

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**KOMPAKT**

# QUANTENPHYSIK

Spukhafte Welt zwischen Welle und Teilchen

## **Verschränkung**

Kosmischer Test für  
die Quantenphysik

## **Informationstechnologie**

Mission Quanten-  
computer

## **Bildgebung**

Fotografieren mit  
verlorenem Licht



Antje Findelee  
E-Mail: [findelee@spektrum.de](mailto:findelee@spektrum.de)

*Liebe Leserin, lieber Leser,*  
wie praktisch wäre es doch manchmal, wenn das aus der Sciencefiction bekannte Beamen bereits in die Realität umgesetzt wäre – oder die Reise durch die Zeit. Und wie zukunftsweisend und sicherlich auch hilfreich wären neue Computertechnologien: Hoffnungen, die sich aus der mysteriösen Welt der Quantenphysik nähren. Noch allerdings ist diese Welt mit den ihr so eigenen Regeln überwiegend rätselhaft, und revolutionäre Anwendungen sind meilenweit entfernt.

Das macht sie aber auch gerade so spannend, findet

**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGERIN DIGITAL:** Antje Findelee  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15-17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE147514638  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer  
**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an [anzeigen@spektrum.de](mailto:anzeigen@spektrum.de).

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

FOLGEN SIE UNS:



04

QUANTENPHYSIK

Und noch ein Schlupfloch erfolgreich geschlossen

Quantenexperiment testet nichtlokalen Kollaps eines einzelnen Lichtteilchens

INFORMATIONSTECHNOLOGIE

Mission Quantencomputer

Wird der Quantencomputer bald Realität?

13

VERSCHRÄNKUNG

Kosmischer Test für die Quantenphysik

Quasare könnten das »Schlupfloch der freien Wahl« schließen

31

ESSAY

Machen Quanten Sprünge?

Im tiefsten Innern ist das Universum kontinuierlich

47

08

QUANTENMECHANIK

Quantenphysik erlaubt die Zeitreise

Simulation löst das Großvaterparadoxon

23

BILDGEBUNG

Fotografieren mit verlorenem Licht

Forscher bilden ein Objekt mit Hilfe eines Quantentricks ab

38

INTERVIEW

»Ich will die Natur verstehen«

Quantenphysiker Jörg Schmiedmayer über die bizarren Gesetze der Quantenwelt

54

NOBELPREISE 2012

Kontrolle über Schrödingers Katze

Physiknobelpreis ehrt Quantenforscher aus Frankreich und den USA



QUANTENPHYSIK

# Und noch ein Schlupfloch erfolgreich geschlossen

von Dirk Eidemüller

Ein neuer Test belegt: Die Quantenwelt bleibt gewohnt unübersichtlich. Und für Skeptiker wird das Eis immer dünner.

**E**twas ist da, oder es ist nicht da. Etwas, das hier ist, kann nicht zugleich woanders sein. Diese Erfahrung machen wir nicht nur im täglichen Leben, sie hat auch Eingang in viele wissenschaftliche und philosophische Theorien gefunden. In der Quantenwelt hingegen können Teilchen nicht nur an einem Ort sein, sondern zugleich auch an vielen anderen – und zwar so lange, bis wir seinen Ort bestimmen.

Ein Lichtquant, Photon genannt, oder etwa auch ein Elektron können sich wie eine Welle über ein großes Areal ausbreiten. Versucht man dann allerdings zu messen, wo es sich aufhält, zeigt es sich nur an genau einer Stelle. Quanten besitzen also sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften: Sie breiten sich aus wie Wellen, lassen sich aber wie Teilchen punktförmig lokalisieren und tragen elektrische Ladung sowie andere Eigenschaften mit sich. Diesen und anderen völlig kontraintuitiven Eigenheiten verdankt die Quantenphysik ihren faszinierenden und bisweilen auch bizarren Charakter.

Physiker beschreiben die Wahrscheinlichkeit, eine ausgedehnte Teilchenwelle bei einer Messung irgendwo zu finden, mit

der quantenmechanischen Wellenfunktion. Um das Verständnis, was genau diese repräsentiert, rankt sich seit ihrer Einführung **ein Streit, in dem sich sowohl Naturwissenschaftler als auch Philosophen engagieren**. Sieht man die Wellenfunktion als eindeutiges Abbild eines real existierenden Feldes – ähnlich wie in der klassischen Physik etwa das elektromagnetische Feld –, dann stellt sich die Frage, was bei einer Messung passiert, mit der zum Beispiel der Ort festgelegt wird.

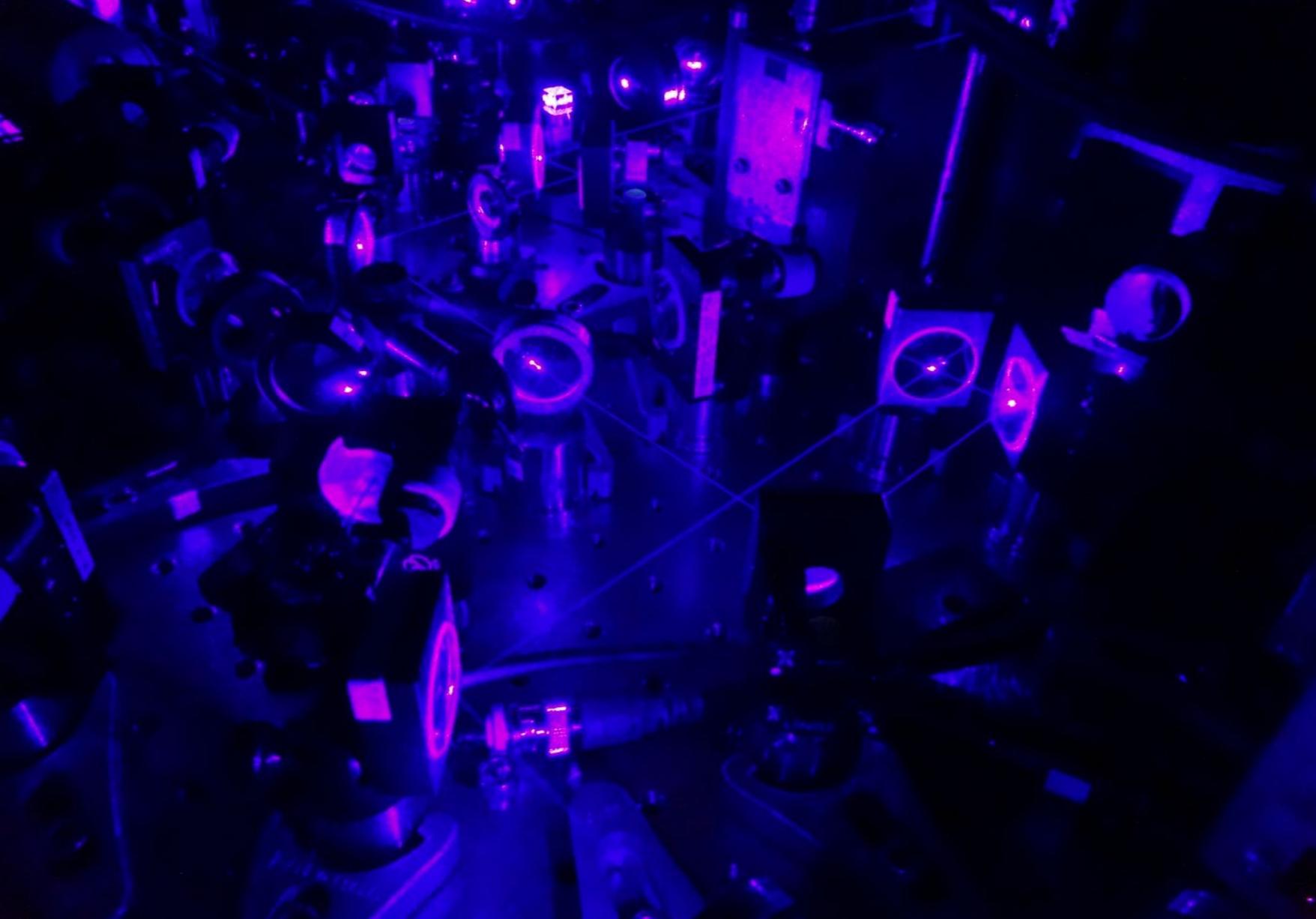
### **Die Wellenfunktion bricht mit unendlicher Geschwindigkeit zusammen**

In dem Augenblick, in dem die Messung stattfindet, verschwindet nämlich die Welle und reduziert sich auf den Punkt, an dem das Teilchen gefunden wurde. Dieser Übergang findet instantan, also mit unendlicher Geschwindigkeit, statt: der so genannte Kollaps der Wellenfunktion. Er bereitet deshalb begriffliche Schwierigkeiten, weil sich nach der Relativitätstheorie nichts schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten sollte. Und die ist zwar enorm hoch, aber doch endlich.

Diese Probleme sind seit Aufstellung der Quantenphysik vor rund 100 Jahren

bekannt und haben Niels Bohr und seine Mitstreiter bewogen, die Wellenfunktion vorsichtiger zu interpretieren. Nach ihrer so genannten Kopenhagener Interpretation ist die Wellenfunktion nichts weiter als eine Wahrscheinlichkeitsfunktion, mit deren Hilfe wir künftige Messergebnisse vorhersagen können. Mit den trefflichen Worten Erwin Schrödingers, dem diese Sichtweise nicht zusagte, ist die Wellenfunktion also lediglich eine Art »Vorhersagekatalog«.

Seitdem haben Physiker viele Experimente ersonnen, um die Kopenhagener Interpretation und ihre Alternativen auf Herz und Nieren zu prüfen. Bei solch fundamentalen Fragen gibt es schließlich viele Bedingungen, die erfüllt sein müssen, um von einem rigorosen Test sprechen zu können. Eine Möglichkeit, die bislang noch nicht besonders gut erforscht ist, liegt darin, den Kollaps der Wellenfunktion an einem einzelnen Teilchen nachzuvollziehen. Dieser Test ist deshalb so schwierig, weil ständig einzelne Quanten verloren gehen können. Man benötigt also eine sehr hohe Effizienz beim Manipulieren und Nachweis der Lichtquanten – deshalb ist auch die Rede vom »Effizienzschlupfloch«.



AKIRA FURUSAWA, UNIVERSITÄT TOKIO

### MESSUNGEN AN EINZELNEN PHOTONEN

**Mit Hilfe von Lasern erzeugten die Wissenschaftler ein Lichtteilchen, das sie anschließend an einem Strahlteiler gleichzeitig in zwei verschiedene Richtungen lenkten – möglich ist dies nur, weil das Photon Eigenschaften einer Welle trägt.**

### Test mit einem einzelnen Photon

Howard Wiseman und Marcin Zwierz vom Centre for Quantum Dynamics der Griffith University in Brisbane haben für diesen Test nun ein Gedankenexperiment vorgeschlagen, das Akira Furusawa und seine Mitarbeiter vom Department of Applied Physics der Universität Tokio umsetzen konnten. Ihre Studie veröffentlichten sie in [»Nature Communications«](#).

Die Idee bestand darin, ein Lichtteilchen zunächst an einem Strahlteiler aufzuteilen, so dass es wie eine Welle in zwei verschiedene Richtungen lief. Die beiden Teilwellen gingen in zwei getrennte Apparaturen – man könnte auch sagen, in zwei verschiedene Labore. Nach dem Gedankenexperiment saß in dem einen Labor Alice und führte dort verschiedene Experimente durch, in dem anderen saß Bob. Auch er nahm verschiedene Messungen an der Lichtwelle vor. Dabei durften Alice und Bob nicht einfach bestimmen, ob das Photon in ihrem Labor angekommen war: Sonst hätten sie es sozusagen gezwungen, sich zu seiner Teilchennatur zu bekennen, und es wäre entweder bei Alice oder Bob erschienen und beim anderen nicht.

Alice und Bob mussten stattdessen die quantenphysikalische Wellenform mit ausgeklügelten Verfahren bestimmen. »Deshalb sagen wir, es handelt sich um eine Messung an einer Welleneigenschaft«, sagt Howard Wiseman.

### Schlupfloch geschlossen: Es bleibt bizarr

Wenn Alice nun bestimmte Messungen durchführte, beeinflusste dies erwartungsgemäß auch die Ergebnisse von Bob – ob-

wohl er räumlich von Alice getrennt war! Vor allem aber trat dieser Effekt nicht allein im statistischen Mittel auf, wie andere Experimente schon vielfach nachgewiesen haben, sondern bei jedem einzelnen Photon. »Wir konnten die Quanteneffizienz zum Nachweis der einzelnen Photonen so stark erhöhen, dass wir dieses Schlupfloch schließen konnten«, sagt Akira Furusawa. Gegner der herkömmlichen Quantenphysik hätten im Prinzip noch hoffen können, dass bei genügend scharfem Hinschauen sich einige bizarre Effekte der Quantenphysik doch nur als Trugschluss herausstellen. Die neuen Messungen bestätigen nicht nur den nicht-lokalen Charakter der Quantenphysik, der philosophisch nach wie vor umstritten ist, [wie Wiseman in einem Beitrag auf »Spektrum.de« ausführte](#), sondern stellen einmal mehr die Weitsicht von Niels Bohr und seinen Kollegen heraus, deren Interpretation auch angesichts dieser Ergebnisse standhält.

Die neuen Methoden sind aber auch aus technologischer Hinsicht interessant: Quantencomputing und Quanteninformationssysteme benötigen verschiedene Komponenten, die sich zu unterschiedlichen Zwecken eignen. So bieten sich Photonen auf Grund ihrer Geschwindigkeit für die Daten-

übertragung an, sie sind aber zu flüchtig für eine Speicherung. Elektronenspins oder supraleitende Elemente sind hingegen besser für die Informationsverarbeitung geeignet, jedoch weniger für die Übertragung.

»Man kann aber sowohl die Wellen- als auch die Teilcheneigenschaften für die Quanteninformationsverarbeitung nutzen«, sagt Furusawa. »Das macht sie deutlich effizienter und unempfindlicher.« Solche hybriden Geräte könnten geschickt die besten Eigenschaften verschiedener Quantensysteme vereinen.

Mit dem neuen Verfahren kann Bob auch eigenständig testen, ob und wie Alice das Photon manipuliert hat und ob es sich um dasselbe Photon handelt. Es könnte sich ja auch ein Spion in die Leitung geschaltet haben. Bob kann also unabhängig von Alice überprüfen, ob sein Quanteninformationssystem richtig funktioniert, so Wiseman: »Unser Verfahren lässt sich als Nachweismethode verwenden, ob eine Verschränkung vorliegt – auch wenn man der anderen Seite nicht traut.« Nicht nur angesichts diverser Abhörskandale eine vielversprechende Option. <

(Spektrum.de, 26. März 2015)

Alles, was Sie wissen müssen. Auf Ihrem Bildschirm



## DAS SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT **DIGITALABO**

Wissenschaftler berichten über die aktuellen Erkenntnisse ihrer Fachgebiete.

Jahrespreis (12 × im Jahr) € 60,-; ermäßigt (auf Nachweis) € 48,-

HIER ABONNIEREN