

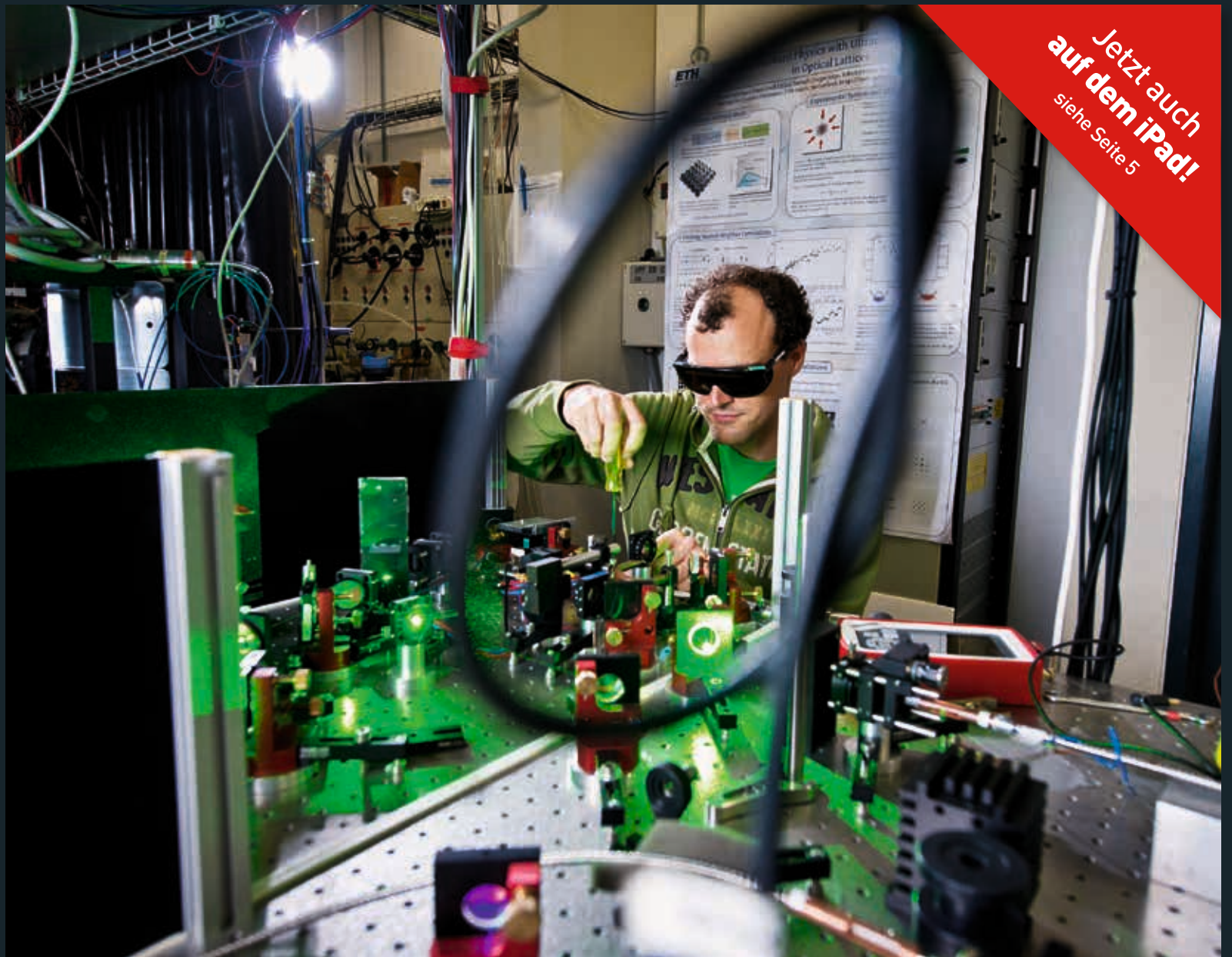
SWISS ENGINEERING

Schweizerische Technische Zeitschrift STZ

Quantenphysik – Grundstein zukünftiger Technologien

Die Effekte sind schwer zu begreifen, trotzdem bestimmen sie die Physik

Nr. 10 · Oktober 2013 · 110. Jahrgang · CHF 9.–



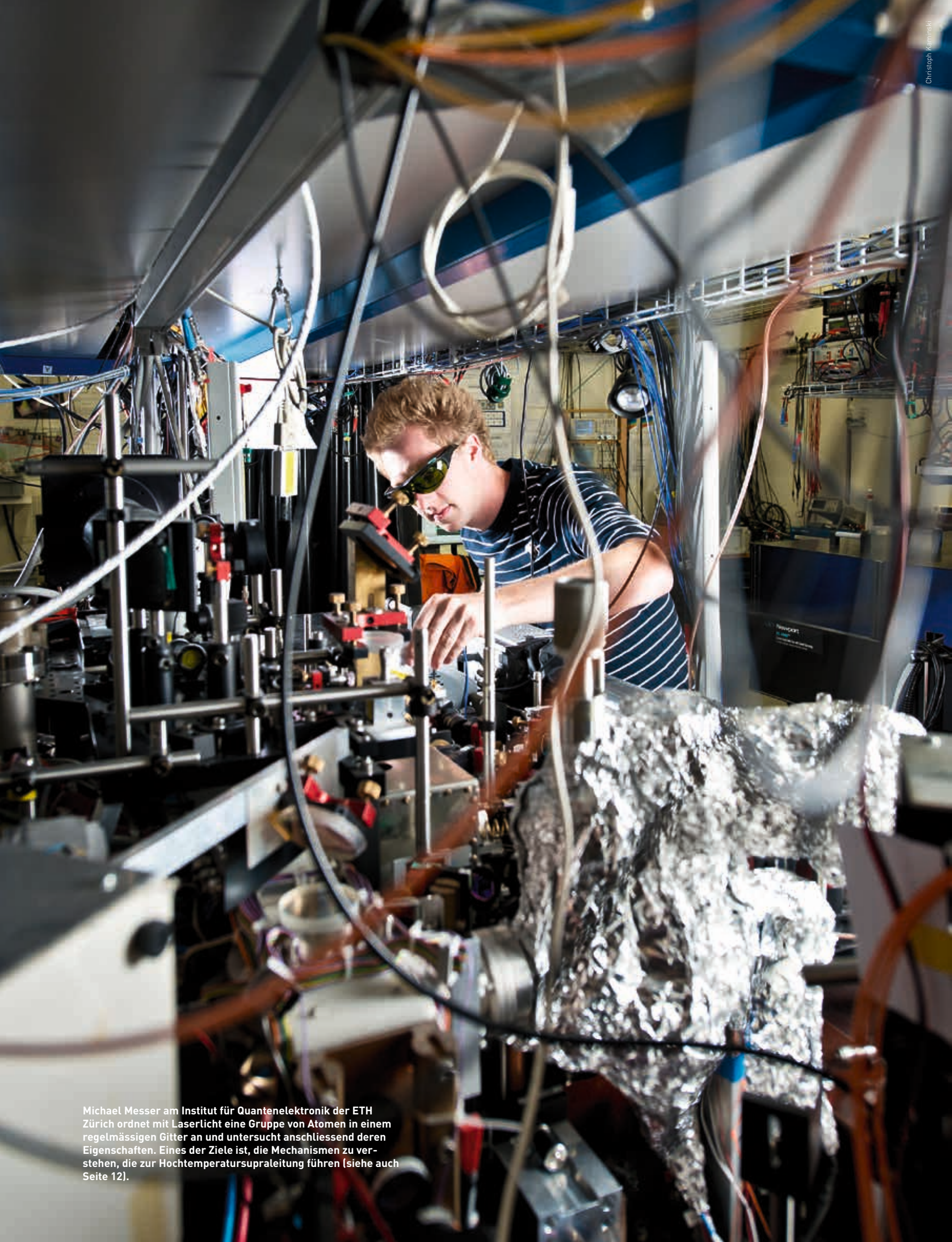
Jetzt auch
auf dem iPad!
siehe Seite 5

Elektrotechnik
Neutronenradiografie
Elektrosmog

Mikrotechnik
Aerogel-Materialien
Ferromagnetismus

Dossier Medizintechnik
Hautkrebs analysieren
Osteotomie

Swiss Engineering
Klausurtagung
Fachgruppe Aerospace



Michael Messer am Institut für Quantenelektronik der ETH Zürich ordnet mit Laserlicht eine Gruppe von Atomen in einem regelmässigen Gitter an und untersucht anschliessend deren Eigenschaften. Eines der Ziele ist, die Mechanismen zu verstehen, die zur Hochtemperatursupraleitung führen (siehe auch Seite 12).

Quantenphysik – wie der Beobachter Teil des Experiments wurde

Als Anfang des letzten Jahrhunderts Physiker begannen, die als sicher geglaubten Grundlagen der klassischen Physik zu untergraben, hatten sie zunächst rein theoretisches Interesse. Sie wollten Erklärungen finden für Phänomene, die damals rätselhaft erschienen: für die Farben glühender Körper, für die Erzeugung einer elektrischen Spannung durch Licht, überhaupt für das Verhalten von Elementarteilchen. Inzwischen hat die damals entstandene Quantenmechanik unzählige praktische Anwendungen. Und neue, ungeahnte Möglichkeiten zeichnen sich am Horizont ab.

Die Lage der Physik erschien am Ende des 19. Jahrhunderts ausgesprochen positiv. Hatte diese Wissenschaft doch Erkenntnisse und Fortschritte hervorgebracht, die sich in beispiellosen technischen Neuerungen niederschlugen. Die Errungenschaft der Elektrizität war nur eine davon, andere waren die Dampfmaschine oder der Telegraf. Flugzeuge gab es noch nicht, aber Eisenbahnen, und die ersten Autos tauchten auf den Strassen auf. Die Natur erschien erklärbar. Ihre Gesetze beruhten nach damaliger Ansicht in erster Linie auf mechanischen Prinzipien. So setzte sich um die Jahrhundertwende in den Köpfen vieler Experten die Vorstellung fest, die Physik sei eine praktisch abgeschlossene Wissenschaft.

Albert Abraham Michelson, der amerikanische Physiker, der später dadurch unsterblich wurde, dass er den Wert der Lichtgeschwindigkeit experimentell bestimmte, schrieb nieder, was viele dachten: «Die wichtigsten Grundgesetze und Grundtatsachen der Physik sind alle schon entdeckt; und diese haben sich bis jetzt so fest bewährt, dass die Möglichkeit, sie wegen neuer Entdeckungen beiseite zu schieben, ausserordentlich fern zu liegen scheint... Unsere künftigen Entdeckungen müssen wir in den sechsten Dezimalstellen suchen.»

Logik wird infrage gestellt

Diese Aussage sollte sich innerhalb weniger Jahre als fundamentale Fehleinschätzung herausstellen. Seit der Kopernikanischen Wende am Beginn der Neuzeit und seit Newtons Mechanik Ende des 17. Jahrhunderts hatte es keine so gewaltigen Umwälzungen in der Betrachtung der Welt mehr gegeben, wie sie durch die Quantenphysik nun auf die Forscher zukamen. Die neuen Erkenntnisse stellten die Gesetze der Logik in der Natur infrage, und sie kippten den Menschen vom so sicher geglaubten Thron des objektiven Beobachters.

Die umstürzlerischen Aktivitäten begannen gleich im ersten Jahr des neuen Dezenniums. Wärme, Elektrizität und Licht galten im ausgehenden 19. Jahrhundert als Phä-

nomene, die durch Schwingungen unterschiedlicher Art verursacht werden. Das Postulat eines Äthers, also eines unsichtbaren Mediums, half dabei, viele Erscheinungen zu verstehen, warf allerdings auch neue Fragen auf. Unter anderem liess sich nicht erklären, warum ein Körper beim Erhitzen erst rot, dann gelb, dann weiss glüht. Nach der Wellentheorie des Lichts müsste jeder heisse Körper nicht sichtbare Farben, sondern ultraviolette Strahlung oder Röntgenstrahlung aussenden. Max Planck, seit 1889 Professor für Physik in Berlin, fand eine mathematische Lösung für das Problem, indem er annahm, dass die Atome des glühenden Körpers Licht nicht kontinuierlich, sondern in Form kleiner Energiepakete ausstrahlen, die er Quanten nannte. Die Energie eines Quants sollte mit der Frequenz des Lichts zunehmen, weisse Quanten sollten also energiereicher sein als gelbe oder rote. Planck veröffentlichte diese Theorie am 14. Dezember 1900. Sie erklärte die beobachteten Phänomene perfekt, aber ihre wirkliche Bedeutung lag zu diesem Zeitpunkt noch im Dunkeln. Knapp 20 Jahre danach sagte Planck in seinem Vortrag anlässlich der Verleihung des Nobelpreises, seine Formel sei nur eine «glücklich erratene Interpolationsformel» gewesen, deren physikalischen Sinn er erst später erkannt habe. Albert Einstein zeigte später zwingend, dass diese Vorstellung, die vielen absurd erschien, die Natur erklären konnte. Er baute auf diesem Postulat viele wichtige Arbeiten auf.

Das Doppelspalt-Experiment

Neben den glühenden Körpern gab es noch weitere Experimente, die mit den damals bekannten Mitteln nicht zu erklären waren, etwa der Versuch mit dem Doppelspalt. Seine Ergebnisse sind immer wieder verblüffend, und ihre Analyse gab den Forschern lange Zeit Rätsel auf. Anfangs dachten sich Wissenschaftler das Ganze als Gedankenexperiment aus und spielten in Gesprächen und Diskussionen durch, was passieren würde, wenn... Nach und nach, mit zunehmender Verfeinerung der experimentellen

Methoden, konnte das Experiment aber auch in der Realität ausgeführt werden, und es bestätigte die geheimnisvollen Vorhersagen. Die Grundanordnung besteht aus einer Wand mit zwei Löchern (oder schmalen Schlitzten), hinter der in einigem Abstand eine zweite Wand steht, die mit Detektoren ausgerüstet ist. Woraus diese im Einzelnen bestehen, ist unterschiedlich, je nachdem, welche Objekte beobachtet werden sollen. Die Detektoren haben aber immer die Fähigkeit, das eintreffende Objekt und seinen Einschlagpunkt zu registrieren. Vor der Wand mit den beiden Löchern befindet sich die Quelle. Sie sendet die Objekte aus, die man beobachten will. Mit dieser Anordnung möchte man experimentell die Antwort auf die Frage finden: «Wie gross ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Objekt, das durch eines der Löcher in der Wand hindurchfliegt, in einem bestimmten Abstand vom Mittelpunkt der Auffangwand ankommt?» Es leuchtet unmittelbar ein, dass man nur über die Wahrscheinlichkeit sprechen kann, denn der genaue Auftreffpunkt eines einzelnen Objekts lässt sich nicht vorhersagen (siehe Kasten übernächste Seite). Führt man das Doppelspalt-Experiment einmal mit Kugeln und einmal mit Wasserwellen durch, ergeben sich fundamentale Unterschiede bei der Verteilung der Objekte auf dem Schirm. Damit zeigt dieses weltberühmte Experiment, wo der entscheidende Unterschied zwischen Teilchen und Welle verborgen ist: Teilchen können nur in Form von «Paketen» registriert werden, Wellen können interferieren, also sich gegenseitig verstärken und auslöschen.

Was passiert, wenn man genau hinschaut?

Um festzustellen, ob beispielsweise Elektronen Teilchen oder Wellen sind, kann man mit ihnen den Doppelspalt-Versuch machen. Welches Ergebnis ist in diesem Fall zu erwarten? Elektronen sind Teilchen, deshalb spricht viel dafür, dass sie ebenso wie die Gewehrpatronen päckchenweise ankommen, denn ein halbes Elektron ist nicht denkbar. Verschliesst man wieder je

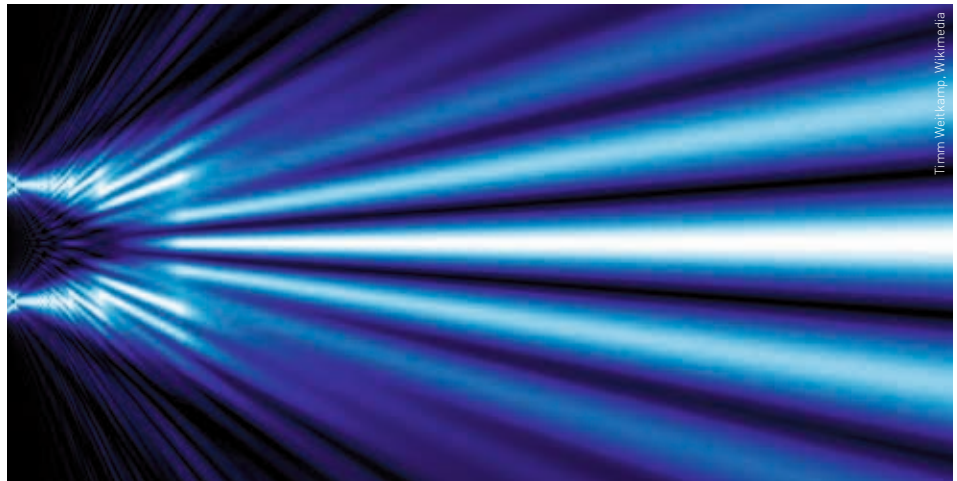
ein Loch und lässt die Elektronen nur durch das jeweils andere fliegen, erhält man eine Verteilung wie bei den Geschwehrgugeln. Lässt man aber beide Löcher offen, so erhält man – und dies ist wirklich erstaunlich – keineswegs die gleiche Verteilung wie bei den Geschwehrgugeln, sondern eine Interferenzkurve, wie sie sich bei den Wasserwellen eingestellt hat. Wie kann mit Teilchen eine solche Interferenz entstehen?

Richard Feynman, Nobelpreisträger und einer der berühmtesten theoretischen Physiker des 20. Jahrhunderts, hat in seinen Vorlesungen auch dieses Problem behandelt. In der ihm eigenen, unterhaltsam-didaktischen Art schreibt er: «Es ist alles recht mysteriös. Und je mehr man es sich anschaut, umso mysteriöser erscheint es. Viele Theorien sind ausgetüfelt worden, um zu versuchen, durch einzelne Elektronen, die auf komplizierten Wegen durch die Löcher laufen, die Kurve zu erklären. Keine von ihnen hatte Erfolg. Wir schliessen daraus Folgendes: Die Elektronen kommen als Klumpen an wie Teilchen, und die Ankunfts-wahrscheinlichkeit dieser Klumpen ist verteilt wie die Intensität einer Welle. Es ist in diesem Sinn zu verstehen, dass sich ein Elektron manchmal wie ein Teilchen und manchmal wie eine Welle verhält.»

Eigentlich ist es ganz einfach, würde man glauben: Jedes Elektron fliegt entweder durch Loch 1 oder 2. Und je nachdem, durch welches Loch es geflogen ist, trifft es an der entsprechenden Stelle auf. Mit einigem Geschick müsste man doch in der Lage sein, die Elektronen dabei zu beobachten. So könnte man das Geheimnis lüften. Damit man die Elektronen auf ihrem Flug sieht, muss man sie beleuchten. Man stellt also eine Lichtquelle kurz hinter die Wand mit dem Doppelspalt, und wenn ein Elektron daran vorbeifliegt, wird es durch das Licht beleuchtet und man kann es sehen. Man kann also bei jedem Elektron erkennen, ob es durch Loch 1 oder Loch 2 geflogen kommt. Nun aber die Überraschung: Wenn man dieses Experiment macht, erscheint auf der Leinwand nicht mehr das Interferenzbild der beiden Wellen wie zuvor, sondern das Bild, das man von den Geschwehrgugeln kennt. Was hat das zu bedeuten? Es heisst nichts anderes, als dass die Elektronen, wenn man sie beobachtet, sich wie Teilchen verhalten. Schaut man während des Fluges aber nicht hin, verhalten sie sich wie eine Welle.

Heisenbergs Unschärferelation

Man kann das Experiment verändern, wie man will, immer kommt man zu dem Ergebnis, dass man das Interferenzbild auf der Leinwand zerstört, wenn man die Elektronen auf ihrem Flug beobachtet. Dies ist nicht ein Mangel des Experiments, sondern es



Die Computersimulation zeigt die Lichtverteilung eines Doppelspalt-Experiments.

ist eine der Grundlagen der Quantenphysik. Der deutsche Physiker Werner Heisenberg hat dies 1927 erkannt und in seiner Unschärferelation so formuliert: «Ort und Impuls eines Teilchens können nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit gemessen werden.» Bestimmt man den Ort genau, weiss man also ganz exakt, wo sich das Teilchen aufhält, dann kann man nicht gleichzeitig seinen Impuls, also seine Geschwindigkeit kennen und umgekehrt. Dabei geht es nicht darum, dass das Messgerät etwa unscharfe Werte ergeben würde, nein, die Messung als solche ist sehr genau. Unschärfe, also ungenau, ist lediglich der jeweils korrespondierende Messwert.

Die Unschärferelation gilt auch für andere Paare von Messgrössen, etwa für die Energie und die Zeit. Als Heisenberg diese Gesetzmässigkeit erkannte, rüttelte er damit an den Grundfesten der Physik. Denn er behauptete mit anderen Worten, dass jede Messung einen Eingriff in das System bedeutet und es dadurch verändert. Dies berührte das Selbstverständnis der Wissenschaftler zutiefst. Hatte man sich doch vorher immer als aussenstehender, objektiver Beobachter gesehen, der die Naturgesetze ergründet, ohne aktiv einzugreifen. Albert Einstein hat sich vehement dagegen gewehrt, die neue Erkenntnis als physikalisches Grundprinzip anzuerkennen: «Gott würfelt nicht», sagte er einmal, und ein andermal: «Raffiniert ist der Herrgott, aber boshaft ist er nicht!» Anscheinend doch, denn bis heute gelang es niemandem, Heisenbergs Gesetz zu entkräften.

Gilt Quantenphysik für Fussbälle?

Wo liegt nun aber die Grenze zwischen klassischer Physik und Quantenphysik? Könnte analog zu einem Elektron am Doppelspalt vielleicht auch ein Fussball am Tor gebeugt werden oder ein Tennisball am Netz? Oder gar ein Auto in der Tiefgarage? Wie gross also darf ein Objekt sein, damit


es noch zur Quantenwelt gehört? Jahrzehntlang drückten sich die Wissenschaftler möglichst schwammig aus und wollten sich nicht festlegen lassen. Bis einige Forscher auf die Idee kamen, man könnte auch diese Frage anhand des Doppelspalt-Experiments klären. Der österreichische Physiker Anton Zeilinger und sein Team an der Universität Wien kamen beispielsweise auf die Idee, den Versuch mit extrem grossen Molekülen auszuführen, mit sogenannten Fullerenen. Dies sind Moleküle, die aus 60 Kohlenstoffatomen bestehen und exakt die Form eines Fussballs haben. Am Ende stand ein Ergebnis, wie es positiver nicht hätte sein können: Die Physiker erzeugten tatsächlich mit den Fullerenen eine Überlagerungskurve, wie man sie von Wellen erwartet hätte. Der Schluss, den man daraus ziehen kann und muss: Auch riesige Moleküle wie Fullerene können sich wie Wellen benehmen.

Wo überhaupt die Grenze liegt zwischen Quantenmechanik und konventioneller Physik, kann selbst ein absoluter Insider wie der letztjährige Nobelpreisträger David Wineland nicht sagen. Beim Festkolloquium zum 60. Geburtstag seines Kollegen Rainer Blatt in Innsbruck meinte er: «Niemand weiss, ob es eine Barriere gibt oder worauf sie beruhen könnte.»

In den Zwanzigerjahren des letzten Jahrhunderts bildete sich allmählich eine Standarderklärung für die Phänomene der Quantenphysik heraus. Physiker sprechen in der Regel von «Zuständen», die sich «überlagern», und beschreiben diese Zustände mathematisch mit sogenannten «Wellenfunktionen», aus denen sich die Wahrscheinlichkeit berechnen lässt, ein Teilchen an einem bestimmten Ort anzutreffen. Insbesondere der österreichische Physiker Erwin Schrödinger hat die Quantenphysik in dieser Form sehr genau ausgearbeitet, zog sich dadurch aber auch den Unwillen Albert Einsteins zu. Die beiden Forscher führten

einen langen Briefwechsel über das Thema, und Einstein brachte eine Menge Einwände gegen Schrödingers Ansichten vor. Er brachte diesen damit aber nicht wirklich in Verlegenheit, sondern er entwickelte ein besonders anschauliches Bild, nämlich das von der Katze, die gleichzeitig tot und lebendig ist. Sie wurde berühmt unter dem Namen «Schrödingers Katze».

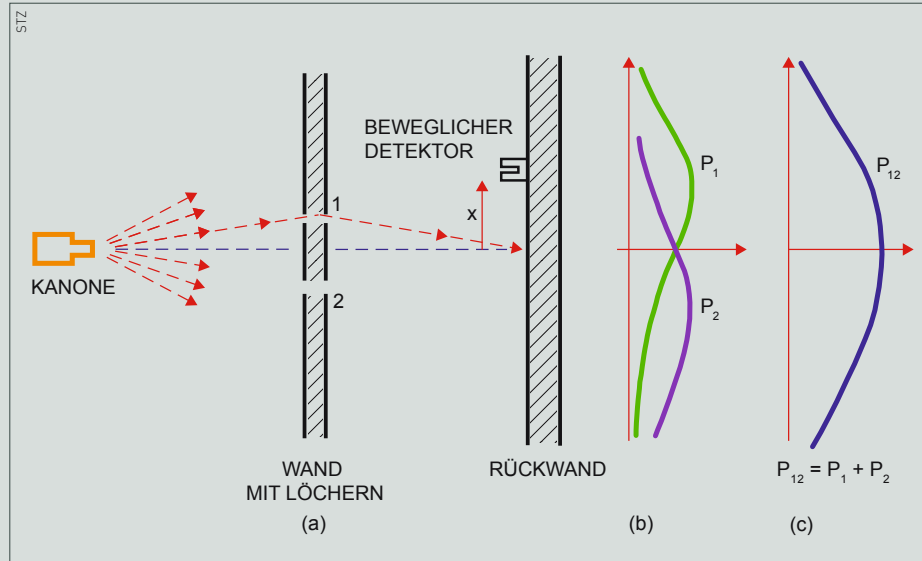
Gleichzeitig tot und lebendig

Es ist wieder ein Gedankenexperiment: Man stelle sich eine Kiste vor, in die man nicht hineinschauen kann und aus der keine Geräusche nach aussen dringen. In dieser Kiste sitzt eine Katze. Neben ihr in der Kiste steht ein physikalischer Apparat, der ihren sicheren Tod bedeutet: Ein radioaktives Präparat wird irgendwann den Zerfall eines Atoms erleben, man weiss nur nicht, wann genau. Wenn das Atom zerfällt, wird es über einen Geigerzähler einen elektrischen Impuls auslösen, der einen Hammer auf ein Fläschchen mit Gift fallen lässt. Der Hammer zertrümmert das Fläschchen, das Gift tritt aus und verdampft, die Katze atmet es ein und stirbt sofort daran. Nichts von alledem ist von aussen zu sehen, zu hören oder zu fühlen. Selbst der aufmerksamste Beobachter wird also nicht feststellen können, ob der radioaktive Zerfall im Inneren der Kiste schon stattgefunden hat oder noch zu erwarten ist. Denn radioaktive Elemente besitzen die Eigenschaft, dass ihre Atome nicht zu einem bestimmten Zeitpunkt zerfallen, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb einer bestimmten Zeitspanne. Was bedeutet dies für die Katze in der Kiste? Während der Zeit, in der der Zerfall wahrscheinlich eintreten wird, kann kein äusserer Beobachter sagen, ob sie noch lebt oder schon tot ist, denn niemand weiss, wann genau das radioaktive Atom zerfällt. Logisch betrachtet, ist die Katze also gleichzeitig lebendig und tot oder keines von beiden. Sie befindet sich in einem Mischzustand zwischen Leben und Tod. Selbstverständlich kann man aber zu jedem Zeitpunkt feststellen, ob die Katze noch lebt oder schon tot ist, indem man die Kiste öffnet und hineinschaut. Dieser Vorgang entspricht in der Physik dem Vorgang der Messung. Die Parallele zwischen dem Doppelspalt-Experiment und Schrödingers Katze liegt auf der Hand: In beiden Fällen weiss man nicht, was los ist, ausser man macht eine Messung. Auf diese Weise ist der Beobachter, der die Messung macht, auf sehr intime Art mit dem Experiment verknüpft – man könnte sagen, er ist ein unverzichtbarer Teil des Experiments. 

Brigitte Röthlein, freie Wissenschaftsjournalistin
www.roethlein-muenchen.de

Das Doppelspalt-Experiment

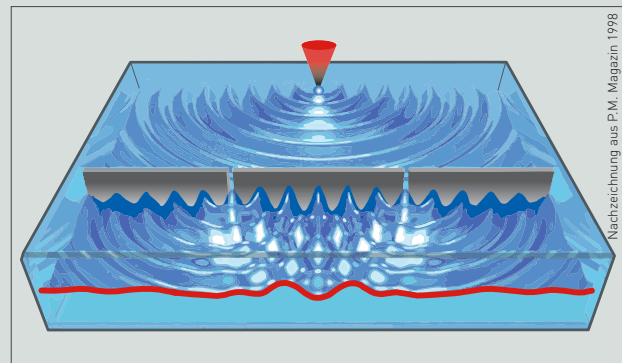
Geht man davon aus, dass die Objekte Geschosse sind, also relativ grosse Geschosse, fliegen manche dieser Kugeln durch Loch 1, andere durch Loch 2. Viele werden von den Rändern der beiden Löcher abgelenkt. Dies hat zur Folge, dass die auf der hinteren Wand auftreffenden Kugeln über die ganze Fläche verteilt sind.



Das Ergebnis der Messungen mit vielen Kugeln ergibt die im Bild gezeigte Kurve (P₁₂). Es liegt auf der Hand, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kugel weit aussen auftrifft, immer geringer wird, je weiter der Punkt von der Mitte des Auffangschirms entfernt ist. Aber längst nicht so einleuchtend ist die Tatsache, dass das Maximum der Wahrscheinlichkeit genau im Zentrum des Auffangschirms liegt. Diesen Tatbestand kann man aber verstehen, wenn man das Experiment zweimal wiederholt und dabei einmal das Loch 1 und einmal das Loch 2 abdeckt. Wenn Loch 1 abgedeckt ist, können alle Kugeln nur durch Loch 2 fliegen, und man erhält die Kurve, die im Bild mit P₂ bezeichnet ist. Deckt man Loch 2 ab, entsteht die Verteilung P₁. Addiert man nun diese beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungen, so erhält man die Kurve P₁₂, die im ursprünglichen Experiment ermittelt wurde, als beide Löcher gleichzeitig offen waren.

Das Experiment soll nun im zweiten Durchlauf nicht mit Geschossen, sondern mit Wasserwellen wiederholt werden. Man stellt also die zwei Wände ins Wasser und platziert vor der Wand mit den zwei Löchern einen Wellengenerator. Analog zur vorherigen Anordnung stellt man nun die Frage, wie hoch die Intensität der auftreffenden Welle ist. Als Erstes findet man, dass die Intensität der gemessenen

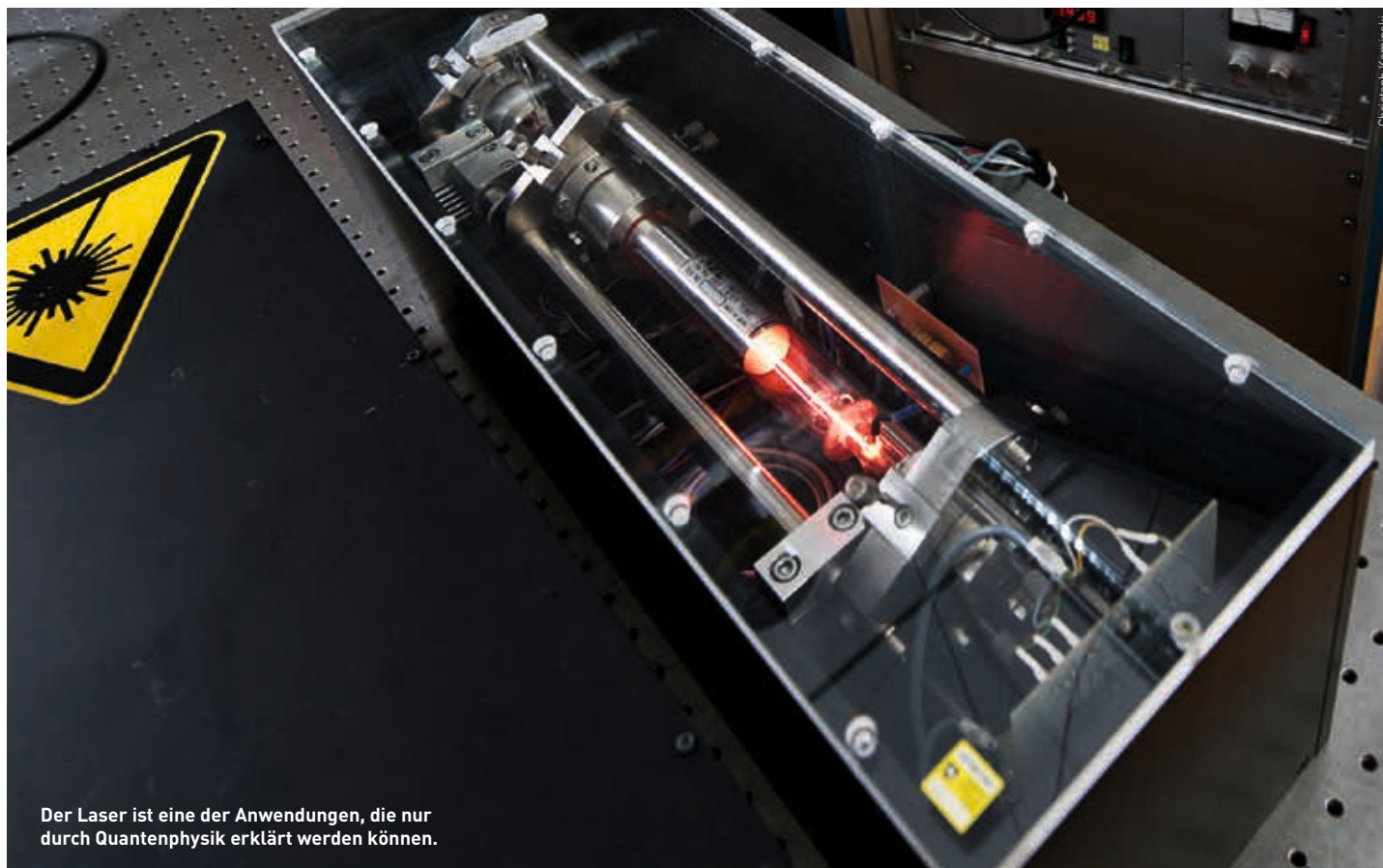
Wellen jede beliebige Grösse haben kann. Dies ist ein wichtiger Unterschied zum ersten Experiment, wo die Kugeln nur ganz oder gar nicht, also sozusagen in Form von Paketen oder Klumpen, auftreffen konnten. Als Intensitätskurve auf der Auftreffwand ergibt sich die exotisch wirkende rote Kurve, die in der Abbildung gezeigt ist. Wie ist sie entstanden? Um dies zu ermitteln, deckt man nun



wieder je ein Loch ab. Es zeigt sich, dass an jedem der beiden Löcher eine kreisförmige Welle erzeugt wird. Jede einzelne dieser beiden Wellen erzeugt eine Intensitätsverteilung, die genau der entspricht, die bei den Geschossen auftrat, wenn man je ein Loch abdeckte. Verblüffend ist jedoch, dass die Überlagerung der beiden Wasserwellen ein völlig anderes Muster erzeugt. Der Unterschied beruht darauf, dass es sich bei den Geschossen um eine schlichte Häufigkeit, beim Wasser aber um eine Welle handelt. Häufigkeiten werden einfach addiert. Wellen aber können sich gegenseitig auslöschen oder verstärken; man nennt dieses Phänomen Interferenz.

Anwendungen der Quantenphysik

In der modernen Technik gibt es viele Dinge, die auf Quantenphänomenen beruhen. Hier stellen wir einige Anwendungen vor, die zu unserem Alltagsleben gehören, aber bei genauem Hinsehen ohne Quantenphysik nicht zu erklären sind.



Der Laser ist eine der Anwendungen, die nur durch Quantenphysik erklärt werden können.

Obwohl Albert Einstein aufgrund seiner theoretischen Überlegungen schon 1914 vorhergesagt hatte, dass es einen Laserstrahl geben müsse, gelang es Forschern erst 1960, dieses Prinzip in ein Gerät umzusetzen. Es ist wohl die bedeutendste Entwicklung, die unmittelbar auf der Quantenphysik beruht. Das Wort ist Programm: Laser. Es hat sich inzwischen auch im Deutschen so eingebürgert, dass kaum jemand noch daran denkt, dass es sich dabei um eine englische Abkürzung handelt. «Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation» ist der volle Name, und das heisst auf Deutsch: «Lichtverstärkung durch angeregte Strahlungsaussendung». Bei allen Lasern kommt der Strahl auf die gleiche Art zustande: Man benutzt ein Medium, das man mit Energie vollpumpt. Anschliessend bringt man dieses Medium dazu, die gespeicherte Energie in Form von Licht wieder abzugeben. Dieses wird dann in einem sogenannten Resonator mittels Spiegeln zu einem Strahl

gebündelt. Das Medium kann ein Gas, eine Flüssigkeit oder ein Feststoff sein, und meist ist der Lasertyp auch nach seinem Medium benannt. Ein Lichtquant oder Photon kommt im Allgemeinen dadurch zustande, dass ein Atom oder Molekül von einem «angeregten» Zustand, in dem es viel Energie enthält, in einen energieärmeren Zustand «fällt». Die Energiedifferenz zwischen den beiden Niveaus ist dann die Energie der Welle oder des Quants. Alles in der Natur versucht, den niedrigsten Energiezustand einzunehmen, der möglich ist. Wenn ein Atom in einen angeregten Zustand gerät, egal aus welchem Grund, ist es bestrebt, unter Aussendung eines Lichtquants wieder in den Grundzustand zurückzufallen. Das geschieht nach einer zufälligen Zeitspanne, deren Mittelwert man aus Messungen kennt. Meist liegt er bei Bruchteilen einer Sekunde. Da der Vorgang des Zurückfallens zeitlich nicht vorhersehbar ist, spricht man von «spontaner Emission». Beim Laser

kommt noch ein weiteres Phänomen hinzu: Man kann das Zurückfallen in den niedrigeren Energiezustand auch künstlich auslösen, indem man ein Lichtquant der gleichen Energie auf das Teilchen treffen lässt. Dieser Anstoss genügt, um das Atom oder Molekül zur Aussendung eines eigenen Photons anzuregen, zu «stimulieren». Der Vorgang heisst aus diesem Grund «stimulierte Emission» – der Ausdruck, der in den Namen des Lasers eingegangen ist.

Atomuhren

Ohne Quantenphysik würde die moderne Welt auch nicht über die hochgenaue Zeitmessung verfügen, die es beispielsweise ermöglicht, Navigation über Satelliten durchzuführen. Für eine derartig exakte Zeitbestimmung sind Atomuhren notwendig, die ebenfalls auf einem quantenmechanischen Effekt beruhen. Die heute vielfach gebräuchlichen Cäsium-Atomuhren bestehen aus einem winzigen Ofen, in dem Cäsi-



Die Kernspintomografie (MRI) nutzt gezielt Quanteneffekte.

ummetall verdampft wird. So erzeugt man einen Strom aus geladenen Cäsiumatomen, der durch ein luftleer gepumptes Rohr läuft. Ein Magnet an dessen Ende lenkt nur Cäsiumionen mit einem ganz bestimmten Energiezustand in den sogenannten Resonator. In ihm werden sie mit Mikrowellen mit einer Frequenz von 9,19263177 GHz bestrahlt. Sie können genau diese Frequenz absorbieren, also Quanten der Strahlung aufnehmen, und werden dadurch angeregt. Nun lenkt ein zweiter Magnet die Ionen in einen Detektor. Wenn dort weniger Ionen eintreffen, wird ein elektronischer Regelkreis aktiv, der die Frequenz der Mikrowelle nachregelt, bis im Detektor wieder die maximale Anzahl an Ionen eintreffen. Auf diese extrem genaue Art und Weise wird die Frequenz gleich gehalten und betreibt dann eine Uhr.

Supraleiter

Der niederländische Physiker Heike Kamerlingh-Onnes entdeckte im Jahr 1911 ein seltsames Phänomen, das er nicht erklären konnte: Wenn er Quecksilber auf weniger als -269°C abkühlte, verlor es seinen elektrischen Widerstand und leitete Strom ohne Verluste. Onnes erhielt 1913 den Nobelpreis, allerdings nicht für diese Entdeckung, die Supraleitung genannt wurde. Nach und nach stellte man fest, dass etwa ein Dutzend Elemente und weit über 100 Legierungen ähnliches Verhalten zeigten. Immer aber lag die sogenannte Sprungtemperatur, unterhalb derer sich Supraleitung einstellte, nur wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt, der bei -273°C angegeben und bezeichnet den Punkt, an dem jede thermische Bewegung der Atome und Moleküle zum Erliegen gekommen ist. Die drei Forscher John Bardeen, Leon Cooper und Robert Schrieffer schlugen Ende der Sechzigerjahre eine quantenmechanische Theorie vor, die das Entstehen des merkwürdigen Verhaltens erklären sollte, die nach den Anfangsbuchstaben der Physi-


ker BCS-Theorie genannt und 1972 mit dem Nobelpreis belohnt wurde. Da die Temperaturen für die Supraleitung so extrem tief lagen, musste man flüssiges Helium benutzen, um die Materialien zu kühlen. Der grosse Aufwand rechtfertigte nur die wenigsten praktischen Anwendungen, etwa supraleitende Spulen für Beschleunigerexperimente, Fusionsanlagen oder Kernspintomografen. Das Thema Supraleitung schien damit ausgereizt und geklärt.

Hochtemperatursupraleitung

Gross war deshalb die Aufregung, als im März 1987 auf einer Tagung der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft in New York der Schweizer K. Alexander Müller und der Deutsche J. Georg Bednarz die Entdeckung eines Materials bekannt gaben, das bereits bei der relativ hohen Temperatur von 35 Kelvin supraleitend wurde. Es handelte sich um die keramische Substanz Lanthan-Barium-Kupferoxid, die ein kompliziert aufgebautes Kristallgitter besitzt und zur Familie der sogenannten Cuprate gehört. Für diese Entdeckung erhielten die beiden im darauffolgenden Jahr den Nobelpreis. Der physikalische Mechanismus, der hinter dem merkwürdigen Phänomen der Supraleitung steckt, konnte bis heute nicht restlos aufgeklärt werden. Bardeen, Cooper und Schrieffer hatten in ihrer BCS-Theorie postuliert, dass die Elektronen in einem Supraleiter sogenannte Cooper-Paare bilden, die im Gegensatz zu einzelnen Elektronen nicht mit ihresgleichen zusammenstossen können und auch nicht an den Störstellen des leitenden Kristalls gestreut werden. Darum treffen sie bei ihrer Fortbewegung auf keinerlei Widerstand. Dass sich Elektronen, die ja bekanntlich eine negative Ladung tragen, überhaupt zu Paaren zusammenschliessen können, ohne sich abzustossen, beruht auf einem quantenmechanischen Effekt, der nur in Festkörpern, genauer gesagt in Kristallen auftritt. Die BCS-Theorie konnte die Supra-

leitung in Metallen gut erklären. Sie versagte aber weitgehend bei der Deutung der neu entdeckten Hochtemperatur-Supraleitung. Deshalb wurden seither die unterschiedlichsten Theorien dafür vorgeschlagen. Durchsetzen konnte sich bisher keine mit letzter Sicherheit.

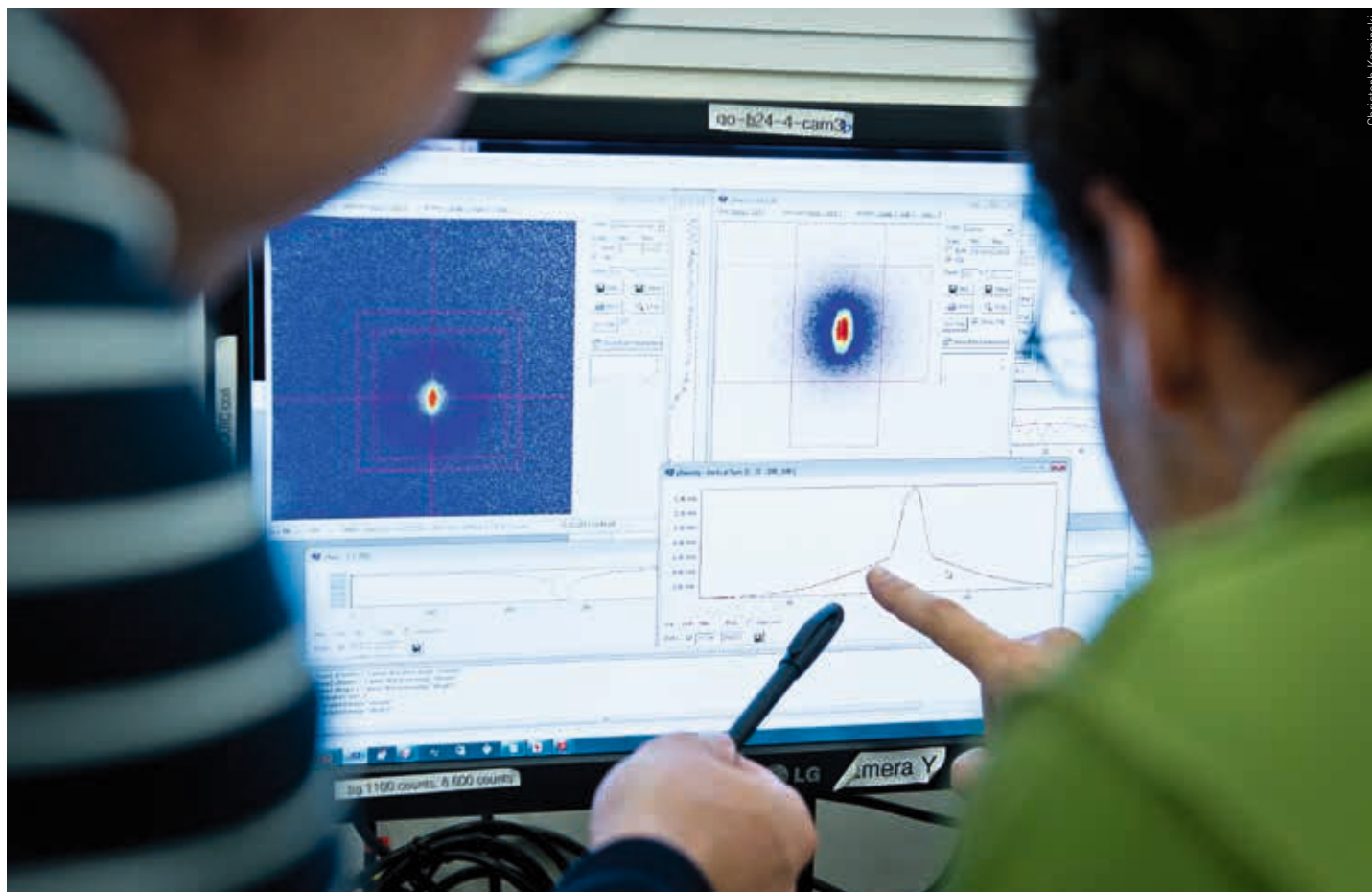
Quantenphysik in der Medizintechnik

Die Kernspintomografie (MRI) ist heute eine Standardmethode der medizinischen Diagnostik. Sie beruht in mindestens zweifacher Hinsicht auf der Quantenmechanik: Einerseits durch die supraleitenden Spulen, die zur Erzeugung der extrem starken Magnetfelder benötigt werden, und andererseits durch die Vorgänge im Inneren des Patienten, die durch das Verfahren abgebildet werden. Bei der Kernspintomografie wird der Patient sozusagen magnetisch durchleuchtet. Dabei nutzt man die Tatsache, dass einige Atome, etwa die des Wasserstoffs, magnetische Eigenschaften besitzen. Man legt den Patienten in ein starkes Magnetfeld. Die Wasserstoffatome im Körper des Probanden richten sich nach diesem Feld aus. Das allein genügt aber noch nicht, um ein Bild zu erhalten. Dazu müssen erst die Atome, die im Magnetfeld ausgerichtet sind, einen «Schubs» bekommen. Dies besorgt ein Radiowellenimpuls, der die Wasserstoffatomkerne auf ein angeregtes Energieniveau hebt. Nun befinden sich die Atome gegenüber dem Magnetfeld nicht mehr in Ruhelage, sondern sie kreiseln um die Feldlinien, bis sie die zusätzliche Energie durch Abstrahlung eines Energiequants – in diesem Fall ein Radiowellenquant – wieder abgegeben haben. Dies geschieht nach den Gesetzen der Quantenmechanik zu keinem genau vorhersagbaren Zeitpunkt, durchschnittlich jedoch ungefähr innerhalb der darauffolgenden Sekunde. Hochempfindliche Messgeräte registrieren die abgestrahlten Energiequants und geben sie an einen Computer weiter. Aus Zigtausenden von Werten konstruiert nun der Rechner ein Bild. Es zeigt nicht nur die Organe, sondern auch krankhafte Veränderungen im Gewebe. Ein Tumor hebt sich beispielsweise gut sichtbar vom umgebenden Hirngewebe ab. Aber das Verfahren kann noch mehr: Wie schnell nämlich die angeregten Atome ihre aufgenommene Energie wieder abstrahlen, hängt von ihrer Umgebung ab. Ein Wasserstoffatom, das ganz fest im Gewebe gebunden ist, braucht zum Beispiel länger als eines, das relativ locker gebunden ist. Die Dauer dieser sogenannten Abklingzeit gibt also einen Hinweis darauf, welche Art von Gewebe betrachtet wird. 

Brigitte Röthlein, freie Wissenschaftsjournalistin
www.roethlein-muenchen.de

Moderne Quantenforschung

In ihrem Bemühen, einen Quantencomputer zu bauen, haben Wissenschaftler in den letzten Jahren das ganze Forschungsgebiet verändert. Auch wenn seine Realisierung noch in weiter Ferne liegt, entstanden auf dem Weg dorthin aufregende neue Entwicklungen.



Christoph Kaminski

Daniel Greif und Michael Messer diskutieren das Ergebnis eines Versuchs im Labor für Quantenoptik unter Prof. Tilman Esslinger. Zuerst erzeugen sie ein Bose-Einstein-Kondensat von ultrakalten Rubidium Atomen: Mit Laserlicht bremsen sie die Atome so stark ab, dass sie praktisch stillstehen. Anschliessend werden Kalium Atome in einem Lichtgitter regelmässig angeordnet, wobei die Abstände und damit die Eigenschaften des atomaren Gitters verändert werden können. Nun können Mechanismen beobachtet werden, wie sie bei der Hochtemperatursupraleitung eine Rolle spielen.

Auch wenn Quantenphänomene in vielen technischen Anwendungen eine Rolle spielen, so behielt dieses Gebiet der Physik dennoch immer den Anschein des Geheimnisvollen, Unerklärlichen. Bewirkt wurde dies vor allem durch experimentelle Befunde, die sich nicht wegdiskutieren lassen: Teilchen, die sich in Wellen verwandeln und umgekehrt; Partikel, die sich per Telepathie verständigen; Katzen, die gleichzeitig tot und lebendig sind; oder Entscheidungen, die man nachträglich noch ändern kann. Seit den Neunzigerjahren hat sich das Bild grundlegend geändert: Nun hat eine neue Generation von Physikern den Mut gefunden, die skurrilen Gesetze des Allerkleinsten zu akzeptieren und für ihre

Zwecke einzusetzen. «Die Einflüsse der Quantenmechanik sehen auf den ersten Blick so aus, als ob es Störungen wären, aber es sind in Wirklichkeit grundlegende Effekte», betont Gerhard Rempe vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching. Das Entscheidende dabei ist: Die physikalischen Gesetzmässigkeiten, die man im ersten Drittel des letzten Jahrhunderts entdeckte, haben sich nicht geändert, nur der Umgang mit ihnen.

Sichere Verschlüsselung

So gelang es Forschern in den letzten 15 Jahren beispielsweise, mithilfe der Quantenmechanik neue Verfahren zum Verschlüsseln von Nachrichten zu entwickeln.

Sie sind mittlerweile auf dem Weg in die praktische Anwendung. Was jedoch bisher nicht in überzeugender Weise gelang, ist der Bau eines Quantencomputers. Das Konzept wurde zum ersten Mal 1981 rein theoretisch vom US-Nobelpreisträger Richard Feynman ins Gespräch gebracht. Information ist bekanntlich aus Bits zusammengesetzt, mit denen herkömmliche Computer rechnen. Dort kann ein Bit den Wert 0 oder 1 haben, und es wird repräsentiert durch den Ladungszustand eines Schaltelements. Ähnliche Strukturen findet man in der Quantenmechanik, dort gibt es «Zustände», die 0 oder 1 entsprechen, etwa der Anregungszustand eines Atoms oder die Richtung eines kreiselnden Teilchens, Spin genannt. So liegt

es nahe, diese Ähnlichkeit auszunutzen, um einen Computer zu bauen. Ein angeregtes Atom könnte beispielsweise einer 1 entsprechen, eines im Grundzustand einer 0. Oder Spin nach oben hiesse 1, Spin nach unten 0. Für die Bits der Quantenwelt hat sich auch schon ein Name eingebürgert: «Qubit». Quantenmechanische Objekte haben jedoch eine Eigenschaft, die wir aus unserem Alltagsleben nicht kennen: Sie befinden sich nicht in einem eindeutigen Zustand, sondern immer in einer Überlagerung aller möglichen Zustände gleichzeitig. So kann also ein Qubit gleichzeitig 0 und 1 sein. Betrachtet man zwei Qubits, so können sie die vier Zustände 00, 01, 10 und 11 annehmen, und zwar alle gleichzeitig. Die Zahl der möglichen Kombinationen steigt schnell an; 32 Qubits ergeben schon vier Milliarden. Im Quantencomputer will man sich diese Vielfalt zunutze machen: Jede Rechenoperation, die man durchführt, würde ja dann in allen Zuständen gleichzeitig ablaufen. Mit zwei Qubits berechnet man automatisch vier Werte gleichzeitig, mit 32 Qubits vier Milliarden Werte. So hätte man einen höchst potenten Parallelrechner, den man beispielsweise für aufwendige Simulationen von Turbulenzen in Flüssigkeiten oder von Klimaphänomenen einsetzen könnte. Tatsächlich gelang es 1995 zwei Wissenschaftlern in den USA, winzige Prototypen zu bauen. Seit dieser Zeit gibt es immer neue Vorschläge zur Realisierung eines Quantenrechners, einige wurden auch schon praktisch erprobt, wenn auch nur in experimentellem Massstab mit grossem Aufwand. Eine wirkliche technische Umsetzung liegt aber noch in weiter Ferne.

Verschränkung und Teleportation

Obwohl es so klingen mag, ist dies keine schlechte Nachricht. Denn die Suche nach Verfahren und physikalischen Prinzipien, die einen Quantencomputer ermöglichen, hat das Gebiet so stark befruchtet wie kaum eine andere Idee. «Die Quantenphysik ist das Gebiet der Physik, das zurzeit am schnellsten wächst», sagt Tilmann Märk, Rektor der Universität Innsbruck. Die jahrelange Kleinarbeit hat reiche Früchte getragen: Inzwischen beherrschen Quantenoptiker die Manipulation einzelner Atome, die sie in Fallen einsperren, ziemlich perfekt, andere arbeiten an quantenphysikalischen Effekten in Festkörpern, und alle zusammen versuchen, das geheimnisvolle Phänomen der Teleportation für ihre Zwecke zu nutzen. «Dies ist eine wichtige Zukunftstechnologie auf dem Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung», sagt Andreas Wallraff, Professor am Laboratorium für Festkörperphysik der ETH Zürich und Leiter eines Experiments, bei dem die Teleportation von

Informationen auf einem Chip nachgewiesen wurde. «Damit lässt sich beispielsweise Information auf einem Quantenchip oder in einem zukünftigen Quantenprozessor von einem Punkt zu einem anderen transportieren. Gegenüber den heutigen Technologien, die auf der klassischen Physik beruhen, hat quantenphysikalische Information den Vorteil, dass die Informationsdichte viel höher ist.» Grundlage dafür ist ein Phänomen, das Albert Einstein noch ungläubig als «spukhafte Fernwirkung» bezeichnet hatte und das heute unter dem Namen «Verschränkung» bekannt ist. Zwei Quantenobjekte, die miteinander verschränkt sind, befinden sich immer im gleichen Zustand, egal, wie weit sie voneinander entfernt sind. Ändert sich der Zustand des einen, so ändert sich automatisch auch der des anderen, als ob sie durch eine telepathische Verbindung aneinandergekettet wären.

Einsteins Gedankenspiel im Labor nachvollzogen

Während Einstein die Verschränkung nur als Gedankenexperiment durchspielte, gelang es im Jahr 1982 dem Franzosen Alain Aspect, der heute am Pariser Forschungslaboratorium Charles Fabry arbeitet, die Verschränkung von Lichtteilchen – auch Photonen genannt – in einem Aufbau nachzuweisen, der mittlerweile als Jahrhundertexperiment gilt (siehe Kasten). Viele Forscher weltweit machten seither ähnliche Experimente, und Anton Zeilinger von der Universität Wien nutzte erstmals die Verschränkung von Photonen, um Quantenzustände zu teleportieren. Inzwischen sind Verschränkung und Teleportation vom Spuk zu einem regulären Arbeitsmittel der Quantenphysiker geworden. Ignacio Cirac vom MPQ und Peter Zoller vom Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) in Innsbruck dachten sich 1995 aus, wie man eine Verschränkung künstlich herstellen könne. So revolutionär erschienen diese Gedankengänge damals, dass ihre Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift zunächst abgelehnt wurde. Heute ist das Paper eines der meist zitierten auf der Welt: Rund 30 000 Mal haben Wissenschaftler in ihren Publikationen darauf Bezug genommen. Rainer Blatt, ebenfalls am IQOQI, schaffte es dann in siebenjähriger Arbeit, die Idee von Cirac und Zoller auch im Experiment umzusetzen. Mittlerweile gelang es ihm und seinem Team sogar, ganze Atome zu teleportieren. Andere Wissenschaftler wiederum verschränkten erfolgreich viele Teilchen miteinander. All dies sind Grundvoraussetzungen für den Bau eines Quantencomputers. Inzwischen haben Wissenschaftler jedoch erkannt, dass die komplizierten experimentellen Aufbauten, die sie heute realisieren können, auch

noch für etwas anderes taugen, nämlich für die Simulation von Quantensystemen. Dazu zählt beispielsweise das Verhalten von Atomen bei sehr tiefen Temperaturen: Werden sie Elektrizität leiten oder nicht, werden sie Supraleitung zeigen? Hier versagt ein konventioneller Rechner, hier braucht man Quanten, und derartige Versuche machen beispielsweise Daniel Greif und seine Kollegen in der Quantenoptik-Gruppe an der ETH Zürich. Durch die Simulation dieser Vorgänge lassen sich vielleicht Vorhersagen ableiten, etwa darüber, wie man Hochtemperatursupraleitung erzeugen könnte. So ergibt sich ganz zwanglos eine enge Verbindung von der Theorie zu womöglich umwälzenden praktischen Anwendungen – und zwar noch lange, bevor ein technisch nutzbarer Quantencomputer existiert. **G**

Brigitte Röthlein, freie Wissenschaftsjournalistin

Verschränkte Photonen

Alain Aspect benutzte in seinem weltberühmten Experiment das Phänomen der Polarisation, bei dem das Licht in einer ganz bestimmten Ebene senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung schwingt. Vereinfacht gesprochen, erzeugte Aspect gleichzeitig zwei polarisierte Photonen, die in entgegengesetzter Richtung auseinanderflogen. Diese schickte er dann durch je ein Polarisationsfilter und mass auf jeder Seite, ob die Teilchen durchkamen. Ein Photon kann das Filter nur dann durchdringen, wenn es die passende Polarisationsrichtung hat. Aspect fand, dass die beiden gleichzeitig erzeugten und losgeschickten Photonen immer gleich reagierten: Kam das rechte am rechten Filter durch, dann kam auch das linke bei seinem Filter durch und umgekehrt. Dies ist noch nicht allzu erstaunlich, da man davon ausgehen kann, dass die beiden Photonen durch ihre gemeinsame Erzeugung in ihrem Verhalten verbunden sind. Aber er belies es nicht dabei, sondern erweiterte die Versuchsanordnung. Er setzte vor die beiden Polarisationsfilter «Schalter», welche die Polarisationsrichtung des Filters änderten. Sie wurden gesteuert von einem Zufallsgenerator und arbeiteten so schnell, dass sie noch in der Lage waren, umzuschalten, wenn das Photon bereits unterwegs war. Die beiden Photonen wussten also beim Start noch nicht, in welche Richtung das Filter geschaltet war. Das Experiment ergab ein faszinierendes Ergebnis: Die jeweils «zusammengehörigen» Photonen verhielten sich immer gleich, wie Zwillinge. Konnte das eine sein Polarisationsfilter durchdringen, so konnte es auch das andere, wurde das eine zurückgehalten, dann auch das andere. Und das, obwohl die Bedingungen erst eingestellt wurden, nachdem die Photonen schon unterwegs waren.