



2014
highlights der **physik**

Quanten welten

Wissenschaftsmagazin

Quanten-Physik in Leichter Sprache

Viele Menschen sind heute immer online.

Das bedeutet:

Ihre Computer oder Telefone sind immer mit dem Internet verbunden.

Das Internet ist sehr kompliziert.

Dazu gehören Computer, Kabel, Telefone und mehr.



Die Teile des Internets funktionieren elektronisch.

Dazu nutzen sie Elektronen.

Mit ihnen kann man Texte und Bilder und Filme speichern und weiter schicken.

Elektronen sind kleine Teilchen.

Man kann sie nicht mit dem Auge sehen.

Für die Texte und Bilder und Filme im Internet braucht man sehr viele Elektronen.

Elektronen werden in Computer-Chips gespeichert.



Man kann die Texte und Bilder und Filme auch mit anderen Teilchen speichern und transportieren.

Diese anderen Teilchen heißen Photonen.

Ein anderes Wort für Photonen ist auch Licht-Teilchen. Das Licht besteht aus Licht-Teilchen.

Elektronen und Licht-Teilchen benehmen sich anders als etwa kleine Kugeln.

Wenn man zum Beispiel ein Elektron bremst, entsteht ein Licht-Teilchen.

Wenn ein Licht-Teilchen ein Elektron trifft, dann verschwindet das Licht-Teilchen.

Das Elektron ist danach schneller.



Elektronen und Licht-Teilchen verhalten sich oft seltsam.

Forscher können dieses seltsame Verhalten mit der Quanten-Physik erklären.

Mit dem Wissen aus der Quanten-Physik kann man Computer bauen.

Und Telefone.

Und Touch-Screens, gesprochen „Tatsch-Skriins“.

Touch-Screens sind die Glasscheiben an modernen Telefonen.

Die kann man mit dem Finger berühren.

Und damit das Telefon bedienen.



Mit der Quanten-Physik kann man auch Lampen bauen.

Diese Lampen heißen LED.

Sie leuchten in verschiedenen Farben.

Sie benötigen wenig Energie zum Leuchten.

LED-Lampen mit Batterie leuchten deshalb lange.

Mit der Quanten-Physik kann man auch geheime Texte übertragen.

Dabei kann nur der Empfänger den Text lesen.

Wenn Spione mitlesen, geht der Text kaputt.



Die Quanten-Physik ist erst 100 Jahre alt.

In fast allen elektronischen Geräten steckt Quanten-Physik.



4 Durchgehend online
im Quantenzeitalter

**Quanten –
Bausteine der Welt**

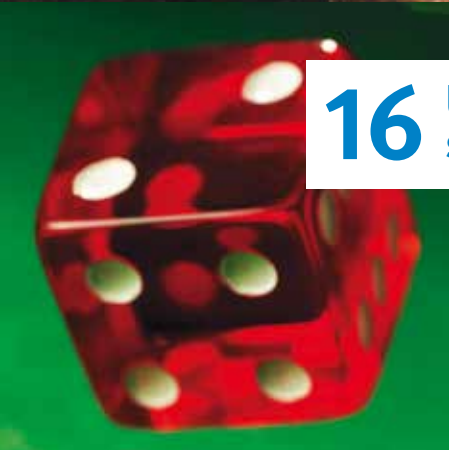
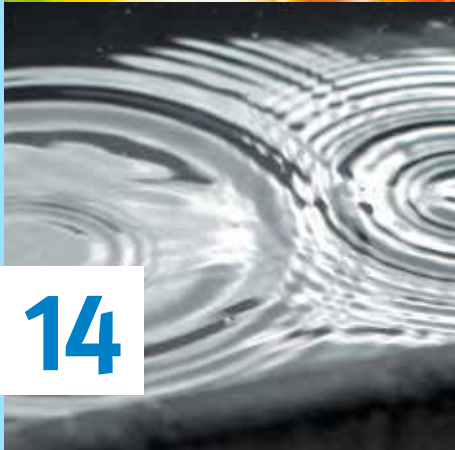
6



8 Quantenphysik heute:
Vom Transistor zum Laser

**Auf der eigenen
Welle surfen**

14



16 Untote Katzen und
spukhafte Fernwirkungen

**Quantencomputer
und Quanteninternet**

18



24 Absolut abhörsicher:
Quantenverschlüsselung

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

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

AUTOR

Roland Wegenmayr

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Prof. Dr. Eberhard Wassermann

REDAKTION

Prof. Dr. Matthias Bartelmann,
Dr. Axel Carl, Dr. Ralph Dieter,
Ruben Düchting, Prof. Dr. Claus Kiefer,
Dr. Jens Kube

KONZEPT UND GESTALTUNG

iserundschmidt (ius)
Kreativagentur für PublicRelations GmbH
(Verantwortlich: Ruben Düchting, Marleen Schwalm)
ius.pr@dpg-physik.de

August 2014

Die Highlights der Physik im Internet:
www.physik-highlights.de

► Einige Stellen im Heft verweisen auf interessante
YouTube-Clips. Wer sein Smartphone mit einem
QR-Code-Scanner ausgestattet hat, kommt leicht auf
die verknüpften Seiten. Für die Inhalte der Clips sind
die Urheber verantwortlich.





Durchgehend online im Quantenzeitalter

Ein Leben ohne elektronische Kommunikation ist unvorstellbar geworden. Wir wollen immer und überall erreichbar sein, im Netz surfen und uns in sozialen Netzwerken austauschen. Für Telefonate, Texte, Bilder nutzen wir Smartphones, Tablets und klassische Computer. Die moderne Kommunikationstechnik hat unsere Kultur gewaltig verändert. Und in ihr steckt verblüffend viel Quantenphysik.



„Durchgehend Online“, der Youtube-Hit von [DieLochis](#), bringt auf den Punkt, wie radikal sich unser Leben innerhalb von nur einer Generation verändert hat. „Dahals gab’s kei’ Internet“, schimpft darin eine Frankfurter Mutter, die mit der Kommunikationswelt ihres Sohns nicht mehr mitkommt. Dieser postet mit seinem Smartphone sogar Selfies aus dem Badezimmer in einem beliebten Fotonetzwerk. Ob man das nun lustig findet oder nicht: All das macht eine Kommunikationstechnologie möglich, die auf trickreichen Anwendungen der Quantenphysik basiert.

Um zu erforschen, wo überall Quanten auf unseren elektronischen Kommunika-

tionswegen „mitreden“, schauen wir Ben über die Schulter. Er ist siebzehn und hat eine 25-jährige Schwester. Anna ist Physikerin und forscht gerade für einige Monate als Gastwissenschaftlerin an einem Institut in New York. Weil der Vater der Geschwister seinen Fünfzigsten feiert, will Anna für zwei Ferienwochen nach Deutschland kommen. Sie hat in New York ein Geschenk im Auftrag der Familie besorgt, Ben dazu die Geburtstagskarte gestaltet. Er fotografiert die Karte mit seinem Smartphone und schickt das Bild über den Atlantik zu Anna. Nach einigen Minuten meldet die sich begeistert, und die Geschwister chatten. Später am Abend skypen beide am Notebook. Anna

zeigt Ben noch ein lustiges Geschenkpapier, das sie in New York entdeckt hat.

Auf dem eben beschriebenen Kommunikationsweg haben Quanten auf vielfältige Weise mitgewirkt. Schon wenn Ben über den [Touchscreen](#) seines Smartphones wischt, bewegt er Elektronen und damit Quantenteilchen. Im Inneren des Geräts verarbeiten elektronische Bauelemente die Signale von Bildschirm, Kameras und Sensoren. Die wichtigsten Arbeitsameisen sind Milliarden winziger Transistoren. Der Transistor ist ein Grundbaustein des heutigen Quanten-Informationszeitalters. Ohne Quanteneffekte könnte er nicht funktionieren.

Auf dem Weg zu Anna wird Bens Nachricht aus dem Mobilfunknetz in das weltumspannende Netz aus Glasfasern eingespeist. Laserdioden verwandeln dazu die elektronischen Bits in Lichtpulse. Diese rasen durch ein Glasfaserkabel am Boden

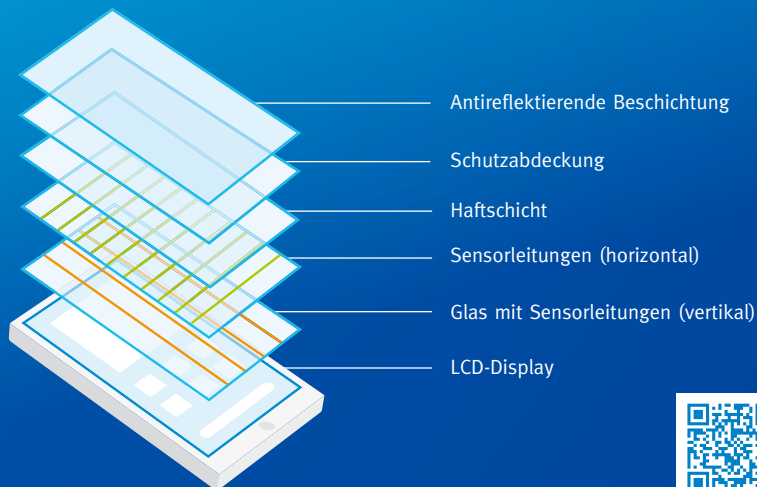
◀ Glasfaserkabel können – ins rechte Licht gesetzt – auch ästhetischen Ansprüchen genügen. Für die weltweite Kommunikation sind sie ohnehin längst unersetzlich. (Bild: Bob Goyette, CC, flickr.com)

INFO

Sensibel für Streicheleinheiten

Am meisten streicheln wir heute vermutlich die Bildschirme von Smartphones und Tabletcomputern. Aber wie erkennen diese unsere Berührung? Dafür gibt es verschiedene Techniken. Einige E-book-Reader benutzen zum Beispiel Licht. Bei Smartphones und Tablets hat sich ein anderes Verfahren etabliert. Ihre Multi-touchscreens können auch Gesten mit mehreren Fingern feinfühlig erkennen. Dabei erfasst der Bildschirm, wie die Fingerspitze ein elektrisches Feld verändert, denn der menschliche Körper ist elektrisch leitfähig. Damit das funktioniert, wird aus dem Bildschirmglas ein sogenannter Kondensator gemacht. An diesem liegt im unberührten Zustand ein gleichmäßiges elektrisches Feld an.

Ein Kondensator besteht aus zwei gegenüberstehenden Platten, die entgegengesetzt elektrisch geladen sind. Die Platten bilden hier zwei durchsichtige, elektrisch leitfähige Schichten aus Indium-Zinnoxid. Sie befinden sich oben und unten auf einer isolierenden Glasplatte. Die obere Schicht enthält feine, parallele elektrische Leitungen, die untere ebenfalls, aber um 90° verdreht. Zusammen bilden beide Schichten eine Matrix, über deren Kreuzungspunkte das Gerät eine Berührung genau lokalisieren kann. Die Fingerspitze verändert dort das elektrische Feld und lässt in den betroffenen Leitungen schwache Ströme fließen.



▲ Schematische Darstellung eines typischen Smartphone-Touchscreens. Berührt man mit dem Finger Kreuzungspunkte der Sensorleitungen, ändert sich dort die Kapazität des Kondensators. So fließt ein elektrisches Signal zur Elektronik des Geräts. (Bild: ius)

▼ Zu einem wichtigen Kommunikationswerkzeug wurde in den letzten Jahren Twitter. Die Karte veranschaulicht die Wege, auf denen seine Kurznachrichten um die Welt geschickt werden: grün eingefärbt sind Tweets, lila ihre Beantwortung. (Bild: Eric Fischer, CC, flickr.com)



des Atlantiks nach Nordamerika. Zwischenverstärker frischen die unterwegs abklingenden Lichtpulse wieder auf. Auf der amerikanischen Seite werden sie zurück in elektronische Bits und dann in Funkwellen umgewandelt. Am Ende empfängt Annas Smartphone Bens Nachricht aus dem New Yorker Mobilfunknetz. Es setzt die elektronischen Bits wieder zu Sprache, Text und Bildern zusammen.

Vor allem das Übertragen von Bildern erfordert große Datenmengen. Der schnelle Austausch sehr vieler Informationen durch ein Kabelnetz wurde durch Laser möglich. Laser nutzen Quanteneffekte, um Licht einer besonderen Qualität auszustrahlen. Ihre Eigenschaften ermöglichen einen lichtschnellen Transport vieler Daten bei geringen Verlusten. Laser sind der zweite wichtige Grundbaustein des Quanten-Informationszeitalters.

Am anderen Ende des Glasfaserkabels muss das Licht wieder in Signale umgewandelt werden, die elektronisch verarbeitbar sind. Dafür sorgen Photodioden. Diese „optoelektronischen“ Bauelemente nutzen einen Quanteneffekt, für den Albert Einstein 1905 die korrekte Beschreibung fand. Er heißt Photoeffekt. Auch die Kamerasensoren in Bens Smartphone benutzen ihn, um das eingefangene Licht in elektronische Bits zu verwandeln.

„Durchgehend online“ bedeutet aber auch, dass wir jederzeit abgehört werden können. Das ist die Schattenseite des Informationszeitalters. Als Ben beim Chatten mit Anna die Abhörskandale in den Nachrichten erwähnt, antwortet diese: „Wir könnten unsere Nachrichten verschlüsseln.“ Dann erklärt sie Ben, dass man mithilfe von Quanten sogar herausfinden könne, ob jemand in der Leitung mitlausche. Sie verspricht, Ben diese „Quantenverschlüsselung“ zu erklären, wenn sie da ist.



Quanten – Bausteine der Welt

Quanten sind die Basis der heutigen Informations- und Kommunikationstechnik. Aber was sind Quanten? Im Jahr 1900 führte Max Planck sein berühmtes Wirkungsquantum in die Physik ein. Schnell zeigte sich, dass die Natur gerne Quantensprünge macht. Das erkannte auch der junge Albert Einstein.

Quant kommt vom lateinischen Wort quantum für „wie viel“. In der Physik beschreibt es zum Beispiel eine kleinstmögliche Energieportion, die Licht und Materie austauschen können. Max Planck entdeckte im Jahr 1900 ungewollt, dass die Welt im Kleinen aus Quanten besteht. Er wollte damals die Temperaturstrahlung beschreiben, die alle Objekte aussenden. Mit einem Trick fand er die korrekte Formel, indem er eine Konstante h erfand und einbaute. Später wurde sie Planck'sches Wirkungsquantum getauft. Mit diesem Kunstgriff begründete Planck die Quantenphysik.

Temperaturstrahlung ist wie Licht elektromagnetische Strahlung, eine Wärmebildkamera kann sie sichtbar machen. Anna

hat eine solche Kamera für den Vater aus New York mitgebracht, an dem teuren Geschenk hat sich die weitverzweigte Familie beteiligt. Der Vater wünscht sich die Kamera, weil er das Haus auf Wärmelecks untersuchen will. Anna macht damit ein Bild von Ben. Auf dem Bildschirm erscheint ein orangerotes, grinsendes Monster mit grüner Nasenspitze. „Deine Nasenspitze friert gleich ab“, scherzt Anna, denn grün bedeutet kalt, orange warm. Ben postet das Bild als neues Profilfoto, schnell kommen belustigte Kommentare von Freunden.

Heute wissen wir, dass das Planck'sche Wirkungsquantum ein Grundmaß für Quantensprünge ist. Das zeigte Albert Einstein

in einer Arbeit von 1905, die heute als zweite Geburt der Quantenphysik gilt. Er fand darin die richtige Erklärung des Photoeffekts [A](#) → Seite 7, den heute neben Kameras und der Informationstechnik auch Photovoltaikanlagen nutzen: Trifft geeignetes Licht auf ein Metall oder einen Halbleiter, dann lässt es einen elektrischen Strom fließen. Damit die Elektronen sich aber frei bewegen können, muss das Licht sie mit seiner Energie aus ihren Atomhüllen herauskicken. Einstein zeigte, dass dieser Kick ein Quantensprung ist. Nur wenn das Lichtquant selbst genug Energie mitbringt, kann es ein solches Elektron freisetzen. Die Größe dieser Energieportion hängt von der Farbe des Lichts ab, also der Schwingungsfrequenz seiner elektromagnetischen Strahlung. Zudem steckt [die Planck-Konstante \$h\$](#) in diesem Quantensprung.

Es zeichnete sich ab, dass es überall dort Quantensprünge gibt, wo Licht mit Materie wechselwirkt. Anna zeigt ein Foto von

◀ Künstlerische Darstellung der Beschleunigung von Elektronen in stark gebündelten Laserpulsen. Dass die Energie eines Infrarot-Photons für den Photoeffekt ausreichend groß ist, fanden Göttinger Physiker im Jahr 2012 heraus. (Bild: Universität Göttingen)

► Eine wichtige Anwendung, die auf der Entdeckung des Photoeffekts basiert, ist die Solartechnik. Das WM-Stadion in Belo Horizonte, Austragungsort des legendären 7:1 der deutschen Nationalmannschaft gegen Brasilien, verfügt zum Beispiel über eine Photovoltaik-Anlage, die 2000 Megawattstunden Strom pro Jahr erzeugt. (Bild: Luan S.R.)

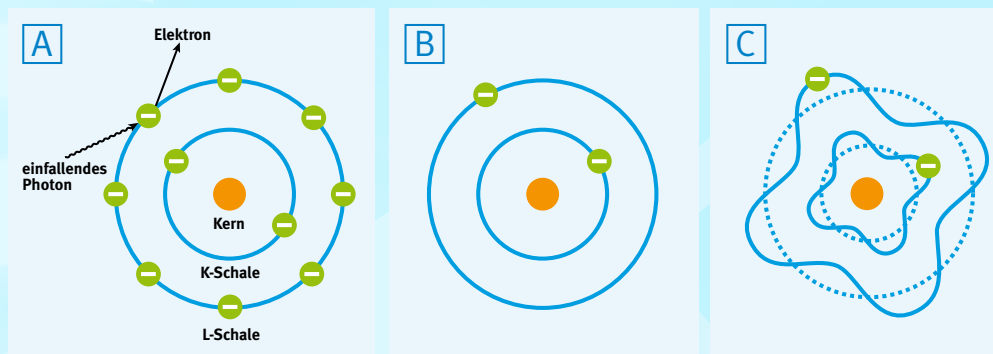


einem jungen Mann mit ovalem Gesicht auf ihrem Tabletcomputer und erzählt: „Das ist Niels Bohr, er hat 1913 die Welt aus Sicht der Physik gerettet.“ Nach der damaligen Vorstellung sollten Atome kleine Planetensysteme sein: Negativ geladene Elektronen umkreisen die positiven Atomkerne. Allerdings erfordert eine Kreisbewegung eine permanente Beschleunigung, Ben erinnert sich an das Fahrgefühl in einem Karussell. Eine beschleunigte elektrische Ladung muss aber elektromagnetische Energie abstrahlen. Darüber mussten die Elektronen im Planetenmodell unweigerlich ihre Energie verlieren und in den Atomkern stürzen.

Niels Bohr fand die Lösung. Nicht nur beim Photoeffekt, auch mit den Elektronen jedes einzelnen Atoms musste Licht in Quantensprüngen Energie austauschen. Offenbar hatte die Natur nur bestimmte Bahnen im Atom erlaubt, auf denen sich die Elektronen ohne Energieverlust bewegen durften. Das war der entscheidende Unterschied zum Planetenmodell. Heute ist das Bohr'sche Atommodell [B] zwar veraltet, doch sein Grundprinzip lebt in den modernen Atommodellen fort. Die erlaubten Quantenzustände der Atome bilden eine Energielleiter. Auf ihr dürfen die Elektronen nur von Sprosse zu Sprosse springen.

Allerdings konnte das Bohr'sche Atommodell nicht erklären, warum nur bestimmte Elektronenbahnen erlaubt sind. Erst 1924 hatte der französische Physiker Louis de Broglie die richtige Idee. Anna zeigt Ben an dessen Gitarre: Zupft man eine Saite an, dann schwingt diese mit einem Bauch in der Mitte. An den beiden Enden, wo die Saite eingespannt ist, hat die Schwingung jeweils einen „Knoten“. Diese schwingende Saite kann man sich nun zu einem Kreis gebogen vorstellen, sodass die zwei Endknoten aufeinander treffen. Das ergibt die Lösung. De Broglie kam auf die Idee, dass Elektronen Welleneigenschaften [C] besitzen. Damit eine Elektronenbahn im Atom erlaubt ist, muss der Wellenzug des Elektrons exakt auf ihren Umfang passen – wie die zum Kreis geschlossene Saite.

▼ Beim Photoeffekt kickt ein Lichtquant ein Elektron aus seiner Bahn (links). Dass Elektronen in Kreisbahnen um den Atomkern verlaufen, beschrieb erstmals Niels Bohr in seinem berühmten Atommodell (Mitte). Bis der Franzose Louis de Broglie schließlich vorschlug, dass man sich die Elektronenbahnen eher wie Wellen vorstellen sollte (rechts). (Grafik: ius)

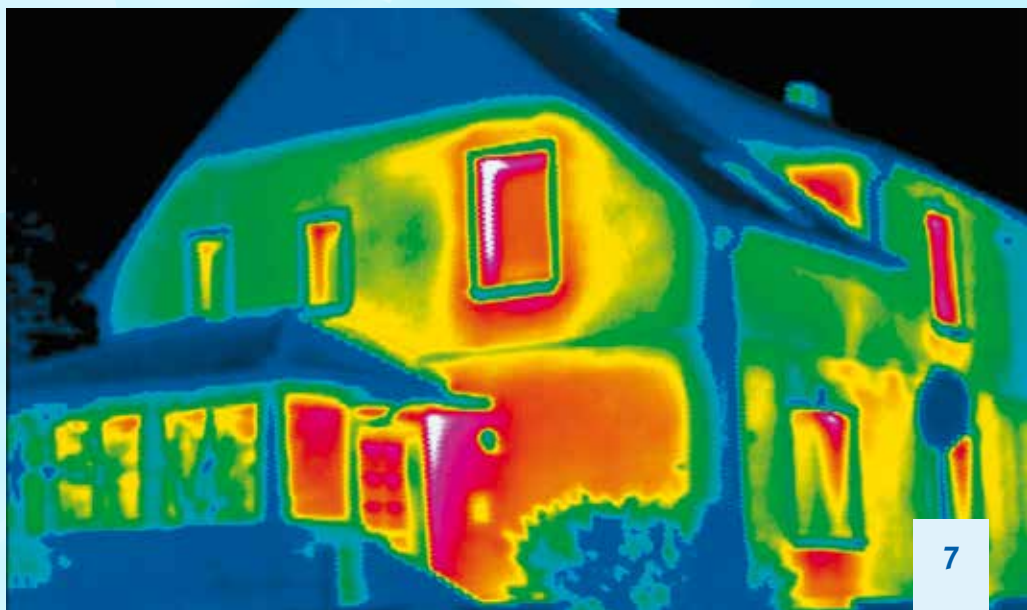


INFO

Das Planck'sche Wirkungsquantum

h ist eine fundamentale Naturkonstante. In der Quantenwelt sind Teilchen auch Wellen – und umgekehrt. Eine Welle schwingt in einer bestimmten Frequenz. Bei Lichtquanten (Photonen) zum Beispiel legt diese Frequenz die Farbe des Lichts fest. h beschreibt für ein Quantenteilchen das Verhältnis von dessen Energie (E) zu seiner Frequenz (ν). Für die Energie des Quantenteilchens ergibt sich daraus umgeformt die einfache Formel $E = h \cdot \nu$. Sie gilt universell für alle Quantenteilchen. In ihr steckt h als Grundmaß für Quantensprünge.

▼ Mit Wärmebildkameras lassen sich die Schwachstellen an Gebäuden aufspüren. Im Bild steht blau für eine gute Isolierung, rot bedeutet Wärmeverlust. Hier sollte nachgebessert werden. (Bild: HSE AG)





Quantenphysik heute: Vom Transistor zum Laser

Ohne Transistoren und Laser gäbe es keine moderne Informations- und Kommunikationstechnologie. Beide nutzen Quanteneffekte aus.

Transistoren und Laser sind die Grundbausteine der heutigen Quanten-Informationstechnologie. Ben will von Anna genauer wissen, wie sie funktionieren. Die Geschwister sitzen gerade im Hobbykeller, wo Ben aus einer Kiste eine verstaubte Platine herauszieht. „Das hat Papa als Junge zusammengelötet“, sagt Ben: „So ein selbstgebasteltes Transistorradio war früher mal cool.“ Anna zeigt auf eine kleine Metallkapsel, die auf drei dünnen Drahtbeinen steht. „Das ist ein alter Transistor“, sagt sie. In einem Smartphone stecken grob eine Milliarde davon, so klein kann man Transistoren heute machen.

Der Transistor und vor ihm die Halbleiterdiode sind die ersten Quantenwerkzeuge der Menschheit. Deutsche Physiker wie

Robert Pohl und Walter Schottky leisteten in den 1920er- und 30er-Jahren wichtige Pionierarbeiten dazu. Den Urtransistor bauten die Amerikaner John Bardeen, William Shockley und Walter Brattain 1947. Sie waren damit etwas schneller als ein deutsches Team um Heinrich Welker. 1956 erhielten die drei Amerikaner den Nobelpreis für Physik. 1958 fertigte der Amerikaner Jack Kilby den ersten integrierten Schaltkreis auf einem Chip. Dafür bekam er im Jahr 2000 einen Anteil des Physik-Nobelpreises.

Die heutige Elektronik basiert auf drei Klassen von Materialien: Isolatoren, elektrisch leitende Metalle und Halbleiter, deren Leitfähigkeit für elektrischen Strom zwischen den ersten beiden liegt. Alle diese

anorganischen Materialien sparen Energie, indem ihre Atome sich zu einem regelmäßigen Kristallgitter sortieren. Elektronen kitten als „Quantenkleber“ die Atome über chemische Bindungen zusammen. Und sie sorgen für den elektrischen Stromfluss.

Elektronen können aber nur dann fließen, wenn sie im Kristallgitter beweglich sind. In Metallen ist das der Fall, denn ihre Atome geben bereitwillig Elektronen ab. In Isolatoren dagegen bleiben alle Elektronen fest an ihre Atome gebunden. Anna zeigt an einem alten Kabel, dass man den Unterschied sogar sehen kann. Die Kunststoffisolierung schimmert nicht wie das Kupfer. „Kommt der Metallganz von den freien Elektronen?“, fragt Ben. „Ja, sie reflektieren das Licht auf besondere Weise“, antwortet Anna.

In Halbleitern halten die Atome ihre äußeren Elektronen ebenfalls fest, aber

◀ Mit einer Lasershow feierte die Stadt Utrecht den 375-jährigen Jahrestag ihrer Universität auf spektakuläre Weise. Die sieben verschiedenfarbigen Laser strahlten über drei Kilometer, von der Uni bis zum Dom im Stadtzentrum. (Bild: Wil Leeuwis, CC, Wikimedia Commons)

wesentlich lockerer als in Isolatoren. Ein ausreichend großer Energiekick kann diese Elektronen von ihrem Atom lösen. Die Energie für diesen Quantensprung kann Licht über den Photoeffekt liefern – oder auch Wärme. Die dritte Möglichkeit ist elektrische Energie, was die Elektronik normalerweise nutzt.

„Aber wozu braucht man Halbleiter, wenn Metallatome freiwillig Elektronen abgeben?“, fragt Ben seine Schwester. Tatsächlich ergibt erst die Kombination von Halbleitern mit unterschiedlichen Eigenschaften elektronische Bauelemente, die zum Beispiel als Schalter oder Ventile für elektrische Ströme wirken können. Genau solche Funktionen braucht eine Elektronik. Bei den Halbleitern kommt dabei neben Elektronen eine zweite Sorte elektrischer Ladungsträger ins Spiel. Hüpf ein Elektron von seinem Atom weg, hinterlässt es dort ein Loch, ein „Defektelektron“. Da in diesem Loch die negative Elementarladung des Elektrons fehlt, wirkt es effektiv in seinem Umfeld als genauso große positive Ladung. Die Löcher können durch das Kristallgitter des Halbleiters springen. Bei jedem Hüpfertausch ein Elektron mit dem wandernden Loch seinen Platz.

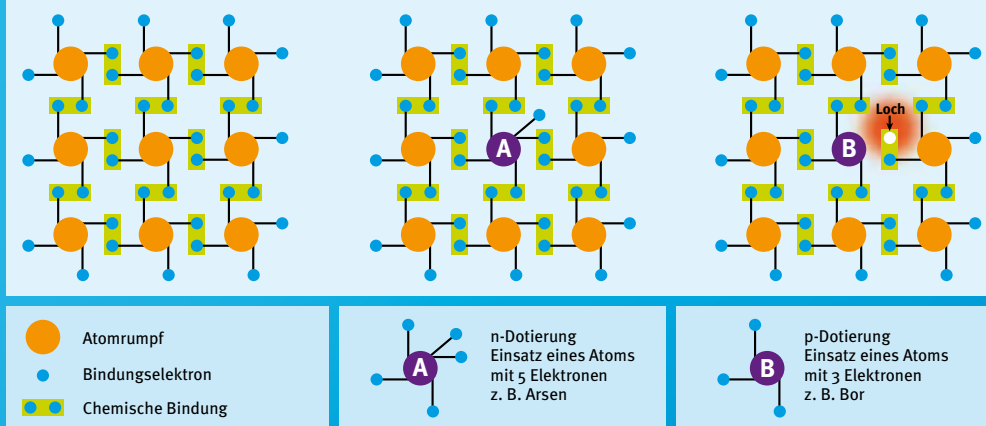
Halbleiter kann man nun so verändern, dass sie entweder einen Überschuss an Elektronen oder an Löchern besitzen. Diese **n- und p-Halbleiter**, n steht für negativ und p für positiv, lassen sich nun

▼ Der erste Transistor der Welt. Das silberfarbene Stück unter der pfeilförmigen oberen Elektrode ist der eigentliche Halbleiter aus Germanium. (Bild: Physik in unserer Zeit)



▲ Der erste Laser, 1960 von Theodore Maiman gebaut. Als Lasermedium diente ein Rubin. Die Blitzlampenspirale „pumpte“ ihn. So ein Rubinlaser konnte nur kurze Laserpulse produzieren. (Bild: Roland Wengenmayr)

INFO



Fehlerteufel

Ordnung ist in der Halbleiterindustrie oberstes Gebot. Das gilt nicht nur für die blitzsauberen Reinräume, in denen die elektronischen Chips auf Siliziumscheiben entstehen. Diese Wafer sind selbst zu Material gewordene Ordnung. Sie werden aus großen Silizium-Einkristallen geschnitten, deren Kristallgitter nahezu keine Fehler aufweist. Nur so funktionieren die mikroskopischen Strukturen der hochintegrierten Schaltungen zuverlässig.

Trotzdem ist der Fehlerteufel ein wichtiger Mitarbeiter der Industrie. Allerdings hat sie ihn gezähmt. Er kommt zum Einsatz, wenn die eigentlichen Chipstrukturen entstehen. Die wesentlichen Funktionen übernehmen dünne Schichten aus Halbleitern mit zwei verschiedenen elektrischen Eigenschaften. Eine Materialsorte ist p-dotiertes, die andere n-dotiertes Silizium. Dotieren kommt aus dem Lateinischen und heißt „ausstatten“.

Der Fehlerteufel ist beim Herstellen von p- und n-Silizium aktiv. Siliziumatome besitzen in ihrer äußeren Schale vier Elektronen, mit denen sie wie mit vier Händen chemische Bindungen zu ihren Nachbaratomen im Kristallgitter aufbauen. Das Dotieren stört dieses Kristallgitter gezielt mit fremden Atomen.

Für p-Silizium eignen sich zum Beispiel Aluminium- oder Bor-Atome, die jeweils ein Elektron weniger in ihrer äußeren Schale haben. Dadurch entsteht ein Loch in einer der vier Bindungen zu den benachbarten Siliziumatomen. Diese Löcher wirken wie positive elektrische Ladungen, die sich durch das Kristallgitter bewegen können. Das n-Silizium benötigt dagegen Atome, die außen ein fünftes Elektron mitbringen, etwa Phosphor oder Arsen. Da diese Elektronen keine bindende Funktion im Silizium-Kristallgitter haben, werden sie zu freien negativen Ladungsträgern.





◀ Perfekt komponierte Lasershow ziehen die Besucher, wie hier bei einem Electro-Festival, in ihren Bann. (Bild: NoNameNight)

miteinander kombinieren. Je nach Kombination entstehen Halbleiterbauelemente mit verschiedenen Eigenschaften, etwa Dioden oder Transistoren. Eine Diode lässt den Strom nur in einer Richtung fließen, wirkt also wie ein **Rückschlagventil** für Wasser.

„Ich habe nie kapiert, was so ein Transistor genau macht“, sagt Ben zu Anna. Transistoren können elektrische Signale verstärken oder ebenfalls als Stromventile arbeiten. Anna führt Ben zum Waschbecken im Hobbyraum. Er solle sich vorstellen, dass das Wasser der elektrische Strom und der Wasserhahn der Transistor sei. Anna dreht ihn auf und lässt den Wasserstrahl abwechselnd auströpfeln und anschwellen. „Mit dem Hahn kann ich dem Wasser also ein Signal aufprägen“, sagt sie.

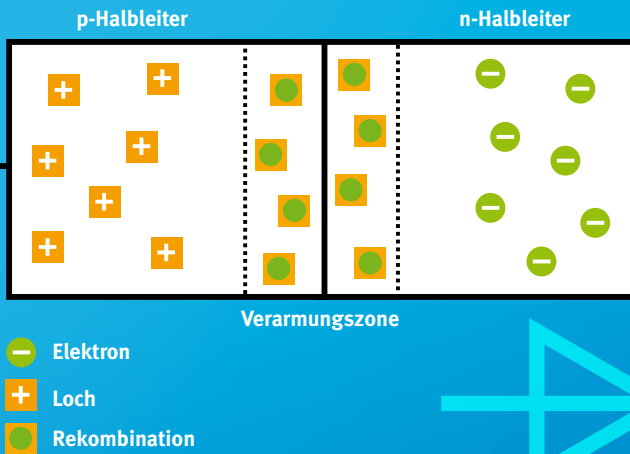
▼ Im Very Large Telescope in Chile dienen Laser als Leitsystem für die Korrektur von Unschärfe-Effekten, die durch die Atmosphäre verursacht werden. (Bild: ESO, Yuri Beletsky)



Ganz ähnlich funktionieren die winzigen Transistoren in den hochintegrierten Chips von Computern oder Smartphones. Es sind sogenannte Feldeffekt-Transistoren. Sie besitzen einen feinen Kanal, durch den Elektronen zwischen zwei Elektroden fließen. „Dazwischen sitzt eine dritte Elektrode, die wie ein Wasserhahn den Kanal öffnen und schließen kann“, sagt Anna. Was Annas Hand am Wasserhahn macht, übernimmt im Transistor ein elektrisches Steuersignal.

Ein solcher Transistor kann zum Beispiel Elektronenpakete als Informationsbits formen. Anna reißt den Hahn auf und erzeugt ein ziemlich nasses digitales Bit 1. Dann schließt sie ihn, das wird das Bit 0. Ähnlich machen es die Transistoren auf den Computerchips. Auf diese Weise wirken sie beim Rechnen mit digitalen Bits mit. „All das passiert auch in deinem Handy“, lacht Anna und spritzt Wasser nach Ben. Er hat gerade ein Foto von ihr mit dem Kommentar „meine große Schwester beim Planschen“ gepostet.

Feldeffekt-Transistoren sind die kleinsten elektronischen Bauteile. In hochintegrierten Chips sind ihre Strukturen nur wenige Dutzend Nanometer groß, was in etwa der Größe von kleinen Viren entspricht. Ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter, *nānos* ist das altgriechische Wort für Zwerg. „Ein Nanometer entspricht etwa zehn nebeneinander gelegten Atomen“, macht Anna die Größenordnung deutlich. Moderne Elektronik ist also schon Nanotechnologie.



Rückschlagventil für Strom

Aus p- und n-dotierten Halbleitern kann man elektronische Bauelemente herstellen. Das einfachste ist die Diode. Sie lässt den elektrischen Strom in einer Richtung durch, sperrt ihn aber in Gegenrichtung. Für eine Diode bringt man einen p- und einen n-Halbleiter zusammen. An der Kontaktfläche ziehen sich die überschüssigen Elektronen im n- und die Löcher im p-Material gegenseitig an. Sie geraten in Bewegung und treffen aufeinander. Dabei fallen Elektronen zurück in Löcher, das Fachwort heißt „rekombinieren“.

Durch diese Massenhochzeit entsteht um die Kontaktfläche herum eine Verarmungszone. In ihr gibt es keine freien Elektronen und Löcher mehr. Diese Zone würde sich gerne weiter ausdehnen. Doch ein strenger Bilanzbuchhalter stoppt sie. Jedes positive Loch, das aus dem p-Material verschwindet, hinterlässt dort nämlich eine negative elektrische Überschussladung. Umgekehrt lädt sich der seiner freien Elektronen beraubte n-Nachbar positiv auf. Damit entsteht ein elektrisches Gegenfeld, das die Ausdehnung der Verarmungszone stoppt.

Liegt eine elektrische Spannung an der Diode in „Durchlassrichtung“ an, dann macht sie die Verarmungszone schmal. So kann ein Strom durch sie hindurch fließen. Bei umgekehrt gepolter Spannung dagegen wird die Verarmungszone so breit, dass sie isoliert. Das ist die Sperrrichtung. Eine Diode kann so aus Wechselstrom einen pulsierenden Gleichstrom machen, indem sie eine Fließrichtung des Wechselstroms sperrt.



◀ In unzähligen Laufwerken entlocken Laser Datenträgern ihre Informationen. Über 100 Millionen Film-DVDs werden pro Jahr in Deutschland verkauft. (Bild: nikkytok)

▲ Laserstrahlschneiden und -schweißen in einem Arbeitsgang. Moderne Fertigungstechnik wäre ohne den Einsatz von hoch präzisen Lasern undenkbar. (Bild: Fraunhofer ILT, Aachen)

Anna sucht die Werkbank ab. Die Mutter hatte sie mit der Bitte in den Hobbykeller geschickt, sich ihren defekten Laserpointer anzusehen. Schließlich findet Anna ihn. Es zeigt sich, dass nur ein Batteriekontakt verschmutzt ist. Die Geschwister haben ihn schnell repariert. Der Laser ist der zweite Grundbaustein des jetzigen Quantenzeitalters. Ohne ihn wäre das schnelle Internet nicht möglich. Laser werden in der Medizin, zum Beispiel beim „Brille weglassen“, eingesetzt, in Laserdruckern, optischen Computerlaufwerken und DVD- oder Blu-ray-Spielern, in der Materialbearbeitung oder etwa in Wetterstationen. Viele Forschungsgebiete brauchen spezielle Laser. Mit Laserpinzetten beispielsweise lassen sich winzige Nanoobjekte manipulieren. Eine solche Vielfalt an Anwendungen hätte sich der

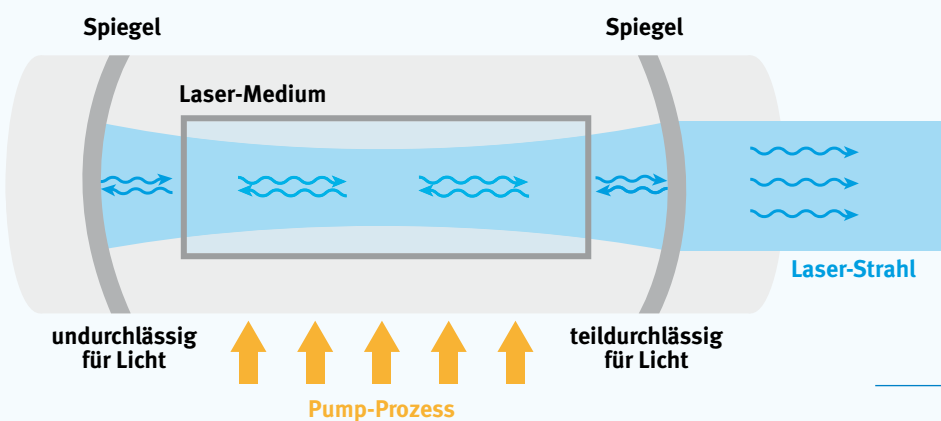
Vater des Lasers, der Amerikaner Theodore Maiman, nie träumen lassen. Als 1960 der erste Laser der Welt lief, soll sein Assistent gespottet haben: „Jetzt haben wir eine Lösung, die nach ihrer Aufgabe sucht.“

Anna entdeckt eine alte Glasfaserlampe und ruft: „Hey, die ist noch aus Mamas wilder Zeit.“ Sie setzt das Glasfaserbündel der Lampe auf den Laserpointer um. Dann schärft sie Ben ein, niemals direkt in Laserlicht zu schauen. Der quitiert die Mahnung mit einem provozierenden Gähnen, doch dann haben beide Spaß an dem Spielzeug. Sie lassen mit den Glasfasern grüne Laserlichtpunkte über die Wände wirbeln und pusten Staub in die Luft, um den Tanz der Laserstrahlen zu beobachten.





▲ Mit Laser und Rauch machen Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt die Strömungen hinter einem 40-Tonnen-Sattelzug sichtbar. Ihr Ziel: LKW aerodynamisch besser und somit spritsparender zu machen. (Bild: DLR)



▲ Funktionsweise eines Laserresonators: Die über einen Pump-Prozess im Lasermedium erzeugten Photonen (wellenförmige Pfeile) werden durch Reflektion zwischen zwei Spiegeln verstärkt. Durch den teiltransparenten Spiegel auf der rechten Seite verlässt schließlich ein gebündelter Strahl mit sehr reiner Lichtfarbe und im Gleichtakt schwingenden Photonen den Laser. (Bild: ius)

Anna ist in ihrem Element, schließlich forscht sie mit Lasern. „Den Laser haben wir im Grunde Albert Einstein zu verdanken“, erzählt sie. Wenn Atome leuchten, dann fallen in ihnen Elektronen von einem höheren in einen tieferen Quantenzustand. Diese beiden Zustände entsprechen also wieder zwei Sprossen einer Energieleiter. Die Energiedifferenz dazwischen senden die Elektronen als Lichtquanten – Photonen – aus. Normalerweise geschieht das spontan, zum Beispiel im glühenden Draht einer Glühlampe. „Einstein fand aber um 1916 heraus“, erzählt Anna, „dass Atome auch zum Photonsenden animiert werden können.“ Dazu brauchen sie einen Anstoß durch andere Photonen. Deren Energie muss genau zu den beiden Sprossen der Energieleiter im Atom passen.

Auf dieser „stimulierten Emission“ basiert die Lichterzeugung im Laser. Als zweite Zutat benötigt der Laser eine Art Pumpe. Diese muss dafür sorgen, dass immer genügend sprungbereite Elektronen in den oberen Quantenzustand „gepumpt“ sind. Rütteln dann Photonen passender Energie an den Elektronen, fallen sie hinunter in den tieferen Zustand. Das erinnert an das Herunterprasseln reifer Äpfel, wenn man einen Apfelbaum schüttelt. Jedes herunterfallende Elektron macht den gleichen Quantensprung und sendet daher ein Photon gleicher Energie aus. Diese Photonen-Lawine macht das Lasermedium zum Lichtverstärker.

„Jetzt musst du noch wissen, dass Photonen als Teilchen und als Welle erscheinen können“, sagt Anna, „wie die Elek-

tronen.“ In einer optischen Atomuhr wird die Frequenz atomarer Resonanz gemessen. Für den Bau solcher Uhren müssen Atome gefangen werden. Auf dem Bild sieht man in der Vakuumkammer einen blauweißen Fleck. In dieser ultrakalten Wolke knapp über dem absoluten Nullpunkt sind rund eine Million Strontium-Atome gefangen. (Bilder: PTB)

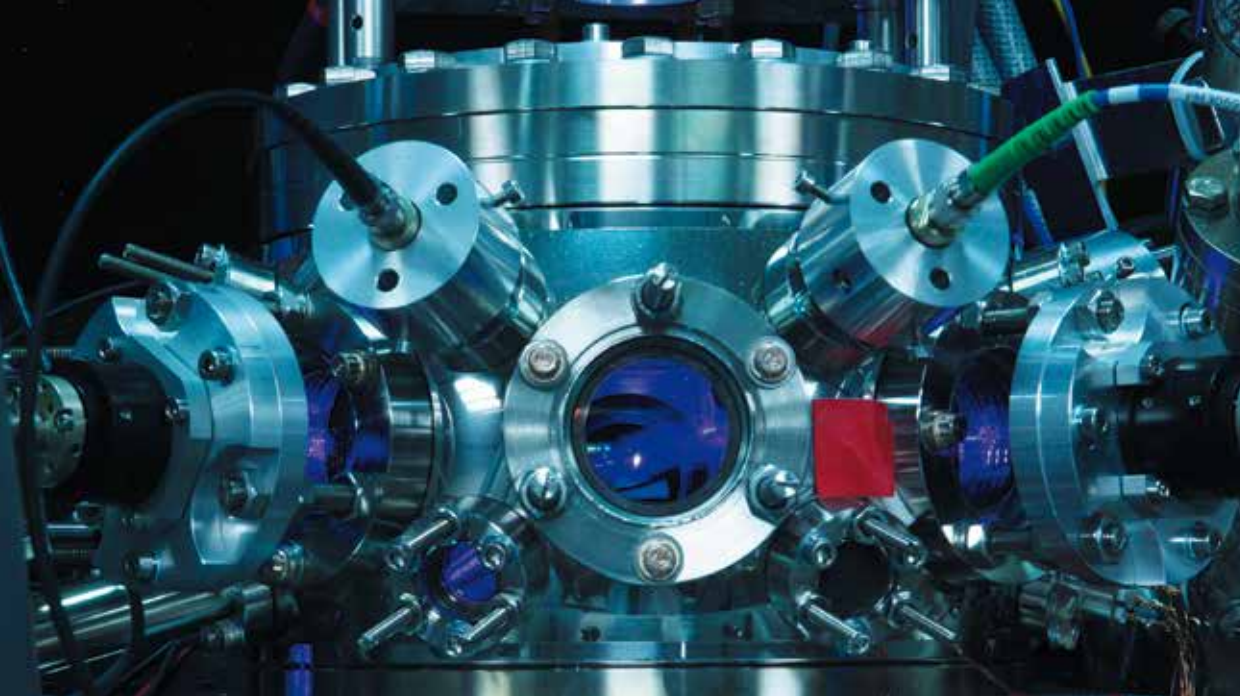
tronen.“ Die Wellenlänge eines Photons ist mit seiner Energie verknüpft → s. [INFO Seite 7](#). Und diese Energie muss genau zu den beiden Sprossen der Elektronen-Energieleiter passen. Dafür sorgt die dritte Zutat zum Laserrezept, der Laserresonator. Er besteht im einfachsten Fall aus zwei Spiegeln, zwischen denen sich das Lasermedium befindet. Der Abstand der Spiegel ist so eingestellt, dass die gewünschte Wellenlänge exakt zwischen sie passt. Das Lasermedium verstärkt die Lichtwelle. „Das Laserlicht schaukelt sich also wie das Rückkopplungspfeifen auf einer Bühne auf“, stellt Ben fest.

Laserlicht hat eine sehr reine Lichtfarbe, weil alle Photonen nahezu dieselbe Wellenlänge haben. Sie bilden gemeinsam sehr lange „Züge“ aus vielen Wellenbergen und -tälern hintereinander, in denen sie im Takt schwingen. Solches Licht heißt „kohärent“. Es gibt unterschiedliche Lasertypen, ihr Lasermedium ist gasförmig, flüssig oder fest. Festkörperlaser haben die heutige Kommunikationstechnik hervorgebracht. „Es sind solche Laserdioden“, sagt Anna und deutet in ein altes, offenes CD-Laufwerk auf der Werkbank.

Fällt Licht auf eine Halbleiterdiode, dann können in ihr Elektronen fließen. Das geschieht in Kamerasensoren oder Solarzellen. Dreht man diesen Photoeffekt um, macht die Diode aus elektrischem Strom Licht. So funktionieren Leuchtdioden (LEDs), und Laserdioden sind spezielle LEDs. Bei ihnen kombiniert die Halbleiterstruktur das Lasermedium mit einem kleinen optischen Resonator. So kann Laserlicht entstehen.

Laserdioden können elektronische in optische Bits umwandeln. Das geschieht im weltweiten Glasfasernetz. Eine Glasfaser kann gleichzeitig viele Photonen sehr verschiedener Frequenzen → s. [INFO Seite 7](#) transportieren, die sich nicht gegenseitig stören. Deshalb kann das Glasfasernetz erheblich mehr Bits zur gleichen Zeit übertragen als ein gleich dickes Kupferkabel mit Elektronen. „Und wann kommen wir zum abhörsicheren Quanteninternet?“, fragt Ben. „Zuerst müssen wir uns die Quantenwelt näher anschauen“, antwortet Anna. Eine zukünftige Quanten-Informationstechnologie wird einige ihrer Effekte nutzen, die höchst merkwürdig sind.





Die Vermessung der Welt

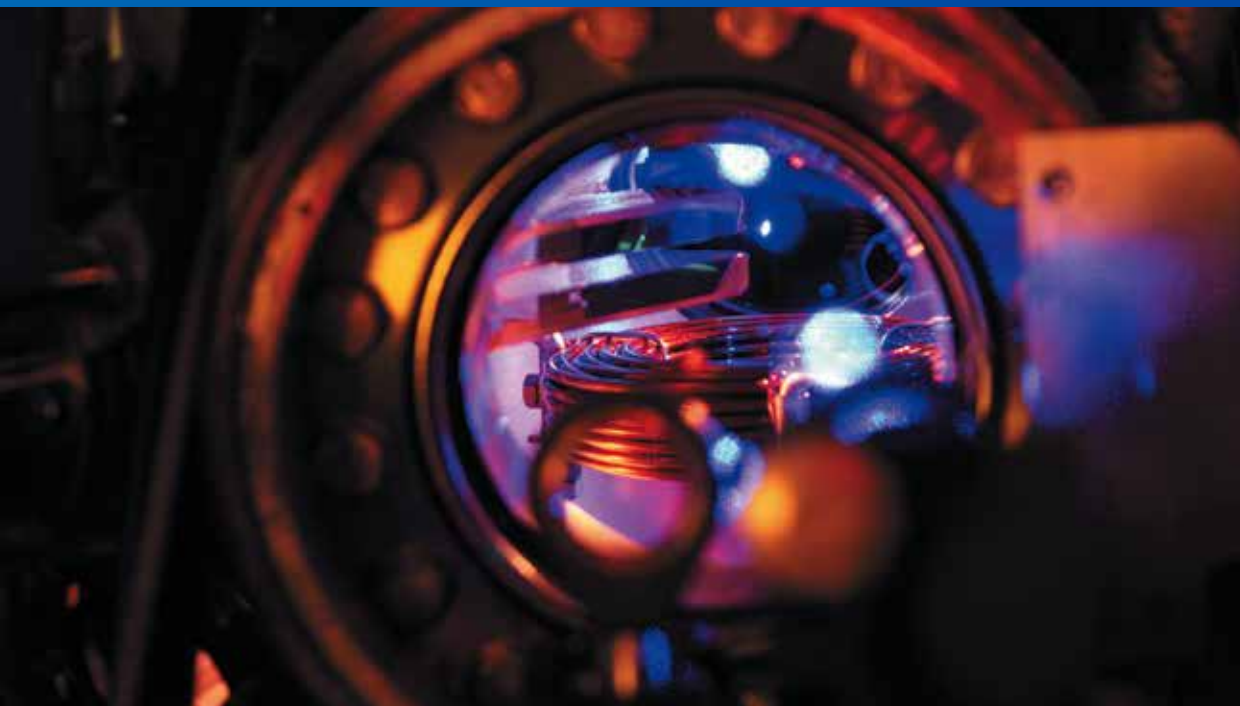
Die Quantenmechanik beschreibt zwar nur Wahrscheinlichkeiten, wie die folgenden Kapitel zeigen werden, diese aber ganz genau. Deshalb ermöglicht sie eine so präzise Vermessung der Welt wie nie zuvor. Dazu zählt die Zeitmessung. Schon auf den alten Segelschiffen kam die Navigation nicht ohne genau gehende Schiffsuhr aus: Nur mit ihr ließ sich der Längengrad ermitteln. Eine ähnliche Schlüsselrolle spielen Atomuhren in der Satellitennavigation. Das Navi errechnet seinen Standort unter anderem aus der Laufzeit der Signale, die es von Navigationssatelliten empfängt. Dazu braucht es ein extrem genaues Zeitsignal, das die Atomuhren an Bord der Satelliten versenden.

Uhren bestehen im Wesentlichen aus einem Pendel und einem Uhrwerk. Das Pendel ist mit seinen Schwingungen der Zeitgeber, das Uhrwerk verwandelt sie in eine Zeitanzeige und treibt zudem das Pendel an. In einer modernen Atomuhr besteht das Pendel aus dem Übergang zwischen zwei Quantenzuständen. Die Energiedifferenz zwischen den beiden Sprossen der Energieleiter entspricht Mikrowellenstrahlung. In Cäsium-133-Atomen schwingt

dieses Quantenpendel 9 192 631 770 Mal pro Sekunde. So ist heute der Zeitstandard gesetzlich festgelegt. Atomuhren gehen nur um eine Millionstel Sekunde pro Jahr falsch.

Derzeit wird intensiv an optischen Atomuhren geforscht. Diese nutzen einen Quantenübergang im sichtbaren Licht aus, der als Pendel rund tausend Mal schneller als in Cäsium-Uhren schwingt. Entsprechend genauer ticken optische Uhren. Ihr Uhrwerk besteht aus einem speziellen Lasergerät. Dieser „Frequenzkamm“ kann die extrem schnellen Lichtschwingungen in vergleichsweise langsame Schwingungen umsetzen, die eine Elektronik mitzählen kann. Für seine Erfindung erhielt der deutsche Physiker Theodor Hänsch 2005 einen Anteil des Physik-Nobelpreises.

Das Meter ist als Längeneinheit unverzichtbar für die Vermessung unserer Welt. Seit 1983 ist seine Länge gesetzlich als diejenige Strecke definiert, die Licht im Vakuum innerhalb von $1/299\,792\,458$ Sekunden zurücklegt. Auch hier fließt also die hochpräzise Zeitmessung aus der Quantenphysik ein.





Auf der eigenen Welle surfen

Quantenteilchen verhalten sich wie Wellen und umgekehrt. Das hat „verrückte“ Folgen. Eine davon: Ein Teilchen kann scheinbar zwei Wege zugleich nehmen. Die andere: Man kann nur entweder den Aufenthaltsort oder die Geschwindigkeit eines Teilchens präzise bestimmen.



Anna muss Ben natürlich viel über die New Yorker Szene erzählen, zum Beispiel über angesagte Clubs. Doch die Geschwister landen auch immer wieder bei der Physik, denn diese ist ein wichtiger Teil von Annas Leben. So kommen sie auf Louis de Broglies Entdeckung zurück, dass Elektronen sich auch wie Wellen verhalten. Das gilt nicht nur für Elektronen, sondern alle Materieteilchen. Ben hat von diesem „Welle-Teilchen-Dualismus“ in der Schule gehört. Aber er hat Schwierigkeiten, ihn zu verstehen. Wie kann ein Objekt sich einerseits wie ein punktförmiges Teilchen verhalten, andererseits wie eine weithin ausgedehnte Welle?

Anna versteht Bens Problem und erzählt: „Als die Quantenmechanik entstand, kämpften alle ihre Pioniere mit der seltsamen Vorstellung, dass Quantenteilchen sich auch wie Wellen verhalten können, und diese Wellen nannten sie Materiewellen.“ Schon Jahrhunderte lang zuvor hatten Gelehrte darüber gestritten, ob Licht aus Teilchen oder Wellen bestehe. Der Brite Thomas Young setzte Ende des 18. Jahrhunderts vorerst die Wellentheorie durch.

Bei seinem berühmten Experiment fällt Licht durch zwei sehr schmale, eng benachbarte Spalte auf einen Schirm. Dort entstehen allerdings nicht etwa zwei

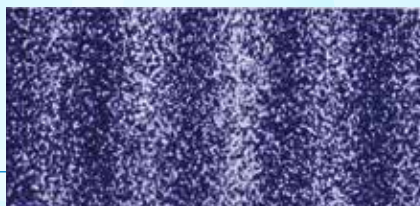
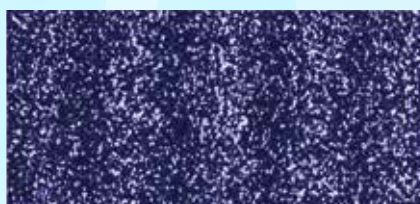
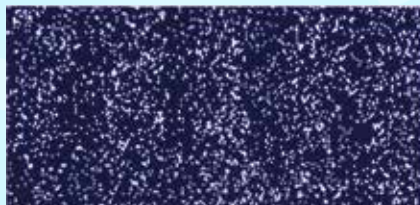
längliche Leuchtflecke. Diese wären bei geradlinig durch die Spalten fliegenden Teilchen zu erwarten. Stattdessen erscheint dort ein markantes Streifenmuster. Es lässt sich nur so erklären: Von beiden Spalten breiten sich zwei halbkreisförmige Lichtwellen aus, die sich auf dem Schirm überlagern. Wo Wellenberg auf Wellental trifft, löschen diese sich gegenseitig aus. Helle Streifen bilden sich dort, wo Wellenberg auf Wellenberg trifft. Dieser Überlagerungseffekt heißt Interferenz.

Das Doppelspaltexperiment funktioniert nicht nur mit Photonen, sondern mit allen Quantenteilchen, auch mit Materieteilchen. Das Ergebnis ist immer ein Interferenzmuster. Die verblüffende Natur der Quantenwelt zeigt sich aber erst, wenn man dieses Experiment mit einzelnen Teilchen macht – und wiederholt. Jedes Teilchen hinterlässt irgendwo auf dem Schirm einen Punkt. Legt man nun

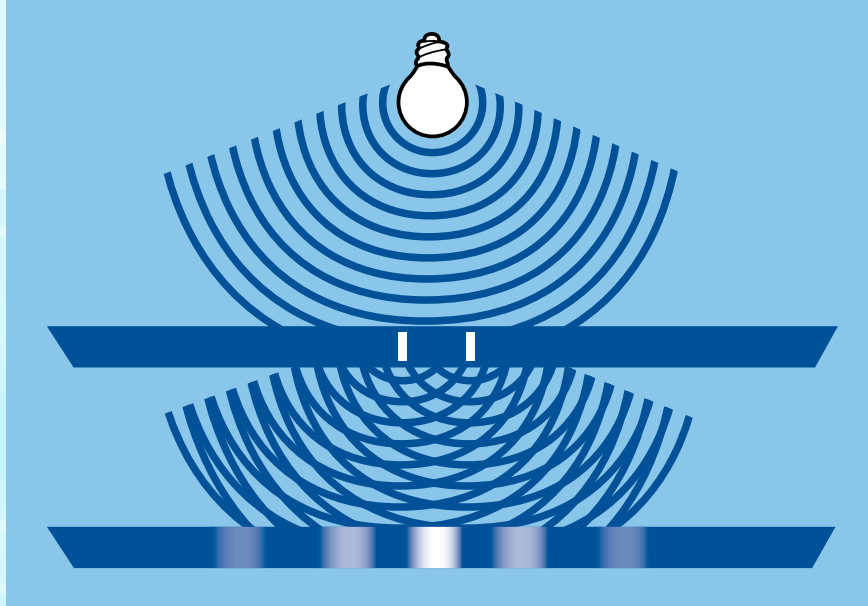
◀ Interferenzmuster im Wassertrog. Um zu beobachten, wie durch Wellenüberlagerung markante Muster entstehen, braucht es keinen aufwendigen Versuchsaufbau. (Bild: Pulpolux !!!, CC, flickr.com)

► Schematischer Aufbau des Doppelspaltexperiments: Fällt Licht durch zwei Öffnungen auf einen Schirm, ist dort ein Streifenmuster zu sehen. Vor dem Schirm kommt es zu Überlagerungen der Lichtwellen. (Bild: ius)

▼ Überraschung am Doppelspalt: Ein Elektron erzeugt einen Punkt, viele Elektronen erzeugen ein Streifenmuster. Die Zahl der auf der Fotoplatte eingeschlagenen Elektronen wurde mit 10, 200, 6000, 40 000 und 140 000 stetig erhöht. (Bilder: Dr. Tonomura Akira, Hitachi Advanced Research Laboratory)



die Punkte vieler Experimente übereinander, dann überlagern sie sich erstaunlicherweise zu einem Interferenzmuster. Das ist nur so erklärbar: Jedes einzelne Teilchen surft auf seiner eigenen Materiewelle, die immer durch beide Spalten läuft und sich danach wieder überlagert.



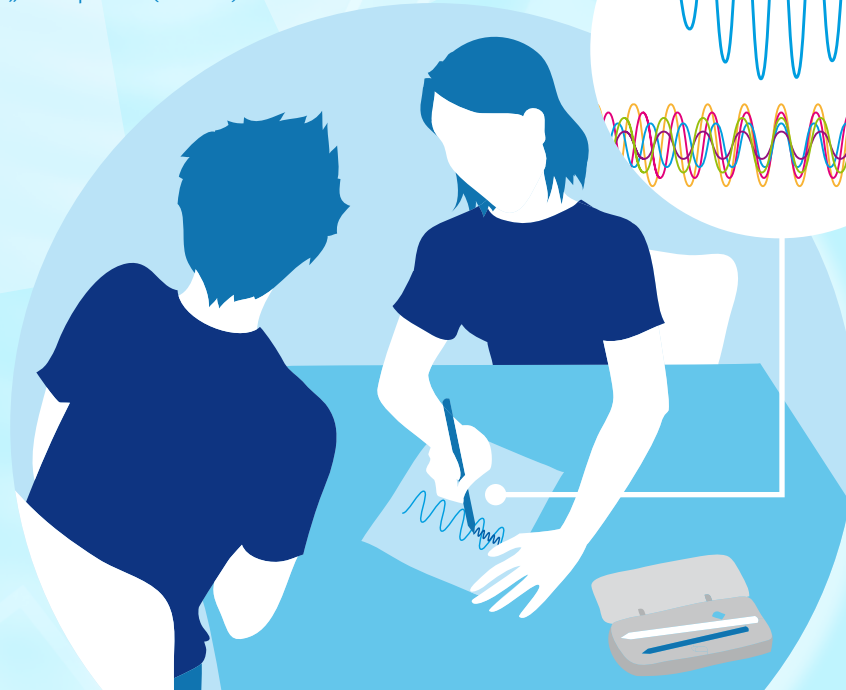
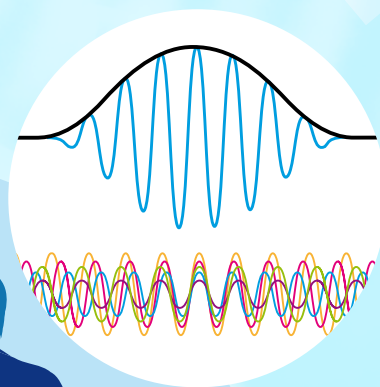
„Aus was bestehen Materiewellen denn?“, fragt Ben. „Es sind keine physikalischen Kraftfelder“, betont seine Schwester. Materiewellen beschreiben einfach gesagt eine Wahrscheinlichkeit, wo sich das zugehörige Teilchen aufhält. „Die Konsequenzen“, erzählt Anna, „haben allerdings die Physik erschüttert.“ Die berühmteste ist die Heisenberg'sche Unschärferelation. Nach ihr gilt: Je genauer man den Aufenthaltsort des Teilchens eingrenzt, desto mehr Information verliert man über dessen Geschwindigkeit. Und umgekehrt. Schuld daran ist seine Materiewelle.

Anna holt Buntstifte und Block und zeichnet eine gleichmäßige Schlängellinie. „Das soll eine Sinuswelle sein“, sagt sie: „Mathematisch ist sie eigentlich unendlich lang und schwingt überall gleich hoch aus.“ Deshalb enthält eine sinusförmige Materiewelle keinerlei Information über den Aufenthaltsort des zugehörigen Teilchens. Dafür allerdings entspricht sie

in der Quantenwelt einer präzisen Geschwindigkeit dieses Teilchens.

„Aber wie kriegen wir jetzt heraus, wo das Teilchen ist?“, will Ben wissen. Anna zeichnet kürzer- und längerwellige Sinuskurven über die erste Kurve drüber. Dann addiert sie alle Wellenzüge zu einer neuen Kurve auf. Als Ergebnis formen sich auf dem Papier kleine Bäuche und Einschnürungen – wie eine Perlenkette. Tatsächlich kann man viele Sinuswellen so geschickt überlagern, dass ihre Addition eine Kurve mit einem einzigen Bauch produziert. „Das ist ein sogenanntes Wellenpaket“, erklärt Anna. Es umschreibt den Bereich, in dem sich das Teilchen höchstwahrscheinlich befindet. Allerdings hat das einen Preis. Je schärfer man den Ort so eingrenzen will, desto mehr verschiedene Wellenlängen muss man aufaddieren. Jede Welle bringt aber eine andere Geschwindigkeit in den Mix ein. Das macht die Information über die Geschwindigkeit des Teilchens unschärfer.

► Addiert man kürzere und längerwellige Sinuskurven zusammen, ergibt sich eine neue Kurve. Bei vielen Sinuswellen können diese sich so überlagern, dass sie sich überall auslöschen – bis auf die Mitte. Dort entsteht ein Bauch, das „Wellenpaket“. (Bild: ius)





Untote Katzen und spukhafte Fernwirkungen

In der Quantenwelt sind Dinge möglich, die unserer Erfahrung im Alltag widersprechen. Teilchen können durch Barrieren tunneln, Katzen zugleich tot und lebendig sein. Und Einstein schüttelte über „spukhafte Fernwirkungen“ den Kopf.

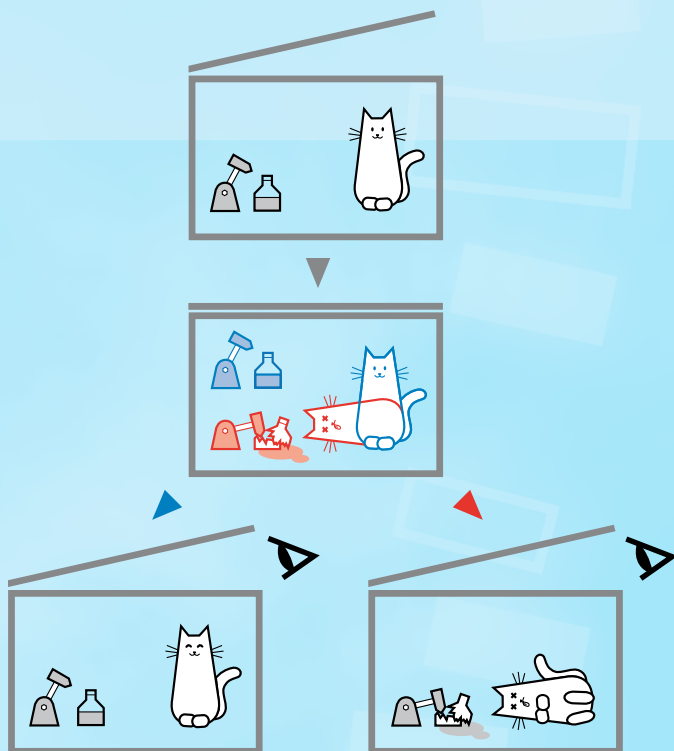
Die Quantenwelt widerspricht unserer von großen Dingen geprägten Erfahrung. Was wäre aber, wenn man sie direkt mit der Welt des Großen verbinden könnte? Das fragte sich 1935 der österreichische Physiker Erwin Schrödinger und entwarf ein Gedankenexperiment. Er nutzte dafür den absoluten Zufall als weitere grundlegende Eigenschaft der Quantenwelt: Es lässt sich nicht vorhersagen, wann ein radioaktives Atom zerfallen wird. Schrödinger sperrte ein solches Atom in Gedanken mit einer lebenden Katze in eine perfekt abgeschirmte, nicht einsehbare Kiste ein. Der Zerfall des Atoms sollte über einen Mechanismus Giftgas freisetzen und die Katze töten. „Solange die Kiste geschlossen ist, weiß man nicht, ob

die Katze darin noch lebt oder nicht“, erklärt Anna. Nach der Quantenmechanik sind die Quantenzustände „Katze lebt“ und „Katze tot“ überlagert. Erst das Öffnen der Kiste entspricht einer Messung, die einen der beiden Zustände festlegt.

Natürlich wissen wir, dass eine echte Katze nicht zugleich tot und lebendig sein kann. Im Vergleich zu Quantenteilchen ist sie auch gigantisch groß. Schrödinger wollte mit seinem [Gedankenexperiment](#) auch keine Tiere quälen, sondern auf eine Besonderheit hinweisen: Die Quantenmechanik setzt der Größe von Quantenobjekten keine prinzipielle Grenze. „Ob tatsächlich keine Grenze zur klassischen Welt der großen Objekte existiert,

versuchen viele Forschungsgruppen herauszufinden“, erzählt Anna, „indem sie mit immer größeren Quantensystemen experimentieren, zum Beispiel in Doppelspaltexperimenten mit großen Molekülen aus vielen Atomen.“ Die Herausforderung dabei ist die Empfindlichkeit der Quantensysteme gegen Störungen. Störungen sind nichts anderes als zufällige Messungen, und jede Messung verändert das betroffene Quantensystem.

Um die Grundlagen einer zukünftigen Quanten-Informationstechnologie verstehen zu können, braucht man noch ein zweites berühmtes Gedankenexperiment. „Dazu habe ich auf deinem und meinem Tablet die gleiche Würfelspiel-App installiert“, erklärt Anna und holt jeweils ein Bechersymbol auf beide Bildschirme. Beim Antippen purzelt ein virtueller Würfel heraus und zeigt eine zufällige Augenzahl an. Anna spielt kurz damit und wür-



◀ Gedankenexperiment von Erwin Schrödinger: eine Katze in einer Kiste. Ob das Atom zerfallen und sie folglich tot ist oder doch lebt, erfährt man erst, wenn man die Kiste öffnet. (Bild: ius)

◀ Pasch garantiert: Vorhersehbare Ergebnisse, wie sie mit zwei verschränkten Quantenwürfeln erzielt werden könnten, wären der Traum eines jeden Zockers. (Bild: Sergey Mironov)

felt eine Zahlenfolge, Ben auf seinem Tablet eine andere. „Die Zahlen sind so zufällig wie bei echten Würfeln“, betont Anna. Nun bittet sie Ben, mit seinem Tablet in die Küche zu gehen. Anna bleibt unter den wachsamsten Augen der Eltern am Kaffeetisch.

Auf Annas Zuruf hin würfeln beide und notieren ihre Würfelzahlen. Nach einigen Runden kommt Ben zurück und zeigt seinen Zettel. Zu seiner Verblüffung steht dort dieselbe Zahlenfolge wie auf Annas Blatt. „Du hast da einen Trick reinprogrammiert!“, ruft er. Anna gibt zu, dass die beiden Tablets heimlich über WLAN die Würfelzahlen abgeglichen haben. Dann betont sie: „Wären das zwei echte Quantenwürfel, dann könnten sie sich ohne solche Tricks so verhalten.“ Dazu müssen die Würfel miteinander „verschränkt“ werden und ein gemeinsames

Quantenobjekt bilden. Im verschränkten Zustand wären für beide Würfel die Zahlen Eins bis Sechs überlagert. Sobald mit einem Würfel eine bestimmte Zahl geworfen wird, entspricht das einer Messung. Diese Messung legt nach den Regeln der Quantenwelt beim anderen Würfel exakt die gleiche Zahl fest.

„Zwischen echten Quantenwürfeln gäbe es keinerlei heimliche Funkverbindung über irgendwelche physikalischen Kräfte“, macht Anna deutlich. Besonders erstaunlich: Die Quantenmechanik setzt der Entfernung zwischen den Teilen eines verschränkten Quantensystems keine Grenze. Die Quantenwürfel könnten also einen unbegrenzten Abstand voneinander haben. Einzige Bedingung: Ihre hochempfindliche Verschränkung darf nicht gestört werden. Trotzdem würde die Zahl eines Würfels ohne Zeitverzögerung diejenige des anderen Würfels festlegen.

Für Albert Einstein war diese „spukhafte Fernwirkung“ ein Beweis für die Unvollständigkeit der Quantentheorie. „Heute wissen wir, dass die Verschränkung tatsächlich große Entfernungen toleriert“, erzählt Anna, „wenn man sie gut schützt.“ Wiener Physiker verschränkten 2010 auf der Kanareninsel La Palma zwei Photonen miteinander und sandten eines davon 144 km weit durch die Luft nach Teneriffa. Trotz der Trennung blieben sie aber verschränkt. Verschränkte Quantensysteme und Schrödingers Katzen-Zustände mögen seltsam anmuten: Genau diese wird eine zukünftige Quanten-Informationstechnologie intensiv einsetzen.

▼ Per Richtlaser werden Teleskope auf Teneriffa (im Bild) und La Palma synchronisiert. Wiener Physiker verschränkten 2010 zwei Photonen miteinander und sandten eines davon über die 144 Kilometer weite Strecke zwischen den beiden Kanareninseln. (Bild: IQOQI)





Quantencomputer und Quanteninternet

Die heutige Informationstechnologie nutzt Quanteneigenschaften nur zu einem kleinen Teil aus. Der zukünftige Schritt vom Bit zum Quantenbit wird völlig neue Möglichkeiten eröffnen. Quantencomputer könnten damit Aufgaben lösen, an denen herkömmliche Computer scheitern. Ein Quanteninternet würde auch abhörsichere Verbindungen ermöglichen.

Die heutige Informationstechnologie ist digital, was vom lateinischen Wort *digitus* für Finger kommt. Sie basiert auf nur zwei Zahlen. Die 1 steht sozusagen für „Daumen hoch“, die 0 für „Daumen runter“, und diese kleinste Informationseinheit heißt Bit. Auch in der zukünftigen Quanten-Informationstechnologie, Annas Forschungsgebiet, wird es so eine kleinste Informationseinheit geben. Sie heißt Quantenbit oder kurz Qubit.

Qubits besitzen ebenfalls zwei verschiedene Quantenzustände, die 0 und 1 repräsentieren können. Anders als ein klassisches Bit kann sich das Qubit jedoch auch

in einer Überlagerung beider Zustände befinden. Das entspricht der zugleich lebenden und toten Schrödinger-Katze. Erst eine Messung legt einen der beiden Qubit-Zustände mit einer Wahrscheinlichkeit fest, die von der Quantenmechanik präzise vorgegeben ist. „Bei dieser Quanteninformationspost“, erklärt Anna ihrem Bruder, „beeinflusst du also sozusagen durch das Öffnen des Umschlags den Inhalt.“

„Aber wozu soll so eine komische Post gut sein?“, kontert Ben. Vor allem irritiert ihn, dass man die Nullen und Einsen nur mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten messen kann: Heißt das nicht, dass sich

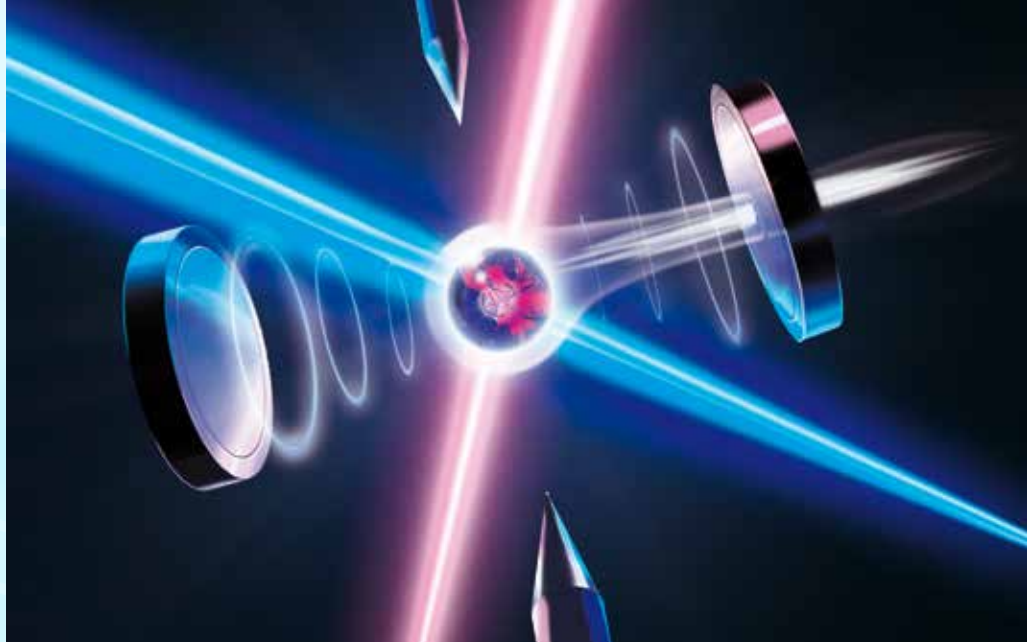
Fehler einschleichen? Anna bestätigt Bens Verdacht vergnügt, was ihn noch mehr irritiert. „Wozu brauche ich denn einen Rechner, der nicht mal $1 + 1$ genau zusammenzählen kann?“, fragt er.

Es wäre in der Tat Unsinn, solche einfachen Aufgaben mit Quantenrechnen lösen zu wollen. Quanteninformationen besitzen Eigenschaften, die sie für ganz andere Anwendungen attraktiv machen. Rechner, die mit Qubits arbeiten, heißen Quantencomputer. Diese Geräte versprechen Probleme zu lösen, an denen herkömmliche Computer wegen des Rechenaufwands scheitern. Noch stecken Quantencomputer in der Babyphase, doch die Forschung an ihren Grundelementen macht Fortschritte.

Zurzeit kennt die Physik drei Sorten solcher Aufgaben, bei deren Lösung ein Quantencomputer – theoretisch – über-

◀ Blick in eine Ionenfalle. In dieser Kammer lassen sich geladene Atome mit Hilfe elektrischer Felder festhalten. Dort verhalten sie sich wie Qubits, die Grundrecheneinheit von Quantencomputern. (Bild: Universität Innsbruck, C. Lackner)

► Forschern der Universität Innsbruck gelang es im letzten Jahr, die Quanteninformationen eines Atoms auf ein Lichtteilchen zu übertragen und via Glasfaserkabel zu einem anderen Atom zu senden. (Bild: Harald Ritsch)



legen wäre. Eine Aufgabe ist das schnelle Suchen einer Information in vielen Daten. Bestimmte Datenstecknadeln findet der Quantencomputer viel schneller in so einem Datenheuhaufen. Die andere Aufgabe wäre das schnelle „Faktorisieren“, also Zerlegen, von riesigen Zahlen in kleinere Teiler, etwa Primzahlen. Zum Beispiel könnten Quantencomputer damit die Rechenzeiten zum Knacken aufwendig verschlüsselter Codes massiv verkürzen. „Das ist ja das Gegenteil von der Quantenverschlüsselung, die du mir noch erklären willst!“, platzt es aus Ben heraus. „Stimmt, aber die Quantenphysik hat dafür auch ein wasserdichtes Rezept gegen unerwünschte Lauscher“, antwortet Anna, „das erkläre ich dir später.“

Die dritte Aufgabe, bei der Quantencomputer herkömmlichen Computern weit überlegen wären, ist die Simulation des Verhaltens von anderen Quantensystemen.

Solche Quantensysteme sind zum Beispiel alle Materialien, denn sie bestehen aus Atomen oder Molekülen. Jedes Atom und jedes Molekül als Materiebaustein bildet schon für sich genommen ein Quantensystem. Besonders wichtig sind die Elektronen, die für die chemischen Bindungen zwischen ihnen sorgen. Mit der Quantenmechanik kann man theoretisch Atom für Atom, Elektron für Elektron, die Eigenschaften eines neuen Materials im Voraus berechnen. Doch herkömmliche Computer scheitern an der Komplexität dieser Rechnungen. Deshalb muss die heutige Forschung mit stark vereinfachten Modellen arbeiten. Entsprechend begrenzt ist deren Aussagekraft.

Der amerikanische Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman hatte 1982 eine bestechende Idee, wie dieses grundlegende Problem lösbar wäre: Man simuliert das Verhalten der Materialien mit einem anderen Quantensystem. Dieser maßgeschneiderte Quantenrechner hätte im Gegensatz zu den Materialien den Vorteil,

INFO

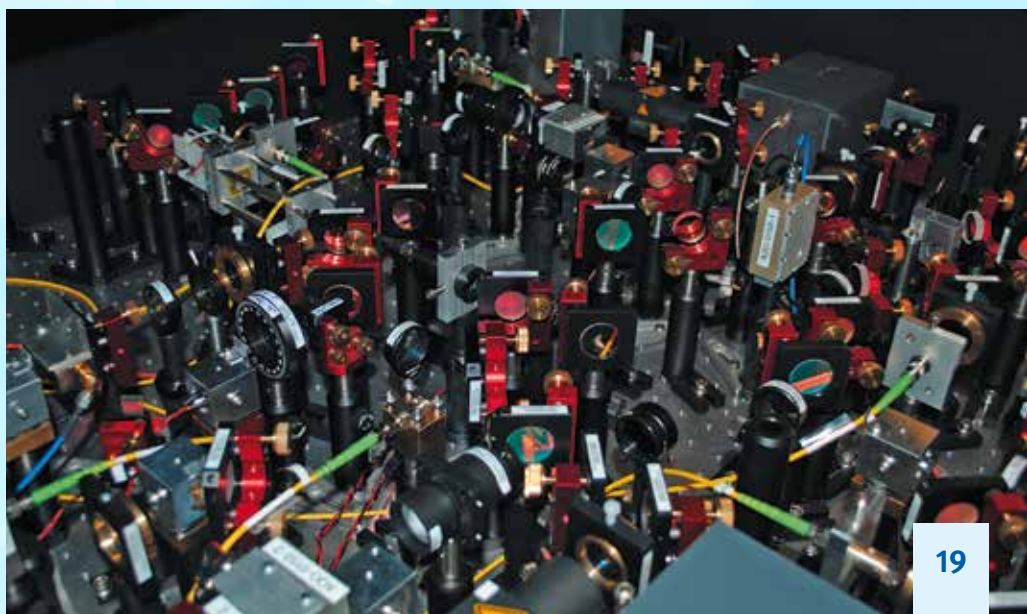
Spintronik

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Dichte der Transistoren auf elektronischen Chips alle achtzehn Monate verdoppelt. Dieser Trend zur Miniaturisierung ist als Mooresches Gesetz berühmt. Doch langsam stößt es an Grenzen: Jüngst hat sich der Verdoppelungsrhythmus auf drei Jahre verlangsamt. Vor allem drohen die elektrischen Strompulse der Bits die winzigen Strukturen der Siliziumchips zu überhitzen.

Die Physik verspricht jedoch neue Lösungen: Die „Spintronik“ würde den Weg zur weiteren Miniaturisierung frei machen. In der Spintronik wird ein einzelnes Elektron zum Träger von zwei Informationen zugleich. Eine ist seine elektrische Ladung, wie in einer herkömmlichen Elektronik. Zum zweiten Informationsträger wird sein „Spin“. Dieser macht das punktförmige Elektron zu einem kleinen Magneten, der sich über Magnetfelder wie ein winziger Kompasszeiger drehen lässt. Allerdings kennt der Spin in einem äußeren Magnetfeld nur zwei Zeigerrichtungen: parallel und antiparallel dazu. Diese beiden Quantenzustände können je für eine digitale 1 und eine 0 stehen.

Derzeit forschen viele Gruppen weltweit an spintronischen Bauelementen, zum Beispiel Transistoren. Noch ist das Grundlagenforschung. Eine spintronische Anwendung hat allerdings längst die Festplatten-Speichertechnik revolutioniert. Der sogenannte Riesenmagnetowiderstand macht heutige Festplatten-Leseköpfe so empfindlich, dass sie extrem kleine magnetische Bits auf den Plattenspeichern lesen können. So ermöglichte dieser Effekt Terabyte-Festplatten. Seine Entdecker, der Franzose Albert Fert und der Deutsche Peter Grünberg erhielten 2007 den Physik-Nobelpreis.

▼ Der Spin bewirkt die bevorzugte Ausrichtung von Elektronen oder Atomen in einem Magnetfeld. Mit diesem komplexen Versuchsaufbau bestimmten Physiker der Unis von Cambridge und Bonn, wie sich eine Spinanregung in einem Material ausbreitet. Dies hilft Prozesse zu verstehen, die einmal in die Entwicklung neuartiger Computer münden könnten. (Bild: Enrico Vogt)



1800

1900

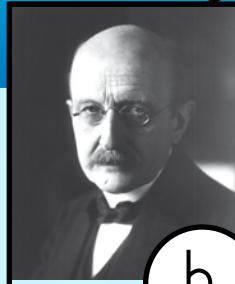
1910



1802

Thomas Young
führt erstmals das Doppelspaltexperiment durch, um die Wellennatur des Lichts zu beweisen.

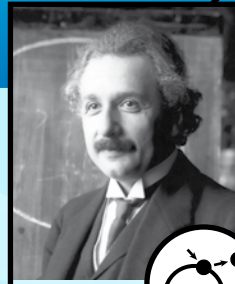
→ Seite 14



1900

Max Planck
begründet mit der Einführung des Wirkungsquantums die Quantenphysik.

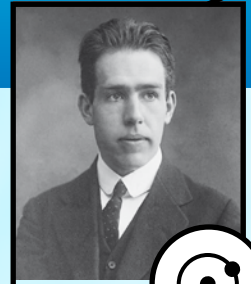
6



1905

Albert Einstein
wird mit seinen Arbeiten zum Photoeffekt nach Planck der zweite Vater der Quantenphysik.

5



1913

Niels Bohr
stellt sein Bohr'sches Atommodell vor. Ein wichtiger Schritt zur Entwicklung der Quantenmechanik.

7

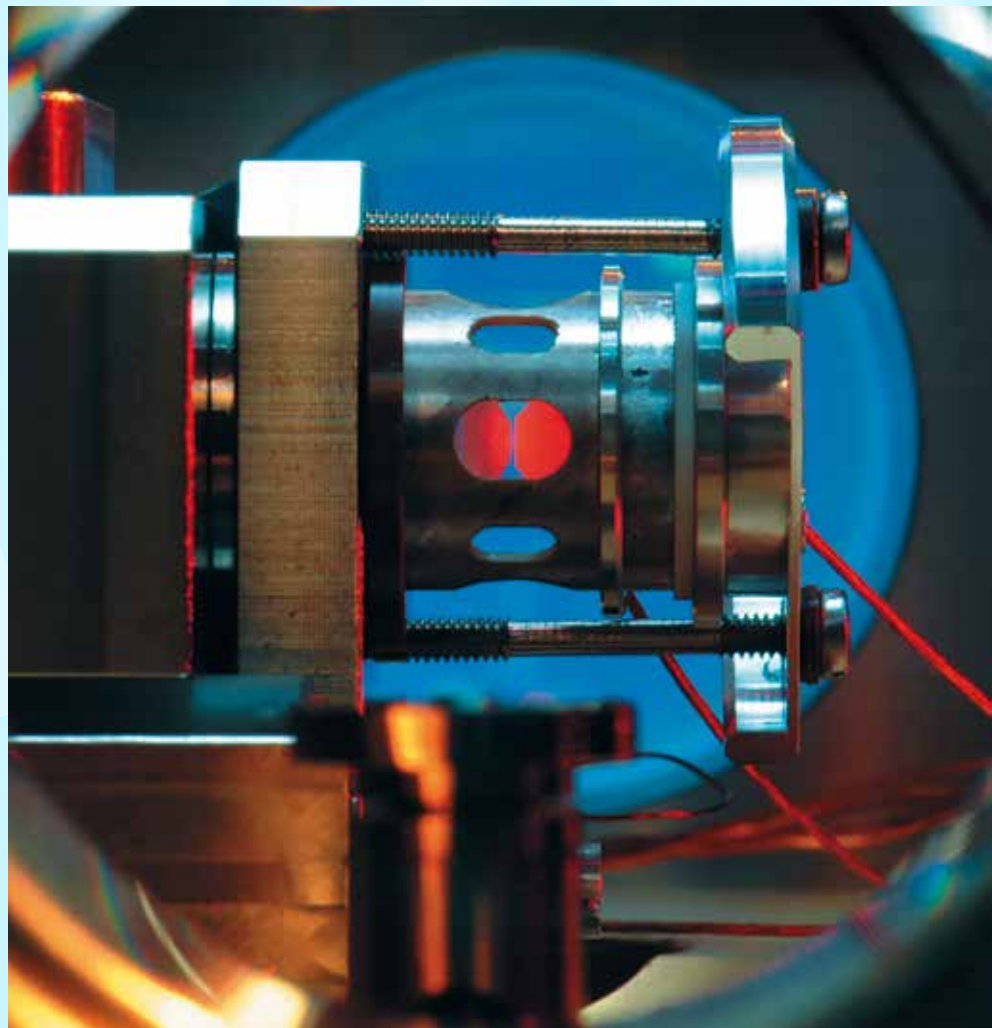


▲ Große Entdeckungen und Entwicklungen berühmter Physiker – der Volksmund würde von Quantensprüngen sprechen. Selbstverständlich haben diese Forscher darüber hinaus noch viele weitere wichtige Beiträge zum Fortschritt der Wissenschaft geleistet. In den blauen Kästchen steht die Seite, auf der ihre Entdeckungen in diesem Heft erwähnt werden. (Grafik: ius)

► In Garching fangen Forscher Atome in einem Viertel Millimeter breiten Spalt zwischen zwei Spiegeln. Durch die Untersuchung der Wechselwirkung von Licht und Materie schaffen sie die Grundlage für ein künftiges Quanteninternet. (Bild: MPQ, Abteilung Quantendynamik)

dass man in ihm auf alle Quantenprozesse zugreifen und sie verändern könnte – wie die Räder eines offenen Uhrwerks. Damit könnte man das Verhalten der Materialien perfekt nachmodellieren. Solche Quantensimulatoren würden die Suche nach neuen Werkstoffen revolutionieren, etwa bei Zimmertemperatur supraleitenden Materialien oder medizinischen Wirkstoffen.

„Schon die genaue Berechnung der Quantenzustände eines Kristallwürfels aus kaum mehr als 40 Atomen überfordert selbst Supercomputer“, sagt Anna. Das Problem erinnert an die berühmte Legende über den Erfinder des Schachspiels. Sein König war so begeistert von dem neuen Strategiespiel, dass er dem Erfinder frei stellte, sich selbst eine Belohnung auszudenken. Der schlaue Mann antwortete, dass er gerne ein bisschen Reis für seine Familie hätte. Der König solle ihm ein einzelnes Reiskorn für das erste Spielfeld des Schachspiels schenken. Und für jedes weitere der 64 Felder solle er die Anzahl der Körner verdoppeln.



„Hättest du als König zugestimmt?“, fragt Anna ihren Bruder. „Nein“, antwortet Ben, der die Falle ahnt. „Du hast recht, wenn du vorsichtig bist“, sagt Anna, „denn der schlaue Erfinder kannte sich in Mathematik aus.“ Die Verdopplung von Feld zu Feld hat nämlich zur Folge, dass auf dem 64. Feld 2^{64-1} Reiskörner liegen müssten. Das

ergibt umgerechnet die gigantische Zahl von 9 223 372 036 854 775 808 Körnern! Zählt man die Reiskörner für alle 64 Felder zusammen, kommt man sogar auf über 18 Trillionen Körner. Das entspricht rund 540 Milliarden Tonnen Reis, ungefähr die Summe aller Reisernten weltweit aus fast 900 Jahren.

1920

1930

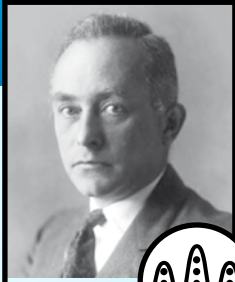
1940



1924

Louis de Broglie
verfeinert das Bohrsche Atommodell: Materieteilchen haben auch Wellencharakter.

7



1926

Max Born
beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der bei einem Quantensystem ein bestimmter Messwert auftritt.



1927

Werner Heisenberg
formuliert eine der fundamentalen Aussagen der Quantenmechanik: die Unschärferelation.

15



1935

Erwin Schrödinger
macht mit seinem Gedankenexperiment „Schrödingers Katze“ die Quantenmechanik greifbar.

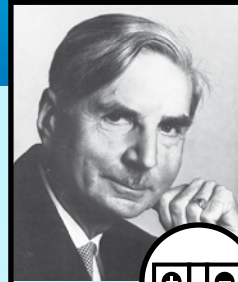
16



1938

Robert Pohl
konstruiert zusammen mit Rudolf Hilsch frühe elektronische Verstärker aus Halbleitern.

8



1938

Walter Schottky
entwickelt eine Theorie, die sich als bahnbrechend für die Halbleitertechnik erwies.

8

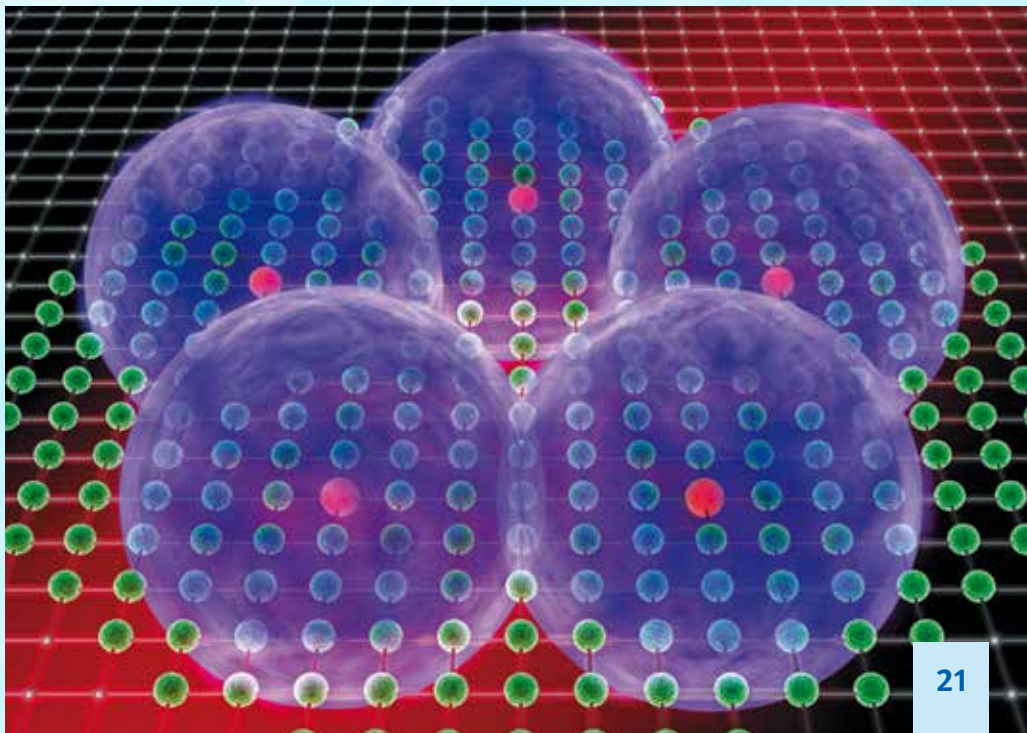
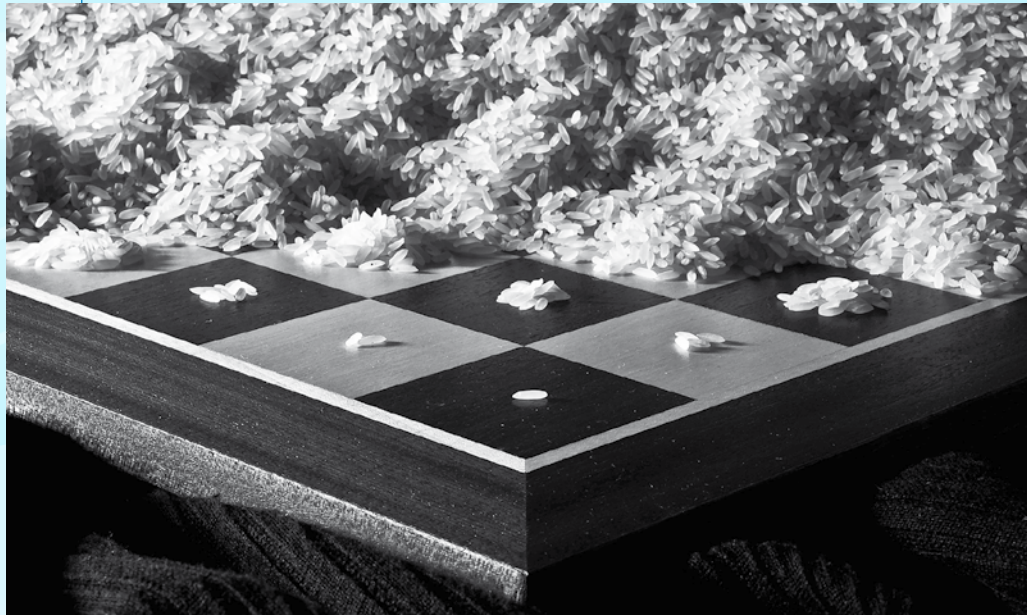
► „Explodierender“ Gewinn: Schnell türmt sich der Reis bei der berühmten Geschichte vom König und dem gewieften Schach-Erfinder in ungeahnte Höhen. (Bild: Timo Richter)

Bei Quantensystemen explodiert der Rechenaufwand mit jedem weiteren Quantenteilchen ähnlich wie die Zahl der Reiskörner auf jedem weiteren Schachfeld. Herkömmliche Computer scheitern an solchen Aufgaben, weil sie diese Bit für Bit abarbeiten. Quantensimulatoren und Quantencomputer funktionieren völlig anders: Sie benutzen den Quanteneffekt der Verschränkung. Im Herz eines Quantensimulators oder Quantencomputers werden die Qubits besonders trickreich miteinander verschränkt.

„Die genaue Form dieser Verschränkung ist sozusagen die Programmierung“, erklärt Anna. Alle Qubits formen zusammen ein großes Quantensystem. Es enthält einfach gesagt bereits alle möglichen Lösungen der Aufgabe zugleich. Eine richtig angesetzte Messung lässt das System in den Quantenzustand der gesuchten Lösung fallen. Allerdings enthält diese Lösung Fehler, die sich aber mit Hilfe der Quantenmechanik präzise eingrenzen lassen.

Das Kernstück von herkömmlichen programmierbaren Computern sind Prozessorschips. Die wichtigsten Elemente in den Prozessoren sind sogenannte Rechenregister und Logikgatter. Erstere übernehmen wesentliche Schritte im

► Gruppe von Rubidiumatomen. Gelingt es, die geometrische Anordnung dieser Atome gezielt zu kontrollieren, könnten sie ein wichtiger Baustein bei der Entwicklung von Quantencomputern werden. (Bild: MPI für Quantenphysik)



1950

1960

1970

1980

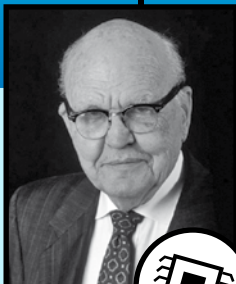


1947

Bardeen, Shockley, Brattain

bauen den ersten Transistor – knapp vor einem deutschen Team um Heinrich Welker.

8

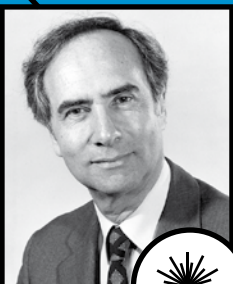


1958

Jack Kilby

„Vater des Mikrochips“. Fertigt den ersten integrierten Schaltkreis auf einem Chip.

8

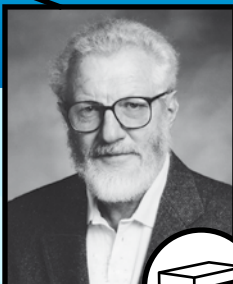


1960

Theodore Maiman

baut mit seinem Assistenten Irnee D'Haenens den ersten funktionsfähigen Laser.

11



1963

Herbert Kroemer

konzipiert die Doppelheterostruktur, die den Bau moderner Halbleiterlaser ermöglicht.



1982

Richard Feynman

hat die Idee, komplexe Quantensysteme mit Quantencomputern zu simulieren.

19



Rechnen mit Zahlen, letztere im Abarbeiten von logischen Entscheidungen in Programmen. Ganz analog dazu werden frei programmierbare Quantencomputer Quantenregister und Quantengatter besitzen. „An ihrer Verwirklichung forschen heute viele Physikerinnen und Physiker in Deutschland und auf der Welt“, erzählt Anna. Eine Herausforderung besteht darin, die supersensiblen verschränkten Systeme gut vor Störungen zu schützen, welche die hochempfindliche Verschränkung zerstören. Die andere Herausforderung ist ihre Steuerung, zum Beispiel mit Laserlicht.

Am weitesten entwickelt ist diese Technik derzeit mit elektrisch geladenen Atomen. Diese „Ionen“ schweben gefangen in Fallen aus elektromagnetischen Feldern. Mit Laserpulsen können die Forscher sie programmieren, Quanteninformationen ein- und wieder auslesen. Den Rekord halten derzeit Innsbrucker Physiker mit 14 vollständig miteinander verschränkten Calcium-

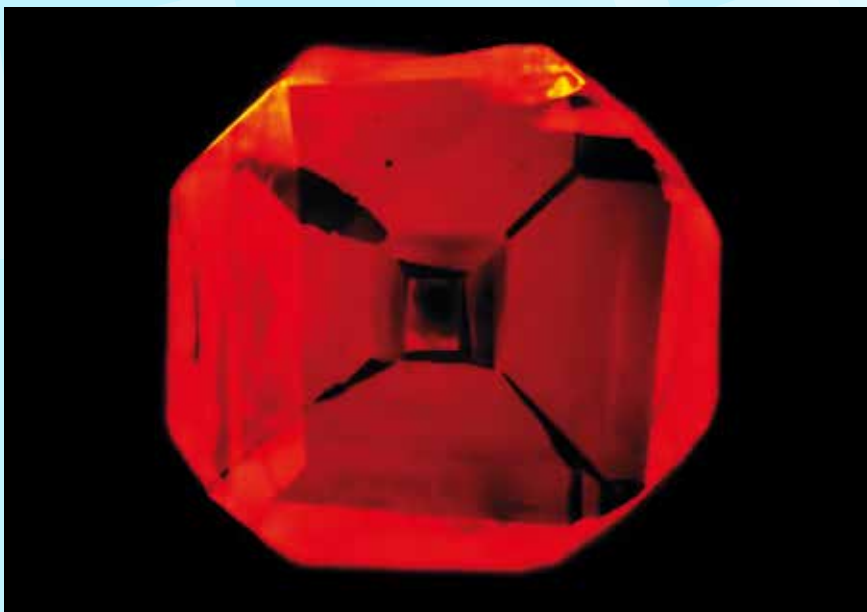
ionen. Diese 14 Qubits entsprechen schon der Situation auf dem 15. Feld der Schachlegende: Sie enthalten $2^{14} = 16\,384$ verschiedene Endzustände zugleich.

Allerdings füllt so ein Experiment noch ein ganzes Labor. Für einen praktisch nutzbaren Quantencomputer müssen die Quantengatter aber stark schrumpfen. Idealerweise sollten sie ähnlich winzig wie in der heutigen Mikroelektronik werden. Das ist ein wichtiges Forschungsziel. Eine Möglichkeit bieten elektronische Chips, über denen solche Ionen in Mikrofallen schweben. Tatsächlich funktioniert das schon im Labor. Ein Quantensimulator, den man bereits kaufen kann, setzt dagegen supraleitende Kreisströme als Qubits ein. Prinzipiell eignen sich alle Systeme mit zwei Quantenzuständen als Qubits. Dazu zählen auch elektrisch neutrale Atome, die in Gittern aus Laserlicht wie in einem Eierkarton gefangen sind. Doch auch diese Technik ist nicht leicht verkleinerbar.

Ein besonders edles System verspricht einen eleganten Weg zur Miniaturisierung: künstliche Diamanten. Wie in der Halbleitertechnologie baut die Forschung gezielt **kleine Fehler** in das Kristallgitter aus Kohlenstoff ein, das Diamanten bildet. Diese im Kristallgitter fremden Atome, etwa Stickstoff oder Silizium, verfärben die Steine – auch bei natürlichen Steinen. Deshalb heißen sie Farbzentren. Die Farbe entsteht, weil diese Defekte einen Teil des weißen Tageslichtspektrums wegschlucken. Sie können aber auch über Licht angesteuert Quanteninformationen speichern und sogar verarbeiten. Deutschen Physikern ist es schon gelungen, in Diamanten ein Quantenregister aus mehreren Qubits herzustellen.

Zu einer echten Quanteninformationstechnik gehört auch das Senden von Quanteninformation über weite Strecken, etwa durch ein zukünftiges Quanteninternet. „Dabei kommt eine andere Eigenheit der Quantenwelt ins Spiel“, sagt Anna. Herkömmliche digitale Bits lassen sich ohne Informationsverlust von Elektronen auf Lichtpulse und zurück kopieren, man kann sie magnetisch auf Festplatten oder optisch auf CDs oder DVDs speichern.

Bits können umkopiert werden, weil sie vom Medium unabhängig sind. Für Qubits gilt das nicht. Nur im Zustand 0 oder 1 ist ihre Information kopierbar, aber dann unterscheiden sie sich auch nicht von klassischen Bits. Anders sieht



◀ **Leuchtende Fehlstellen:** Stickstoff-Verunreinigungen in einem Diamanten lassen sich mit grünem Licht anregen, sodass der Edelstein rot leuchtet. So können Quantenbits in dem Diamanten gezielt angesprochen werden. (Bild: Universität Stuttgart)

1990

2000

2010



1984

**Charles Bennet,
Gilles Brassard**

entwickeln auf Grundlage der Quantenmechanik das Verschlüsselungsverfahren BB84.

27



1988

**Albert Fert,
Peter Grünberg**

entdecken einen Effekt, der die Speicherfähigkeit von Festplatten erhöht.

19



1991

Artur Ekert

stellt mit dem Protokoll E91 ein abhörsicheres Quantenverschlüsselungsverfahren vor.

27

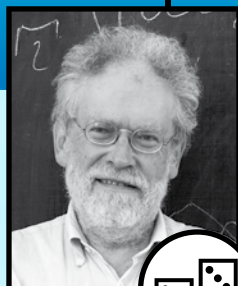


1998

Theodor Hänsch

baut den Frequenzkamm, der eine sehr präzise Messung von Lichtfrequenzen ermöglicht.

13



2010

Anton Zeilinger

verschränkt mit seinem Team zwei Photonen und sendet eins über 144 Kilometer.

17

es aus, wenn ein Qubit sich in der Überlagerung beider Zustände befindet. Jeder Versuch, diesen empfindlichen Quantenzustand zu kopieren, ist nichts anderes als eine Messung. Das entspricht dem Öffnen der Kiste mit Schrödingers Katze, [was deren Zustand festlegt](#).

Kopieren erzwingt wie jede Messung, dass das Quantenbit in einen der beiden Zustände 0 oder 1 hinein springt. Die Quanteninformation ist damit verloren. „Trotzdem kann man Quanteninformation sozusagen posten“, sagt Anna. Der Schlüssel hierzu ist die Übertragung durch Quantenteleportation. Ben horcht auf. „Meinst du so etwas wie das Beamen bei Star Trek?“, fragt er. „Nicht wirklich“, entgegnet Anna, „mit der Quantenteleportation lassen sich nur Quantenzustände übertragen, keine echte Materie.“

Für ein Quanteninternet braucht man zwei Sorten Qubits. Ruhende Qubits speichern die Quanteninformation, fliegende Qubits übertragen sie über längere Strecken. Ruhende Qubits sind zum Beispiel Ionen, Atome oder Farbzentren. Als fliegende Qubits eignen sich Photonen sehr gut. Für die Teleportation des Quantenzustands müssen alle ruhenden und fliegenden Qubits gemeinsam verschränkt werden. Sie werden, einfach gesagt, zu einem ausgedehnten Quantenobjekt durchgeschaltet.

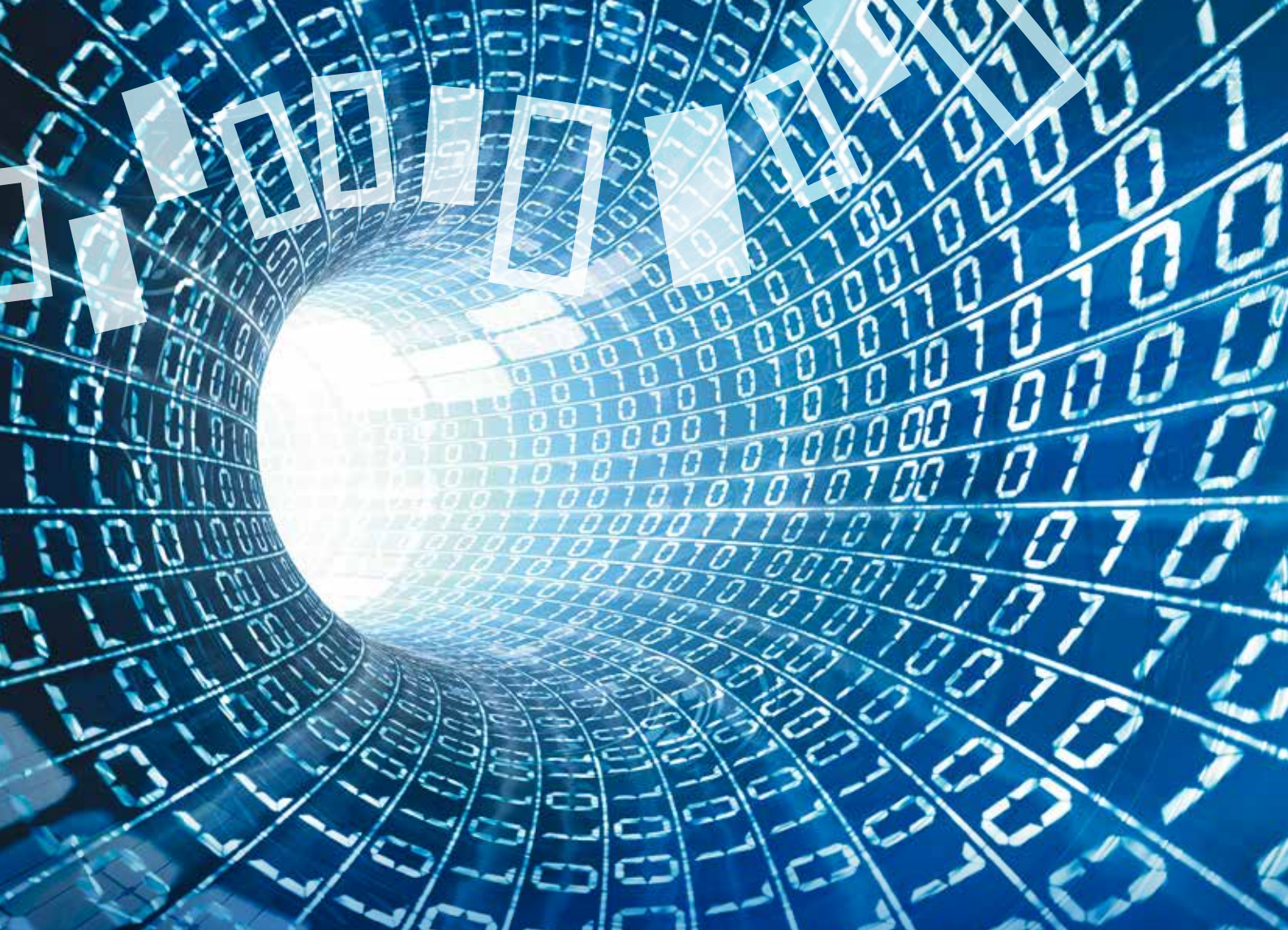
Wegen der Empfindlichkeit der Verschränkung ist die technische Realisierung allerdings eine gewaltige Herausforderung. Doch erste Schritte gelingen bereits. Physiker in Garching zum Beispiel haben zwei Atome, die zwanzig Meter voneinander entfernt waren, erfolgreich über ein Photon als fliegendes Qubit verschränkt. Für die

▲ Bildquellen Zeitleiste S. 20 bis 23:
Das Bundesarchiv, GFHund, Tamiko Thiel, John Robinson, Markus Pössel, Jaqueline Godany (alle CC, Wikimedia Commons), Courtesy of Texas Instruments, W. F. Meggers, Corning Incorporated/Hecht Collection, Physics Today Collection (alle AIP), IBM, Universität Montreal.

Übertragung sorgte ein Glasfaserkabel. Die beiden einzelnen Atome als ruhende Qubits waren jeweils mit Laserlicht zwischen zwei nahezu perfekten Superspiegeln gefangen. „Ein einzelnes Atom ist grob ein Zehntel eines Milliardstel Meters klein“, macht Anna die Herausforderung klar. Dieses Mininetzwerk lässt sich im Prinzip um weitere Atome und durch Glasfasern fliegende Photonen erweitern. Noch ist das Grundlagenforschung, aber diese macht Fortschritte.

▼ Zu mir oder zu dir? In der Quantenwelt sind die möglichen Zustände eines Quantensystems überlagert. Hier ist es die Entscheidung, ob Anna Ben in Deutschland besucht oder Ben Anna in den USA (linkes Bild). Erst Bens Frage legt eine der beiden Möglichkeiten fest, was in der Quantenwelt einer Messung entspricht. (Bild: ius)





Absolut abhörsicher: Quantenverschlüsselung

Spione mögen keine Quanten. Denn mithilfe der Quantenverschlüsselung kann man garantiert abhörsicher kommunizieren. Ein Lauscher in der Leitung verrät sich über eine fette Spur aus Übertragungsfehlern.

Die Quantenkryptographie ermöglicht tatsächlich eine abhörsichere Quantenkommunikation. Kryptographie ist das aus dem Altgriechischen abgeleitete Fachwort für Verschlüsselung, es heißt so viel wie „Geheimschrift“. Quantenkryptographie setzt auf die Grundeigenschaft der Quantenmechanik, dass jede Messung ein Quantensystem verändert. Darüber verrät sich ein Lauscher in der Leitung.

Der Begriff der Quantenkryptographie führt also etwas in die Irre. Denn bei ihr geht es nicht um die Verschlüsselung selbst, sondern um Abhörsicherheit. Grundsätzlich benutzen quantenkryptographische Systeme zwei Kanäle. Über den abhörsicheren Quantenkanal tau-

schen die Partner den Schlüssel aus. Die damit verschlüsselten Nachrichten können sie dann über einen beliebigen ungesicherten Kanal untereinander kommunizieren, zum Beispiel das normale Internet.

Es gibt verschiedene quantenkryptographische Verfahren. Sie benutzen sogenannte polarisierte Photonen als fliegende Qubits. „Die kannst du dir einfach als fliegende Zeiger vorstellen“, erklärt Anna ihrem Bruder. Nach den Quantenregeln dürfen diese Zeiger nur in zwei verschiedene Richtungen jeweils senkrecht zur Flugbahn „einrasten“. Definiert man eine Richtung willkürlich als 1, dann ist die andere die 0.

„Zur Demonstration habe ich wieder kleine Apps gebastelt und auf unseren beiden Tablets installiert“, sagt Anna und setzt sich neben Ben. [A](#) → Seite 26 Der Bruder soll den Absender der Quantenpost spielen. Anna zeigt auf Bens Bildschirm ein kleines quadratisches Kärtchen mit einem Schlitz. „Das ist ein sogenannter Polarisator“, sagt sie: „Damit prägst du einem Photon eine 1 oder 0 als Quanteninformation auf, das dann zu mir als Empfänger fliegt.“ Ben muss dazu das Kärtchen in eine der beiden zueinander senkrechten Richtungen drehen. Mit Tippen auf ein Glühbirnensymbol kann er ein Photon abschicken. Bevor das Photon Bens Polarisator erreicht, ist es ein formloser Fleck. „Es hat ja noch keine dir bekannte Polarisation, also Quanteninformation“, erklärt Anna. Erst Bens Polarisator formt es zu einem Zeiger, der parallel zu dessen Schlitz steht.

◀ Daten in der Datenleitung: Wird dank Quantenkryptographie das abhörsichere Verschlüsseln von Informationen einst zum Standard gehören? (Bild: alphaspirt)

▶ Computersimulation eines Quantenkryptographie-Netzwerkes. Anders als die Grafik vermuten lässt, ist das Ausspionieren von Daten bei der Quantenverschlüsselung nicht möglich – jeder Eingriff verrät sich über Fehler beim Empfänger. (Bild: Austrian Research Centers)

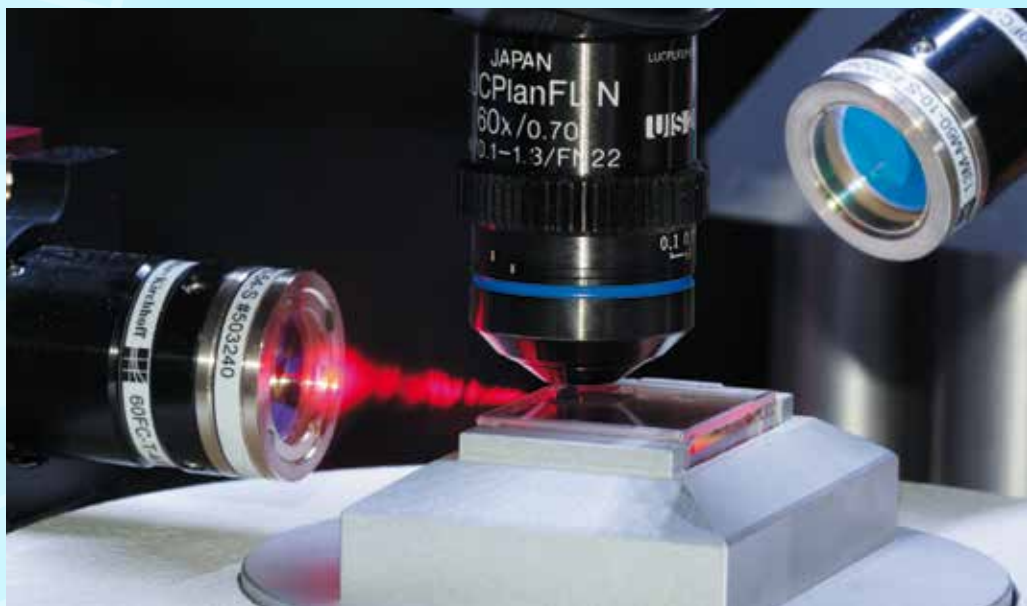


Unter dem Polarisator erscheint in senkrechter Richtung eine 1, in waagerechter Richtung eine 0. „Das habe ich willkürlich festgelegt“, erklärt Anna, während Bens Photon am rechten Rand seines Bildschirms verschwindet. Prompt taucht ein formloser Fleck links auf Annas Bildschirm auf. Sie hält das Spiel kurz an. „Hier kommt dein Qubit bei mir an“, sagt sie. „Aber wo ist denn der Zeiger?“ wundert sich Ben. Doch da Anna Bens Quanteninformation noch nicht kennen kann, erscheint das bei ihr ankommende Photon zunächst wieder als Fleck. Sie muss diese Information erst mit einer eigenen Messung lesen.

Zum Lesen hat sie einen sogenannten Analysator. Er ist ebenfalls ein drehbares Quadrat, allerdings mit einem Kreuzschlitz. Hier kommt eine weitere Eigenheit der Quantenwelt ins Spiel. Die zwei Drehschalterpositionen, mit denen Ben sein Qubit mit 0 oder 1 präpariert, bilden eine „Basis“. Die Quantenmechanik lässt bei solchen Photonen aber noch eine zweite Basis zu. Anna demonstriert dies, indem sie ihren Analysator um 45° verkippt.

„Das ist leider etwas unübersichtlich, aber entscheidend für die abhörsichere Übertragung“, sagt Anna. Sie lässt das Photon nun weiterfliegen. Ihr Analysator steht gerade zufällig in der gleichen Basisorientierung wie Bens Polarisator. Deshalb zeigt das Photon nach dem Passieren des Analysators auch in die korrekte „1“-Richtung, in der Ben es präpariert hatte. Bens Quanteninformation ist bei Anna angekommen. [B]

Ben kann ebenfalls zwischen den beiden um 45° gedrehten Basen umschalten. Die Geschwister spielen testweise das Schlüsselsenden mit verschiedenen Einstellungen durch. Auf Bens Bildschirm wächst die angezeigte Liste der präparierten Qubits mit zugehöriger Basis, auf Annas Bildschirm diejenige der empfangenen Information. Immer wenn Anna zufällig die gleiche Basis wie Ben gewählt hat, stimmen ihre Bits überein. Eine falsch gewählte Basis produziert bei Anna dagegen nur sinnlose Zufallszahlen. [C]



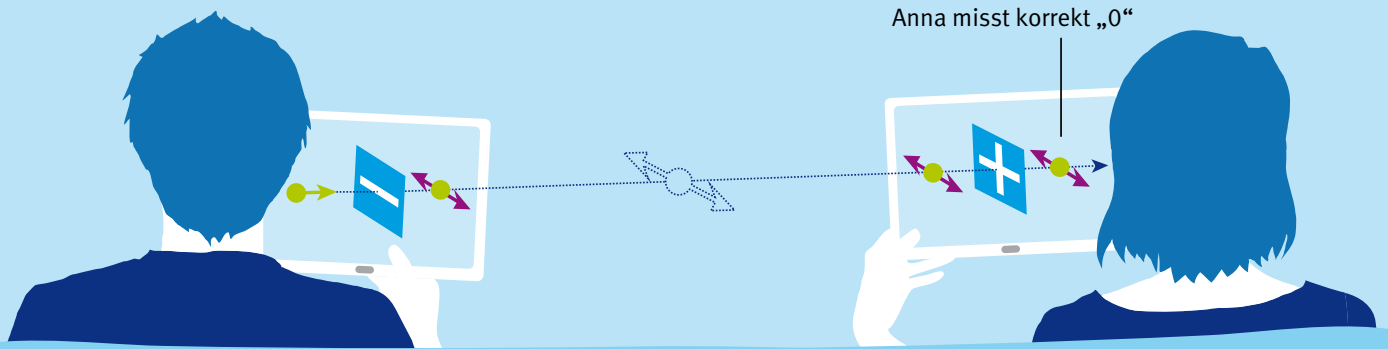
▲ Mit einem gepulsten Laser (rot) werden in sogenannten Quantenpunkten gezielt einzelne Photonenpaare erzeugt. Miteinander verschränkt, ließen sie sich unter anderem für die Quantenkryptographie verwenden. (Bild: Uni Innsbruck)



„Die falsche Messbasis zerstört die ursprüngliche Quanteninformation“, sagt Anna. Damit die beiden gemeinsam den richtigen Schlüssel finden, müssen sie am Ende ihre Basiseinstellungen austauschen. Anhand dieser Liste wählen sie nur die Quantenbits aus, bei denen sie

▲ Quantenschlüssel aus der Luft. Deutschen Wissenschaftlern ist es erstmals gelungen, Quantendaten per Laserstrahl von einem Flugzeug zur Bodenstation zu übertragen. Das dafür erforderliche Laserterminal wurde am Rumpf des Forschungsflugzeugs Do228-212 angebracht. (Bild: DLR)

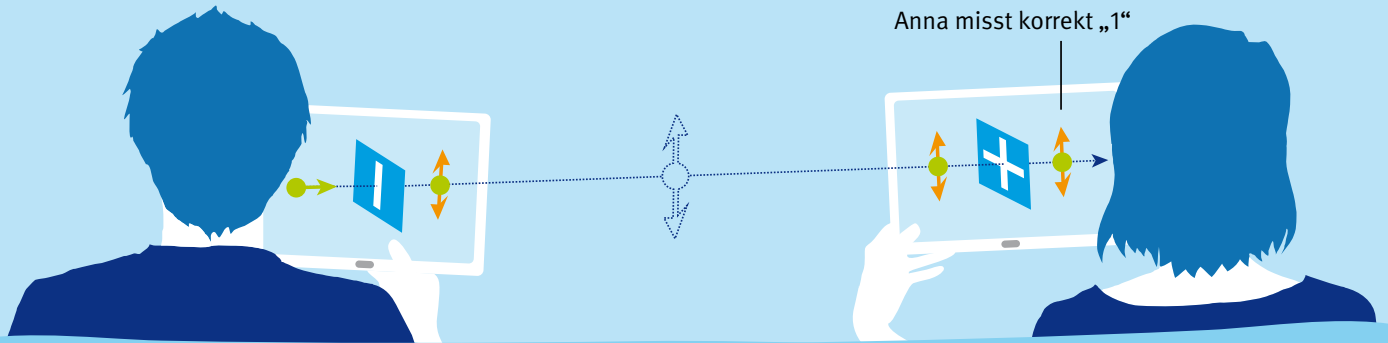
A



Ben prägt Polarisation „0“ auf

Anna stellt ihren Analysator zufällig in die richtige Position „+“

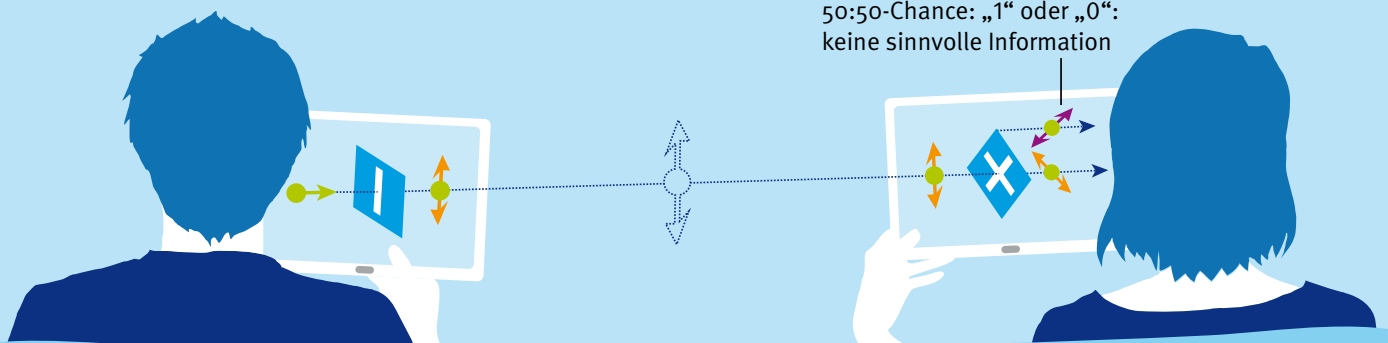
B



Ben prägt „1“ auf

Position „+“

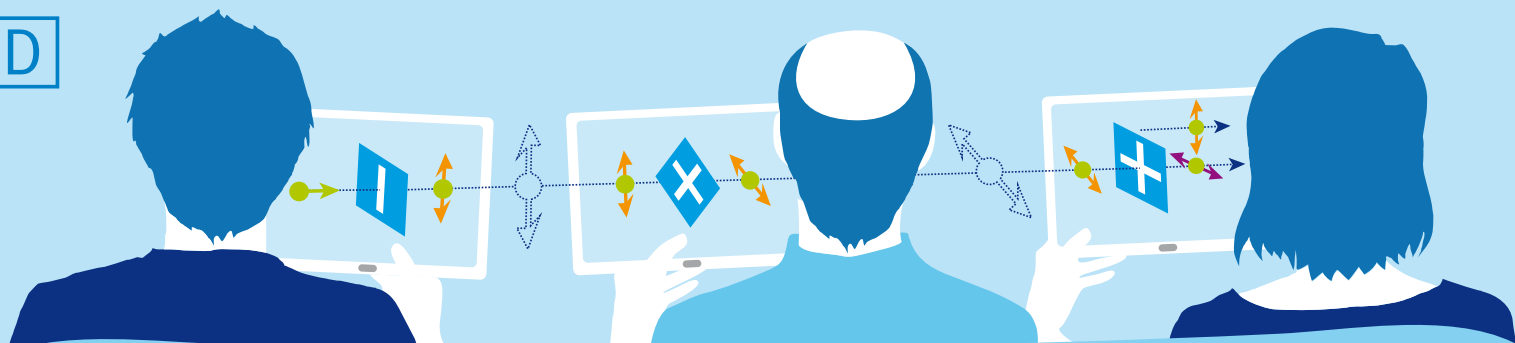
C



Ben prägt „1“ auf

Anna dreht den Analysator in die falsche Position „x“

D



Ben prägt „1“ auf

Vater benutzt z. B. einen „x“-Analysator und verändert dabei ungewollt den Zustand des Photons

Anna misst mit 50:50-Chance: „1“ oder „0“: keine sinnvolle Information

zufällig die gleiche Basiseinstellung verwendet hatten. Diese Qubits stimmen bei beiden überein. Und nur diese benutzen die Geschwister für den gemeinsam verwendeten Schlüssel. „Beim Austausch der Basiseinstellungen darf ruhig ein Spion mitlauschen“, erklärt Anna: „Denn allein damit kriegt er nicht die einzelnen Nullen und Einsen unseres Schlüssels heraus.“ Was passiert aber, wenn ein Spion in der Leitung ist?

Dazu bittet Anna den Vater mit dessen Tablet hinzu. Sie startet darauf eine dritte App, und es erscheint ebenfalls ein Quadrat mit Kreuzschlitz. Mit diesem Analysator soll er die Quanten-Kommunikation zwischen den Geschwistern ausspionieren. „Ich bin also wieder der Böse“, seufzt der Vater augenzwinkernd. Sein Spionage-Analysator funktioniert genauso wie Annas Empfangs-Analysator. D

Nun verteilen sich die Drei in verschiedene Zimmer. Nach einigen Dutzend Versandrunden versammeln sie sich wieder im Wohnzimmer, aber ohne einander ihre Protokolle zu zeigen. Anna und Ben verständigen sich über ihre Basiseinstellungen, danach vergleichen sie ihre damit generierten Schlüssel. Doch nun haben sich sogar bei identischer Basiseinstellung viele Fehler eingeschlichen. Wären sie weit voneinander entfernt, dann könnten sie diese Fehler im Schlüssel mit einer Testnachricht aufdecken. Die Fehler hat der Spion verursacht, sobald er unwissentlich die falsche Basis gewählt hat. Damit verändert er die Quanteninformation auf dem Weg zum Empfänger und hinterlässt eine Spur.

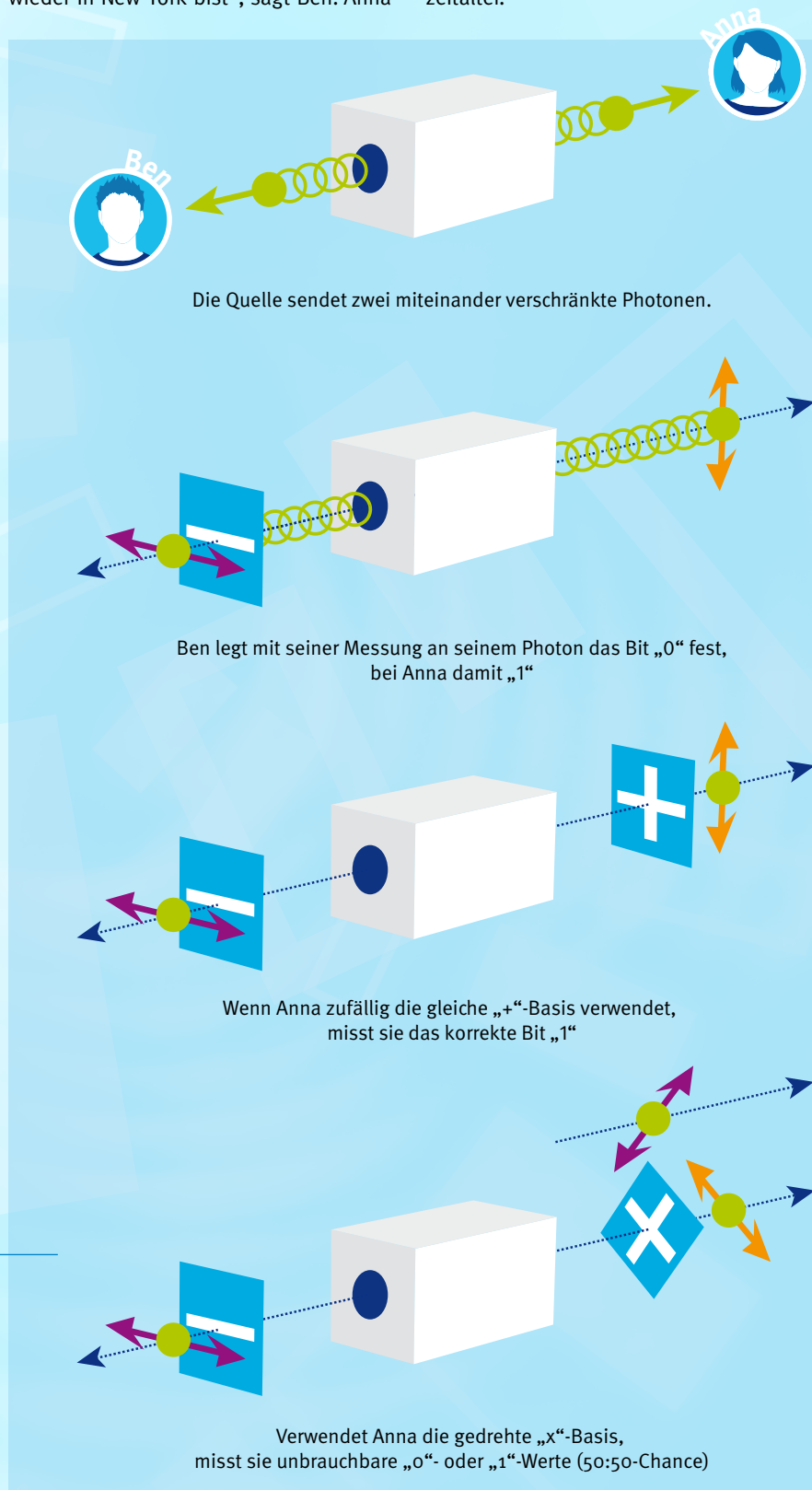
Diese Art der Quantenverschlüsselung haben der amerikanische Physiker Charles Bennet und sein frankokanadischer Kollege Gilles Brassard 1984 ersonnen. Deshalb heißt sie BB84-Protokoll. Darauf basierende Systeme sind bereits auf dem Markt. Allerdings ist das BB84-Protokoll nur garantiert abhörsicher, wenn exakt ein Photon pro Quantenbit versendet wird. Rutschen mehrere Photonen gleicher „Zeigerrichtung“ mit in ein Qubit-Paket, dann könnte ein Lauscher – theoretisch – die überzähligen Photonen unerkant abzweigen und messen.

Absolut wasserdicht ist das [E91-Protokoll](#) des britischen Physikers Artur Ekert von 1991. Dabei versorgt eine spezielle Lichtquelle Sender und Empfänger mit je einem Photon als Qubit. Diese beiden Qubits sind miteinander verschränkt. In diesem Fall erhält Ben als Absender des Schlüssels sein Photon früher als Anna als Empfängerin. Ben prägt seinem Photon mit dem Polarisator wieder eine Quanten-

information auf. Diese legt über die Verschränkung auch die „Zeigerrichtung“ des zweiten Photons fest, das Anna empfängt. Bei richtiger Wahl der Basis erhält Anna wieder die korrekte Information. Ein Spion zerstört mit seinem Analysator die Verschränkung und verrät sich so.

„Schade, dass wir noch nicht quantenverschlüsselt chatten können, wenn du wieder in New York bist“, sagt Ben. Anna

lacht und meint: „Vielleicht kann ich als Forscherin mithelfen, dass das Quanteninternet Realität wird.“ Sie erinnert ihren Bruder an die Pioniere der Quantenphysik. Keiner von ihnen konnte voraussehen, dass sie mit ihren [Entdeckungen](#) technische Revolutionen ausgelöst haben – seien es Transistoren, Laser oder Terabyte-Festplatten. Dank dieser Revolutionen leben wir heute längst im Quantenzeitalter.



Veranstalter



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Partner



Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige GmbH



Eine Initiative des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung



Medienpartner



Saarbrücker Zeitung

Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft 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 erscheint zu den „Highlights der Physik 2014: Quantenwelten“ (Saarbrücken, 27.09. – 02.10.2014), Infos: www.physik-highlights.de