

# Quantenradierer selbst gemacht

Mit leicht verfügbarem Material können Sie daheim ein Experiment ausführen, das einen besonders seltsamen Effekt der Quantenmechanik veranschaulicht. Je nachdem, ob man sich Information über den Weg von Lichtstrahlen verschafft oder nicht, verhalten diese sich wie Teilchen oder Wellen.

Von Rachel Hillmer und Paul Kwiat

**A**us der Theorie der Quantenmechanik geht bekanntlich hervor, dass die Natur sich im Grunde äußerst fremdartig verhält. Scheinbar selbstverständliche, aus unserem Alltag gewohnte Vorstellungen über die Realität werden über den Haufen geworfen. Widersprüchliche Alternativen können zusammen bestehen; beispielsweise vermag ein Objekt gleichzeitig zwei unterschiedlichen Wegen zu folgen. Ort und Geschwindigkeit eines Objekts lassen sich nicht gleichzeitig exakt bestimmen; und die Eigenschaften von beobachteten Objekten und Ereignissen können einer unvermeidlichen Zufälligkeit unterliegen, die nichts mit der Unvollkommenheit unserer Beobachtungswerkzeuge zu tun hat.

Verflogen ist die vertraute Welt, in der Atome und andere Partikel wie wohl-erzogene Billardkugeln auf dem grünen Tuch der Realität umherrollen. Vielmehr verhalten sie sich – manchmal – wie Wellen, die sich über ein Gebiet verteilen, einander kreuzen und Interferenzmuster bilden.

Doch immerhin scheint all diese Fremdartigkeit erst weit entfernt vom Alltagsleben aufzutreten. Am deutlichsten machen sich Quanteneffekte in winzigen Systemen bemerkbar, etwa an Elektronen, die in einem Atom gebun-

den sind. Theoretisch weiß man zwar, dass die moderne Technik großenteils auf Quantenphänomenen beruht und dass im Labor allerlei Kunststücke mit Quanten aufgeführt werden können, aber zu Hause gibt es das doch wohl nur zu sehen, wenn eine Wissenschaftssendung im Fernsehen darüber berichtet. Richtig? Nicht ganz.

Auf den folgenden Seiten zeigen wir, wie man ein Experiment aufbaut, das einen so genannten Quantenradierer veranschaulicht. Dieser Effekt beruht auf einer der seltsamsten Eigenschaften der Quantenmechanik: Sie erlaubt uns bestimmte Handlungen, durch die sich unsere Interpretation vergangener Ereignisse grundlegend ändert.

## Unheimlicher Tanz der Photonen

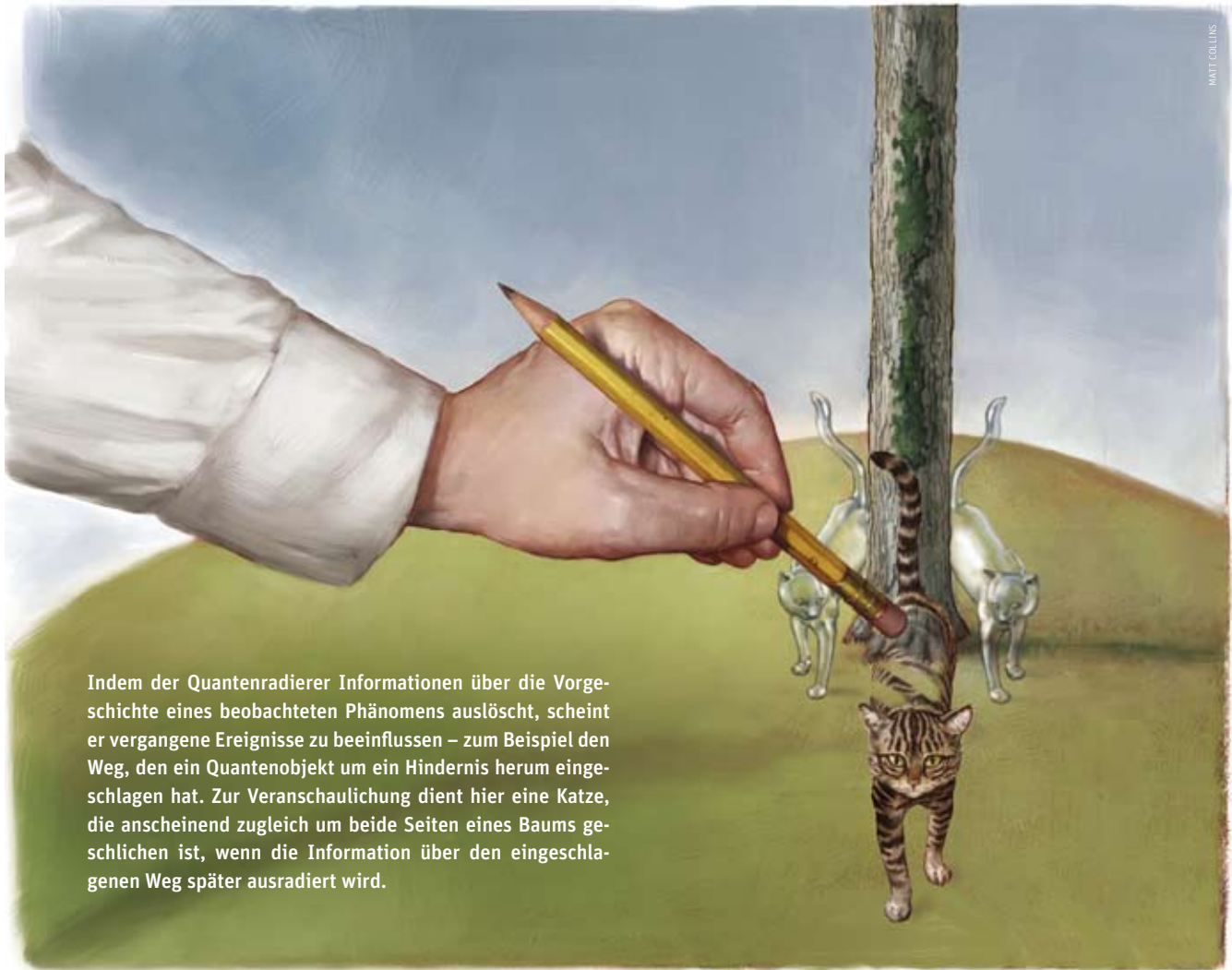
Bevor wir erklären, was wir damit meinen, und das Experiment selbst beschreiben, müssen wir der Wahrheit halber eine wichtige Einschränkung aussprechen. Das Lichtmuster, das bei erfolgreicher Durchführung des Versuchs zu sehen sein wird, lässt sich auch erklären, indem man das Licht als klassische Welle beschreibt, ohne die Quantenmechanik zu bemühen. So gesehen bleibt unser Experiment hinter seinem Anspruch zurück; es vermag den Quantencharakter des Effekts nicht vollständig zu demonstrieren.

Dennoch vollführen die einzelnen Lichtquanten oder Photonen, aus denen

die Lichtwelle besteht, tatsächlich den kompletten Quantentanz in all seiner Unheimlichkeit – obwohl man, um das streng zu beweisen, die Photonen einzeln durch den Apparat schicken und eines nach dem anderen nachweisen müsste. Leider übersteigt das die Möglichkeiten eines Hobbybastlers bei Weitem. Aber wenn Sie die Muster in Ihrem Experiment beobachten und darüber nachdenken, was sie vom Standpunkt des einzelnen Photons aus bedeuten, gewinnen Sie einen unmittelbaren Eindruck von der bizarren Quantenwelt.

Falls Sie geradewegs zum Experiment schreiten wollen, blättern Sie weiter zur Doppelseite 70/71. Die hier anschließende – und auf S. 72 fortgesetzte – Diskussion befasst sich gründlicher mit dem wissenschaftlichen Hintergrund des Quantenradierers. Mit dieser Erklärung werden Sie besser verstehen, was unser Experiment demonstriert; vielleicht werden Sie darauf zurückkommen wollen, nachdem Sie gesehen haben, wie dieser spezielle Radierer sich verhält.

Zu den seltsamen Eigenschaften der Quantenphysik gehört, dass das Verhalten eines Objekts davon abhängen kann, was wir über es herauszufinden versuchen. Ein Elektron kann sich als Teilchen oder als Welle verhalten, je nachdem, welches Experiment wir anstellen. Teilchenförmiges Verhalten tritt auf, wenn wir den speziellen Weg feststellen, dem ein Elektron gefolgt ist – und wel- ▷



MATT COLLINS

Indem der Quantenradierer Informationen über die Vorgeschichte eines beobachteten Phänomens auslöscht, scheint er vergangene Ereignisse zu beeinflussen – zum Beispiel den Weg, den ein Quantenobjekt um ein Hindernis herum eingeschlagen hat. Zur Veranschaulichung dient hier eine Katze, die anscheinend zugleich um beide Seiten eines Baums geschlichen ist, wenn die Information über den eingeschlagenen Weg später ausradiert wird.

## Was Sie für das Experiment brauchen

- ▶ ein sehr **dunkles Zimmer**;
- ▶ **Polarisationsfolie**. Einfache graue Folie liefert die besten Resultate; farbgetönte Folien sind ungeeignet. Sie finden Angebote im Internet unter dem Stichwort »Polfolie«. Achten Sie auf lineare, nicht zirkulare Polarisation. Sie müssen die Folie in sechs Quadrate mit je rund 5 Zentimeter Kantenlänge zerschneiden. Der Kasten auf S. 72 beschreibt, was Polarisatoren mit Photonen anstellen;
- ▶ einen **Laser**, zum Beispiel einen Laser-Zeigestab. Falls Ihr Gerät polarisiertes Licht emittiert, richten Sie seine Polarisation unter 45 Grad zur Vertikalen aus. Falls Ihr Laser nicht polarisiert ist, müssen Sie stets unmittelbar nach dem Laser einen Polarisator unter 45 Grad einrichten. Verwenden Sie ein Gummiband, um den Laser dauerhaft einzuschalten;
- ▶ ein dünnes, gerades **Stück Draht**, beispielsweise eine gerade gebogene Büroklammer. Je dünner der Draht, desto besser;
- ▶ ein **Stück Alufolie** und eine **Nadel**, um ein feines Loch hineinzustechen. Das durch das Loch austretende Licht bildet einen schmalen, kegelförmigen Strahl. Das Loch macht die Muster schwächer, verbessert aber die Resultate, sofern das Zimmer dunkel genug ist;
- ▶ einige **Ständer**, um den Laser und die Polarisationsfilter zu fixieren. Einfachste Haltevorrichtungen wie Klammern und Schachteln genügen;
- ▶ einen **Schirm**, um die erzeugten Muster darzustellen. Die nackte Wand reicht aus, wenn sie glatt und eben ist; ansonsten verwenden Sie ein Blatt Papier.

# Ein Quantenradierer für den Hausgebrauch

**DIE HIER BESCHRIEBENEN SCHRITTE SKIZZIEREN**, welche Effekte man mit dem Quantenradierer beobachten kann. Im Internet finden Sie unter [www.sciam.com/ontheweb](http://www.sciam.com/ontheweb) in englischer Sprache eine genauere Beschreibung und zusätzliche Informationen über die Grundlagen der Interferenz von Wellen.



## 1 INTERFERENZSTREIFEN

- ▶ Wickeln Sie die Alufolie um die Austrittsöffnung des Lasers und stechen Sie mit der Nadel ein kleines Loch hinein, um einen feinen Lichtstrahl zu erzeugen.
- ▶ Platzieren Sie den Laser mindestens zwei Meter vom Schirm entfernt. Er sollte auf dem Schirm einen kreisförmigen Lichtfleck erzeugen.
- ▶ Platzieren Sie den Draht vertikal in der Mitte des Lichtstrahls.

**WAS GESCHIEHT:** Wie gezeigt, sollten Sie ein Interferenzmuster aus hellen und dunklen Streifen sehen. Das Muster entsteht, weil das Licht, das links am Draht vorbeigeht, sich mit dem rechts vorbeigehenden überlagert. Wenn Sie ein Stück Papier knapp hinter den Draht halten, sehen Sie zwei Lichtflecke zu beiden Seiten des Drahtschattens. Die Flecke vergrößern und überschneiden sich immer mehr, je näher sie dem Schirm kommen. Von jedem einzelnen Photon, das im Überlappungsgebiet den Schirm erreicht, lässt sich nicht sagen, ob es links oder rechts am Draht vorbeigegangen ist; die Überlagerung der beiden Wege verursacht die Interferenzstreifen. Obwohl Sie Billionen Photonen betrachten, interferiert jedes einzelne nur mit sich selbst.



Das Foto zeigt die tatsächlich sichtbaren Interferenzstreifen. In den farbigen Schemazeichnungen sind die Größe und andere Details des Musters übertrieben dargestellt.



## 2 MARKIEREN DES WEGES

- ▶ Nehmen Sie zwei Polarisatoren aus Polfolie und drehen Sie den einen so, dass die Polarisationsachsen zueinander rechtwinklig stehen. Das erkennen Sie daran, dass beide Polarisatoren, wenn sie vorübergehend übereinandergelegt werden, im Überlappungsgebiet kein Licht mehr durchlassen.
- ▶ Kleben Sie die Polarisatoren exakt nebeneinander, ohne Fuge oder Überlappung. Platzieren Sie die Klebstreifen nur ganz oben und unten, damit diese das Licht nicht blockieren. Sie fungieren als Wegmarkierer.
- ▶ Stellen Sie den Markierer so in den Strahl, dass die lotrechte Verbindungskante des Markierers sich direkt hinter dem Draht befindet. Am einfachsten ist es, den Draht am Markierer zu befestigen. Draht und Markierer werden im weiteren Experiment nicht mehr bewegt. Wir behaupten, dass der linke Polarisator vertikal polarisiertes Licht (V) erzeugt, der rechte horizontal polarisiertes (H). Das ist willkürlich; wir könnten diese Etiketten genauso gut vertauschen.

**WAS GESCHIEHT:** Obwohl das Licht weiterhin beide Seiten des Drahts passiert, müssten die Streifen jetzt verschwunden sein. Wenn ein Photon den Schirm erreicht, nachdem es links am Draht vorbeigegangen ist, kommt es V-polarisiert an; ging es rechts vorbei, dann ist es nun H-polarisiert. Damit hat der Markierer Information über den von jedem Photon eingeschlagenen Weg zugänglich gemacht. Das verhindert Interferenz.

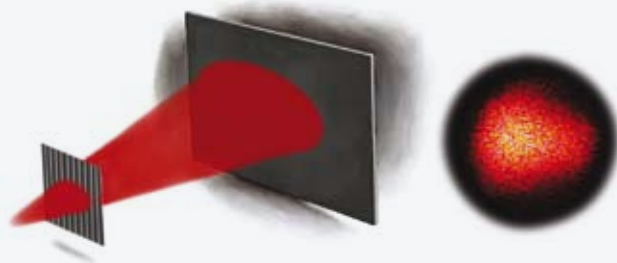




### 3 AUSWAHL DER LINKS VORBEIGEHENDEN PHOTONEN

- ▶ Platzieren Sie einen dritten Polarisator (den »Analysator«) in V-Stellung zwischen den Markierer und den Schirm.

**WAS GESCHIEHT:** Der Analysator blockiert alle rechts vorbeigehenden (und vom Markierer H-polarisierten) Photonen und lässt alle links vorbeigehenden durch. Das Muster ist nun schwächer und rechts kürzer, es besteht nur aus dem linken Lichtfleck. Mit dem Analysator verschaffen Sie sich die vom Markierer zugänglich gemachte Information: Sie wissen, dass alle Photonen auf dem Schirm links am Draht vorbeigegangen sind.



### 4 AUSWAHL DER RECHTS VORBEIGEHENDEN PHOTONEN

- ▶ Drehen Sie den Analysator in die H-Stellung.

**WAS GESCHIEHT:** Der H-Analysator blockiert den linken Lichtfleck und lässt nur den rechten Fleck durch. Wenn man die Lichtintensität (die Anzahl der Photonen) auf dem Schirm messen könnte, würde man herausfinden, dass das Licht in Schritt 2 genau die Summe des Lichts in den Schritten 3 und 4 ist. Man beachte: In Schritt 2 traten keine Streifen auf, obwohl die Polarisation der Photonen nicht festgestellt wurde; die bloße Möglichkeit reichte aus, wie in den Schritten 3 und 4.



### 5 AUSTRADIEREN DER WEGINFORMATION

- ▶ Drehen Sie den Polarisator von der V-Stellung um 45 Grad im Uhrzeigersinn in die diagonale D-Stellung.

**WAS GESCHIEHT:** Die Streifen tauchen wieder auf! Der Polarisator radiert die Information über den Weg jedes Photons aus. Links vorbeigehende V-Photonen haben eine Chance von 50 Prozent, den Schirm zu erreichen; rechte H-Photonen ebenso. Durchgelassene Photonen werden D-polarisiert; der Weg jedes Photons ist unbekannt. Jedes nimmt anscheinend beide Wege zugleich und interferiert mit sich selbst.



### 6 DER ANTI-RADIERER

- ▶ Drehen Sie den Polarisator von der V-Stellung gegen den Uhrzeigersinn in die antidiagonale A-Stellung.

**WAS GESCHIEHT:** Wiederum gibt es Streifen; das in Schritt 5 Gesagte gilt auch für einen A-polarisierten Radierer. Doch die Streifen sind in beiden Fällen leicht gegeneinander verschoben. Die A-Streifen sind hell, wo die D-Streifen dunkel sind, und umgekehrt. Könnte man die Intensitäten oder Photonenzahlen des D- und des A-Radierers addieren, ergäbe die Summe den Fleck von Schritt 2, ohne sichtbare Interferenz.



### 7 BEIDE RADIERER AUF EINMAL

- ▶ Schneiden Sie einen D- und einen A-Polarisator waagrecht mittendurch.
- ▶ Verbinden Sie die obere D-Hälfte mit der unteren A-Hälfte.
- ▶ Platzieren Sie diesen Hybrid-Analysator in den Strahl.

**WAS GESCHIEHT:** In der oberen Hälfte des Lichtflecks auf dem Schirm erscheinen D-Streifen, in der unteren Hälfte A-Streifen. Das Muster ähnelt ein wenig einem schiefen Gebiss und verdeutlicht, wie die dunklen und hellen Streifen jedes Radierers einander entsprechen.



## SCHLUSSFOLGERUNG

#### WAS WIDERFUHR DEN PHOTONEN IN DEN UNTERSCHIEDLICHEN SCHRITTEN?

- ▶ In den Schritten 3 und 4 lief jedes Photon entweder an der einen oder der anderen Seite des Drahts vorbei – es gab keine Interferenz. In Schritt 1, 5, 6 und 7 nahmen die Photonen anscheinend beide Wege zugleich und erzeugten Interferenz.
- ▶ Unsere Interpretation hängt davon ab, was mit den Photonen später geschah – ob sie einem Analysator, einem Radierer oder nur dem Schirm begegneten.
- ▶ Die Schritte 6 und 7 zeigen, dass die Welcher-Weg-Information auf unterschiedliche Weise ausradiert werden kann, wobei entweder das ursprüngliche oder das inverse Interferenzmuster erzeugt wird.

▷ lenförmiges Verhalten, wenn wir das nicht tun.

Ein Standardnachweis dieses Welle-Teilchen-Dualismus beruht auf dem Doppelspaltversuch; unser Quantenradierer zum Selbstmachen ähnelt diesem Experiment insofern, als ebenfalls zwei Wege im Spiel sind, wenn auch nicht zwei Spalte. Beim Doppelspaltversuch emittiert eine Quelle Teilchen, die zunächst auf einen Schirm mit zwei Schlitzen treffen. Die durchgelassenen erreichen dann einen zweiten Schirm, und dort erzeugt jedes einen winzigen Fleck. Wo einzelne Teilchen landen, bleibt bis zu einem gewissen Grad zufällig und unvorhersagbar, aber Tausende solcher Flecken summieren sich zu einem bestimmten, vorhersagbaren Muster. Wenn die Bedingungen so sind, dass die Teilchen sich als Wellen verhalten, entsteht ein Interferenzmuster – eine Abfolge von unscharfen Streifen, in denen die meisten Teilchen auftreffen, während nur sehr wenige in den Zwischenräumen landen.

Die Teilchen erzeugen das Interferenzmuster nur, wenn jedes durch jeden der beiden Spalte gegangen sein könnte und wenn nicht festzustellen ist, durch welchen. In diesem Fall gelten die beiden Wege als ununterscheidbar, und je-

des Teilchen verhält sich, als hätte es tatsächlich beide Schlitze passiert. Gemäß der gängigen Deutung der Quantenmechanik tritt Interferenz ein, wenn ununterscheidbare Alternativen in dieser Weise kombiniert werden.

## Die zwei Wege der Katze um den Baum

Falls zwei oder mehr Alternativen koexistieren, spricht man von Superposition. Erwin Schrödinger unterstrich 1935 die Eigentümlichkeit von Quantensuperpositionen durch sein Gedankenexperiment mit der zugleich lebenden und toten Katze, deren Zustand in einer Kiste nicht beobachtet werden kann. Tritt Quanteninterferenz ein, ähnelt manches an unserem Experiment diesem Beispiel. Statt zugleich lebendig und tot zu sein, geht unsere Katze zugleich links und rechts an einem Baum vorbei.

Schauen wir in die Kiste, hört Schrödingers Katze auf, als Superposition zu existieren: Wir sehen stets entweder ein lebendes oder ein totes Tier. Allerdings besagen manche Deutungen der Quantenmechanik, dass nun wir zu einer Superposition der zwei Alternativen werden, eine tote oder eine lebende Katze gesehen zu haben. Wenn in unserem Fall

der Baum von einer Taschenlampe beleuchtet wird, sehen wir die Quantenkatze auf der einen oder der anderen Seite daran vorbeischieben. Ebenso können wir ein Messgerät hinzufügen, um jedes Teilchen beim Durchgang durch die Spalte zu beobachten. Man könnte sich vorstellen, dass Licht so auf die Schlitze fällt, dass wir einen von jedem passierenden Teilchen gestreuten Lichtblitz sehen, der uns Auskunft über den Teilchenweg gibt. Der Blitz macht die zwei alternativen Wege unterscheidbar, zerstört dadurch die Superposition, und die Partikel bilden auf dem Schirm nicht ein Streifenmuster, sondern einen strukturlosen Fleck. Solche Experimente sind durchgeführt worden – tatsächlich ergibt sich kein Interferenzmuster.

Wir müssen nicht »wirklich nachschauen« und brauchen die Lichtblitze nicht zu registrieren und festzustellen, welchen Weg jedes Teilchen eingeschlagen hat. Es genügt, dass die Information in den Blitzen zugänglich ist und direkt hätte beobachtet werden können.

Indem der Quantenradierer die Information »ausradiert«, die den Weg jedes Teilchens beschreibt, stellt er die Ununterscheidbarkeit der Alternativen wieder her – und somit die Interferenz.

## WIE POLARISATIONSFILTER AUF PHOTONEN WIRKEN

**DIE POLARISATIONSFOLIE** lässt nur Licht durch, das parallel zur Polarisationsachse oszilliert; die Achse wird in unseren Schemazeichnungen durch parallele Linien auf der Folie angezeigt. Wenn wir uns Licht einfach als Welle auf einem zwischen zwei Leuten gespannten Seil vorstellen, dann kann die Welle das Seil nach oben und unten, nach links und rechts oder unter jedem Winkel dazwischen bewegen. Der Oszillationswinkel ist die Polarisation der Welle.

Die Folie wirkt wie ein Raster aus parallelen Stäben, zwischen denen das Seil hindurchgeführt wird. Parallel zum Raster polarisierte Wellen passieren ungehindert, senkrecht dazu polarisierte werden blockiert, und andere Winkel gelangen mit veringerteter Amplitude hindurch. Die Welle, die den Polarisator verlässt, ist immer parallel zu dessen Achse polarisiert.

Die quantenmechanische Beschreibung klingt ähnlich: Licht besteht aus einzelnen Partikeln namens Photonen, die wie eine Welle jeweils eine Schwingungsrichtung haben können. Ein Photon wird immer dann durchgelassen, wenn die Achse des Polarisators parallel zur Polarisation des Photons steht. Ein senkrecht dazu stehender Polarisator blockiert das Photon immer. Bei einem Winkel von 45 Grad hat das Photon eine 50-prozentige Chance durchzukommen; die exakte Wahrscheinlichkeit variiert mit dem Winkel. Nach Verlassen des Polarisators ist das Photon stets parallel zu dessen Achse polarisiert.

Licht kann auch unpolarisiert sein, das heißt, seine Photonen haben zufällige Polarisationsrichtungen. In diesem Fall gelangt die Hälfte der Photonen durch den Polarisator; sie sind dann parallel zu ihm polarisiert.

Sie können prüfen, wie die Polarisatoren wirken, indem Sie zwei aufeinanderlegen. Während Sie den einen langsam drehen, können Sie gut hindurchsehen, sofern beide Polarisationsachsen übereinstimmen; bei anderen Winkeln trübt sich das Bild, und wenn die Achsen senkrecht stehen, können Sie praktisch nicht hindurchsehen. Photonen, die durch den ersten Polarisator gelangen, werden entsprechend polarisiert, und dann hängt die Wahrscheinlichkeit, mit der sie durch den zweiten kommen, vom Winkel zwischen ihrer Polarisation und dessen Achse ab.

**EIN INTERESSANTER EFFEKT TRITT EIN**, wenn zwei Polarisatoren zueinander senkrecht stehen und ein dritter unter einem Winkel – am besten 45 Grad – dazwischen platziert wird. Durch Einfügen des dritten Polarisators werden die gekreuzten Polarisatoren ein wenig lichtdurchlässig, obwohl man erwarten würde, er wirke als zusätzliches Hindernis. Der Effekt erklärt sich, wenn man die Wirkung eines Polarisators nach dem anderen überlegt (siehe [www.sciam.com/ontheweb](http://www.sciam.com/ontheweb)). Auch der selbst gebaute Quantenradierer beruht auf einem 45-Grad-Polarisator, der das Verhalten des Lichts ändert.



Aber wie kann ein Radierer das? Angenommen, der Lichtblitz, der von jedem Teilchen gestreut wird, ist nur ein einzelnes Photon. Damit das Photon die Welcher-Weg-Information des Teilchens enthüllt, muss sich – wenigstens im Prinzip – angeben lassen, von welchem Spalt das Photon ausging. Das heißt, wir müssen den Ort, von dem aus jedes Photon gestreut wurde, exakt genug messen können, um die Spalte zu unterscheiden. Das Heisenberg'sche Unbestimmtheitsprinzip besagt nun: Wenn wir stattdessen den Impuls jedes Photons mit großer Genauigkeit messen, werden die Orte der Photonen weniger scharf definiert. Wenn wir also die Photonen durch eine Linse schicken, die uns Information über ihre Impulse zugänglich macht, wird die Information über ihre Orte ausstrahlt. In diesem Fall sind die zwei Wege, denen die Teilchen folgen können, wieder ununterscheidbar und die Interferenz wird wiederhergestellt.

Zunächst einmal halten wir inne und denken ein bisschen mehr über den eben beschriebenen Radiervorgang nach, denn darin steckt die Seltsamkeit. Wenn wir den Ort nachweisen, an dem eines der Photonen gestreut wurde, erfahren wir, durch welchen Spalt das zugehörige Teilchen gegangen ist; das heißt, das Teilchen passierte tatsächlich den einen oder den anderen Spalt, nicht beide. Wenn wir andererseits den Impuls des Photons nachweisen, können wir nicht wissen, welchen Schlitz das Teilchen durchquert hat. Positiv ausgedrückt: Wenn wir viele Impulsmessungen ausführen und ein Interferenzmuster sehen, schließen wir daraus, dass in solchen Fällen die Teilchen

beide Schlitze passiert haben – andernfalls wäre Interferenz unmöglich.

Demzufolge hängt die Antwort auf die Frage »Ging das Teilchen durch einen Spalt oder durch beide Spalte?« davon ab, was wir mit dem zugehörigen Photon lange nach dem Durchgang des Teilchens anstellen. Es ist fast, als würde unsere Behandlung der Photonen etwas beeinflussen, was sich in vergangenen Ereignissen abgespielt hat. Wir können herausfinden, durch welchen Spalt das Teilchen ging – oder wir können diese Information mit dem Quantenradierer aus dem Universum löschen.

Besonders seltsam ist, dass wir uns entscheiden dürfen, welche Messung wir durchführen, nachdem das Teilchen bereits die Schlitze passiert hat. Wir können den Apparat für beide alternative Messungen präparieren, mit einem Schalter, den wir erst knapp vor Ankunft jedes Photons betätigen. Physiker nennen diese Variante ein *delayed-choice experiment* (Experiment mit verzögerter Wahl). Die Idee hatte John A. Wheeler von der Universität von Texas in Austin im Jahr 1978; sie erweitert ein Gedankenexperiment, das Niels Bohr und Albert Einstein 1935 in ihrer berühmten Debatte über Quantenmechanik und Realität verwendeten.

Aufmerksame Leser erkennen hier ein Problem: Warum können wir die Wahl unserer Photonenmessung nicht aufschieben, bis wir bereits gesehen haben, ob die Partikel ein Interferenzmuster bilden? Das ließe sich erreichen, indem wir den Auffangschirm nicht allzu weit vom Doppelspalt und den Photonendetektor viel weiter entfernt platzieren. Was ▷

# WISSEN

WAS HEUTE WICHTIG IST



Die Redaktion von **spektrumdirekt** informiert Sie schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.



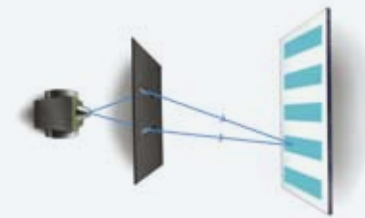
[www.spektrumdirekt.de/heute](http://www.spektrumdirekt.de/heute)

**spektrumdirekt**  
Die Wissenschaftszeitung im Internet



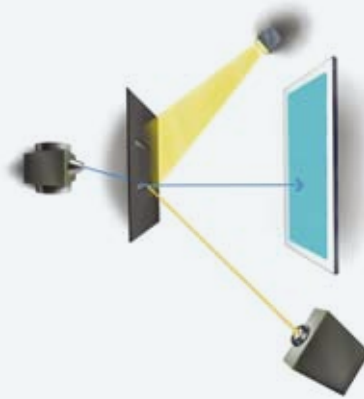
WIE EIN QUANTENRADIENER FUNKTIONIERT

**DAS VERHALTEN VON QUANTENPARTIKELN** kann davon abhängen, welche Information über sie zugänglich ist. Ein Quantenradierer eliminiert Information und stellt dadurch das Phänomen der Interferenz wieder her. Das lässt sich am besten anhand eines Doppelspaltexperiments verstehen.



**Erzeugung von Quanteninterferenz**

Werden Teilchen durch zwei Spalte geschickt, erzeugen sie Interferenzstreifen, da sie vorwiegend in bestimmten Gebieten auf einem Schirm auftreffen (blau), aber kaum dazwischen (weiß). Das Interferenzmuster erscheint, wenn jedes Teilchen auf seinem Weg zum Schirm beide Spalte hätte passieren können (Pfeile).



**Verhindern der Interferenz**

Die Streifen treten nicht auf, wenn die Teilchen mit etwas wechselwirken, das benutzt werden könnte, um den Ort jedes Teilchens an den Spalten festzustellen. Zum Beispiel könnte ein Lichtquant (gelbe Linie) am Teilchen gestreut werden und enthüllen, dass es den rechten Spalt passiert hat. Das Photon muss gar nicht nachgewiesen werden – es genügt, dass die Welcher-Weg-Information im Prinzip verfügbar ist.



**Der Radierer stellt die Interferenz wieder her**

Ein Quantenradierer löscht die Welcher-Weg-Information. Wenn das Teilchen ein Photon streut, könnte eine Linse die Feststellung unmöglich machen, von welchem Spalt das Photon gekommen ist. In diesem Fall geht das zugehörige Teilchen anscheinend durch beide Spalte wie zuvor, und Interferenzstreifen treten auf. Das Seltsamste am Quantenradierer ist, dass das Verhalten des Teilchens an den Spalten davon abzuhängen scheint, was mit dem Photon geschieht, nachdem das Teilchen den Spalt – beziehungsweise die Spalte – passiert hat.

GRAFIKEN: MATT COLLINS

▷ geschähe, wenn wir sähen, dass die Teilchen Interferenzstreifen bilden, und wir erst dann Photonen-Ortsmessungen machten, die das Entstehen solcher Streifen verhindern sollten? Wir können nicht erwarten, dass das bereits registrierte Interferenzmuster verschwindet! Deshalb sollten sich mit dem Effekt der verzögerten Wahl Botschaften augenblicklich über beliebige Entfernungen übertragen lassen – das heißt mit Überlichtgeschwindigkeit!

Ein kniffliges Detail, das wir anfangs unterschlagen haben, bewahrt vor solchen Verwicklungen. Um die Interferenz der Teilchen nach Anwendung des Quantenradierers zu sehen, müssen wir sie zuerst in zwei Gruppen teilen und diese separat beobachten.

Die eine Gruppe wird das ursprüngliche Streifenmuster zeigen, die andere hingegen das dazu inverse Muster – das heißt, die Teilchen der zweiten Gruppe landen dort, wo ursprünglich die dunklen Zwischenräume lagen, und meiden die Orte der ursprünglich hellen Streifen. Beide Gruppen zusammen füllen

sämtliche Lücken und verbergen die Interferenz.

Das Paradox wird vermieden, weil wir die Daten der Photonenmessung brauchen, um zu wissen, zu welcher Gruppe jedes Teilchen gehört. Darum können wir die Interferenzstreifen erst beobachten, nachdem wir die Photonenmessungen durchgeführt haben, denn erst dann wissen wir, wie wir die Teilchen in Gruppen aufteilen sollen.

In unserem Experiment für den Hausgebrauch geschieht das Aufteilen der Teilchen in Gruppen automatisch, weil die eine Gruppe durch einen Polarisationsfilter blockiert wird; man sieht das Interferenzmuster der durchgelassenen Gruppe mit bloßem Auge. Im letzten Schritt können Sie die Interferenzmuster der beiden Gruppen direkt nebeneinander beobachten.

Vom praktischen Standpunkt ist es enttäuschend, dass man mit Überlichtgeschwindigkeit keine Botschaften senden kann. Physiker und Logiker sind darüber jedoch erleichtert, denn so werden Paradoxien vermieden. ◁



**Rachel Hillmer** arbeitet an neuen Methoden, Quanteninformation mit Licht zu kodieren. Sie studiert bei **Paul Kwiat**, der Professor für Physik an der Universität von Illinois in Urbana-Champaign ist. Er erforscht Quantenradierer und optische Quantenprogrammierung.



Quantenradierer. Von Stephen P. Walborn et al. in: Spektrum der Wissenschaft 2/2004, S. 32

Quantum-erasing the nature of reality, or perhaps, the reality of nature? Von P.G. Kwiat and B.-G. Englert in: Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology, and Complexity. Von John D. Barrow, Paul C.W. Davies und Charles L. Harper jr. (Hg.). Cambridge University Press, 2004

Quantitative wave-particle duality and non-erasing quantum erasure. Von P.D.D. Schwindt, P.G. Kwiat und B.-G. Englert in: Physical Review A, Bd. 60, S. 4285, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/874881](http://www.spektrum.de/artikel/874881).

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE