

Veranstalter:



Partner:



Medienpartner:



2008
highlights der **physik**

2008
highlights der **physik**

Quanten sprünge

Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten die Deutsche Physikalische Gesellschaft und das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre ist zu den „Highlights der Physik 2008: Quantensprünge“ erschienen (Halle/Saale, 14.9. – 18.9.2008), Infos: www.physik-highlights.de

Wissenschaftsmagazin

INHALT



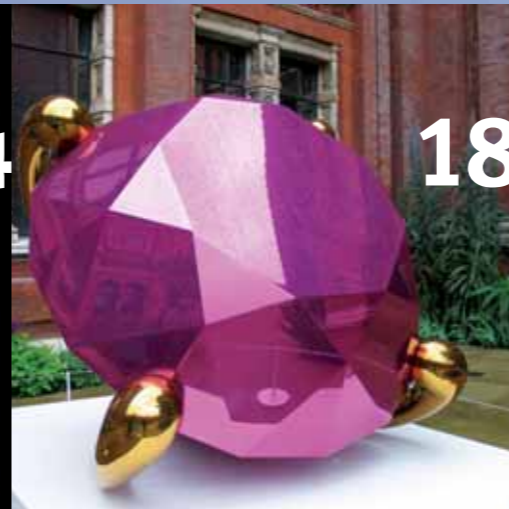
4



10



14



18

Quanten sprünge

- 4** Das schönste Experiment aller Zeiten
- 10** Quantensprünge
- 14** Die Wellenrevolution
- 18** Quantenindustrie
- 24** Die Wissenschaft der Rätsel



24

IMPRESSUM

HERAUSGEBER
Deutsche Physikalische
Gesellschaft e.V. (DPG)
Bundesministerium für
Bildung und Forschung

AUTOR
Wolfgang Richter

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG
Prof. Dr. Eberhard F. Wassermann

INFORMATIONEN ZUM INHALT
Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Pressestelle
Bonner Talweg 8
53113 Bonn
Tel. (0228) 55 525 - 18
Fax (0228) 55 525 - 19
presse@dpg-physik.de

KONZEPT, REDAKTION UND GESTALTUNG
iserundschmidt
Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bonn – Bad Honnef – Berlin
(Verantwortlich: Timo Meyer, Marleen Schwalm)

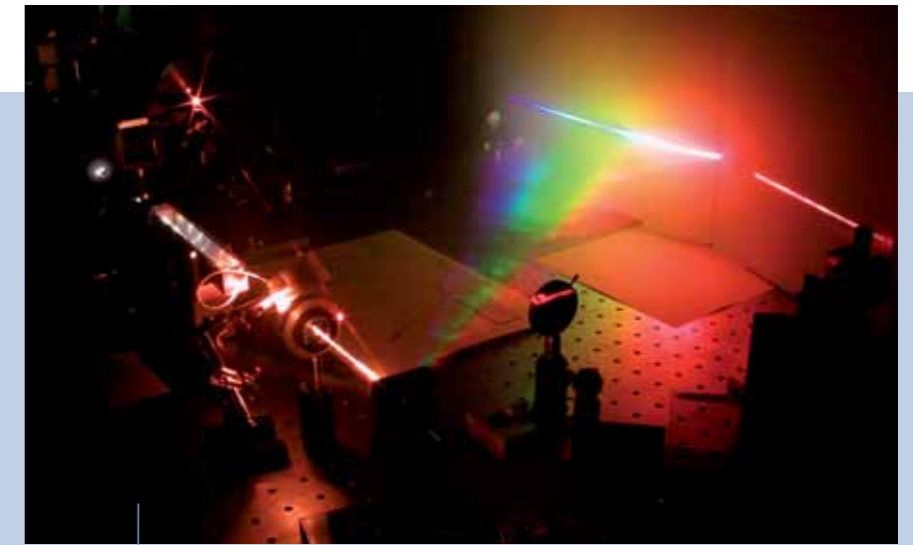
September 2008

Bildquellen (v.l.n.r.): Schrollum, Flickr.com;
BIPM photo; Florian Loder © Uni Augsburg;
© Santanu Vasant, Flickr.com; PhotoDisc;
Titel: Max Planck (Bild: Archiv der Max-
Planck-Gesellschaft, Berlin-Dahlem)



◀ Regenbogen über Hinterbichl in Osttirol (Bild: Schrollum, Flickr.com)

▶ Ein Prisma fächert hier weißes Licht in das gesamte Farbspektrum auf. Ein Nebel aus Wasserdampf macht die Farben sichtbar. (Bild: Frank Luerweg / Uni Bonn)



▶ Wer hier ganz genau hinsieht, erkennt unter dem Hauptregenbogen die überzähligen Bögen. Ihre Entstehung lässt sich nur mit den Welleneigenschaften des Lichts erklären. (Bild: _setev, Flickr.com)

◀ Weg eines Lichtstrahls durch einen Regentropfen (Grafik: ius)



Das schönste Experiment aller Zeiten

Ein einfacher Versuch offenbart die Magie der Quantenphysik besonders eindrucksvoll. Die Idee für das Experiment stammt aus der Zeit, als die Wissenschaftler dem Geheimnis des Regenbogens auf die Spur kamen.

Was haben Mariah Carey, Johnny Cash und Bushido gemeinsam? Alle drei haben nicht nur die Liebe besungen – sondern auch den Regenbogen. Kaum eine Naturerscheinung hat Musiker und Poeten so inspiriert wie das Farbenspiel, das entsteht, wenn Sonne und Regen zusammentreffen. Auch die Wissenschaft hat das Phänomen über Jahrhunderte beschäftigt. So entzündete sich an den Farben des Regenbogens der historische Streit, ob Licht nun aus Teilchen oder Wellen besteht. Und Anfang des 19. Jahrhunderts wurde ein junger, vielseitig begabter Eng-

länder vom Regenbogen zu einem Versuch angeregt, der 160 Jahre später zum zentralen Experiment der Quantenmechanik werden sollte. 2002 kam dieser Versuch sogar in die Charts: Englische Physiker wählten ihn in einer Umfrage zum schönsten Experiment aller Zeiten.

Die Geschichte dieses Experiments beginnt schon im Jahr 1300, als sich der Mönch Dietrich aus Freiberg in Sachsen Gedanken über die Entstehung des Regenbogens machte. Er war der erste, der – fast – auf die richtige Lösung kam: Fällt Licht von der Sonne auf einen kugelförmigen Regentropfen, wird zwar ein großer Anteil am glitzernden Tropfen sofort reflektiert, ein Teil des Lichts tritt jedoch in den Tropfen ein. Bei diesem Übergang vom dünneren Element Luft in das dichtere Element Wasser werden die Lichtstrahlen „gebrochen“ – das

heißt, zur Tropfenmitte hin abgelenkt. Ein Teil dieses gebrochenen Lichts wird danach an der hinteren runden Innenwand des Tropfens reflektiert. Beim Austritt aus dem Tropfen wird das reflektierte Licht schließlich dann noch einmal gebrochen.

Diese Vorgänge bewirken, dass die Lichtstrahlen gebündelt werden und gemeinsam in einem bestimmten Winkelbereich (etwa 40 bis 42 Grad) den Wassertropfen verlassen. Hat man also die tiefstehende Sonne im Rücken und eine ausreichend große Regenwand vor sich, sind es die Regentropfen auf einem Kreisbogen um 42 Grad, die ihr gebündeltes Licht genau in das Auge des Beobachters schicken. Den äusseren Nebenregenbogen mit umgekehrter Farbfolge, der manchmal zusätzlich zu beobachten ist, deutete Dietrich ebenfalls richtig mit doppelter Reflexion

innerhalb des Tropfens. Warum jede der Regenbogen-Farben aber unter einem etwas anderen Winkel den Tropfen verlässt und deshalb einen eigenen Kreisbogen bildet, konnte Dietrich nicht erklären.

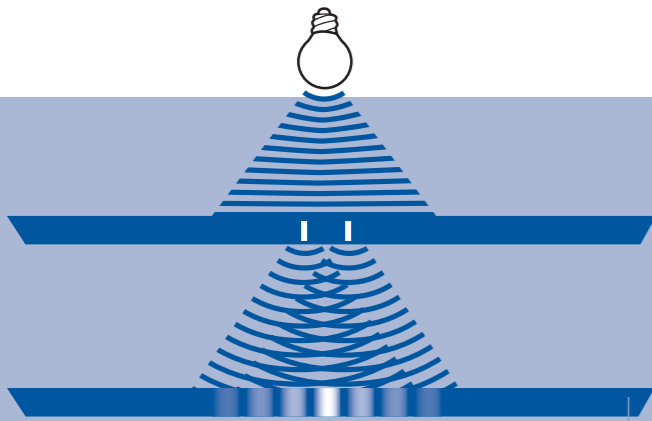
Es dauerte mehr als 300 Jahre, bis René Descartes 1637 den Verlauf der Lichtstrahlen mathematisch exakt beschreiben konnte. Und erst 1666 konnte Isaac Newton die physikalischen Hintergründe der Farbzerlegung des Lichts durch Brechung richtig deuten. Er erkannte, dass das weiße Licht der Sonne aus vielen Farben zusammengesetzt ist. In diese farbigen Bestandteile, sein Spektrum, kann es durch ein Prisma oder eben einen Regentropfen aufgespalten werden: Je nach Farbe wird das Licht beim Eintritt in den Tropfen etwas anders gebrochen und tritt deshalb auch unter einem etwas anderen Winkel aus

dem Tropfen wieder aus. So erscheint für jede Farbe ein eigener Kreisbogen auf der Regenwand.

Die Brechung brachte Newton zu der Überzeugung, dass Licht aus „atomähnlichen“ Teilchen bestehe – er nannte sie „Korpuskeln“. Denn wenn verschieden farbiges Licht unterschiedlich gebrochen wird, muss es je nach Farbe unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Da liegt es nah anzunehmen, dass die Ursache dafür einfach unterschiedlich große Lichtteilchen sind. Der Holländer Christiaan Huygens war allerdings ganz anderer Ansicht: Er hatte um 1650 eine Theorie ausgearbeitet, nach der sich Licht wellenförmig ausbreitet. Die parallelen Lichtstrahlen der Sonne werden in diesem Bild zu einer breiten Wellenfront, ähnlich wie die parallelen Wellen der Meeresbrandung. Mit diesem

Ansatz ließ sich nicht nur die Brechung von Licht erklären, sondern zusätzlich auch erstmals die Beugung, also die Ausbreitung des Lichts hinter einem Hindernis.

Newtons Einfluss und seine halsstarrige Abneigung gegen Kritik waren aber so groß, dass für die nächsten hundert Jahre Huygens' Theorie kaum Anhänger fand. Erst als sich der junge Arzt, Sprachforscher und Physiker Thomas Young Anfang des 19. Jahrhunderts intensiv mit dem Regenbogen beschäftigte, kam wieder Bewegung in den Welle-Teilchen-Disput. Young machte sich Gedanken über die so genannten überzähligen Bögen, die man bei guten Bedingungen direkt unterhalb eines Regenbogens erkennen kann. Sie sind ebenfalls farbig, aber wesentlich blasser als der eigentliche Bogen – und können nicht mit Newtons Theorie erklärt werden.

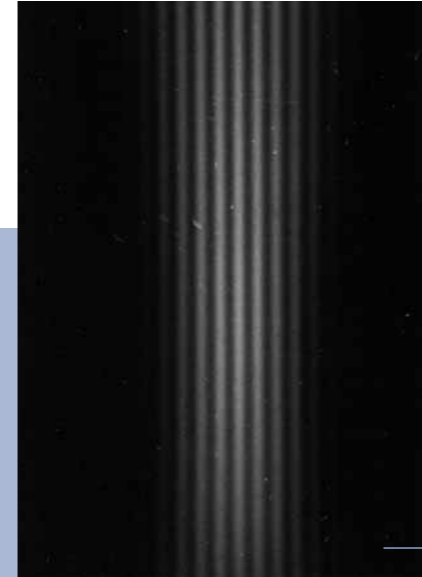


◀ Schematischer Aufbau des Doppelspalt-Experiments: einfarbige Lichtquelle, zwei Spalte und ein Schirm (Grafik: ius)

▼ Wie Wellen durch Überlagerung auffällige Muster erzeugen, lässt sich nicht nur bei schwimmenden Enten beobachten. (Bild: © John Dalkin, Heaven's Gate (John), Flickr.com)



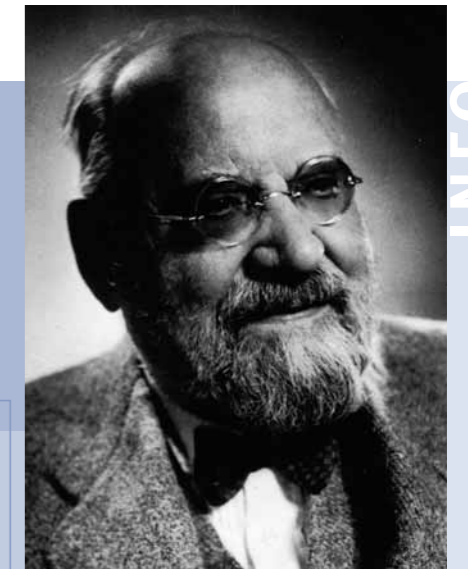
▼ Auch das Weiß der Schäfchenwolken lässt sich mit Mies Streutheorie erklären. Während die Luftmoleküle den blauen Anteil des Sonnenlichts stärker streuen, streuen die größeren Wassertröpfchen der Wolke alle Anteile gleich stark. Ergebnis: Die Wolken sind weiß, der Himmel ist blau. (Bild: PhotoDisc)



◀ Das historische Foto aus Jönssons Originalarbeit zeigt das Streifenmuster der Elektroneninterferenz. (Bild: Prof. Dr. Jönsson, Universität Tübingen)



◀ Dieses Farbstoff-Solarmodul nutzt den Photoeffekt, um mithilfe des Sonnenlichts elektrischen Strom zu erzeugen. (Bild: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE)



100 JAHRE REGENBOGEN

Greifswald, Halle (Saale), Freiburg im Breisgau: In diesen Städten hat Gustav Mie (oben) – der „Vater des Regenbogens“ – als Professor für Physik gelehrt. Im Jahr 1908 veröffentlichte er seine berühmt gewordene Theorie zur „Streuung einer ebenen elektromagnetischen Welle an einer homogenen Kugel“. Dass man mit ihr auch sämtliche Phänomene eines Regenbogens erklären und berechnen kann, wird aus dem Titel allerdings nicht sofort klar. Mie baute seine Theorie auf einer Reihe von Gleichungen auf, die der Schotte James Clerk Maxwell 1865 aufgestellt hatte. Sie verknüpfen die Phänomene Elektrizität und Magnetismus miteinander – und aus ihnen lässt sich auch ableiten, dass Licht eine „elektromagnetische“ Welle sein muss, mit der sich ein elektrisches und ein magnetisches Feld als Schwingung ausbreiten. Das Erstaunliche an Mies Theorie: Sie enthält unendliche Summen komplizierter Ausdrücke, die zu seinen Lebzeiten nicht einmal näherungsweise berechnet werden konnten. Dies gelang erst 1990 mit den dann zur Verfügung stehenden schnellen Computern. Es ist also noch gar nicht so lange her, dass das Rätsel des Regenbogens gelöst wurde.

Bild: Universitätsarchiv Freiburg D 13/142

Young, der 1796 in Göttingen seinen Doktor gemacht hatte, ging ein Jahr später an das Emmanuel College in Cambridge. Der Legende nach kam er am dortigen Ententeich auf die Lösung des Problems: Er beobachtete zwei Enten, die nebeneinander schwammen und kleine Wellen hinter sich ließen. Die Wellen der beiden Enten überlagerten sich, und an einigen Stellen war das Wasser ruhig, obwohl beide Wellen dort zugleich ankamen. Offensichtlich waren an diesen Stellen gerade die Wellentäler von Ente 1 auf die Wellenberge von Ente 2 getroffen und hatten sich gegenseitig ausgelöscht. Ließe sich dieser Effekt vielleicht auch mit Licht erzielen? Young konstruierte sich einen Schirm mit zwei schmalen, parallelen Spalten in geringem Abstand und beleuchtete ihn mit einfarbigem Licht. Und in der Tat – an der gegenüberliegenden Wand konnte er ein Streifenmuster erkennen. Youngs Erklärung: Wie bei **Wasserwellen** breiten sich hinter den beiden Spalten die Lichtwellen kreisförmig aus. An einigen Stellen treffen Wellenberge und -täler aufeinander und heben sich auf, an anderen Stellen verstärken sich Berge bzw. Täler gegenseitig.

Genau dieser Effekt ist auch für die zusätzlichen, intensitätsschwachen inneren Bögen des Regenbogens verantwortlich. Sie entstehen, wenn sich Lichtwellen aus gleichen Richtungen überlagern – man sagt auch „interferieren“ – und ein Muster wie in **Youngs Labor-Experiment** bilden. Durch seine Entdeckung stand es nun 1:0 für das Wellenmodell des Lichts – und die Physiker machten sich daran, es immer weiter zu verbessern. Noch einmal hundert Jahre später, im Jahr 1908, veröffentlichte Gustav Mie schließlich seine berühmte

Theorie der „**Streuung** einer ebenen elektromagnetischen Welle an einer homogenen Kugel“. Damit konnte das Phänomen Regenbogen vollständig beschrieben werden.

Das Doppelspalt-Experiment von Young widerspricht offensichtlich Newtons Teilchenbild des Lichts. Denn wären Lichtpartikel zum Beispiel so groß wie Sandkörner und würde man diese von oben durch zwei Spalte rieseln lassen, würde sich auf dem Boden darunter je ein Sandstreifen hinter jedem der Spalte bilden – aber kein ausgedehntes Interferenzmuster mit vielen Streifen. Trotz dieses Arguments zugunsten des Wellenmodells war aber noch nichts entschieden, wie sich 1905 zeigte. Es war Albert Einstein, der für neuen Aufbruch sorgte, als es ihm gelang, ein lange bekanntes, rätselhaftes Phänomen theo-

retisch zu deuten: Strahlt man Licht auf eine Metalloberfläche, so werden dort Elektronen freigesetzt und es fließt ein Strom. Diesen „**Photoeffekt**“ konnte Einstein nur erklären, wenn das Licht nicht aus Wellen besteht, sondern aus kleinen Portionen – den „Lichtquanten“ – die beim Photoeffekt wie Gewehrkugeln die Elektronen des Metalls treffen und herauschlagen. Newton und seine Teilchenhypothese waren also zumindest zum Teil wieder rehabilitiert. 1:1 im Spiel Welle gegen Teilchen?

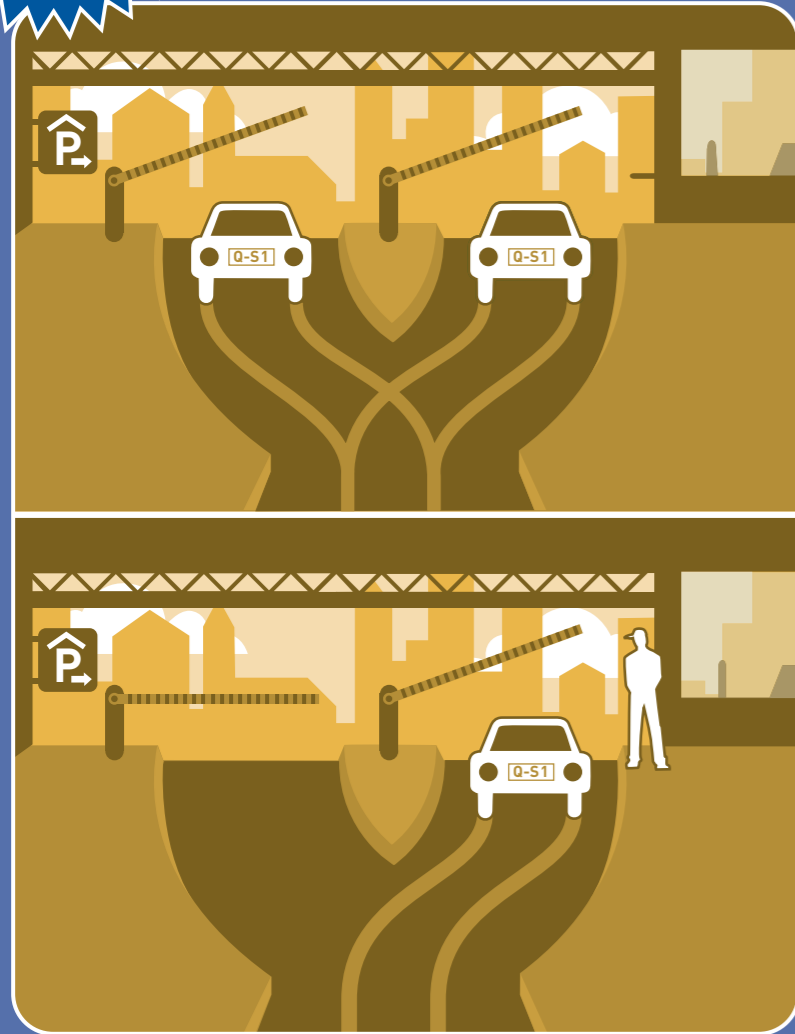
Ende der 1920er Jahre wurde die Sachlage im Disput noch merkwürdiger: Experimente und theoretische Überlegungen im Zusammenhang mit der Entwicklung der Quantenmechanik hatten nämlich gezeigt, dass auch **Teilchen Welleneigenschaften** besitzen können. 1960 gelang dann Claus Jönsson von der Universität Tübingen das

nach der Umfrage unter britischen Physikern „schönste Experiment aller Zeiten“. Er „beleuchtete“ einen Doppelspalt statt mit Licht mit einem Elektronenstrahl und registrierte die ankommenden Elektronen hinter den beiden Spalten auf einer **Fotoplatte**. Obwohl sie beim Aufschlag auf der Platte eindeutig ihre Teilcheneigenschaften zeigten – jedes Elektron erzeugte einen schwarzen Punkt – bildete sich im Lauf der Zeit, nachdem viele Elektronen eingeschlagen waren, genau wie beim Licht ein Interferenz-Streifenmuster auf der Fotoplatte. Das gleiche geschah auch, als man später den Versuch mit einem Atomstrahl, also „richtiger“ Materie, wiederholte.

Wie kann nun ein Teilchenstrahl aus Atomen ein Interferenz-Muster erzeugen, ein Strahl aus Sandkörnern aber offensichtlich nicht? Offenbar haben die kleinen Elektro-

nen und Atome noch „Welleneigenschaften“, die Sandkörner nicht mehr besitzen. Mit dieser Annahme scheint eine Erklärung des Doppelspalt-Experiments einfach: Strahlt man viele Atome auf die beiden Spalte, so gehen einige durch den rechten Spalt, einige durch den linken. Im Raum

QUANTENWELT IM XXL-FORMAT



Stellen Sie sich vor ...

... ein Auto fährt aus dem Parkhaus durch beide Ausfahrten gleichzeitig, wenn es keiner sieht. Schaut dagegen jemand zu, entscheidet es sich spontan für eine von beiden. Was bizarr klingt und höchstwahrscheinlich in ein Verkehrschaos münden würde, ist beispielsweise für Elektronen gang und gäbe. Das konnten Forscher mit dem berühmten Doppelspalt-Experiment spektakulär zeigen. (Grafik: Timo Meyer, Melina Diener)

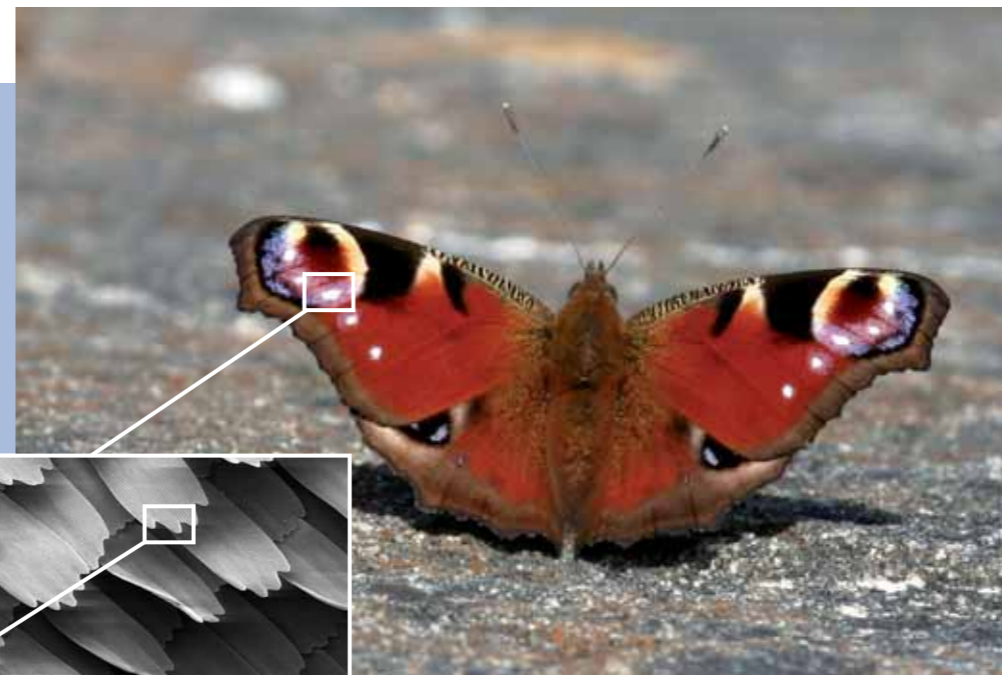
dahinter überlagern sich dann die „Materiewellen“ dieser Atome und bilden durch Auslöschung oder Verstärkung das typische Streifen-Muster.

Das Merkwürdige: diese Erklärung ist falsch! Dimmt man nämlich die Atomstrahlquelle so weit herunter, dass nur noch einzelne Atome herauskommen, und wartet dann mit dem Abschuss des nächsten Atoms immer so lange, bis das vorangegangene garantiert auf der Fotoplatte angekommen ist, dann geschieht etwas Unglaubliches: Langsam aber sicher bildet sich wieder ein Streifenmuster! Für die Interferenz ist es aber zwingend notwendig, dass von beiden Spalten kreisrunde Wellen ausgehen. Hat sich also jedes einzelne Atom vor dem Schirm in zwei Hälften – zwei Teilwellen – gespalten, die gleichzeitig durch die beiden Spalte fliegen, um

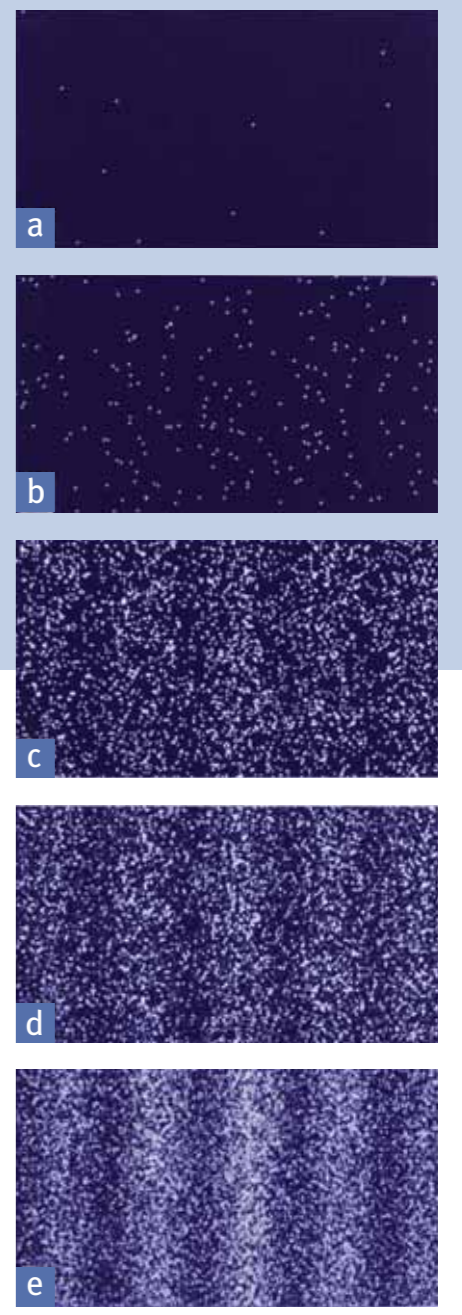
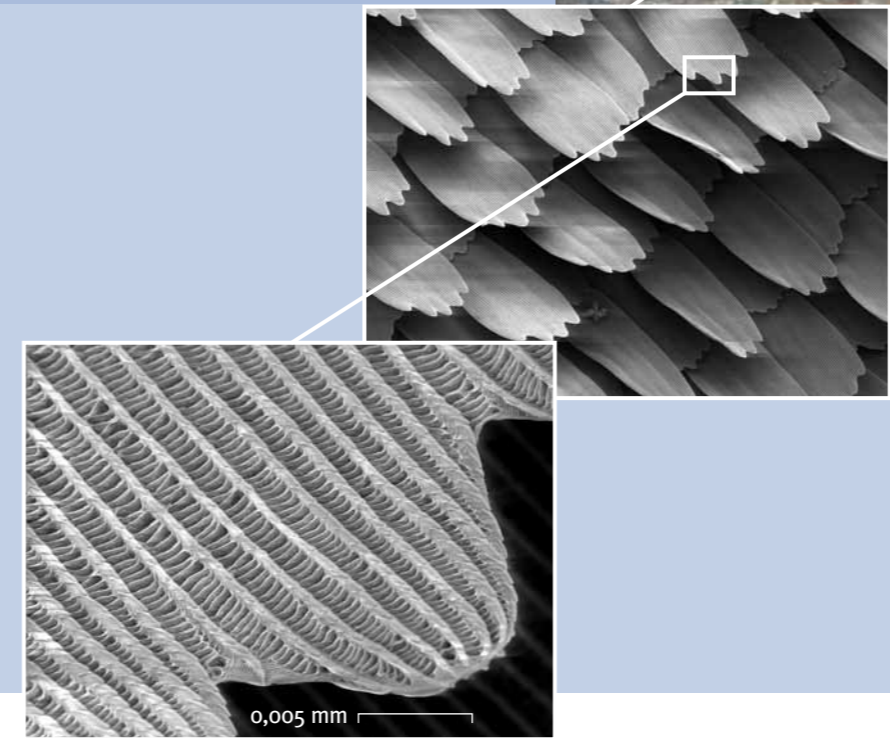
dann hinter den Spalten zu interferieren und das Streifenmuster zu bilden?

Um dies näher zu untersuchen, ersannen die Forscher eine Vorrichtung, um die Atome einzeln direkt hinter dem Schirm zu orten (Details sollen hier nicht interessieren). Nun war es also möglich zu bestimmen, ob die Atome durch den rechten, den linken oder gar durch beide Spalte gleichzeitig gehen. Bei einer Wiederholung des Versuchs stellten die Wissenschaftler fest, dass genau die Hälfte der Atome durch den rechten, die andere Hälfte durch den linken Spalt gegangen war, und keines durch beide gleichzeitig. Allerdings: Nun war auch das Interferenzmuster auf der Fotoplatte verschwunden. Stattdessen konnte man auf der Platte hinter jedem der Spalte einen ordinären „Sandhaufen“ erkennen. Offensichtlich merken

► Überraschung am Doppelspalt: Ein Elektron erzeugt einen Punkt, viele Elektronen erzeugen ein Streifenmuster. Die Zahl der auf der Fotoplatte eingeschlagenen Elektronen: 10 (a), 200 (b), 6000 (c), 40000 (d) und 140000 (e). (Bilder: Dr. Tonomura Akira, Hitachi Advanced Research Laboratory)



◀ Schmetterlinge wie dieses Pfauenauge sind der schillernde Beweis für die Wellennatur des Lichts. Ihre Flügel sind mit unzähligen, winzigen Rippen bestückt (in der untersten Elektronenmikroskopaufnahme erkennbar), deren stufenförmige Oberflächen die Sonnenstrahlen interferieren lassen und so die Farbenpracht erzeugen. (großes Bild: Strange Ones, Flickr.com; kleine Bilder: Wikimedia Commons)





Quantensprünge

Vor über 100 Jahren entdeckte Max Planck, dass die Natur Sprünge macht. Die von ihm gefundene Naturkonstante h , zu seinen Ehren „Planck'sches Wirkungsquantum“ genannt, ist heute aktueller denn je.

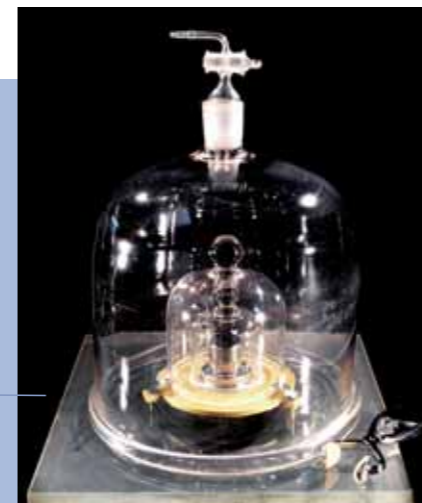
In einer kleinen Villa aus dem 18. Jahrhundert, von Rosen umgeben und inmitten eines weitläufigen Parks in Sèvres unweit von Paris, liegt seit 119 Jahren die letzte Reliquie der Physik. Ein blank polierter Platinzylinder, gelagert im Inneren des „Pavillon de Breteuil“, hinter den Zentimeter dicken Stahlplatten eines Tresors, unter einer luftleer gepumpten Glasglocke: das internationale **Ur-Kilogramm**. Nach seinem Ebenbild wurden die nationalen Eichstandards der ganzen Welt geschaffen, die für alle Gewichte, auch die beim Gemüsehändler um die Ecke, Pate standen.

Seit rund 20 Jahren haben die Wächter dieses Heiligtums aber ein Problem. Bei Vergleichsmessungen mit den rund 40 Kopien der einzelnen Nationen zeigte sich, dass das Ur-Kilogramm an Gewicht verliert. Die Ursache dafür ist unklar – zu häufiges Putzen des Metallzylinders wurde als Möglichkeit ausgeschlossen. Bis 2011 soll deshalb das Kilogramm auf eine Naturkonstante zurückgeführt werden. Schließlich ist es die einzige physikalische Maßeinheit, die sich nicht direkt aus einer Präzisionsmessung bestimmen lässt – so wie zum Beispiel das Meter über die Messung der Lichtgeschwindigkeit definiert wird, oder die Stromstärke Ampère mit Hilfe der Elementarladung eines Elektrons.

Heißer Kandidat für die Neudefinition des Kilogramms ist das „Planck'sche Wirkungsquantum“ h , eine in der Öffentlichkeit

weithin unbekanntes Naturkonstante. Ihr Absolutwert soll zum Eichen eines Gewichtes verwendet werden. Dafür nimmt man eine Balkenwaage und hängt an einen Arm das zu eichende Kilogramm-Gewicht. Am anderen Arm hängt eine stromdurchflossene Spule, die sich in einem inhomogenen Magnetfeld befindet. Je nach Stromstärke in der Spule zieht dieses Magnetfeld die Spule mit einer bestimmten Kraft nach unten. Ist die Balkenwaage im Gleichgewicht, kompensiert diese elektromagnetische Kraft gerade die Gewichtskraft des Kilogramms.

Nun machen die Wissenschaftler zwei Messungen: Ist die Waage im Gleichgewicht, messen sie die Stärke des dazu notwendigen Stroms in der hängenden Spule. Dann schalten sie den Strom ab und bewegen die Waage und damit die



▲ Das Ur-Kilo – ein kleiner Platinzylinder von 39 mm Durchmesser – unter Glas. (Bild: BIPM photo)

► Das Prinzip ist einfach, die Umsetzung schon schwieriger: Die Wattwaage im National Institute of Standards and Technology (NIST), an der der Physiker Richard Steiner hier arbeitet, ist zwei Stockwerke hoch. (Bild: © Robert Rathe)

◀ Pavillon de Breteuil – malerischer Stammsitz des „Bureau international des poids et mesures“ und des internationalen Ur-Kilogramms (Bild: BIPM photo)

Spule im Magnetfeld. Die dadurch in der Spule induzierte Spannung wird nun ebenfalls gemessen. Um die Planck'sche Konstante h ins Spiel zu bringen, werden beide Messungen mit Hilfe quantenmechanischer Phänomene ausgewertet (siehe Info Seite 12). Ergibt sich bei den Messungen der korrekte Wert für die Konstante h , hängt an der anderen Seite der Waage gerade das Gewicht von einem Kilogramm. Übrigens: Aufgrund der Messung von Strom und Spannung, also der elektrischen Leistung, spricht man auch von einer „Watt-Waage“.

Was hat es nun mit diesem ominösen „ h “ auf sich? Schon sein Entdecker, der Nobelpreisträger Max Planck, sah im Jahr 1900 die Möglichkeit voraus, mit Hilfe dieser und den anderen Naturkonstanten „Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Tempe-

ratur aufzustellen, welche, unabhängig von speziellen Körpern oder Substanzen, ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und aussermenschliche Culturen notwendig behalten und welche daher als ‚natürliche Maasseinheiten‘ bezeichnet werden können.“ Die eigentliche Bedeutung der Konstante h – Max Planck nannte sie einfach „Hilfsgröße“ – war ihm damals noch nicht klar: Ihre Entdeckung war die Geburtsstunde der Quantenphysik.

Planck war es um die Jahrhundertwende gelungen, ein damals kontrovers diskutiertes Problem zu lösen: Wie lässt sich die in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessene Intensitätsverteilung der Strahlung eines „Schwarzen Körpers“ erklären? Dieser Begriff wurde schon im Jahr 1859 von Gustav Kirchhoff, einem der Lehrer

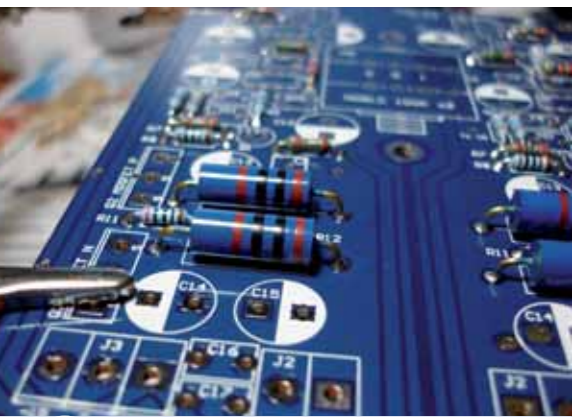


GESPRÄCHSSTOFF FÜR BESSERWISSE

Über den Niedergang der deutschen Sprache wird heute oft lamentiert. Wer zusätzlich mit seinem Fachwissen angeben möchte, beschwert sich im Party-Smalltalk gerne über die missbräuchliche Verwendung des Wortes „Quantensprung“: Physiker bezeichnen damit die kleinstmögliche Energieübertragung, Wirtschaftsbosse und Politiker dagegen einen größtmöglichen Fortschritt. „Erste schriftliche Belege für diese zweite Bedeutung des Wortes gibt es aus dem Jahr 1990, danach hat die Verwendung rapide zugenommen“, sagt Evelyn Knörr von der Duden-Redaktion. Inzwischen wird der Begriff in diesem Sinn auch von großen Zeitungen wie der Süddeutschen benutzt und hat Eingang in mehrere Bücher gefunden.

Warum er bei uns erst seit einigen Jahren verwendet wird, ist für die Sprachforscher ein Rätsel, denn im Englischen gibt es den Begriff „quantum jump“ beziehungsweise „quantum leap“ schon seit den 50er Jahren in der Bedeutung einer plötzlichen, großen Zunahme oder eines großen Fortschritts. Vielleicht spielte ja das Fernsehen bei der Verbreitung des Begriffs eine kleine Rolle: So lief in den 1990er Jahren die amerikanische Science-Fiction-Serie „Quantum Leap“ auch in Deutschland an.

Plancks, geprägt. Man versteht darunter ein idealisiertes Objekt, das jede auftretende elektromagnetische Strahlung gleich welcher Wellenlänge vollständig absorbiert. Außerdem strahlt er selbst Energie ab und zwar über den gesamten Wellenlängenbereich – man nennt ihn deshalb auch einen „Schwarzen Strahler“. Welche



SPANNUNG HÄPPCHENWEISE

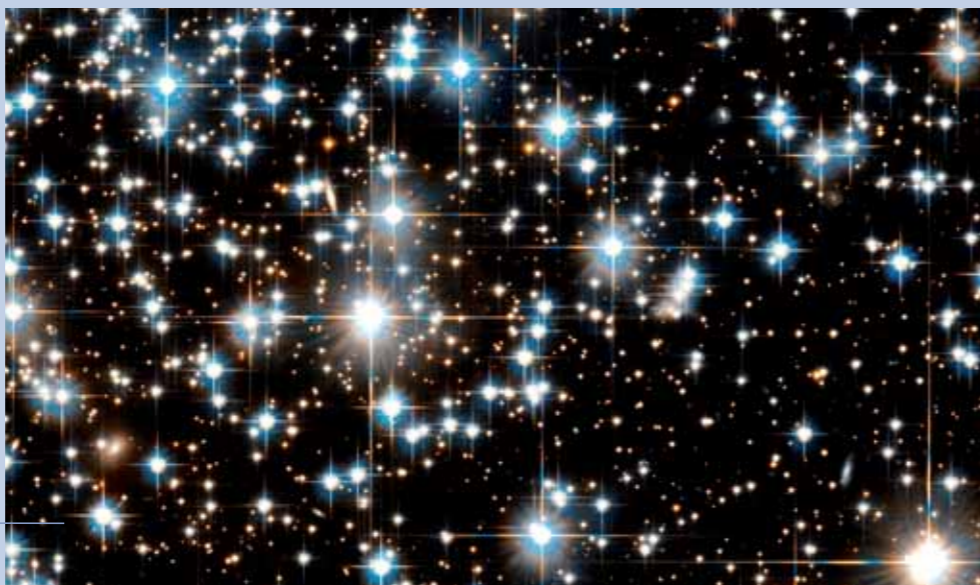
Manche werden sich noch an den Begriff „Hall-Effekt“ aus dem Physik-Unterricht erinnern: Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld, so wirkt auf die Elektronen senkrecht zu ihrer Stromrichtung die so genannte Lorentz-Kraft. Durch sie werden die Elektronen zu einer Seite des Leiters abgelenkt, und man kann quer über den Leiter eine Spannung messen. Klaus von Klitzing vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart untersuchte 1980 diese Hall-Spannung bei sehr tiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern an ganz speziellen Proben („Halbleiter-Heterostrukturen“). Seine erstaunliche Beobachtung: Hier wuchs die Hall-Spannung nicht wie sonst kontinuierlich mit der Stärke des Magnetfeldes, sondern in kleinen Abstufungen. Für die Entdeckung dieses „Quanten-Hall-Effekts“ bekam er bereits fünf Jahre später den Nobelpreis für Physik. Bei der Neudefinition des Kilogramms mit Hilfe der Watt-Waage wird dieser Effekt benutzt, um die Stromstärke in der hängenden Spule mit der Planck'schen Konstante h zu verknüpfen. Die Spannung in der Spule kann mit h in Verbindung gebracht werden, wenn man für ihre Messung den „Josephson-Effekt“ in einem „supraleitenden“ Ring verwendet (siehe Kapitel 4).

Intensität die abgegebene Strahlung bei einer bestimmten Wellenlänge besitzt, hängt ausschließlich von der Temperatur des **Schwarzen Körpers** ab.

Planck ging davon aus, dass die Temperatur eines Materials das Schwingungsverhalten seiner Atome bestimmt. Je nach Frequenz der Schwingungen wird dann unterschiedlich energiereiche Strahlung

◀ Was die Naturkonstante h für das Kilo werden soll, ist die „von-Klitzing-Konstante“ für die Einheit des elektrischen Widerstands, dem Ohm. Ableiten lässt sie sich aus dem „Quanten-Hall-Effekt“. Benannt wurde sie nach dessen Entdecker Klaus von Klitzing. (Bild: Vincent's Album, Flickr.com)

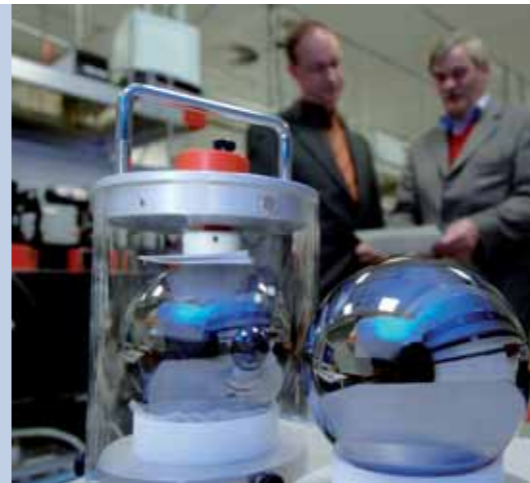
▼ Sterne inklusive unserer Sonne sind annähernd perfekte „Schwarze Strahler“. Astronomen können daher allein anhand der Strahlung, die die fernen Sonnen zu uns schicken, ablesen, wie heiß es an deren Oberfläche zugeht. (Bild: NASA, ESA, and H. Richer (University of British Columbia))



von den Atomen des Schwarzen Strahlers ausgesandt. In der Mechanik gibt es nun schwingende Systeme, die nur ganz bestimmte Schwingungsfrequenzen annehmen können – zum Beispiel eine Gitarrensaiten, deren Schwingung sich sprunghaft von einem Bund zum nächsten ändert. Nur unter der Annahme, dass auch die schwingenden Atome ihre Energie nur sprunghaft ändern, konnte Planck eine Strahlungs-Formel aufstellen, die die bekannten experimentellen Kurven exakt reproduzierte. Die kleinstmögliche „Sprunghöhe“ ist dabei proportional zum Wirkungsquantum h . Planck betrachtete diese Quantelung der Energie also als Eigenschaft der Materie und nicht des Lichts. Das Licht war nur insofern betroffen, als es in seinem Modell immer nur in bestimmten Portionen Energie mit Materie austauschen konnte, weil in der Materie nur bestimmte Energieniveaus möglich sind.

Max Planck war sich der Tragweite seines Einfalls keineswegs bewusst. Er nannte die Einführung von Energieportionen, eben den Quanten, sogar einen „Akt der Verzweiflung“. Erst als Albert Einstein 1905 den Photoeffekt mit seiner Hypothese der Lichtquanten erklären konnte, bekam die Quantentheorie eine fundamentale Bedeutung, und es dauerte acht weitere Jahre, bis klar wurde, dass Quanten auch bei der Beschreibung der Materie eine weitaus größere Rolle spielen als von Planck angenommen.

Zu dieser Zeit stellten sich die Physiker vor, dass in einem Atom winzige negativ geladene Elektronen in großem Abstand um einen positiv geladenen Kern kreisen, ähnlich wie Planeten um die Sonne. Die ins Zentrum gerichtete elektrische Anziehung zwischen den negativen und positiven Ladungen wird in diesem Modell durch die nach außen gerichtete Zentrifu-



▶ Max Planck und Sohn Erwin bei einer Bergwanderung in den späten 1930er Jahren (Bild: Archiv der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin-Dahlem)

◀ Auch eine Kugel aus reinem Silizium könnte das 1889 hergestellte und seit 20 Jahren an Gewicht verlierende Ur-Kilo ersetzen. Die „Avogadro-Kugel“ ist lupenrein und nahezu perfekt – nicht nur was ihre Kristallstruktur angeht. Wäre die Erde so perfekt rund wie diese Kilokugel, wäre der Mount Everest nur 182 cm hoch. (Bild: PTB)

▶ In diesen Fläschchen schwimmen winzige, nur aus einigen zehntausend Atomen aufgebaute Halbleiterkristalle. Diese sind so klein, dass quantenmechanische Effekte ihre Eigenschaften bestimmen – so zum Beispiel die Farbe, in der sie leuchten. (Bild: Office of Naval Research)



galkraft aufgehoben – so laufen die Elektronen auf stabilen Bahnen. 1913 legte jedoch der junge Däne Niels Bohr den Finger in die Wunde dieser Theorie: Nach den Gesetzen des Elektromagnetismus verliert nämlich jede sich bewegende elektrische Ladung Energie. Die Elektronen müssten also langsamer werden und auf einer Spiralbahn in den Kern stürzen.

Bohr behauptete nun, in Erweiterung von Plancks Quantenhypothese, dass die Elektronen eines Atoms Strahlung nur in Portionen aufnehmen bzw. abgeben können. Ein Elektron kann demnach bei seiner Bewegung um den Atomkern gar nicht kontinuierlich Energie verlieren, sondern nur abrupt, wenn es von einer höheren Bahn in eine erlaubte tiefere Bahn wechselt. Dabei strahlt es eine elektromagnetische Welle ab, wobei die Energiedifferenz E zwischen den beiden Bahnen der Frequenz

f des abgestrahlten Lichts direkt proportional ist. Die Proportionalitätskonstante ist das Planck'sche Wirkungsquantum, also $E = h \cdot f$. Umgekehrt kann ein Elektron nur dann von einer tieferen Bahn in eine höhere springen, wenn von außen genau die Energiedifferenz zwischen den beiden Bahnen eingestrahlt wird.

Dieses „Bohr'sche Atommodell“ ist so anschaulich, dass es auch heute noch in der Schule gelehrt wird – obwohl es von der Realität weit entfernt ist. Denn einerseits liefert es nur für das einfachste Atom, den Wasserstoff, korrekte Ergebnisse. Und zum anderen sind Elektronen eben keine kleinen Kügelchen, die im Kreis fliegen. Dies machte zehn Jahre später ein französischer Prinz der verblüfften Wissenschaftsgemeinde klar – und läutete damit die zweite Revolution in der Quantenphysik ein.



REVOLUTIONÄR WIDER WILLEN

Dass Deutsche nicht besonders gut darin seien, eine richtige Revolution auf die Beine zu stellen, ist ein gängiges Vorurteil. Max Planck, der am 23. April 1858 in Kiel geboren wurde, passt da als unfreiwilliger Urheber der Quanten-Revolution gut ins Klischee. War er sich zunächst der Bedeutung seiner Theorie nicht bewusst, stand er später den revolutionären Ideen junger Quantenphysiker wie Werner Heisenberg eher ablehnend gegenüber. Planck war sehr konservativ, pflichtbewusst und gewissenhaft. Er liebte Musik und die Gesellschaft von Freunden, die oft in seinem Haus im Berliner Villenvorort Grunewald zu Gast waren. Während der Zeit des Nationalsozialismus geriet seine grundsätzliche Loyalität zum Staat in Konflikt mit seinem Gewissen. Mehrfach setzte er sich als Präsident der „Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft“ für bedrohte Kollegen ein, unter anderem auch für Albert Einstein. Privat war das Leben Max Plancks von schweren Schicksalsschlägen geprägt: Seine erste Frau stirbt früh, sein ältester Sohn Karl fällt im Ersten Weltkrieg, die Zwillingstöchter sterben beide im Wochenbett. Schließlich verliert er auch sein viertes Kind: Sein Sohn Erwin, in der Weimarer Republik Staatssekretär unter von Papen und Schleicher, wird als Mitverschwörer des Attentats auf Hitler im Januar 1945 in Plötzensee erschossen. Max Planck stirbt am 4. Oktober 1947 in Göttingen.



Die Wellenrevolution

Dass Licht sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften besitzt, daran hatten sich die Physiker Anfang der 1920er Jahre gewöhnt. Dass sich aber auch massive Teilchen wie zum Beispiel Elektronen wie Wellen verhalten können, hielten die meisten für eine obskure Idee.

Vielleicht war es die außergewöhnliche Kindheit von Louis-Victor de Broglie, die ihn empfänglich machte für bizarre Ideen. 1892 als Spätankömmling und viertes Kind einer Familie des französischen Hochadels geboren, erlebte er in seiner Jugend unruhige Zeiten. Während seine Eltern mit dem gesamten Hausrat und der Dienerschaft in einem eigenen Eisenbahn-Salonwagen von einem Ort zum nächsten eilten, verschlang der junge Louis die Folianten aus der väterlichen Bibliothek oder erfand phan-

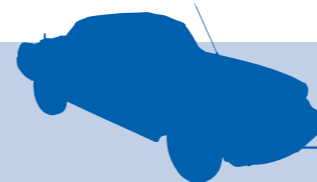
tastische Rollenspiele zusammen mit seiner vier Jahre älteren Schwester. Erst spät, angeregt durch seinen 17 Jahre älteren Bruder Maurice, der ihm auch den früh verstorbenen Vater ersetzte, entdeckte er die Liebe zur Physik – und wäre dann beinahe durch seine Doktor-Prüfung gefallen.

Was de Broglie 1924 seinen Professoren präsentierte, war für die damalige Zeit tatsächlich revolutionär. Seine Idee: Wenn Licht als eine immaterielle Form der Energie sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften haben kann, könnte das nicht auch für reale Teilchen gelten?

Einsteins berühmte Formel $E = mc^2$ besagt, dass Materie (der Masse m) einer Energie (E) äquivalent ist, wenn man sie auf Lichtgeschwindigkeit c beschleunigt. Setzt man nun die von Planck für Lichtwellen gefun-

dene Energie $E = h \cdot f$ der Energie nach Einstein gleich, also $E = h \cdot f = mc^2$, und drückt die Frequenz f der Lichtwelle in dieser Gleichung durch ihre Wellenlänge $\lambda = c / f$ aus, so erhält man $\lambda = h / m \cdot c$. Das heißt: Die Wellenlänge des Lichts ist gleich dem Planck'schen Wirkungsquantum h geteilt durch den „Impuls“ des Lichts $p = m \cdot c$. De Broglies genialer Gedanke, für den er 1929 den Nobelpreis für Physik erhielt: Diese Beziehung gilt nicht nur für Licht, sondern für alle möglichen Teilchen. Setzt man die entsprechenden Geschwindigkeiten (v) und Massen (m) für Elektronen, Protonen oder Neutronen in die Formel ein, erhält man auch für sie eine Wellenlänge: die **de Broglie-Wellenlänge**.

Mit seinem Ansatz konnte de Broglie eine große Schwäche des Bohr'schen Atommodells beheben. Denn mit dem Postulat, dass



$v = 50 \text{ km/h}, m = 1 \text{ t}$

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 0477 mm



$v = 5 \text{ km/h}, m = 50 \text{ kg}$

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 00954 mm

$v = 95 \text{ km/h}, m = 420 \text{ g}$

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 0598 mm



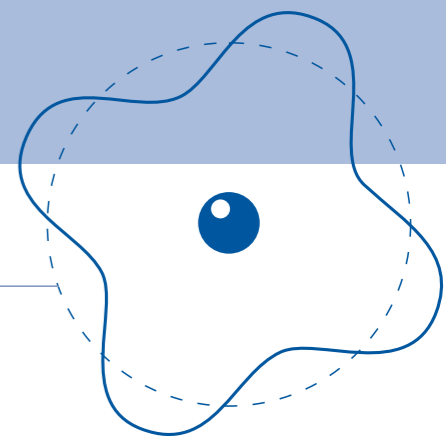
$v = 1.080.000 \text{ km/h}, m = 0,000 000 000 000 000 000 000 000 91 \text{ g}$

0,000 00242 mm

◀ In einem Atom bewegen sich die Elektronen nach quantenmechanischen Spielregeln in so genannten Orbitalen. Auf welchen komplexen Bahnen sie sich in supraleitenden Metallringen bewegen, konnten Augsburger Forscher jetzt berechnen. Das visuell spektakuläre Ergebnis passt in jede Kunstgalerie. (Bild: Florian Loder © Uni Augsburg)

▲ Auch Objekten, die sehr viel größer sind als Elementarteilchen kann man eine de Broglie-Wellenlänge $\lambda_{dB} = h / m \cdot v$ (mit $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$) zuordnen. Autos, Menschen oder Fußballer benehmen sich trotzdem nicht wie Wellen, denn ihre Wellenlängen sind geradezu winzig und nicht beobachtbar. Bei einem Elektron (unterste Reihe) sieht dies schon ganz anders aus: Seine λ_{dB} liegt in der Größenordnung der Atomabstände in Festkörpern. (Grafik: ius)

▼ Eine „zugelassene“ Umlaufbahn eines Elektrons um einen Atomkern. Man beachte: Die Kreisbahn entspricht einem Vielfachen der Wellenlänge des Elektrons. (Grafik: ius)



es für Elektronen im Atom nur bestimmte Umlaufbahnen gibt, hatte Niels Bohr zwar die Stabilität der Materie erklären können. Was fehlte, war aber ein physikalischer Mechanismus, der diese Annahme verständlich macht. Stellt man sich nun das Elektron auf seiner Umlaufbahn als Welle vor, so muss diese in sich geschlossen sein – denn sonst ergäbe sich an einer Stelle ja ein „Sprung“ in der Welle und damit im Teilchenbild eine plötzliche Änderung des Impulses. Dies bedeutet aber, dass nur solche Umlaufbahnen für das Elektron zugelassen sind, in die ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge passt! Im Wellenbild ergibt sich die Quantisierung der **Elektronenbahnen** also ganz zwangsläufig.

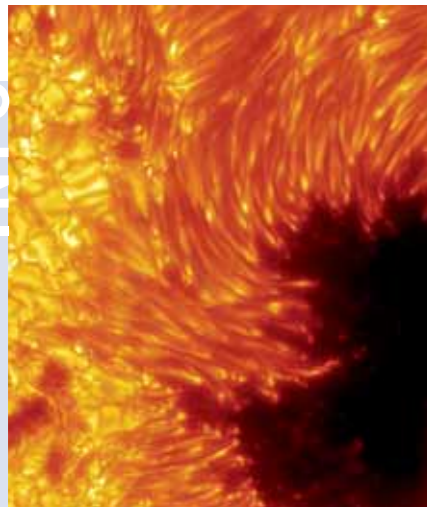
Die Prüfungskommission ließ Louis de Broglie bestehen, aber keiner der Professoren glaubte ernsthaft an die Existenz

der Materiewellen, denn für sie gab es keine experimentellen Beweise. Die Herren schickten jedoch ein Exemplar der Arbeit an Einstein – der ihre Bedeutung sofort erkannte. In den folgenden Jahren beschäftigten sich die bedeutendsten Physiker dieser Epoche mit de Broglies Konzept, darunter Niels Bohr selbst, der Österreicher Erwin Schrödinger sowie der junge deutsche Physiker Werner Heisenberg. Sie stellten de Broglies Ideen nicht nur auf ein solides mathematisches Fundament, sondern erweiterten sie auch um einen entscheidenden Punkt: den Zufall. Am Ende der Entwicklung stand das Konzept der „Wahrscheinlichkeits-Wellenfunktion“. Sie ist heute ein Schlüsselbegriff der Quantenphysik.

Diese Wellenfunktion beschreibt den quantenmechanischen Zustand eines Teilchens

oder eines Systems von Teilchen. Sie entspricht von der mathematischen Form her zwar genau der Funktion für eine Welle aus der klassischen Mechanik – womit sich der Begriff Quantenmechanik erklärt. In der Quantenphysik spielt sie aber eine völlig andere Rolle. Ihr liegt die 1927 von Werner Heisenberg formulierte Unschärferelation zu Grunde, nach der Größenpaare wie Ort und Impuls oder Zeit und Energie nicht gleichzeitig und mit beliebiger Genauigkeit gemessen werden können. Je genauer man den einen Wert misst, umso unbestimmter wird der andere.

Da also im Unterschied zur klassischen Physik eine exakte Aussage zum Beispiel

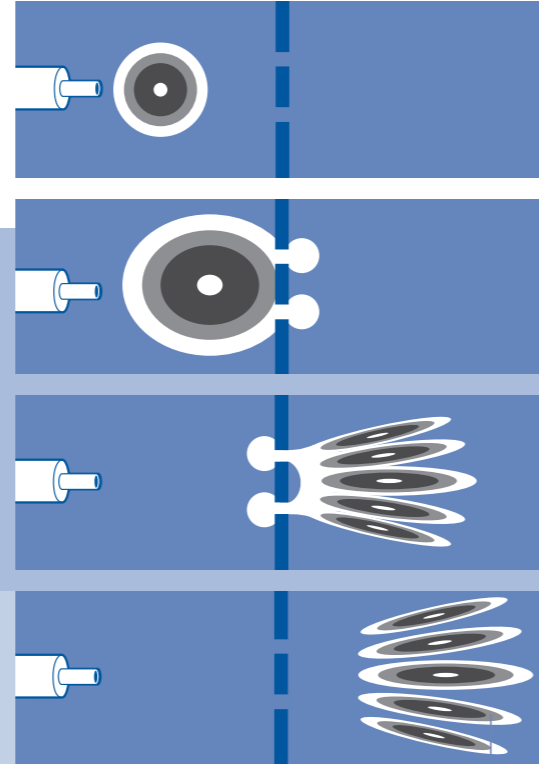


TUNNEL ZUM LEBEN

Der „Tunneleffekt“ ist eines der zentralen Phänomene in der Quantenphysik. Berechnet man, an welchen Orten sich ein Teilchen aufhalten kann, das irgendwo „eingesperrt“ ist oder sich vor einer Barriere befindet, so stellt man häufig fest: Seine Wahrscheinlichkeits-Wellenfunktion lappt ein kleines Stück über diese Begrenzung hinaus. Dies bedeutet, dass das Teilchen sich mit einer (allerdings sehr kleinen) Wahrscheinlichkeit auch auf der anderen Seite der Barriere befinden kann – als hätte es sich heimlich einen Flucht-Tunnel durch diesen Wall gegraben. Dieser Effekt tritt zum Beispiel in Halbleiter-Tunneln und macht die sogenannten Rastertunnel-Mikroskope, mit denen man Atome „sehen“ kann, erst möglich. Elektronen tunneln dabei von einem Atom einer zu untersuchenden Oberfläche in die Spitze des Mikroskops. Sie werden erfasst und liefern so Informationen über die Kontur der Probe. Auch die für die Evolution wichtigen spontanen Mutationen in unseren Genen können durch den Tunneleffekt ausgelöst werden. In DNA-Molekülen brechen Protonen mit seiner Hilfe aus ihrem „Gefängnis“ im Atomkern aus und verändern so die Molekülstruktur der Erbinformationen. Das Tunneln von Elektronen und Protonen betrachten viele Wissenschaftler auch als die Lösung des Rätsels, warum Enzyme chemische Reaktionen im Körper enorm beschleunigen können. Und selbst die Sonne würde ohne den Tunneleffekt nicht scheinen. Erst mit seiner Hilfe ist es nämlich den Wasserstoff-Atomkernen im Sonneninneren möglich, die Barriere ihrer gegenseitigen elektrischen Abstoßung zu überwinden und zu Helium-Kernen zu verschmelzen. Ein Teil der dabei frei werdenden Energie erreicht auch unsere Erde – als strahlender Sonnenschein.

◀ Unter der brodelnden Sonnenoberfläche trägt auch das „Tunneln“ zur Energieerzeugung bei. (Bild: Royal Swedish Academy of Sciences)

▶ Künstlerischer Deutungsversuch des Doppelspaltexperiments: Die Wellenfunktion eines Atoms trifft auf die Spalte und erzeugt ein Interferenzmuster. Die unterschiedlichen Konturen markieren die Höhe der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Atoms, ähnlich wie Höhenlinien auf einer Landkarte. (Grafik: ius)

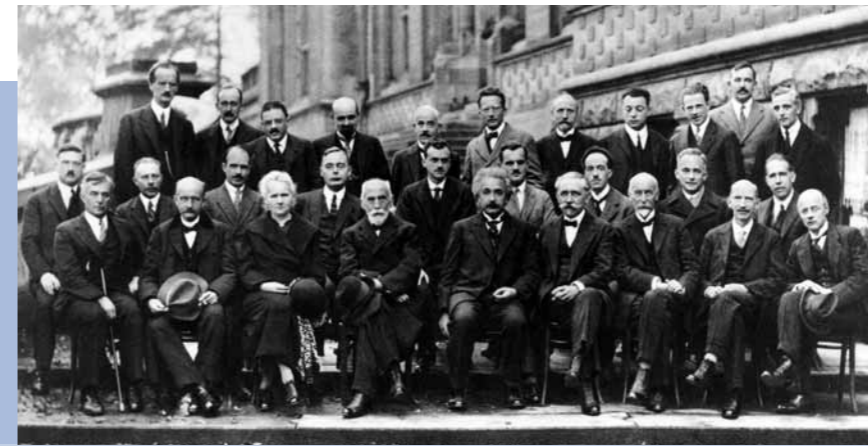


▼ Zumindest in der Quantenwelt müsste es statt H₂O eigentlich H_{1,5}O lauten. Berliner Physiker konnten zeigen, dass bei der Streuung von Elektronen an Wassermolekülen die streuenden Protonen des Wasserstoffs H für die Elektronen teilweise „unsichtbar“ sind. Mögliche Erklärung: Die Protonen heben sich durch kurzzeitige Überlagerung an manchen Stellen gegenseitig auf – ganz genau wie Wellenberg und Wellental interferierender Wasserwellen. (Bild: OiMax, Flickr.com)

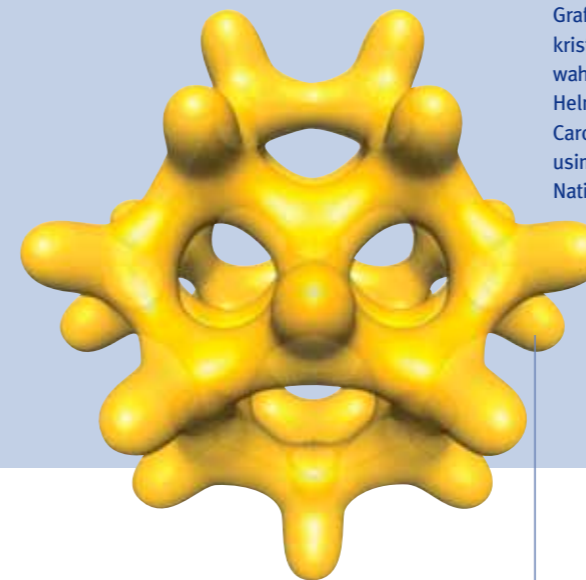


über den Aufenthaltsort eines quantenmechanischen Teilchens nicht möglich ist, verwenden die Quantenphysiker den Begriff der „Aufenthaltswahrscheinlichkeit“. Sie berechnet sich aus der Wellenfunktion, die für einen bestimmten Raumbereich eine Zahl angibt. Quadriert man diese Zahl, erhält man die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Teilchen gerade in diesem Bereich aufhält. Die Wellenfunktion kann sich auch mit der Zeit ändern. Auf diese Weise lässt sich das Rätsel des [Doppelspalt-Experiments](#) aus dem ersten Kapitel lösen: Sobald ein Atom die Quelle verlassen hat und Kurs auf die beiden Spalte nimmt, breitet sich auch die Wellenfunktion in diese Richtung aus. Ist sie bei den beiden Spalten angekommen, trägt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für das Atom in jedem der Spalte gerade 50 Prozent.

Hinter den Spalten verhält sich die Wellenfunktion nun genauso wie eine Wasserwelle: Die Teilwellen aus den Spalten überlagern sich und bilden auf der Fotoplatte ein Interferenz-Muster. Jede Stelle in diesem Muster entspricht nun einer Wahrscheinlichkeit, das Atom gerade an diesem Ort zu finden – denn wir reden hier ja immer noch über die Wellenfunktion eines *einzelnen* Atoms. Das Atom wird sich nun zufällig für eine der möglichen Stellen entscheiden und sich dort als Teilchen „materialisieren“. Damit schrumpft die Wellenfunktion plötzlich auf diesen einen Punkt zusammen, denn dort ist jetzt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit 100 Prozent, überall sonst null. Mit dem Eintreffen von weiteren Atomen (jedes mit einer neuen, aber gleich aussehenden Wellenfunktion) entsteht nun allmählich auf der Fotoplatte das reale Streifenmuster.



▲ „Exzellenzcluster“ der besonderen Art: Zu den Teilnehmern der fünften Solvay-Konferenz im Jahre 1927 gehörten neben Louis de Broglie (Mitte, 7.v.l.) u. a. auch Max Planck (vorn, 2.v.l.), Albert Einstein (vorn, 5.v.l.), Niels Bohr (Mitte, 9.v.l.), Erwin Schrödinger (hinten, 6.v.l.) und Werner Heisenberg (hinten, 9.v.l.). (Bild: Benjamin Couprie, Institut International de Physique Solvay, Brussels, Belgium)



◀ Visualisiert durch eine gelbe Hülle, fasst diese Grafik all jene Orte innerhalb eines Silizium-Nanokristalls zusammen, an denen die Elektronen am wahrscheinlichsten anzutreffen sind. (Grafik: Zack Helms, Quantum Simulations Laboratory, North Carolina State University; simulations completed using computational resources provided by the National Center for Supercomputing Applications)



▲ Sogar Comic-Autoren greifen manchmal auf Quanteneffekte zurück. Ähnlich den Teilchen, die durch Potentialbarrieren „tunneln“, geht Superheldin Kitty Pryde durch massive Wände und hat so das Überraschungsmoment stets auf ihrer Seite. (Bild: TM & © 2008 Marvel Characters, Inc. All Rights Reserved.)

Was passiert aber, wenn man wie in Kapitel 1 das Atom direkt hinter den Spalten mit einem berührungslosen Verfahren wie etwa einem Laserstrahl ausspioniert? Genau wie an der Fotoplatte wird sich das Atom zufällig für einen möglichen Ort entscheiden – also hinter dem rechten oder linken Spalt auftauchen. Auch hier bricht dann aber die Wahrscheinlichkeits-Wellenfunktion zusammen. Also gibt es auch keine Teilwellen mehr, die sich zu einem Interferenzmuster überlagern könnten! Das Atom fliegt einfach geradeaus weiter und nach dem Eintreffen vieler Atome entstehen die bekannten „Sandhaufen“ hinter den beiden Spalten.

Sind diese Wahrscheinlichkeitswellen nun physikalisch real oder nur ein mathematisches Konstrukt? Und was macht das Atom eigentlich, während diese Wellen

seine möglichen Aufenthaltsorte ausknobeln? Über diese Fragen streiten sich die Physiker bis heute. Die meisten sind der Ansicht, dass es einfach keinen Sinn macht, sich über etwas den Kopf zu zerbrechen, was man nicht beobachten oder messen kann. Und verweisen auf die eindrucksvollen Resultate, die man in den vergangenen Jahrzehnten mit dem Konzept der Wellenfunktion erzielt hat.

Ästhetisch am ansprechendsten sind dabei sicherlich die unterschiedlichen Formen, die die Wellenfunktionen der Elektronen in einem Atom annehmen können. Diese komplexen Gebilde aus Keulen, Kugeln und Hohlkugeln sind keine „Elektronenwolken“, sondern lediglich Illustrationen, die die Orte angeben, an denen sich das Elektron mit einer bestimmten **Wahrscheinlichkeit** aufhalten kann. Über ihre Form lässt sich

beispielsweise erklären, wie verschiedene Atome chemisch miteinander reagieren oder welche Struktur unsere Materie hat.

Betrachtet man die Wellenfunktionen der Bausteine eines Atomkerns, fällt einem bei bestimmten chemischen Elementen eine Besonderheit auf: Obwohl die Kräfte im Inneren des Atomkerns die Bausteine eigentlich fest zusammenhalten, lappt ein kleines Stück Wellenfunktion über den Kern hinaus. Dies bedeutet, dass für bestimmte Kernbausteine auch eine kleine Wahrscheinlichkeit besteht, dass sie aus dem Kernverbund ausbrechen können. Dieses auch „**Tunneleffekt**“ genannte Verhalten erklärt das Phänomen des Alphazerfalls von Plutonium oder Uran, bei dem radioaktive Strahlung freigesetzt wird.



Quantenindustrie

Quanteneffekte widersprechen zwar unserer Alltagserfahrung, sind im Alltag aber sehr gut zu gebrauchen. Wir stellen wichtige Anwendungen und Zukunftsszenarien vor.

Wer Quantenphysik außerhalb eines Labors live erleben will, muss einfach in den nächsten Supermarkt gehen. Der Laser an der [Scanner-Kasse](#) beruht nämlich auf dem Prinzip der Quantensprünge: In die Atome eines Gases wird mit Hilfe von Strom Energie „gepumpt“. Fällt nun ein Elektron mit hoher Energie in einen Zustand mit niedrigerer Energie zurück, sendet es dabei eine Lichtwelle aus. Diese Lichtwelle kann nun unter geeigneten Bedingungen in einem anderen Atom des Gases den gleichen Vorgang auslösen. Da sich das Gas in einer verspiegelten Röhre befindet, kommt es nach kurzer Zeit zu einem Lawinen-

effekt. Immer mehr Wellen stoßen immer mehr angeregte Atome an, die dann eine Welle gleicher Wellenlänge aussenden. Dadurch entsteht nicht nur besonders intensives Licht – es ist auch extrem gebündelt und die Lichtwellen schwingen alle im Gleichtakt. Physiker sagen, sie sind „kohärent“.

Das Konzept der Materiewellen legt nahe, dass in Analogie zum Laser mit Licht-Teilchen auch ein Laser mit Atom-Strahlen möglich sein müsste. Tatsächlich konnten ihn Forscher Mitte der 1990er Jahre realisieren. Dazu kühlten sie ein Gas sehr stark ab, so dass sich alle Atome im Zustand mit der niedrigsten Energie sammelten. In diesem Gedränge überlagern sich nun die Wahrscheinlichkeits-Wellenfunktionen der Atome. Sie schwingen dadurch nicht nur im Gleichtakt wie beim Lichtlaser, sondern

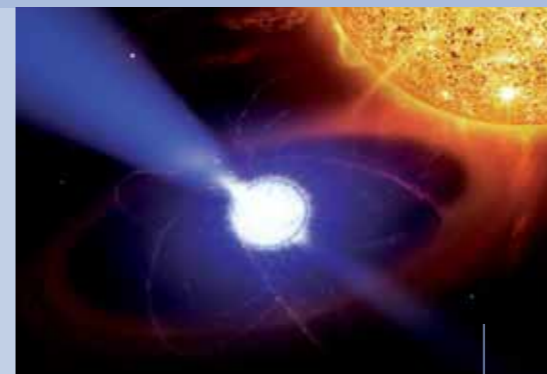
bilden eine neue, gemeinsame makroskopische Wellenfunktion. Diesen Zustand nennt man „Bose-Einstein-Kondensat“, nach Albert Einstein und dem indischen Physiker Satyendra Bose, die solch einen Zustand vorhergesagt hatten. Um einen Atomlaser zu erhalten, muss man – sehr vereinfacht gesagt – jetzt nur einen Stöpsel am Boden ziehen: Die Atome fallen dann brav, geordnet und alle mit der gleichen Energie in einem Strahl nach unten.

Der Atomlaser könnte in der Zukunft zum Universalwerkzeug der Informationstechniker werden. Denn mit ihm ließen sich wie mit Lego-Bausteinen kleinste Strukturen Atom für Atom zusammenbauen. Einziger Haken: Nicht alle Atome können ein Bose-Einstein-Kondensat bilden. Schuld daran ist ein abstraktes Phänomen, der so genannte Spin. Er ist eine grundlegende quantenme-



◀ Man könnte meinen, Teilchen mit Spin würden Pirouetten drehen wie dieses Karussell. Dem ist jedoch nicht so. Der Spin ist eher eine innere Eigenschaft eines Elementarteilchens. (Bild: Cayusa, Flickr.com)

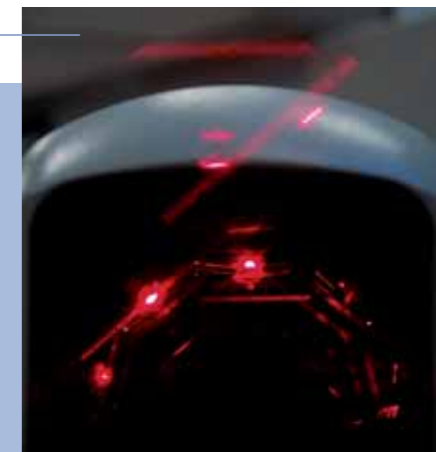
▶ Quantensprünge im Supermarkt: Laserstrahlen innerhalb eines Barcode-Scanners (Bild: © Tim Ellis, flickr.com/timailius)



◀ Ist Diamant der Baustoff zukünftiger Quantencomputer? Stuttgarter Physiker konnten zeigen, dass in Diamant eingeschlossene Stickstoffatome als Recheneinheiten eines Quantencomputers fungieren könnten, durch die Härte des Diamantgitters perfekt abgeschirmt gegen äußere Einflüsse. (Bild: © Santanu Vasant, Flickr.com)

◀ Der klaren Regelung für Fermi-Teilchen verdanken so genannte Weiße Zwerge (Bildmitte) ihre Existenz. Die kompakten Sternleichen entstehen durch den Kollaps einer ausgebrannten Sonne und werden nur durch ihre Elektronen und deren Verteilung auf unterschiedliche Energieniveaus vor einem weiteren Zusammensturz bewahrt. (Grafik: Casey Reed / NASA)

▶ Moderner Magnetresonanztomograph während eines Aufnahmevorgangs (Bild: Siemens-Pressbild)



chanische Eigenschaft, die viele Materiebausteine besitzen. Die mathematische Beschreibung des Spins ähnelt den Gleichungen, die in der klassischen Physik die Drehung eines Körpers um die eigene Achse beschreiben – daher das englische Wort Spin (= „Drall“).

Mit dieser Ähnlichkeit hat uns die Natur allerdings aufs Glatteis geführt, denn für den Spin gelten seltsame Regeln, die wenig mit einer Drehung gemeinsam haben. Elektronen und die meisten Bausteine der Atomkerne zum Beispiel haben einen Spin mit dem Betrag „ $1/2$ “. Zu Ehren des italienischen Physikers Enrico Fermi nennt man sie auch „Fermi-Teilchen“. Sie dürfen nach den Gesetzen der Quantenmechanik nicht alle im Zustand mit der niedrigsten Energie sein, sondern müssen sich auf die verschiedenen Energieniveaus eines Atoms

nach gewissen Regeln verteilen. Diese Regeln sind die Grundlage für das periodische System der Elemente und erklären die Vielfalt der Chemie.

Nun gibt es aber auch Teilchen, die einen ganzzahligen Spin haben. Nach Satyendra Bose nennt man sie auch „Bose-Teilchen“. Dazu zählen Lichtteilchen, die gar keinen Spin haben (also Spin „0“ – das ist auch eine ganze Zahl) und solche Atome, bei denen die Summe aus ihren Kern-Spins und den Spins der Elektronen eine ganze Zahl ergibt. Für sie gilt das obige Ausschließungs-Prinzip nicht und sie können daher in jeder Anzahl in jedem Energiezustand sein. Kühlt man solche Atome also lange genug, sammeln sie sich bei der niedrigsten Energie in einem Bose-Einstein-Kondensat und können für einen Atomlaser verwendet werden.

Neben dieser Einteilung der Welt in eine Zwei-Klassen-Gesellschaft ist der Spin auch für eine sehr elementare Eigenschaft der Materie verantwortlich – den Magnetismus. Anschaulich kann man sich ein Elektron mit Spin daher als kleine Kompassnadel vorstellen, die entweder nach oben „Norden“ (Spin $+1/2$) oder nach unten „Süden“ (Spin $-1/2$) zeigen kann. Aus diesem Grund lassen sich Spins auch durch Magnetfelder beeinflussen, was man sich bei der [Kernspintomographie](#) in der Medizin zu nutze macht: Ein statisches Magnetfeld richtet dabei die Spins der Wasserstoff-Atomkerne im Gewebe in eine Richtung aus. Dann „rüttelt“ ein überlagertes magnetisches Wechselfeld an den Spins. Schaltet man es wieder ab, gehen die Spins in ihre Ausgangslage zurück und geben dabei Strahlung ab, die für das jeweilige Gewebe charakteristisch ist.

MAGNETISCHE LESEHILFE

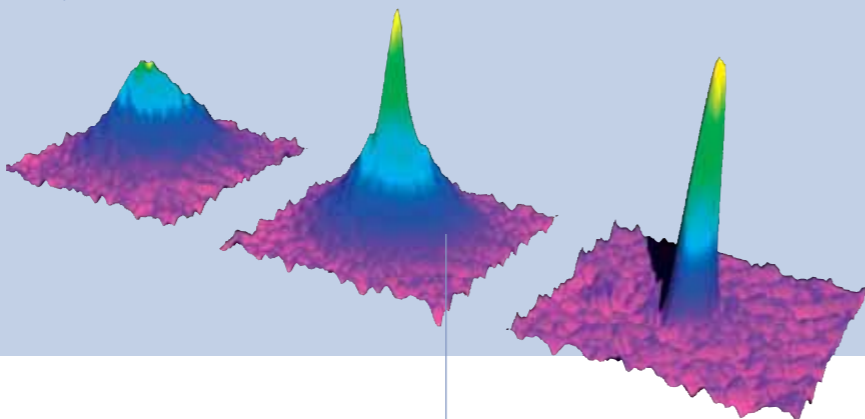
Experten schätzen, dass mehr als ein Viertel des Bruttosozialprodukts der Industrienationen mit Hilfe von Quantenphänomenen erwirtschaftet wird. Keinen geringen Anteil daran dürfte der Quanten-Effekt haben, für dessen Entdeckung Peter Grünberg vom Forschungszentrum Jülich und sein Kollege Albert Fert von der Universität Paris 2007 den Nobelpreis für Physik bekamen. Nur durch diesen „Riesenmagnetowiderstands-Effekt“ sind die Lese-Köpfe für heute übliche Gigabyte-Festplatten möglich geworden – ein „Quantensprung“ in der Datenspeichertechnik. Grünberg und Fert entdeckten unabhängig voneinander, dass der Strom durch eine sandwichartige Struktur aus zwei dünnen, magnetischen Schichten, die durch eine nichtmagnetische Schicht getrennt sind, stark davon abhängt, ob die magnetischen Schichten gleich oder entgegengesetzt zueinander magnetisiert sind. Sind sie entgegengesetzt magnetisiert, können die Elektronen mit ihren „Magnetnadeln“, den Spins, die Schichtgrenzen nur sehr schwer überqueren – der elektrische Widerstand des Schichtpakets ist groß. Sind die Schichten parallel magnetisiert, ist der Widerstand wesentlich kleiner. Hält man nun die Magnetisierung in einer Schicht fest und lässt sie in der anderen frei rotierbar, so kann man damit magnetische Daten-Punkte (die „Bits“) auf einer Festplatte auslesen. Diese winzigen Magnet-Punkte können nämlich die Magnetisierungsrichtung der veränderlichen Schicht umdrehen. Damit „betätigen“ sie das Schichtpaket wie einen Schalter: zum Beispiel von parallel ausgerichtet (entsprechend „1“) zu antiparallel ausgerichtet (entsprechend „0“).

Die hohen Magnetfelder für dieses Verfahren werden energieeffizient von „supraleitenden“ Spulen erzeugt, die ihren elektrischen Widerstand verlieren, wenn man sie mit flüssigem Helium auf -269 °C abkühlt. Verantwortlich für dieses Phänomen sind Elektronen, die sich mit Hilfe eines



▲ In jedem MP3-Player steckt auch ein Stück von Peter Grünberg. Ohne seine Forschung wären die kompakten und leistungsfähigen Festplatten der kleinen Multimedia-Winlinge undenkbar. (Bild: Timo Meyer)

▼ Ein Bose-Einstein-Kondensat entsteht. Die Bilder zeigen die Dichteverteilung der Atome als Berg, der immer höher und schlanker wird – sichtbares Zeichen dafür, dass sich immer mehr Teilchen in einem einzigen Quantenzustand versammeln. (Bild: Immanuel Bloch, Universität Mainz)



Tricks über ihr Ausschließungs-Prinzip hinwegsetzen. In bestimmten Stoffen können sich nämlich Elektronen mit Spin $+1/2$ und Spin $-1/2$ zusammenschließen und ein Paar bilden, das dann einen (ganzzahligen) Gesamt-Spin 0 hat. Aus Fermi-Teilchen werden so Bose-Teilchen, und die können alle kollektiv in den energetisch tiefsten Zustand gelangen. Ähnlich wie beim **Bose-Einstein-Kondensat** werden sie durch eine gemeinsame kohärente und makroskopische Wellenfunktion beschrieben, die sich über das gesamte Atom-Gitter des Materials erstreckt. Diese Welle kann nun nicht mehr von lokalen Hindernissen (wie zum Beispiel Fremd-Atomen im Gitter) gestört werden. Mit Hilfe der Elektronenpaare kann also ein Strom vollkommen widerstandslos fließen.

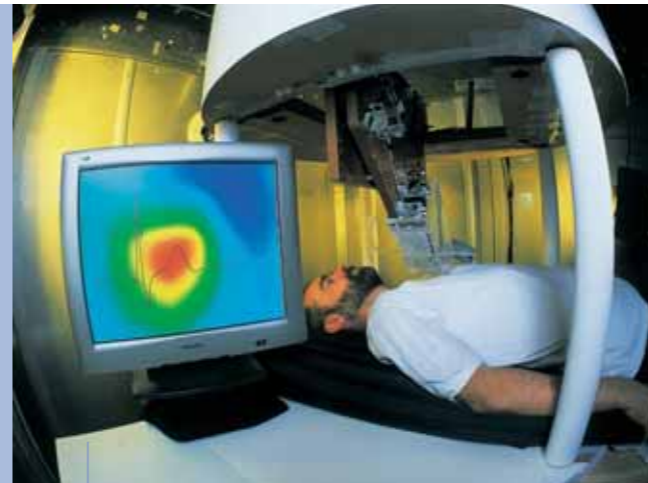
Auch hier gibt es natürlich einen Haken: Ist es zu warm, wackeln die Atome im Gitter



▲ Die beiden deutschen Nobelpreisträger Peter Grünberg (links, Physik) und Gerhard Ertl (rechts, Chemie) nach der feierlichen Verleihung des Nobelpreises 2007 (Bild: picture-alliance/dpa)

zu sehr und die Elektronen-Paare werden getrennt. Deshalb funktioniert die Supraleitung nur bei sehr niedrigen Temperaturen. Die 1987 von Johannes Bednorz und Karl Müller entdeckten Hochtemperatur-Supraleiter brachten allerdings einen gewissen Fortschritt. Sie verlieren ihren Widerstand schon bei -140 °C , ein wenig „wärmer“ also als bei den normalen Supraleitern, die das erst mit frostigen -260 °C tun.

Eine besondere Anwendung der Supraleitung verwendet Ringe aus supraleitendem Material. Aus quantenmechanischen Gründen kann ein magnetisches Feld im Inneren solch eines supraleitenden Rings nur in kleinen Portionen (den „Flussquanten“) auftreten. Unterbricht man den Ring zudem an ein oder zwei Stellen durch eine dünne, isolierende Schicht oder macht seinen Querschnitt dort ganz klein, so können die



▼ Hier nutzen Forscher eine an einen Pick-Up angehängte SQUID-Apparatur, um eine archäologische Ausgrabungsfläche magnetisch zu kartieren. Noch vor dem ersten Spatenstich kann das Messsystem selbst feinste, durch die Hinterlassenschaften alter Kulturen verursachte Veränderungen der magnetischen Eigenschaften des Bodens aufspüren. (Bild: IPHT Jena, Abteilung Quantendetektion)



Elektronenpaare diese Stellen nur noch mit Hilfe des Tunneleffekts überwinden. Dies begrenzt den widerstandslosen Stromfluss im Ring auf sehr kleine Werte. Beide Effekte zusammen sorgen dafür, dass die Supraleitung im Ring sehr empfindlich auf ein äußeres Magnetfeld reagiert. Auf diese Weise lassen sich so genannte supraleitende Quanteninterferometer, kurz „SQUIDs“, realisieren, die noch Magnetfelder messen können, die nur ein Milliardstel der Stärke des Erdfeldes betragen. Ihre Einsatzgebiete reichen von der Untersuchung von Hirn- und **Herzströmen** bis hin zur Suche nach neuen Erdölquellen und **vergangenen Kulturen**.

Die supraleitenden SQUID-Ringe stehen auch hoch im Kurs bei den Forschern, die sich mit dem Bau eines „Quantencomputers“ beschäftigen. Ähnlich wie sich beim

Doppelspalt-Experiment die Wellenfunktionen aus dem linken und dem rechten Spalt überlagern, können dies hier die Wellenfunktionen für einen im Ring links herum beziehungsweise für einen rechts herum fließenden Strom tun. Nennt man jetzt links herum „1“ und rechts herum „0“, hat man wie bei einem normalen Computer grundlegende Informationseinheiten geschaffen. Mit dem großen Unterschied, dass man nun aufgrund der Überlagerung mit diesen „Quanten-Bits“ einen Rechenschritt an allen Informationseinheiten gleichzeitig ausführen und deshalb parallel und damit wesentlich schneller rechnen kann.

Die Quanten-Informatiker arbeiten dabei zurzeit an zwei prinzipiellen Schwierigkeiten: Zum einen müssen sie mehrere Quanten-Bits – also zum Beispiel die supra-



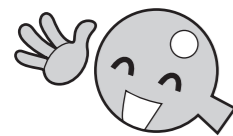
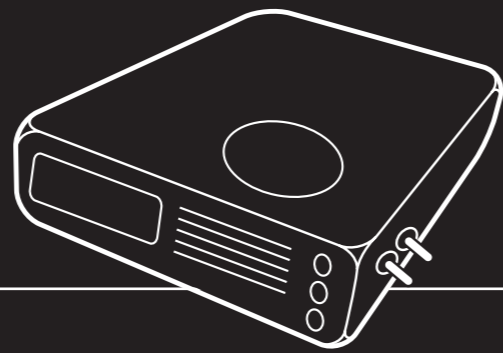
BANDWURM UND NOBELPREIS

Der amerikanische Schriftsteller Mark Twain hätte sich wohl über sie gefreut. Die Photoelektronenemissionsmikroskopie wäre für ihn ein neuerlicher Beweis gewesen für die Untauglichkeit der deutschen Sprache im Allgemeinen und ihre abartige Neigung zu zusammengesetzten Substantiven im Besonderen. Vielleicht hätte den notorischen Deutsch-Hasser Twain aber die Nützlichkeit der „PEEM“ begeistert: Strahlt man UV-Licht auf eine Oberfläche, werden dort von den energiereichen Lichtquanten Elektronen herausgeschlagen (Einsteins berühmter „Photoeffekt“). Diese treffen auf einen fluoreszierenden Schirm und erzeugen so ein Bild der Probe. Gerhard Ertl vom Fritz Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin untersuchte unter anderem mit dieser Methode chemische Reaktionen auf festen Oberflächen. Die Energie der herausgeschlagenen Elektronen verändert sich nämlich, wenn sich beispielsweise Sauerstoffatome oder Kohlenmonoxid (CO) auf der Oberfläche befinden. Ertls Untersuchungen brachten nicht nur neue Erkenntnisse für die Katalysatorteknik, sondern ihm auch den Nobelpreis für Chemie 2007 ein.

leitenden Ringe – so koppeln, dass ihre Wellenfunktionen miteinander wechselwirken. Um eine Rechnung zu steuern, müssen sie zudem von außen auf diesen Zustand einwirken können, ohne ihn zu zerstören. Ein weiteres Problem besteht darin, dass für das Auslesen des Ergebnisses eine Messung an diesem System gemacht werden muss. Dabei brechen aber die Wellenfunktionen zusammen und man erhält nur einen einzigen Endzustand. Die Rechenverfahren müssen also so gewählt werden, dass die Lösung eines gestellten Problems in dieser einen Antwort enthalten ist. Bisher existieren nur Vorstufen eines Quantencomputers mit maximal 12 Quanten-Bits. Kanadische Forscher konnten sie durch ein alternatives Verfahren realisieren, bei dem die Spins von Atomkernen miteinander überlagert werden.

QuantumWARE®

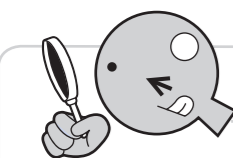
HAL DEUTSCHLAND GMBH



QuantumWARE®

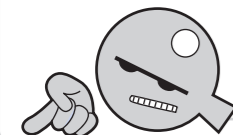
Liebe Kundin, lieber Kunde,

wir beglückwünschen Dich zum Kauf des ersten PC mit Quantencomputer-Modul aus unserer neuen Produktserie QuantumWARE®*. Mit den 300 Quanten-Bits (Qubits) in diesem Modul kann Dein PC mit 2^{300} Zahlen auf einmal rechnen – also mehr als es Atome im sichtbaren Universum gibt! Angesteuert werden die Qubits dabei über einen neuronalen Algorithmus, der speziell für QuantumWARE® entwickelt wurde. Wenn Dein PC auf diese unglaubliche Ressource zurückgreift, erkennst Du dies am Aufleuchten des „Quantum“-Schriftzugs über dem Bildschirm. Um die Möglichkeiten von QuantumWARE® voll nutzen zu können, stehen Dir folgende neue Software-Komponenten zur Verfügung:



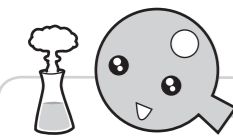
QuantumHOMESuite®

QuantumMINING®: Data-Mining in Deinen Festplatten und im Internet. Du hast ein altes Foto Deines Schulfreundes und willst ihn damit im Netz finden? Mit Bildanalyse und Mustererkennung fischt ihn QuantumMINING® in Sekundenschnelle heraus.



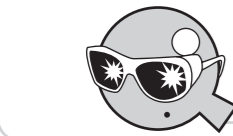
QuantumANTIVIRUS®: Über eine Funktionsanalyse unbekannter Programmfragmente werden auch neue Computer-Viren sofort identifiziert.

QuantumSTOCK®: Dein persönlicher Broker für aktuelle Börsenanalyse und -prognose
QuantumVEGAS®: Endlich echte Zufallszahlen für Poker und Roulette am PC. Denn mit Qubits ist der Zufall noch zufälliger als im Casino!



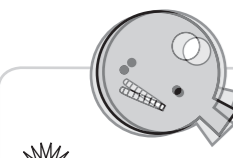
QuantumPROFESSIONAL®

QuantumPATTERN®: Muster-Erkennung bei der Eingabe von Handschriften und bei der Bildanalyse (z.B. für intelligente Roboter-Systeme)



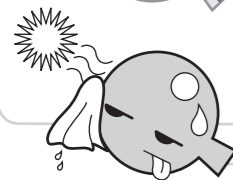
QuantumBIOS®: Schnelle Suche in Gen-Datenbanken sowie Live-Stream-Simulationen chemischer Reaktionen

QuantumTECH®: Überwachung von Maschinen und Turbinen mit Echtzeit-Analyse kritischer Zustände



Pflegehinweise

Standort: Damit Du lange Freude an Deinem Quantencomputer-Modul hast, solltest Du Deinen PC an einem erschütterungsfreien Ort aufstellen, damit die quantenmechanischen Überlagerungen nicht gestört werden.



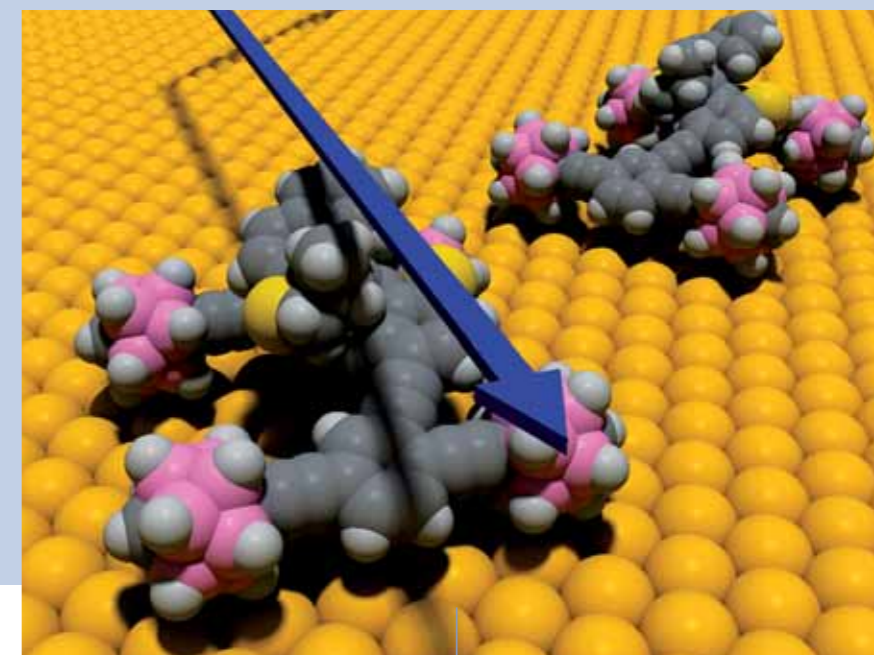
Temperatur: Vermeide zudem starke Sonneneinstrahlung, denn bei einer Temperatur von über 50 °C bricht die Supraleitung im Quanten-Modul zusammen!

*QuantumWARE® ist ein eingetragenes Warenzeichen der HAL Deutschland GmbH ©1981 – 2058. Dieses Produkt ist weltweit urheberrechtlich geschützt. Unbefugter Vertrieb dieses Produkts oder von Teilen dieses Produkts wird sowohl straf- als auch zivilrechtlich verfolgt und kann schwere Strafen und Schadenersatzforderungen zur Folge haben.

◀▶ Die Gebrauchsanleitung links mag fiktiv sein – einzelne Punkte sind es vielleicht nicht mehr lange. So konnten Forscher anhand eines noch sehr einfachen Quantencomputers aus zwei Qubits zeigen, dass ein von ihnen entwickelter Algorithmus zur Mustererkennung für einen Quantencomputer in der Praxis korrekte Ergebnisse liefert. Das Programm gliedert Muster aus Punkten, die jeweils zwei Farben annehmen können, mit bereits gespeicherten Mustern ab. Das Bild rechts zeigt die Wissenschaftler mit einer Veranschaulichung der Muster. (Bild: Siemens-Pressbild)



▶ Bei zukünftigen Nanomaschinen wie diesem aus einzelnen Atomen aufgebauten Auto ist die Casimir-Kraft ein echter Störfaktor. In der Welt der Millionstel Millimeter ist sie stark genug, um Bauteile aneinander haften und die winzigen Maschinchen blockieren zu lassen. (Grafik: Yasuhiro Shirai, Rice University)



Dass quantenmechanische Effekte nicht nur für Innovationen sorgen, sondern den Ingenieuren auch Kopfzerbrechen bereiten können, zeigt die „Kraft aus dem Nichts“ – der so genannte Casimir-Effekt, der im Jahr 1948 vom holländischen Physiker Hendrik Casimir entdeckt wurde. Nach der Heisenberg'schen Unschärferelation sind Energie und Zeit bis zu einem gewissen Grad unbestimmt. Dies hat einen sehr verblüffenden Effekt: Selbst in einem vollkommenen Vakuum, das heißt im absoluten „Nichts“ ohne Teilchen, Strahlen oder sonst einer Form von Energie, kann für sehr kurze Zeit der Energieerhaltungssatz verletzt und ein wenig Energie vom Vakuum „entliehen“ werden. Diese manifestiert sich in „virtuellen“, nicht beobachtbaren Teilchen wie beispielsweise einem virtuellen masselosen Lichtquant. Da die Energie, der es seine Existenz verdankt,

auch wieder ans Vakuum zurückgegeben werden muss, verschwindet es auch wieder. Ein ständiges Werden und Vergehen.

Trotz ihres gespenstischen Wesens hat der kurze Auftritt der virtuellen Teilchen auf der Weltbühne ganz reale Auswirkungen. Entstehen diese nämlich zwischen zwei parallelen, dicht an dicht liegenden Metallplatten, so müssen ihre Materiewellen an diesen Wänden einen „Knoten“ aufweisen. Es passen also nur ganzzahlige Vielfache der halben Wellenlänge zwischen die Wände. Durch diese Bedingung ist die Bewegung der Teilchen dort eingeschränkt. Für die Teilchen außerhalb der Wände gilt diese Einschränkung jedoch nicht – sie kollidieren daher im Schnitt öfter mit der Wand als ihre eingesperrten Kollegen. Die Folge ist eine Kraft, die die Wände zusammendrückt – der Casimir-Effekt. Sie lässt

Sandkörner anders rieseln als erwartet und kann bei kleinsten Motoren im Mikromaßstab schnell zu einem „Kolbenfresser“ führen.

Das letztere Problem übrigens hoffen Forscher schon bald in den Griff zu bekommen. Sie konnten erstmals den so genannten „kritischen“ Casimir-Effekt nachweisen, das klassische Pendant der rein quantenmechanischen Casimir-Kraft. Dieser tritt nicht im Vakuum auf, sondern in Flüssigkeitsgemischen und kann sowohl anziehend als auch abstoßend wirken. Würde man zukünftige Nanomaschinen also in speziellen Flüssigkeiten betreiben, könnte man eventuell den anziehenden Kräften des quantenmechanischen Casimir-Effekts die abstoßenden seines klassischen Pendants entgegensetzen.





Die Wissenschaft der Rätsel

In wohl kaum einem Wissenschaftszweig geben schon die Grundlagen der Disziplin so viele Rätsel auf wie in der Quantenmechanik. Dass man trotzdem so gut mit ihr arbeiten kann, ist auch eins.

Die zwei Gesichter der Quantenmechanik könnten nicht unterschiedlicher sein: Sie ist einerseits die Grundlage für fast alle Bereiche der modernen Physik und gilt deshalb als die wahrscheinlich am besten überprüfte wissenschaftliche Theorie überhaupt. Ihr Formalismus ist in sich schlüssig und sagt das Verhalten von Atomen und Molekülen – und damit die bunte Vielfalt unserer Welt – sehr genau voraus. Auf der anderen Seite ist es seit der Entwicklung der Quantentheorie fraglich geworden, ob wir diese Welt jemals wirklich verstehen werden. Vor allen Dingen stellt sich die

Frage, was „verstehen“ eigentlich genau bedeuten soll. Die Physiker lassen sich von diesen philosophischen Problemen jedoch nicht abhalten, mit Hilfe von Experimenten hinter den Vorhang zu spähen, hinter dem die Natur ihre Zauberkunststücke vorbereitet.

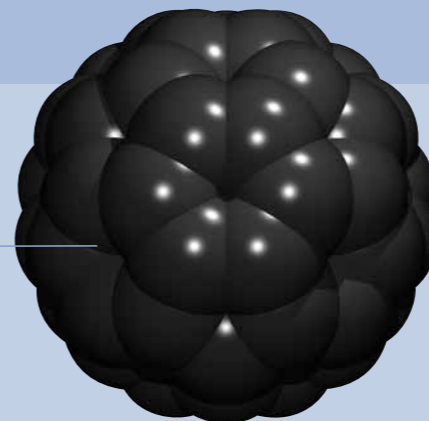
So untersuchen beispielsweise Markus Arndt und Anton Zeilinger von der Universität Wien schon seit Jahren die Grenze zwischen Quanten- und Alltagswelt. In den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts war die noch scheinbar klar gezogen. Dass ein Elektron etwas ist, das sich unserer alltäglichen Vorstellungswelt vollkommen entzieht, leuchtete ein. So fiel auch die Antwort auf die Frage, ob ein Elektron nun ein Teilchen oder eine Welle ist, nicht schwer: Es ist natürlich keines von beiden,

denn diese Begriffe stammen aus unserer Alltagswelt. Sie können immer nur Hilfsmittel sein, um das Verhalten eines unbekannten Wesens aus der Quantenwelt zu beschreiben.

Im Jahr 2003 konnten Arndt und Zeilinger nun aber demonstrieren, dass selbst riesige **Moleküle** in Form eines Fußballs aus 60 Kohlenstoff- und 48 Fluoratomen noch ein Interferenzmuster bewirken, wenn man sie auf einen Doppelspalt schießt. Auch größere Biomoleküle wie die so genannten Porphyrine, die Blätter grün und Blut rot färben, zeigen dieses Quantenverhalten. Ein Bose-Einstein-Kondensat, das Abermilliarden gleichgeschaltete Atome enthält und deshalb fast einen Millimeter groß ist, besitzt trotzdem Quanteneigenschaften. Die kann man sogar mit einem einfachen

◀ Die Existenz von Parallelwelten ist nur eine der erstaunlichen Interpretationen quantenmechanischer Messvorgänge. (Bild: PhotoDisc)

▶ David Deutsch, einer der prominentesten Vertreter der „Viele-Welten-Theorie“ (Bild: jochen, Flickr.com)



▲ Kalottenmodell eines aus insgesamt 60 Kohlenstoffatomen bestehenden Fulleren-Moleküls. Mit solchen „Buckyballs“ konnten Arndt und Zeilinger bereits 1999 Interferenzmuster erzeugen. (Grafik: Rob Hooft, Wikimedia Commons)

▼ Der Physiker und Nobelpreisträger von 1965 Richard Feynman formte unser Bild der Quantenwelt entscheidend mit und kommentierte ihre Merkwürdigkeiten einst mit dem Satz: „... ich denke, ich kann davon ausgehen, dass niemand die Quantenmechanik versteht.“ Doch seit damals hat sich einiges getan. (Bild: picture-alliance/dpa)



Mikroskop studieren: Befindet sich das Kondensat in einem rotierenden Becher, nimmt es die Rotationsenergie nur portionsweise auf, was man an den entstehenden Strudeln beobachten kann.

Manche Forscher schließen aus diesen Ergebnissen, dass quantenmechanische Prozesse auch bei den Abläufen in unserem Gehirn eine Rolle spielen könnten. Ihnen hat es dabei vor allem die Zufälligkeit angefallen, mit der sich Objekte der Quantenwelt für ein mögliches Messergebnis (zum Beispiel den Auftreffort auf einer Fotoplatte) entscheiden. Gäbe es diesen „absoluten“ Zufall nicht, wäre das Verhalten von Atomen und Molekülen grundsätzlich vorausberechenbar. Dies müsste dann auch für unsere Gedanken und Gefühle gelten, die ja letztlich auch auf atomaren Vorgängen

in unserem Gehirn beruhen – keine schöne Vorstellung. Wie sich aus der Zufälligkeit der Quantenmechanik aber unsere Willensfreiheit ergeben könnte, darüber wird noch ausgiebig gerätselt.

Es gibt noch aus einem anderen Grund Vorbehalte gegen die obige These. Damit quantenmechanische Prozesse wie die Interferenz am Doppelspalt oder auch die Berechnungen eines Quantencomputers ungestört ablaufen können, müssen sie von ihrer Umgebung gut isoliert sein. Ist das nicht der Fall, findet im Prinzip genau dasselbe wie bei einer Messung statt: Das Quantenobjekt „verrät“ zum Beispiel seine Position durch Wechselwirkung mit anderen Atomen, und die Wahrscheinlichkeitswellenfunktion schnurrt auf diesen einen Punkt zusammen. Es ist nun sehr fraglich,



PARALLELUNIVERSEN

Die Quantenmechanik ist anders als alle anderen wissenschaftlichen Theorien. Das zeigt sich auch darin, dass es für sie unterschiedliche „Interpretationen“ gibt, wie man die merkwürdigen Verhältnisse deuten soll. Die hier vorgestellte Interpretation des Messvorgangs ist zwar die von den meisten Physikern akzeptierte, aber längst nicht die einzig mögliche Sichtweise. So kam zum Beispiel der US-Physiker Hugh Everett 1957 auf eine simple, aber in ihren Konsequenzen erstaunliche Idee: Was wäre, wenn sich ein Elektron bei einer Messung gar nicht für einen Zustand entscheiden muss, sondern einfach alle denkbaren Messergebnisse eintreten? Dies wäre tatsächlich möglich – wenn sich das Universum vorher in so viele Parallelwelten aufgespalten hätte, wie es mögliche Messergebnisse gibt! Dass es dadurch fast unendlich viele Universen geben müsste, in denen jeder von uns millionenfach vorkommt, ist für den Oxforder Physiker David Deutsch kein Makel dieser Vorstellung. Er hofft, dass bei Experimenten mit verschränkten Teilchen einmal Beobachtungen gemacht werden, die mit Hilfe der Viele-Welten-Interpretation einfacher zu verstehen sind.

ob sich solche Wechselwirkungen in der dichten Umgebung eines Gehirns verhindern lassen.

Welcher Mechanismus dabei hinter dem Zusammenbrechen der Wellenfunktion steckt, ist den Physikern immer noch ein Rätsel. Betrachten wir zum Beispiel ein Elektron, dessen „Magnetnadel“, der Spin, entweder nach oben oder nach unten weisen kann. Nach den Regeln der Quantenmechanik befindet sich die Wellenfunktion

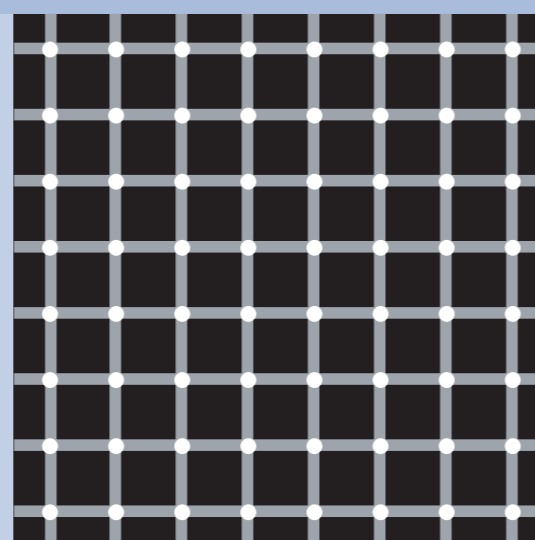
QUANTENWELT IM XXL-FORMAT



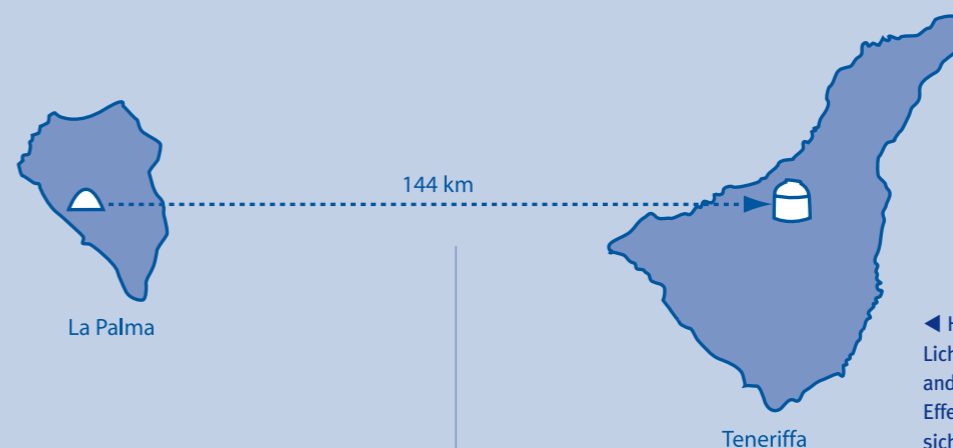
Stellen Sie sich vor ...

... man könnte Würfel quantenmechanisch miteinander verschränken. Selbst Lichtjahre voneinander entfernt, bestünde ein unsichtbares Band zwischen ihnen. Jeder Wurf würde stets eine zufällige Augenzahl ergeben; allerdings würden beide Würfel wie gezinkt immer das gleiche Ergebnis liefern. Fällt der eine auf die Drei, so auch der andere. Verrückt, sagen Sie? Genau dieses Phänomen zeigen zum Beispiel Lichtteilchen, die Physiker bereits über mehrere hundert Kilometer miteinander verschränken konnten. (Grafik: Timo Meyer, Melina Diener)

▼ Fixiert man in dieser optischen Täuschung einen weißen Kreis, sieht man in einigen benachbarten Kreisen schwarze Punkte aufblitzen. Blickt man auf einen von ihnen, wird dieser sofort wieder weiß und bleibt es auch. Eine schöne Analogie zur Einflussnahme des Messvorgangs auf ein Quantensystem. (Grafik: ius)



► Quantenmechanik als Leinwandstoff: Im Film „Hollow Man“ des Starregisseurs (und Physikers) Paul Verhoeven nutzt ein Forscher Quanteneffekte, um sich unsichtbar zu machen. Das sieht zwar spektakulär aus, mit den tatsächlichen Spezialeffekten der Quantenwelt kann die reine Fiktion des Films allerdings nicht mithalten. (Bild: picture-alliance/dpa)



◀ Härtestest auf den Kanaren: Zwei verschränkte Lichtteilchen zeigten auch 144 Kilometer voneinander entfernt die „spukhafte Fernwirkung“. Der Effekt könnte in Zukunft eine vollkommen abhörsichere Satellitenkommunikation ermöglichen. (Grafik: ius)

des Elektrons vor einer Messung in einer Überlagerung der möglichen Zustände „Spin oben“ und „Spin unten“. Gerät das Elektron nun in einen Messapparat für die Eigenschaft „Spin“, so wird sich seine Wellenfunktion mit den Wellenfunktionen der Atome der Messeinrichtung überlagern. Diese Atome stehen aber wieder mit anderen Atomen in Verbindung, zum Beispiel in den Kabeln oder in den Lämpchen der Anzeigetafel.

Wollte das Elektron nun seine interne Überlagerung aus „Spin oben“ und „Spin unten“ aufrechterhalten, müsste es diese auf die Milliarden mal Milliarden Atome der Messapparatur übertragen. Aus irgendeinem Grund ist die Überlagerung dafür offensichtlich zu instabil und das Elektron muss sich spontan für einen der beiden Zustände entscheiden. Diesen Vorgang nennen die Physiker „Dekohärenz“. In den letzten Jahren konnten sie diesen Prozess genauer

untersuchen, denn heute ist es möglich, einzelne Atome mit Hilfe von Laserstrahlen einzufangen, stark abzubremsen und zu manipulieren. Über ausgeklügelte Experimente maßen die Forscher die Zeit, bis zu der eine Überlagerung zweier Quantenzustände noch aufrechterhalten werden kann. Diese Dekohärenz-Zeit kann unter geeigneten Bedingungen viele Sekunden betragen – für atomare Verhältnisse eine Ewigkeit.

Neben der Zeit gibt es noch eine andere Disziplin, in der Quantenzustände Rekorde aufstellen können: die Entfernung. Hier spielt das Phänomen der so genannten Verschränkung eine zentrale Rolle. Sie kann zum Beispiel an Lichtteilchen beobachtet werden, deren Wellen entweder vertikal oder horizontal zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Unter bestimmten Bedingungen lassen sich nun zwei Lichtteilchen so erzeugen, dass ihre Schwingungsrichtun-

gen immer senkrecht zueinander stehen müssen. Beide Lichtquanten werden dabei durch eine einzige Wellenfunktion beschrieben – sie sind dann miteinander „verschränkt“. Vor einer Messung befinden sich beide in einer Überlagerung der Zustände „Schwingung vertikal“ und „Schwingung horizontal“. Misst man nun ein Lichtteilchen, so entscheidet es sich spontan für einen der beiden Zustände, zum Beispiel „horizontal“. Dies bedeutet aber, dass in demselben Augenblick das andere Teilchen den Zustand „vertikal“ annehmen muss.

Das mag zunächst nicht besonders erstaunlich klingen, wenn man davon ausgeht, dass diese ganzen Dinge in einem Labor stattfinden. Forscher der Universitäten Wien und München haben solch ein Experiment aber auf die Kanaren verlegt: Das eine Lichtteilchen untersuchten sie auf La Palma, das andere schickten sie per Laserimpuls auf die 144 Kilometer entfernte Insel Teneriffa

und maßen es dort. Das Ergebnis: Obwohl beide Teilchen weit entfernt voneinander waren, standen ihre Schwingungsrichtungen stets senkrecht zueinander. Sie waren also die ganze Zeit durch das unsichtbare Band ihrer gemeinsamen Wellenfunktion miteinander in Kontakt!

Selbst Albert Einstein glaubte nicht an die Möglichkeit solch eines Experiments und sprach von „spukhaften Fernwirkungen“, die es nicht geben könne. Doch sie existieren – und zeigen damit, dass man sich nicht mit Astrologie oder Esoterik beschäftigen muss, um unglaubliche Dinge zu entdecken. Diese geheimnisvolle Seite der Quantenmechanik ist der eine Grund, warum sich Forscher so gerne mit ihr beschäftigen. Auf der anderen Seite stellt sie für die Physikerinnen und Physiker ein einzigartiges Werkzeug dar, um in „Quantensprüngen“ die Technik und damit unsere Zukunft mit zu gestalten.