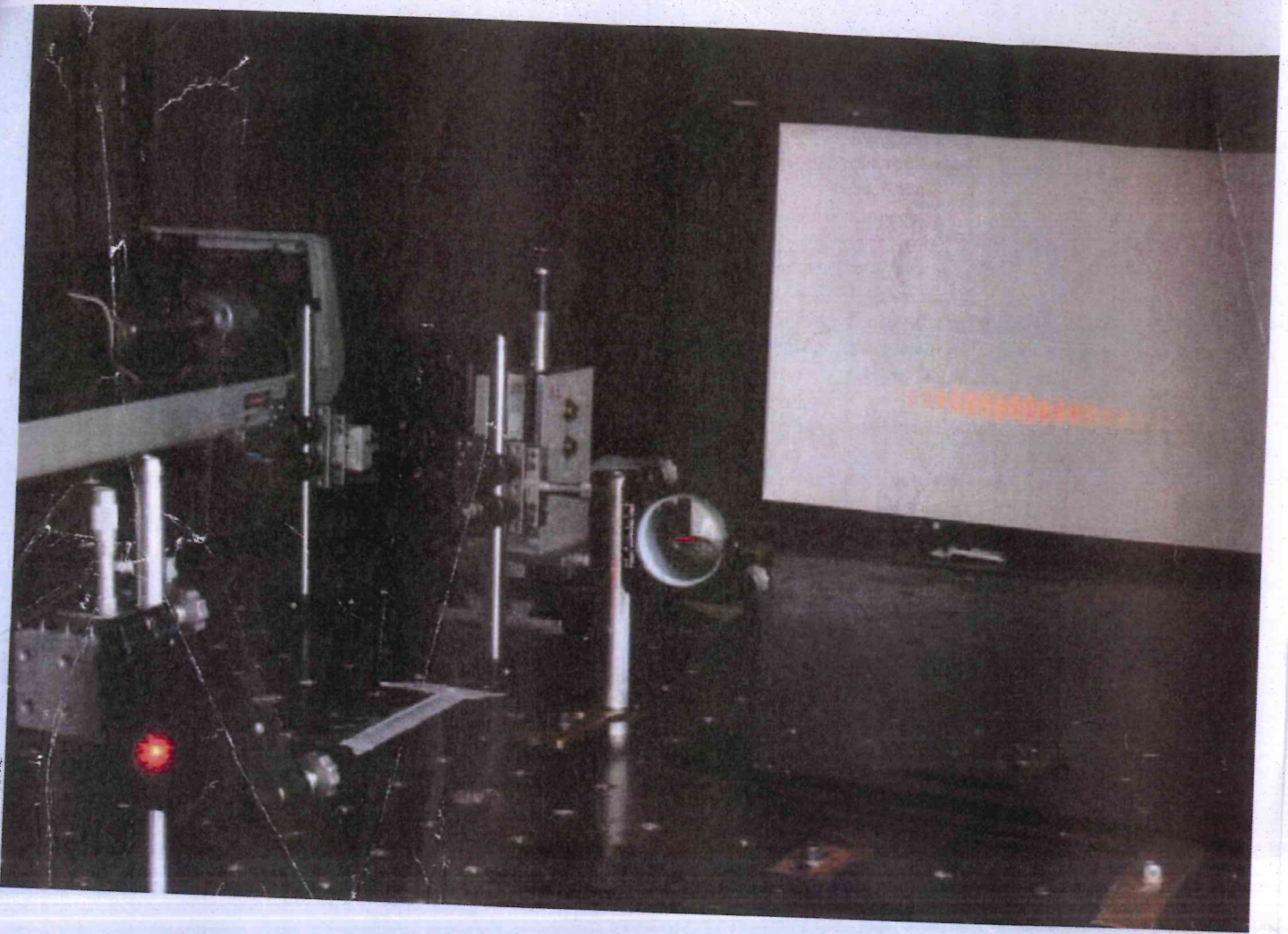
Was Young auf der gegenüberliegenden Wand sah, war nicht wie erwartet ein einzelner dünner Schatten, sondern eine ganze Reihe von hellen und dunklen Streifen in gleichen Abständen, wobei der mittlere Streifen stets hell blieb. Wenn er das Licht auf einer Seite des schmalen Kartenstücks blockierte, verschwanden die Streifen. Daraus schloss er, dass das Muster nur entstand, wenn das Licht beide Seiten der Karte passierte. Aber wie konnten zwei Lichtstrahlen zusammen einen dunklen Streifen erzeugen? Und warum war das Zentrum des Schattens nicht dunkel, sondern stets hell? Das lässt sich kaum erklären, wenn das Licht – wie Isaac Newton und viele andere Physiker postulierten – aus Partikeln bestehen soll, die sich stets als gerade Strahlen ausbreiten.



Mit seinem »Kartentrick« löste Young eine Revolution der Physik aus, deren Nachbeben noch immer andauern. Sein Experiment gehört heute in jedes physikalische Anfängerpraktikum; dort wird es meist mit zwei in schwarzen

Mikrofilm geätzten Schlitzen als »Doppelspaltversuch« durchgeführt. Das von Young beobachtete Phänomen – die Interferenz – lässt sich ganz einfach mit Wellen in einem Wassertank veranschaulichen. Somit schien sein Experiment zu

$d \sin \alpha = d \cdot \sin \alpha = \dots$



beweisen, dass Licht aus Wellen besteht, wie der niederländische Physiker Christiaan Huygens angenommen hatte. Aber damit war diese Geschichte noch nicht zu Ende.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckten die Physiker, dass Licht sich in mancher Hinsicht doch so verhält, als bestünde es aus Teilchen – kleinsten Strahlungsquanten oder Photonen. 1909 wiederholte Geoffrey Taylor an der Universität Cambridge eine Variante von Youngs Experiment und demonstrierte an einzelnen Photonen ein weiteres Interferenzphänomen, die Brechung. Indem Taylor das Licht so sehr abschwächte, das nur noch ein Photon nach dem anderen den Schirm erreichte, schloss er jede Möglichkeit von Interferenz zwischen den Photonen aus. Dennoch fand er, nachdem er das Resultat vieler einzelner Photondurchgänge registriert hatte, dasselbe Muster von Brechungstreifen wie bei stärkerem Licht. Offensicht-

lich vermag ein einzelnes Photon mit sich selbst zu interferieren.

Das gilt nicht nur für Photonen. Materieteilchen wie Elektronen, Neutronen und sogar Fulleren-Moleküle aus sechzig Kohlenstoffatomen zeigen das selbe wellenartige Verhalten. Die Selbst-Interferenz einzelner Teilchen ist das größte Rätsel der Quantenphysik; der amerikanische Nobelpreisträger Richard Feynman nannte es sogar »das einzige Geheimnis« der Quantentheorie.

Das Prinzip der verzögerten Wahl

Kürzlich haben Physiker dieses Geheimnis mit Hilfe so genannter Quantenradierer ein wenig gelüftet; dabei lassen sich die Interferenzstreifen tatsächlich nach Belieben ein- und ausschalten. Unsere Gruppe hat mittels einer verfeinerten Version des Youngschen Experiments einen Quantenradierer konstruiert und damit das Prinzip der »verzögerten Wahl« demonstriert: Der Experimentator kann

In einer modernen Version des klassischen Doppelspaltversuchs von Thomas Young beleuchtet ein Helium-Neon-Laser ein Stück Mikrofilm, in das zwei Spalte in 0,1 Millimeter Abstand geätzt wurden. Anschließend passiert der Laserstrahl eine Streulinse (Mitte), die ein vergrößertes Bild der Interferenzstreifen auf den Schirm im Hintergrund wirft.

seine Entscheidung für Welle oder Teilchen sogar noch fällen, nachdem das Teilchen nachgewiesen wurde. Das Experiment mit verzögerter Wahl mutet an wie eine Veränderung der Vergangenheit. Doch wie wir erklären werden, ändern Quantenradierer die Geschichte nicht wirklich. Aber sie verdeutlichen, wie Interferenzphänomene in der Quantenmechanik entstehen.

Warum im klassischen Doppelspaltversuch Interferenzstreifen auftreten, ist ▷

$$d \sin \alpha = d \cdot \sin \alpha = d \cdot \sin \alpha = (m \cdot \lambda) / 2$$

▷ kein Geheimnis. Gemäß der Wellentheorie des Lichts überlagern sich zwei kohärente Lichtstrahlen gleicher Wellenlänge. Die Extremfälle sind konstruktive Interferenz – die Wellen verstärken einander – und destruktive Interferenz, das heißt völlige Auslöschung.

Bei Youngs Versuch sind die Wege von jedem Spalt zu einem gegebenen Beobachtungspunkt in der Regel nicht gleich lang. Wenn sie gleich sind – das heißt, wenn der Beobachtungspunkt symmetrisch zwischen den Schlitzen liegt –, treffen die Wellen einander in Phase und interferieren konstruktiv. Das erklärt, warum Young in der Mitte des »Schattens« seiner Karte immer einen hellen Streifen sah. Zu beiden Seiten dieses Mittelstreifens liegt ein Gebiet, zu dem die eine Welle exakt eine halbe Wellenlänge mehr zurücklegen muss als die andere. Dort interferieren die Wellen destruktiv, und ein

dunkler Streifen erscheint. Als Nächstes kommt eine Region, bis zu der die eine Welle exakt eine ganze Wellenlänge mehr braucht als die andere; hier gibt es wiederum konstruktive Interferenz und einen hellen Streifen.

Der Wurf der Quantenmünze

Um das Unerwartete an der Quanteninterferenz zu verstehen, betrachten wir zunächst einen Münzwurf. Bei einer fairen Münze ist die Wahrscheinlichkeit für Kopf 50 Prozent und für Zahl ebenso. Die Wahrscheinlichkeit W dafür, Kopf oder Zahl zu erhalten, ist die Summe der individuellen Wahrscheinlichkeiten:

$$W(\text{Kopf oder Zahl}) = W(\text{Kopf}) + W(\text{Zahl}) = 100 \text{ Prozent}$$

Nun betrachten wir einen »Quantenmünzwurf«, der auf Youngs Versuch beruht. Wir werfen einen Lichtstrahl auf den Doppelspalt und platzieren dahinter

in gewissem Abstand einen Photodetektor. Um das Paradox zuzuspitzen, bringen wir den Detektor in die Mitte eines dunklen Interferenzstreifens. Nun schwächen wir das Licht so sehr ab, dass nur noch ein Photon nach dem anderen den Doppelspalt passiert. Zuerst bedecken wir Spalt 2 und finden beispielsweise, dass 5 Prozent der Photonen durch Spalt 1 gehen und den Detektor auslösen. Das heißt, $W(\text{Spalt 1}) = 5 \text{ Prozent}$. Dann blockieren wir Spalt 1 und stellen das Gleiche bezüglich Spalt 2 fest: $W(\text{Spalt 2}) = 5 \text{ Prozent}$. Jetzt geben wir beide Spalte frei, öffnen damit zwei mögliche Pfade und würden erwarten, 10 Prozent der Photonen nachzuweisen.

Doch weit gefehlt. Da wir den Detektor in einen dunklen Streifen platziert haben, können wir das Experiment stundenlang fortsetzen, ohne ein einziges Photon zu sehen. Das heißt:

$$W(\text{Spalt 1 oder Spalt 2}) = 0 \text{ Prozent} \neq W(1) + W(2)$$

Die unanschauliche Erklärung der Quantenphysiker für dieses überraschende Verhalten ist das Superpositionsprinzip. Es besagt, dass wellenartige Ereignisse sich nicht gemäß einer Wahrscheinlichkeit zusammensetzen, sondern gemäß einer Wahrscheinlichkeitsamplitude. Mathematisch gesprochen handelt es sich dabei nicht um eine positive reelle Zahl, sondern um eine komplexe Zahl wie $0,1 + 0,2i$, wobei i für die Quadratwurzel aus -1 steht.

Philosophisch betrachtet ist die Bedeutung von Wahrscheinlichkeitsamplituden nach wie vor ein großes Rätsel. Jedenfalls verhält sich eine »Quantenmünze« nicht wie ein klassisches Geldstück. Infolge des Superpositionsprinzips kann ein Photon – unsere »Quantenmünze« – eine Kombination von Kopf und Zahl darstellen.

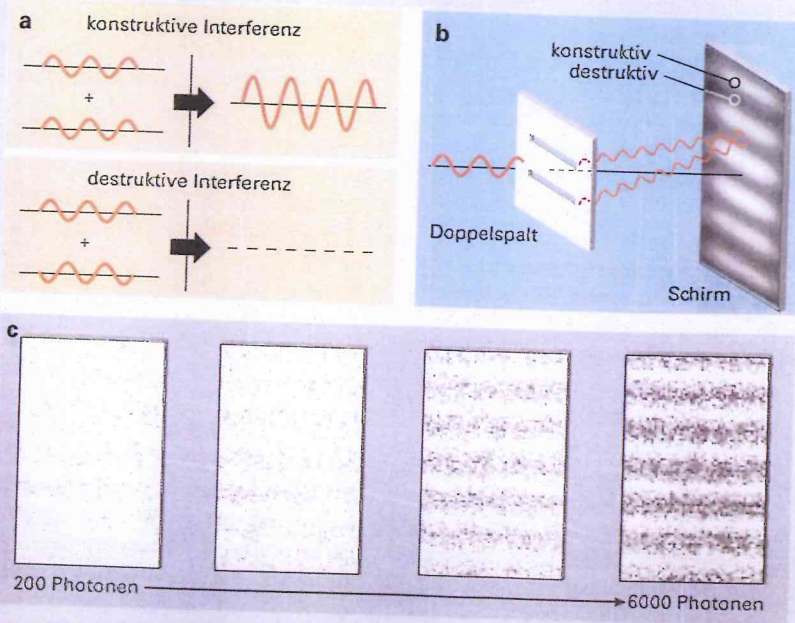
Wem all das ziemlich unglaublich vorkommt, der ist in guter Gesellschaft. Schon die Schöpfer der Quantenphysik stritten um die Grundbegriffe, und einige akzeptierten die Theorie, die sich ihnen aufdrängte, bis zuletzt nicht. Max Planck postulierte zwar im Jahre 1900 als Erster, Licht verhalte sich so, als bestünde es aus Quanten, aber er hielt das nur für eine Art mathematischen Trick, der eher zufällig zu den experimentellen Daten passe.

Hingegen akzeptierte Einstein zwar die Existenz der Lichtquanten, war aber mit der späteren Entwicklung der Quantentheorie gar nicht einverstanden. Er

Ein Lichtquant interferiert mit sich selbst

Interferenz ist ein typisches Wellenphänomen. Wenn zwei Lichtwellen in Phase sind, verstärken sie einander; wenn sie eine halbe Wellenlänge versetzt schwingen, löschen sie einander aus (a). Nach Durchgang durch den Doppelspalt tritt konstruktive Interferenz dort ein, wo die Wege der beiden Strahlen gleich lang sind – in der Mitte des Schirms – oder sich um ganze Wellenlängen unterscheiden. Wo die Wegdifferenz eine halbe

Wellenlänge oder ein Vielfaches davon beträgt, entstehen durch destruktive Interferenz dunkle Streifen (b). Sogar wenn das Licht so schwach ist, dass immer nur ein Photon nach dem anderen den Doppelspalt passiert, erscheinen mit der Zeit – wie in dieser Computersimulation – die typischen Interferenzstreifen (c). Offenbar kann ein Photon durch beide Spalte gleichzeitig gehen und mit sich selbst interferieren.



ALLE GRAFIKEN: AMERICAN SCIENTIST

Handwritten note:
 $d \sin \alpha = d \cdot \sin \alpha = (m \cdot \lambda) / 2$ d.h. m.b.

konnte sich nicht an die Idee gewöhnen, dass das, was wir beobachten und infolgedessen real nennen, ein Zufallsprodukt sein soll – denn die Quantenmechanik handelt von Wahrscheinlichkeiten und sagt darum nichts darüber, wo das Photon ist, sondern nur, wo es mit welcher Wahrscheinlichkeit auftauchen wird.

Einstein widersetzte sich auch der Folgerung, diese Realität existiere nur dann in einem eindeutigen Zustand, wenn wir sie beobachten. Er drückte diese Unzufriedenheit gegenüber Abraham Pais mit den Worten aus: »Glauben Sie, dass der Mond nur existiert, wenn Sie ihn anschauen?« Interessanterweise war vor allem Einsteins Kritik immer wieder Anlass für wichtige Untersuchungen über die Grundlagen der Quantenmechanik.

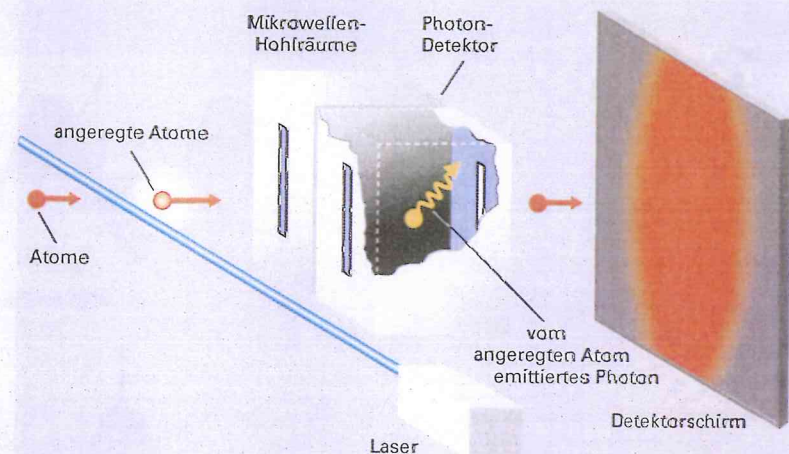
Ende der 1920er Jahre formulierte der dänische Physiker Niels Bohr die »Kopenhagener Deutung«; sie ist bis heute die am breitesten akzeptierte Methode, den Paradoxien der Quantenphysik auszuweichen. Insbesondere besagt Bohrs Komplementaritätsprinzip, dass bei komplementären Beobachtungsgrößen – wie Ort und Impuls – die genaue Kenntnis der einen jede Kenntnis der anderen ausschließt. Der Ort ist eine »teilchenartige« Observable: Ein Teilchen hat eine bestimmte Position im Raum, eine Welle nicht. Hingegen ist der Impuls eine wellenartige Observable; 1927 postulierte Louis de Broglie, dass ein Teilchen, etwa ein Elektron, mit einem bestimmten Impuls auch eine bestimmte Wellenlänge erwirbt. Nach Bohr ist jedes Quantenobjekt sowohl Welle als auch Teilchen, und das Verhalten, das wir beobachten, hängt einfach von der Art der Messung ab, die wir wählen. Wenn wir eine teilchenartige Eigenschaft messen, dann zeigt das Objekt teilchenartiges Verhalten. Entschließen wir uns später, eine wellenartige Eigenschaft zu messen, werden wir wellenartiges Verhalten beobachten. Doch beides zugleich geht nicht.

Bei mehreren Gelegenheiten suchte Einstein in der Kopenhagener Deutung Lücken nachzuweisen. Unter anderem heckte er folgendes Gedankenexperiment aus: Eine Blende mit Doppelspalt hängt an empfindlichen Federn, sodass sie frei schwingen kann. Wenn ein Photon am Doppelspalt gestreut wird, versetzt es der Blende einen schwachen Stoß. Indem ein Beobachter den Rückstoß des Geräts sowie die spätere Position des Photons re-

Ein hypothetischer Quantenradierer

Im Gedankenexperiment von Scully, Englert und Walther tritt ein mittels Laser hoch angeregtes Atom durch einen Doppelspalt. Dahinter liegen zwei Mikrowellen-Hohlräume, in denen das Atom spontan ein Photon emittiert und dadurch zu erkennen gibt, durch welchen Spalt es gegangen ist. Nach Bohrs Komplementaritätsprinzip hat es durch die Preisgabe von »Welcher-Weg-Information« Teil-

chencharakter angenommen und kann sich nicht mehr wie eine Welle verhalten. Darum entsteht bei wiederholten Durchläufen auf dem Schirm kein Interferenzstreifenmuster, sondern ein diffuser Fleck. Nun kommt der »Quantenradierer« ins Spiel: Durch Entfernen der Trennwand zwischen den Hohlräumen wird die Welcher-Weg-Information gelöscht und die Interferenz wiederhergestellt.



gistriert, könnte er feststellen, durch welchen Spalt das Photon gegangen ist. Zugleich, so Einstein, würde die – erst nach Durchgang des Photons vollzogene – Rückstoßmessung die Trajektorie des Photons nicht verändern, und darum wären weiterhin die Interferenzstreifen zu beobachten. Aus dem Abstand der Streifen ginge die Wellenlänge hervor, zweifellos eine wellenartige Eigenschaft. Somit wären sowohl Impuls als auch Trajektorie bekannt – und das Komplementaritätsprinzip wäre widerlegt.

Doch Bohr entdeckte rasch einen Fehler in Einsteins Argument. Er berief sich dabei auf Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip. Dieses Grundprinzip der Quantenmechanik gibt trotz seines vage klingenden Namens sehr bestimmt Auskunft über die höchstmögliche Präzision, mit der komplementäre Variable gemessen werden können. Der Rückstoß des Doppelspaltgeräts stört das System unausweichlich und erzeugt eine gewisse Unbestimmtheit beim Nachweis des Photon-Orts auf dem Detektorschirm. Diese Unbestimmtheit reicht gerade aus, die Interferenzstreifen so zu verschmie-

ren, dass der Impuls nicht mehr gemessen werden kann.

Viele Jahre lang galt Heisenbergs Prinzip als Garant der Komplementarität. Erst spät kam die Hypothese auf, die Komplementarität sei fundamental, und die Position eines Teilchens lasse sich auf eine Weise markieren, die seinen Impuls nicht verändert. Diese Idee führt zu einer Klasse von Experimenten, die Quantenradierer genannt werden.

Welcher Weg?

Vor rund zwanzig Jahren sorgten Marlan O. Scully und Kai Drühl – damals am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und an der University of New Mexico – unter Quantenphysikern für einiges Aufsehen. Sie behaupteten: Wenn die Information über die Trajektorie des Objekts ohne merkliche Störung gewonnen werden kann, dann sollte die Interferenz verschwinden, weil die Komplementarität das verlangt. Doch wenn diese Information anschließend »ausradiert« wird, sollte die Interferenz wiederkehren. Man könnte sogar sagen: »Interferenz ist gleich Ignoranz« (über den Weg des Teilchens). ▶

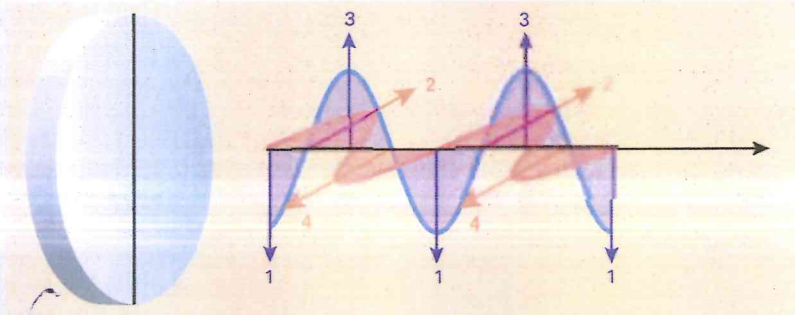
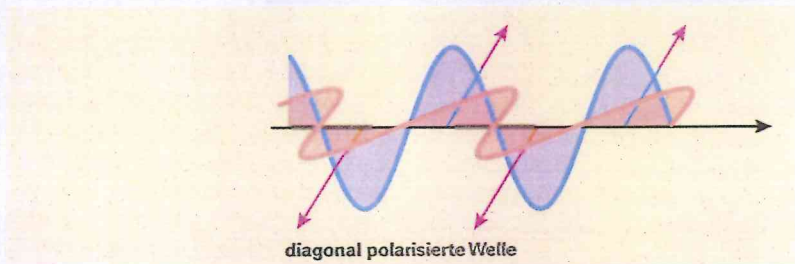
Handwritten notes:
 $E = h \cdot \nu$
 $\lambda = \frac{h}{p}$
 $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$
 $\lambda = \frac{h \cdot c}{E}$
 $p = \frac{h}{\lambda}$
 $p = \frac{h \cdot E}{h \cdot c} = \frac{E}{c}$



Polarisation als Welcher-Weg-Information

Unsere Version des Quantenradierers verwendet die Polarisation als Wegmarkierung. Eine Lichtwelle besteht aus elektrischen und magnetischen Wechselfeldern; wir zeigen nur das elektrische Feld (oben). Da es im gezeigten Fall gleich große horizontale und vertikale Komponenten hat (rot und blau), ist die Welle diagonal polarisiert (violette Pfeile). Eine so genannte Wellenplatte verlangsamt eine Komponente um eine Viertelwellenlänge (unten). Dadurch ro-

tiert das resultierende elektrische Feld (nummerierte Pfeile) gegen den Uhrzeigersinn um die Fortpflanzungsrichtung; es entsteht eine linkszirkular polarisierte Welle. Verlangsamung der anderen Komponente hätte eine rechtszirkular polarisierte Welle erzeugt. Steht die Achse der Wellenplatte vertikal, verwandelt sie diagonal polarisiertes Licht in zirkular polarisiertes. Steht die Achse diagonal unter 45 Grad, so verwandelt sie vertikal polarisiertes Licht in zirkular polarisiertes.



Eine Wellenplatte verwandelt eine diagonal polarisierte Welle in eine zirkular polarisierte.

rotieren, so dass die Lichtwelle sich wie eine rechts- oder linkshändige Schraube dreht. Solche Wellen heißen (rechts- oder links-) zirkular polarisiert.

Mit so genannten Wellenplatten lässt sich die Polarisationsrichtung verändern oder ein linear polarisierter Strahl sogar in einen zirkular polarisierten verwandeln. Eine weitere optische Komponente ist ein Polarisator, der nur Licht einer bestimmten Polarisation durchlässt. Passt ein zirkular polarisierter Strahl einen horizontalen Polarisator, so wird der vertikale Anteil der Welle zurückgehalten, und übrig bleibt nur ein horizontal polarisierter Strahl, der halb so intensiv ist wie der ursprüngliche.

Angenommen, wir wiederholen nun Youngs Experiment mit vielen horizontal polarisierten Photonen. Hinter jeden Spalt setzen wir je eine Viertelwellenplatte, und zwar so, dass die eine Platte die horizontal polarisierten Photonen in rechtszirkular polarisierte verwandelt, die andere in linkszirkular polarisierte. Wie wir erstaunt feststellen, verschwinden die Interferenzstreifen; an ihrer Stelle erscheint ein einzelner Lichtfleck, der im Zentrum am intensivsten ist. Wenn wir die Photonverteilung grafisch darstellen, erhalten wir eine Glockenkurve.

Verschränkung statt Unbestimmtheit

Was ist mit der Interferenz geschehen? Die Photonen scheinen sich nicht mehr wie Quantenmünzen zu benehmen, sondern wie klassische Objekte. Die Wellenplatten haben jeden Spalt eindeutig mit einer bestimmten Polarisation verknüpft. Mit Hilfe eines Zirkularpolarisators könnten wir die Polarisation messen und feststellen, durch welchen Spalt jedes Photon gegangen ist. Wohlgedacht, um das Interferenzmuster zu zerstören, müssen wir die Polarisation gar nicht wirklich messen. Es genügt, dass uns die Welcher-Weg-Information im Prinzip zur Verfügung steht. Durch bloßes Dummsstellen lässt sich die Interferenz nicht wieder hervorzaubern.

Um einen Quantenradierer vorzuführen, genügt es aber nicht, den Weg des Photons zu markieren; man muss auch zeigen, wie diese Information »ausradiert« werden kann. Wir verwenden dafür einen Linearpolarisator, den wir auf waagrechte Polarisation einstellen und zwischen die Viertelwellenplatten und den Detektor bringen. Wenn wir nun das Experiment wiederholen, sehen

▷ Später schlugen Scully, Berthold-Georg Englert und Herbert Walther vom Garching Max-Planck-Institut für Quantenoptik ein praktisches Verfahren dafür vor. Als interferierendes Objekt dient ein Atom, dessen Elektronen auf ein sehr hohes Energieniveau angeregt sind. Hinter jedem Spalt liegt ein Mikrowellen-Hohlraum; er soll ein Photon einfangen, das vom Atom beim spontanen Übergang in ein niedrigeres Anregungsniveau emittiert wird. Indem der Beobachter einfach nachsieht, welcher Hohlraum das Photon enthält, kann er sagen, durch welchen Spalt das Atom gegangen ist. Aus der Komplementarität folgt, dass die Interferenzstreifen verschwinden müssen. Doch wenn der Experimentator die Trennwand zwischen den zwei Hohlräumen herausnimmt, wird die zusätzliche »Welcher-Weg-Information« gelöscht, und – simsalabim – die Streifen sind wieder da.

Bisher hat niemand den Scully-Englert-Walther-Vorschlag zu realisieren vermocht. Doch wir haben ein analoges Experiment mittels Photonen durchgeführt, das viel weniger Schwierigkeiten macht. Wir verwenden als Wegmarkierung die Polarisation. Licht hat wie jede elektromagnetische Welle eine Polarisationsrichtung, die aus Konvention durch die Schwingungen des elektrischen Feldes gegeben ist; das magnetische Feld oszilliert immer rechtwinklig zum elektrischen. Die beiden Felder schwingen stets in einer zur Fortpflanzungsrichtung senkrechten Ebene, können aber innerhalb dieser Ebene in verschiedene Richtungen zeigen: vertikal, horizontal, unter plus oder minus 45 Grad zur Waagrechten und so weiter. Sie können sogar während der Fortpflanzung

Handwritten signature or mark.

wir statt der Photonen-Glockenkurve ein Interferenzmuster. Es ist, als hätten wir eine Sonnenbrille aufgesetzt und sähen plötzlich alles um uns gestreift.

Aber wir kann das sein? Wie schon gesagt: Wenn wir uns einfach nur dumm stellen, kommt die Interferenz nicht wieder. Warum schafft das ein horizontaler Polarisator? Die Antwort lautet: Er radiert die Welcher-Weg-Information aus. Da unser Horizontalpolarisator sowohl aus einem rechts- als auch aus einem linkszirkular polarisierten Photon ein horizontal polarisiertes herausfiltert, lässt sich kein Unterschied mehr zwischen beiden finden. Ist ein Photon erst einmal durch den Polarisator gegangen, kann niemand mehr sagen, ob es Spalt 1 oder Spalt 2 passiert hat. Befreit von der teilchenartigen Information können die Photonen sich wieder wie Wellen verhalten.

Auch wenn wir einen vertikalen Linearpolarisator zwischen Viertelwellenplatten und Detektor platzieren, radieren wir die Welcher-Weg-Information aus. Doch in diesem Fall beobachten wir so genannte Anti-Streifen, das heißt ein Muster, das nicht nur in der Mitte einen dunklen Streifen zeigt, sondern auch überall sonst das exakte Gegenteil des Musters mit horizontalem Polarisator bildet.

Wir haben damit zwei Möglichkeiten, die Versuchsergebnisse in Untermengen zu teilen. Mit einem Zirkularpolarisator können wir die Photonen in zwei Gruppen trennen: Die einen haben Spalt 1 passiert und sind rechtszirkular, die anderen sind linkszirkular und durch Spalt 2 gegangen. Mit einem Linearpolarisator können wir zwei ganz andere Gruppen von Photonen organisieren: Die einen ergeben ein Streifenmuster und sind horizontal polarisiert, die anderen erzeugen Anti-Streifen und sind vertikal polarisiert. Das ist das Wesen der Quantenradierung.

Sagt das Unbestimmtheitsprinzip irgendetwas über dieses Experiment aus? Nein. Polarisation und Position sind keine komplementären Variablen, darum gilt das Heisenberg-Prinzip hier ebenso wenig wie für den Scully-Englert-Walther-Vorschlag. Wodurch wird aber dann das Komplementaritätsprinzip erzwungen?

Die Antwort lautet Quantenverschränkung. Wenn ein Photon den Doppelspalt passiert, verwandelt es sich in eine Superposition von Ortszuständen: Spalt 1 und Spalt 2. Die Viertelwellenplatten führen eine zusätzliche bedingte logische Operation durch. Geht das Photon

durch Spalt 1, so ist es hinterher rechtszirkular polarisiert, und wenn es Spalt 2 passiert, kommt es linkszirkular polarisiert heraus. Somit ist die Polarisation mit dem Pfad verschränkt worden. Der Zustand des Photons lässt sich als eine neue und kompliziertere Superposition beschreiben:

(Spalt 1 UND rechtspolarisiert) +
(Spalt 2 UND linkspolarisiert)

Weil die zwei Observablen nun verschränkt sind, verändert jedes Manipulieren an der Information über die eine Observable automatisch die Information über die andere. Der Photonzustand lässt sich aber auch völlig äquivalent beschreiben als:

(Streifen UND horizontal polarisiert) +
(Anti-Streifen UND vertikal polarisiert)

Wenn wir wieder den Vergleich mit dem Münzwurf heranziehen, so verhalten sich die Orts- und Polarisations-Observablen jetzt wie zwei »telepathische« Geldstücke. Münze 1 zeigt in der Hälfte aller Fälle Kopf, Münze 2 ebenso, und solange man jede von ihnen separat betrachtet, scheint alles ganz normal zu sein. Ihre

quantenmechanische Seltsamkeit tritt erst zu Tage, wenn man sie beide beobachtet und entdeckt, dass jedes Mal, wenn Münze 1 Kopf zeigt, Münze 2 das auch tut.

Das hört sich ziemlich sonderbar an. Das fand auch Einstein, und in einem berühmten Artikel mit Boris Podolsky und Nathan Rosen von 1935 behauptete er, telepathische Münzen würden das Komplementaritätsprinzip verletzen. Dennoch ist Quantenverschränkung einfach eine Tatsache. Physiker erproben derzeit – in der Theorie und im Labor – den Einsatz der Verschränkung für Quantencomputer und abhörsichere Datenübertragung.

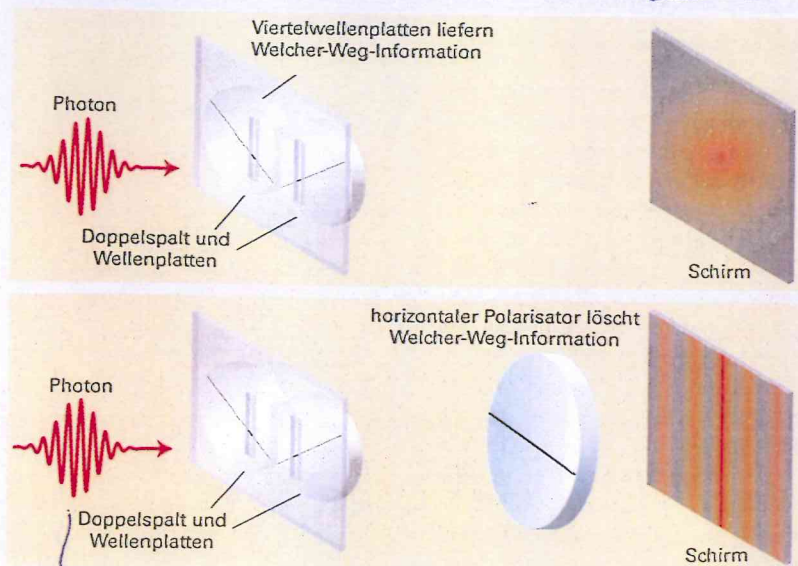
Veränderung der Geschichte?

Unsere letzte Variante des Young'schen Experiments enthält die Quantenverschränkung auf viel explizitere Weise und erzeugt damit eine scheinbar paradoxe Situation, die ursprünglich von John A. Wheeler vorgeschlagen wurde. Diese so genannte verzögerte Wahl mutet noch spukhafter an als die telepathischen Münzen, denn scheinbar ermöglicht sie ein Manipulieren der Vergangenheit. Doch ▷

Ein Polarisator als Quantenradierer

Bei unserem Quantenradierer werden hinter den Spalten Viertelwellenplatten platziert, welche die Photonen linkszirkular beziehungsweise rechtszirkular polarisieren. Das verschafft dem Beobachter Welcher-Weg-Information, und die Interferenzstreifen verschwinden (oben). Doch ein eingeschobener hori-

zontaler Polarisator (unten) verwandelt beide zirkularen Polarisationen in horizontale, sodass der Unterschied zwischen »linken« und »rechten« Photonen verschwindet. Die Welcher-Weg-Information wird gelöscht, und die Interferenzstreifen – wie von den Autoren im Labor demonstriert – kehren wieder.



Warum die Anti-Streifen?

Übermischung?

QUANTENMECHANIK

▷ wir betonen »scheinbar« – in Wirklichkeit tut sie nichts dergleichen.

Beim Experiment mit verzögerter Wahl erzeugen wir zwei verschränkte Photonen *a* und *b* mit folgender Eigenschaft: Wann immer an Photon *a* eine horizontale Polarisation beobachtet wird, ist *b* notwendigerweise vertikal polarisiert, und umgekehrt. Praktisch geschieht dies durch einen nichtlinearen optischen Prozess namens parametrische Oszillation (englisch *spontaneous parametric down-conversion*), wobei wir einen ultravioletten Argon-Laser auf einen dünnen Kristall richten, der daraufhin ein Photonen-»Zwillingspaar« emittiert. Wir manövrieren Photon *a* durch den Doppelpalt und die Viertelwellenplatten zu einem Detektor, während *b* direkt zu einem separaten Polarisationsdetektor geführt wird. Diesmal dient uns die Polarisation von Photon *b* als Kontrolle für den Quantenradierer.

Weil *a* und *b* verschränkt sind, sagt jede Messung von *b* etwas über *a* aus. Wir können an *b* entweder eine Messung ausführen, die Welcher-Weg-Information über *a* liefert, oder uns für eine Messung entscheiden, bei der die Interferenz erhalten bleibt. Wenn wir die horizontale oder vertikale Polarisation von *b* messen, geht uns die Welcher-Weg-

Information nicht verloren. Denn zum Beispiel bedeutet »*a* rechtszirkular UND *b* horizontal«, dass Photon *a* durch Spalt 1 gegangen ist, während »*a* linkszirkular UND *b* horizontal« bedeutet, dass es durch Spalt 2 trat.

Verzögerte Messung auf dem Mars

Um die Welcher-Weg-Information über *a* auszuradiieren, können wir stattdessen die diagonale Polarisation von *b* messen. Eine Messung in der positiven Diagonalrichtung (45 Grad) wird Interferenzstreifen auf dem Detektorschirm für *a* ergeben, während eine Messung in der negativen Diagonalrichtung (-45 Grad) Anti-Streifen erzeugen wird.

In unserem Labor haben wir demonstriert, dass der Quantenradierer unabhängig von der Reihenfolge funktioniert, in der *a* und *b* nachgewiesen werden. Da unser Detektor für Photon *b* nur 1,5 Meter weit entfernt liegt, ist der Zeitverzug zwischen dem Nachweis von *a* und dem von *b* winzig – nur rund fünf Nanosekunden (milliardstel Sekunden). Aber im Prinzip könnten wir *b* sehr weit fortsenden, etwa bis zum Mars. Das würde dem Beobachter auf dem Mars mehrere Minuten für die Entscheidung geben, ob wir hier unten auf der Erde Streifen beobach-

ten oder nicht. Aber könnten wir unsere Daten nicht bereits gesammelt haben und das Gegenteil beobachten?

Nein, das ist ausgeschlossen. Die verzögerte Messung auf dem Mars verändert kein Ereignis auf der Erde – sie verändert nur unsere Buchführung. Hier folgt die Erklärung in Form eines fiktiven Dialogs. Angenommen, Alice führt auf der Erde einen Doppelpaltversuch mit Viertelwellenplatten durch. Ihr Freund Bob lebt auf dem Mars und sendet ihr von dort ein Paket Photonen. Alice schickt jedes Photon durch den Doppelpalt und misst dann seine Position: »Photon 567 wurde am Ort $x = 4,3$ nachgewiesen.« Sie hat keine Ahnung, dass Bob auf dem Mars einen verschränkten Zwilling jedes Photons zurückbehalten hat. Er beschließt, bei jedem Zwilling die Polarisation zu messen, und zwar entweder horizontal und vertikal oder in den diagonalen Richtungen +45 Grad und -45 Grad. Er notiert die Resultate in seinem Laborbuch: »Photon 567(B) wurde mit horizontaler Polarisation nachgewiesen.«

Einige Wochen später besucht Bob seine Freundin Alice.

Alice: Hallo Bob! Wie war's auf dem Mars? Ich habe den Doppelpaltversuch mit Viertelwellenplatten gemacht, wie ihn diese Physiker beschrieben haben. Wie erwartet kam eine langweilige Glockenkurve heraus, ohne eine Spur von Interferenz.

Bob (schelmisch): Bist du sicher? Nimm noch einmal deine Daten vor und trage nur die Positionen dieser Photonen in ein Diagramm ein. (Er überreicht Alice eine Liste der Photonen, bei denen er eine Polarisation von +45 Grad gemessen hat.)

Alice: Interferenzstreifen! Wie hast du die Photonen zur Interferenz gebracht, nachdem sie schon in meinem Laborbuch verzeichnet waren?

Bob: Das ist noch gar nichts! (Jetzt gibt er Alice eine Liste der Photonen, an denen er vertikale Polarisation gemessen hat.)

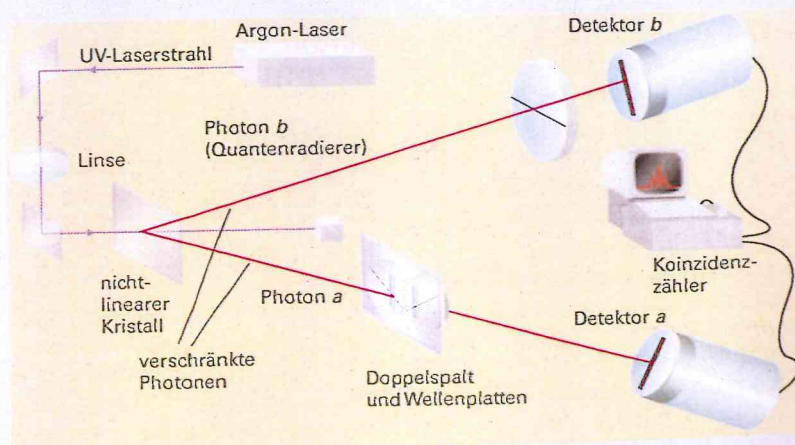
Alice: Keine Streifen! Jetzt kommt wieder die Glockenkurve heraus. (Bob gibt ihr eine Liste der Photonen mit -45 Grad Polarisation, und sie trägt deren Positionen in ein Diagramm ein.) Jetzt ist die Interferenz wieder da, aber diesmal Anti-Streifen. Wie ist das möglich? Du hast Macht über die Vergangenheit!

Bob: Nein, da ist keine Hexerei im Spiel. Die Photonen, die ich dir gab, waren mit Photonen verschränkt, die ich behalten habe. Ich habe an ihnen Polarisati-

Verzögerte Wahl mit verschränkten Photonen

Beim Experiment mit verzögerter Wahl dient ein zweites Photon als Quantenradierer. Zunächst werden zwei verschränkte Photonen *a* und *b* erzeugt, sodass jede Messung der Polarisation von *b* augenblicklich die Polarisation von *a* festlegt. Nachdem Photon *a* den Doppelpalt passiert hat, ist die Polarisation

von *b* mit der Welcher-Weg-Information von *a* verschränkt. Mittels Koinzidenzdetektoren vermag der Beobachter festzustellen, welche Photonen miteinander verschränkt sind. Sprechen beide Detektoren innerhalb einer Nanosekunde an, bilden die beiden Photonen fast sicher ein verschränktes Paar.

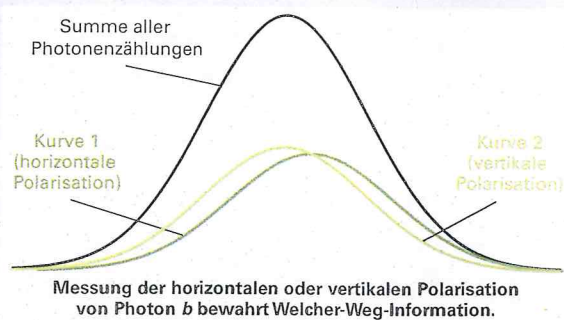


Doppelte Buchführung gemäß Wellen- oder Teilcheneigenschaften

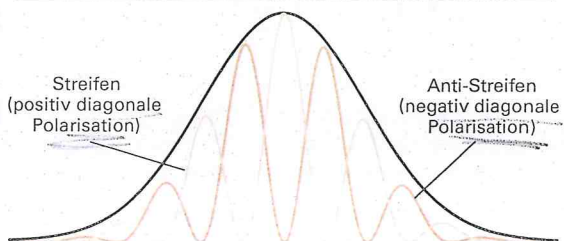
Das **Paradox der verzögerten Wahl** beruht nicht auf einer Veränderung der Geschichte, sondern auf einem Wechsel der Buchführung. Zwei verschränkte Photonen *a* und *b* werden von zwei Beobachtern separat aufgezeichnet. Beobachter *A* wiederholt das Experiment viele Male und stellt die Orte, wo die Photonen auftreten, grafisch dar. Unabhängig von der Art der Messung, die Beobachter *B* wählt, erhält *A* eine Glockenkurve, die einem verwaschenen Lichtfleck entspricht. Wenn Beobachter *B* sich für eine Messung der horizontalen oder vertikalen Polarisation entscheidet, wird jedes seiner *b*-Photonen Welcher-Weg-Information

über den verschränkten Zwilling enthalten. Dadurch werden die von *A* gemessenen *a*-Photonen in zwei Gruppen aufgespalten: Eine ist durch Spalt 1 gegangen, die andere durch Spalt 2. Die Photonenzählung wird für jede dieser Gruppen eine leicht verschobene Glockenkurve ergeben (grüne Linien rechts). Wenn Beobachter *B* sich für eine Messung der diagonalen Polarisation entscheidet, wird die Welcher-Weg-Information gelöscht. In diesem Fall können die verschränkten Photonen, die *A* gemessen hat, in zwei Gruppen getrennt werden: Die eine bildet Interferenzstreifen, die andere Anti-Streifen (unten).

	Photon <i>b</i>	Photon <i>a</i>
liefert Welcher-Weg-Information	horizontaler Polarisator	rechts-zirkuläre Polarisation Spalt 1
	vertikaler Polarisator	links-zirkuläre Polarisation Spalt 2
löscht Welcher-Weg-Information	positiv diagonaler Polarisator	Interferenzstreifen
	negativ diagonaler Polarisator	Anti-Streifen



Messung der horizontalen oder vertikalen Polarisation von Photon *b* bewahrt Welcher-Weg-Information.



Messung der diagonalen Polarisation löscht Weg-Information.

onsmessungen durchgeführt, und daher kommen diese mysteriösen Photonenlisten. Aber meine Messungen haben die Geschichte nicht verändert. Sie haben mir nur gezeigt, wie ich deine experimentellen Resultate aufteilen muss. Ich kann sie entweder in Streifen und Anti-Streifen aufteilen oder in zwei Glockenkurven. Aber den Ort, an dem jedes einzelne Photon tatsächlich gelandet ist, kann ich nicht verändern.

Alice: Eigentlich schade. Aber könnten wir daraus nicht wenigstens eine Methode zum Senden geheimer Botschaften machen?

Bob: Daran arbeitet sicherlich schon jemand.

Vermutlich wäre Einstein nicht glücklich über diese Experimente. Der Quantenradierer verdeutlicht, dass das Komplementaritätsprinzip in der Tat ein fundamentaler Bestandteil der Quantentheorie ist. Obwohl solche Experimente

das duale Wesen der Quantenobjekte illustrieren, vermögen die Physiker noch immer nicht zu erklären, warum der Welle-Teilchen-Dualismus existiert. Diesbezüglich sind wir nicht weiter als Richard Feynman, der in den 1960er Jahren schrieb: »Wir können das Rätsel nicht zum Verschwinden bringen, indem wir erklären, wie es funktioniert. Wir werden Ihnen nur sagen, wie es funktioniert.«

Dennoch machen wir Fortschritte. Wir verstehen jetzt, dass für die Komplementarität im Doppelspaltversuch nicht etwa eine durch die Messung verursachte »quantenmechanische Unbestimmtheit« verantwortlich ist, sondern die Quantenverschränkung als notwendiger Teil des Messvorgangs selbst. Das mag auf den ersten Blick aussehen wie ein Nebenaspekt; aber für das – nach all den Jahren noch immer offene – Problem, wie die Quantentheorie zu interpretieren sei, bedeutet es eine wichtige Einsicht. <

Stephen P. Walborn beendet gerade seine Dissertation über Quantenoptik an der Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) in Belo Horizonte (Brasilien). **Marcelo O. Terra Cunha** ist dort Assistenz-Professor für Mathematik, **Sebastião Pádua** und **Carlos H. Monken** leiten das Forschungsteam für experimentelle Quantenoptik.

© American Scientist Magazine (www.americanscientist.org)

Feynman Vorlesungen über Physik. Drei Bände. Oldenbourg Verlag, München 2001

Komplementarität und Welle-Teilchen-Dualismus. Von Berthold-Georg Englert, Marlan O. Scully und Herbert Walther in: Spektrum der Wissenschaft 02/1995, S. 50

Double-slit quantum eraser. Von S. P. Walborn, M. O. Terra Cunha, S. Pádua und C. H. Monken in: Physical Review A, Bd. 65, 033818 (2002)

Quantum theory: concepts and methods. Von A. Peres. Kluwer Academic, New York 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Es gibt kein Dohm! Warum Universalität annehmen?