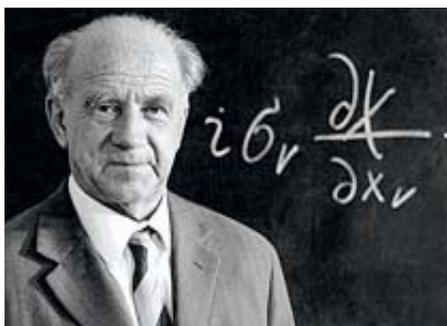


Geballte Intelligenz der Atome

Rasant dringen die Ingenieure in den Mikrokosmos vor. Sie stoßen dabei auf eine Welt, in der es statt Teilchen nur Wolken und statt Gewissheit nur Wahrscheinlichkeiten gibt. Ihr Ziel: Superrechner auf Quantenbasis zu bauen. Wird sich mit ihrer Hilfe klären lassen, was Wirklichkeit ist?



Quantenpionier Heisenberg (um 1970)
„Jetzt weiß ich, wo ich bin“

Ein seltsames Volk war es, das da in der letzten Woche über die deutsche Hauptstadt herfiel. In Horden zogen sie, in Jeans und Sweatshirt gekleidet, über Ku'damm und Gendarmenmarkt und plauderten mit unüberhörbar deutschem Akzent über Dinge wie „magnetic instabilities“, „gravity waves“ und „vortex dynamics“.

Eine Woche lang waren Lichtgitter und Superstrings Thema in Berlins Hotelbars, und in den Frühstücksräumen der Jugendherbergen wurde über Quantenfeldtheorie oder Fermionen-Kondensate gewitzelt. Eine Woche lang hatten schüchterne Di-

* Die Ionen werden mit Laserlicht zur Fluoreszenz angeregt; diese dient dazu, die Ionen sichtbar zu machen.

plomanden Zeit, sich an die Koryphäen ihres Fachs heranzupirschen, in der Hoffnung, vielleicht eine Stelle als Doktorand zu ergattern.

7700 Forscher hatten sich zur Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) versammelt. Nie zuvor trafen sich mehr Physiker auf europäischem Boden. Und wie immer, wenn Wissenschaftler dieses Fachs zusammenkommen, ging es nicht nur um viele experimentelle Details und technische Tipps, es ging auch ums große Ganze: Geredet wurde über den Anfang der Welt und das Wesen der Zeit, über den Aufbau aller Dinge und die Natur der Wirklichkeit.

Eine phantastische Reise ins Innerste der Materie hat die moderne Physik da begonnen. Es ist eine Reise bis in jenes Reich, in dem Elektronen und Protonen einander umschwirren und blitzhafte Photonen entstehen und vergehen – ein Reich, bizarr wie Alices Wunderland, wo der gesunde Menschenverstand außer Kraft gesetzt scheint: willkommen im Land der Quanten.

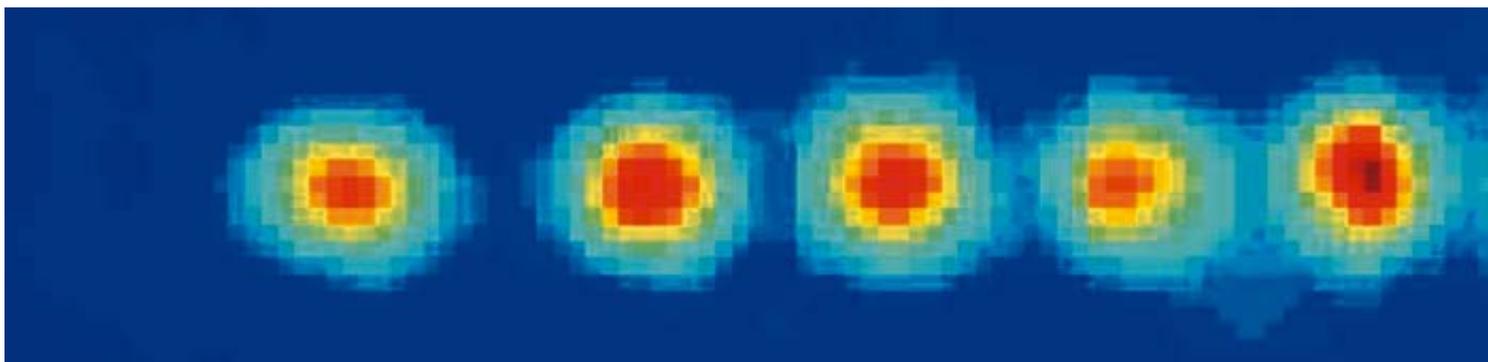
Fast in allen Bereichen, in denen die Physik an die Grenzen des Verstehbaren vordringt, kommt irgendwann die Quantentheorie ins Spiel. Vielen gilt sie – mehr noch als Molekulargenetik, Urknall- und Relativitätstheorie – als tiefgreifendste Revolution des wissenschaftlichen Denkens



Quantenvortrag auf der Berliner DPG-Tagung:

im 20. Jahrhundert. Denn die Väter der Quantenmechanik, die beschreibt, wie sich submikroskopisch Kleines verhält, hatten sich nicht damit begnügt, die physikalischen Gesetze zu formulieren, denen die Atome gehorchen. Gleichsam en passant zertrümmerten sie dabei auch große Teile des philosophischen Fundaments, auf dem der ganze wissenschaftliche Weltklärungversuch beruht.

Nichts scheint mehr gewiss im Reich der Atome, in dem Energie nur in Gestalt kleiner Bündel, der Quanten, auftritt. Alles ist in einen unheimlichen Nebel von Wahrscheinlichkeit getaucht. Eine objektive Wirklichkeit? Den Quantenphilosophen zufolge nur ein Phantom. Solange niemand die Welt betrachte, existiere sie gar nicht in eindeutiger Weise.



Kalzium-Ionen in der Ionenfalle*: Bis auf den absoluten Nullpunkt kühlen die Forscher einzelne Teilchen ab, nanometergenau schubsen sie



Auf der Suche nach dem Computer der Zukunft

Spätestens in 15 Jahren wird der Siliziumchip an seine physikalischen Grenzen stoßen, während der Bedarf an Rechenleistung steigt ...

... für DATENBANKEN

Suchmaschinen, die alles finden

... ZUR EXPLORATION VON ROHSTOFFEN

Aufspüren von Erdölfeldern

... FÜR WETTERVORHERSAGEN

Frühzeitiges Erkennen von Wirbelstürmen

... ZUR SIMULATION

von Klimamodellen oder komplizierten Maschinen

... ZUR OPTIMIERUNG VON ABLÄUFEN

Komplexe Routenplanung etwa bei Speditionen

... FÜR DIE KRYPTOGRAPHIE

Knacken von Codes

Phantastische Reise ins Innerste der Materie, in ein Reich, bizarr wie Alices Wunderland

Generationen von Physikstudenten haben sich mittlerweile das Hirn gemartert, um solchen Aussagen Sinn zu entlocken; die meisten trösten sich am Ende damit, dass die Rätselwelt der Quanten wohl gar nicht so ganz zu begreifen sei. Das Gehirn des Menschen, so ein häufiges Argument, sei von der Evolution schließlich hervorgebracht worden, um sich in der Alltagswelt zurechtzufinden. Zum Verstehen des Mikrokosmos der Photonen und Atome dagegen sei es eben nicht gemacht.

Lange hatte es fast den Anschein, als hätte sich die sonst doch alles hinterfragende Zunft der Physiker mit der Unbegreiflichkeit der Quantenphänomene abgefunden.

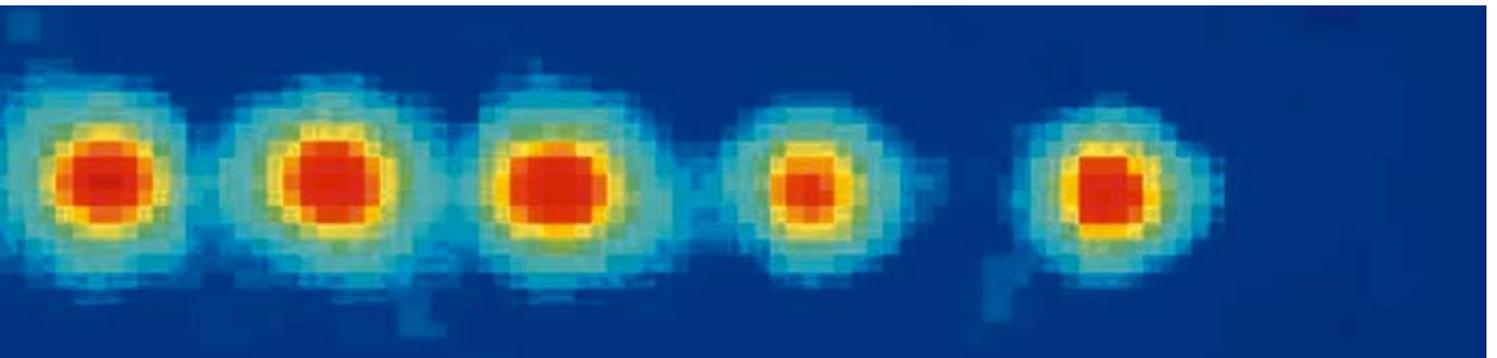
Die Berliner Tagung jedoch offenbarte, wie gründlich sich das in den vergangenen

Jahren geändert hat. Plötzlich sind Quantenrätsel in Physikerkreisen wieder angesagt. Kaum eine Ausgabe der großen Wissenschaftsjournale „Science“ und „Nature“ erscheint, ohne dass darin eine neue Erfolgsmeldung von der Quantenfront verkündet würde. Da berichten die einen, es sei ihnen gelungen, Licht einzufrieren; andere melden Vollzug beim „Beamten“; wieder andere versenden Materie in Gestalt von Laserstrahlen, oder sie verschmelzen Tausende Atome zu einem einzigen Superatom.

Einige Forscher, wie der britische Mathematiker Roger Penrose, glauben gar, auch das menschliche Bewusstsein sei im Kern ein quantenmechanisches Phänomen. Aber selbst wer diese Behauptung als allzu spekulativ verwirft, den lockt doch das

Versprechen, hier die tiefsten Wahrheiten über das Wesen der Natur zu erfahren. „Alle wollen auf einmal wissen, was wir so treiben“, stellt der Wiener Quantenphysiker Anton Zeilinger etwas erstaunt fest (siehe Kasten Seite 180). Seit ihm sein erstes Beam-Experiment gelungen sei, könne er sich vor Vortragsanfragen und Konferenzeinladungen kaum retten.

Es sind dies Konferenzen, auf denen sich die weltweite Gemeinde der Quantenpioniere austauscht über ihre rasanten Fortschritte beim Manipulieren einzelner Atome. Denn dank moderner Laser-, Kernspin-, Tunnelmikroskop- und Tieftemperaturtechnik gelingt es den Physikern, in immer präziserer Weise direkt ins Wechselspiel der Materiebausteine einzugreifen – die Ära der Quanteningenieurere ist an-



diese dann hin und her

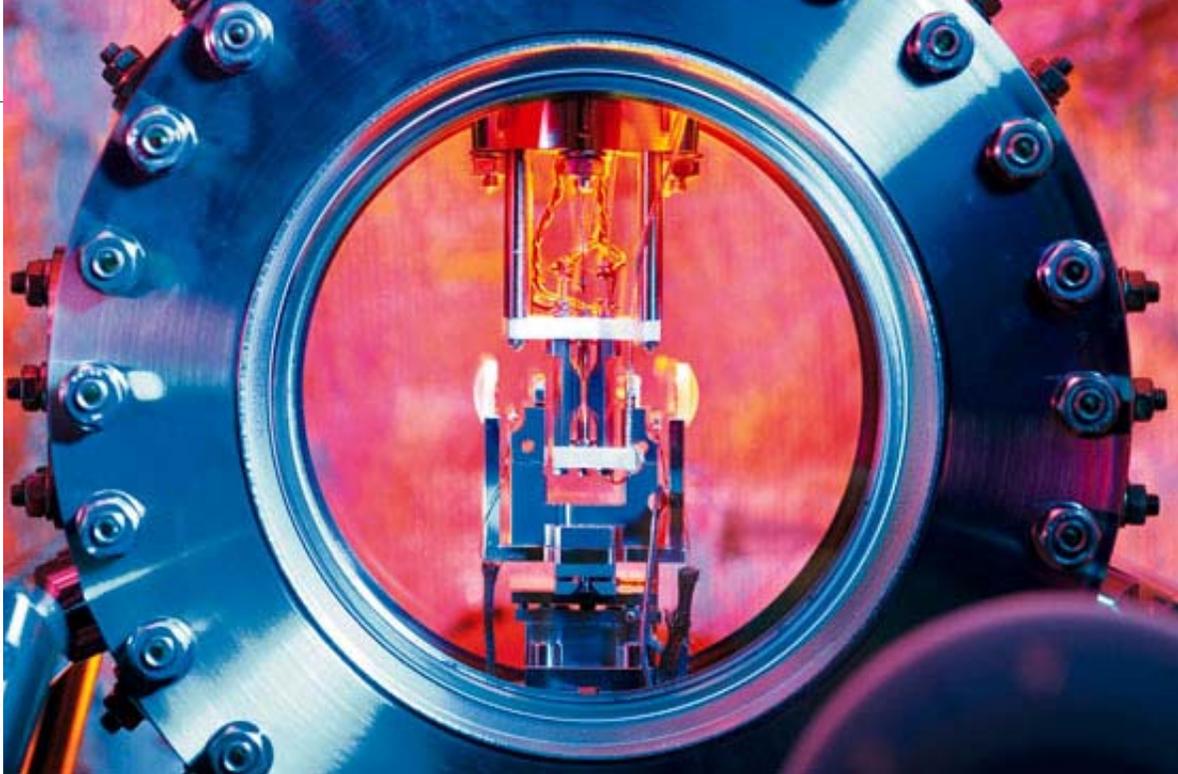
gebrochen. „Wir stehen heute an einem Wendepunkt“, konstatiert der Innsbrucker Physiker Wolfgang Hänsel, „erstmal können wir der Quantenmechanik bei der Arbeit zuschauen.“

Bis auf den absoluten Nullpunkt kühlen die Forscher in elektrischen Käfigen gefangene Ionen ab, nanometergenau schubsen sie diese dann hin und her. Fast nach Belieben können sie einzelne Atome mit Strahlen beschießen und auf diese Weise präparieren. Laserblitze von einigen hundert Attosekunden* Dauer erlauben es ihnen, die Elektronenhülle der Atome abzutasten.

Doch all diese Erfolge sind einstweilen nur Etappen, Durchgangsstationen gleichsam auf dem Weg zum großen Fernziel des Vorstoßes in den Mikrokosmos: dem Bau eines Quantencomputers. Es sind dies zukünftige Rechner ganz eigentümlicher Art, die tollkühne Visionäre bereits zur vielleicht bedeutsamsten Entdeckung der Menschheitsgeschichte hochstilisieren.

Seit Jahrzehnten schon verlangt die Industrie nach immer winzigeren Schaltkreisen, und langsam stößt sie dabei an physikalische Grenzen. Deshalb haben sich nun Forscher in rund hundert Labors weltweit daran gemacht, Computer aus den kleinstmöglichen Bestandteilen zu bauen – sie versuchen, den Atomen, Photonen oder Elektronen das logische Schlussfolgern beizubringen. Und dies, so zeigt sich, ist weit mehr als nur ein weiterer Schritt der Miniaturisierung. Denn nicht nur können Atome

* Eine Attosekunde ist der milliardste Teil einer milliardstel Sekunde; eine Sekunde besteht aus etwa so vielen Attosekunden, wie das Universum insgesamt bisher an Sekunden zählt.



THOMAS PFLAUM / AGON / VISUM

Experimenteller Aufbau einer Ionenfalle: Ein elektrischer Käfig für gefangene Atome

me überhaupt rechnen, sie können es sogar viel besser als Transistoren.

Erste Vorformen der neuartigen Form von Rechenmaschinen existieren bereits. So präsentierte gerade erst in der letzten Woche der Wiener Vordenker Zeilinger einen Prototyp, in dem er vier Lichtteilchen logisch miteinander verkoppelte; die Idee dazu lieferten Innsbrucker Theoretiker. „Dieses Experiment ändert die Weise, wie wir über die Quantenphysik zu denken haben“, verkündet Zeilinger – ein recht großspurig anmutendes Versprechen angesichts der Tatsache, dass sein Computer bisher nicht einmal die Aufgabe 1+1 zu bewältigen vermag.

Doch so bescheiden bisher auch die Leistungen, die Physiker sind elektrisiert. Denn falls es gelingt, auch nur geringfügig komplexere Quantenmaschinen zu bauen, dann könnten diese bald fähig sein, selbst leistungsstärkste Superrechner in den Schatten zu stellen. Den Gleichungen der Quantenmechanik zufolge lässt sich nämlich die Intelligenz einzelner Atome miteinander verkoppeln, und dabei entsteht rasch ein Quantenhirn kaum vorstellbarer Rechenkraft: „Rein theoretisch würden schon 50 Atome ausreichen, um die versammelte Rechenleistung aller existierenden Computer noch zu übertreffen“, erklärt Herbert Walther vom Garchinger Max-Planck-Institut für Quantenoptik – kaum auszudenken, wozu dann erst

1000 verkoppelte Atome fähig wären. „Der Quantencomputer“, so formulierte es der „New York Times“-Autor George Johnson, „verhält sich zum gewöhnlichen PC wie die Kernkraft zum Feuer.“

Noch weiß niemand, wie sehr ein solches Ungetüm die Welt verändern würde. Gut möglich, dass es am Ende doch nur für wenige Nischenanwendungen taugt. Denkbar ist aber auch, dass es die Tür aufstoßen wird zu Welten, die heute so wenig vorstellbar sind, wie es das World Wide Web noch vor 20 Jahren war.

An Quantenhirne und rechnende Atome dachte indes noch niemand, als vor 80 Jahren ein erst 23-jähriger Jungforscher den entscheidenden Gedankenblitz hatte. Vom Heuschnipfen geplagt, war der Göttinger Privatdozent Werner Heisenberg ins Reizklima der Nordseeinsel Helgoland geflüchtet und hatte dort über die ungelösten Rätsel der Atome gegrübelt. „Um drei Uhr nachts lag schließlich das Ergebnis der Rechnung vor mir“, erinnerte er sich später. „Ich war so erregt, dass ich an Schlaf nicht denken konnte.“ Wie im Rausch lief er aus dem Haus und erwartete auf der Spitze eines Felsens den Sonnenaufgang.

Den Schlüsselmoment der Erkenntnis verglich Heisenberg mit jenem Augenblick, in dem der orientierungslos im Nebel verlorene Wanderer plötzlich für einen



Chronik der Quantenphysik

Max Planck (1858 – 1947)

1900

Planck prägt den Begriff des Quants

1905

Einstein präsentiert eine Quantentheorie des Lichts

1913

Bohr entwickelt mit Hilfe der Quantentheorie sein Atommodell

1925

Heisenberg findet eine mathematische Formulierung der Quantenmechanik

1926

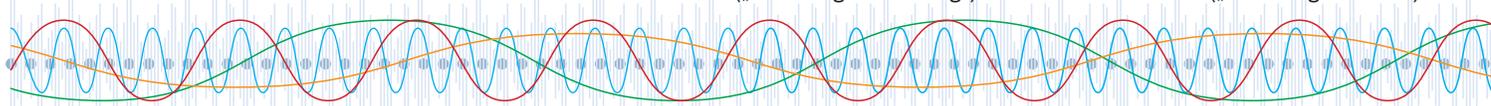
Schrödinger schlägt eine alternative Quantenmathematik vor („Schrödinger-Gleichung“)

1927

Die „**Kopenhagener Deutung**“ der Quantenmechanik entsteht

1935

Schrödinger stellt die Quantenmechanik mit einem Paradoxon in Frage („Schrödingers Katze“)



kurzen Augenblick die Silhouette eines Gipfels vor sich auftauchen sieht: „In diesem Moment sagst du dir: Jetzt weiß ich, wo ich bin.“

Dennoch fiel es Heisenberg zunächst schwer, seine Kollegen davon zu überzeugen, dass er den Nebel wirklich gelichtet hatte. Denn seine Gleichungen erklärten zwar, warum die Elektronen stets nur auf ganz bestimmten Bahnen um den Atomkern zu kreisen schienen und dann, wenn sie von einer Bahn zur anderen springen, Lichtquanten ganz bestimmter Energie aussenden – und das war schließlich der zentrale experimentelle Befund, den es zu erklären galt.

Doch der Preis für diese Erklärung war immens. Denn die Physiker hatten nun zwar einen Satz Formeln vor sich, die das Verhalten eines Atoms korrekt beschrieben. Doch niemand wusste so recht, was diese Gleichungen eigentlich bedeuteten. Begriffe wie „Bewegung“ oder „Bahn“ wollten im Rahmen von Heisenbergs Formelwerk gar keinen rechten Sinn mehr ergeben. Alles, was sich messen lässt, sagte seine seltsame neue Quantenmechanik richtig voraus. Doch auf die Frage, was wirklich im Innern eines Atoms passiert, verweigerte sie jede Antwort.

Jahrelang debattierte die verstörte Forschungsgemeinde über den Sinn der Heisenbergschen Theorie. Schritt um Schritt erst traten dabei die philosophischen Konsequenzen zu Tage. Und diese mussten jedem Physiker ungeheuerlich erscheinen:

- ▶ Die Vorstellung einer wohldefinierten Wirklichkeit wird abgeschafft.
- ▶ Der Zufall erhält den Rang eines nicht weiter hinterfragbaren Naturgesetzes.
- ▶ Dem Betrachter wird eine zentrale Rolle zugewiesen: Indem er die Welt beobachtet, verändert er diese.
- ▶ Physikalische Vorgänge sind auf rätselhafte Weise miteinander verwoben: Die Messung an einem Ort kann sich auswirken auf Geschehnisse an einem ganz anderen, weit entfernten Ort.

Auch Albert Einstein reagierte skeptisch. Zerissen zwischen Bewunderung und tiefem Unbehagen, raunzte er mit der für ihn typischen Schnoddrigkeit: „Heisenberg hat ein großes Quantenei gelegt. In Göttingen glauben sie daran (ich nicht).“ Die Radikalität von Heisenbergs „Hexeneinmaleins“, wie er



ARCHIV FRIEDRICH / INTERFOTO

Quantenpionier Schrödinger (1956): Zusammen mit Einstein in der Schmollecke

an anderer Stelle spottete, ging selbst dem Revolutionär Einstein zu weit.

Dass ausgerechnet er die neue Quantenmechanik ablehnte, war bitter für den jungen Heisenberg. Denn nicht nur als Begründer der Relativitätstheorie war Einstein in die Annalen der Physik eingegangen. Er hatte auch der Quantenidee den Weg geebnet. Licht, so hatte Einstein schon 1905 festgestellt, verhalte sich mitunter gerade so, als bestünde es aus Teilchen, die jedes ein Energiepaket, ein Quant, mit sich trügen. Die meisten Kollegen indes wollten davon zunächst nichts wissen: War nicht die traditionelle Beschreibung des Lichts als elektromagnetische Welle viel zu erfolgreich, um sie leichtfertig für überholt zu erklären?

Sogar Einstein selbst war ratlos: „Man hat also jetzt zwei Lichttheorien“, notierte er im „Berliner Tageblatt“, „beide unentbehrlich und ohne jeden logischen Zusammenhang.“ Unermüdlich suchte er nun nach einer allgemeineren Theorie, die beide Betrachtungsweisen des Lichts widerspruchsfrei miteinander versöhnen könnte.



BETTAMANN / CORBIS

frühes Experiment mit Laserstrahl

Dass die Väter der Quantenmechanik genau darauf verzichteten, war ihr vielleicht verblüffendster Geniestreich. An die Stelle des bodenständigen Entweder-

Lebendig-tote Katze

Schrödingers Gedankenexperiment zur Quantenmechanik

Mit dem berühmten Gedankenexperiment einer Katze im Kasten begründete Schrödinger seine Vorbehalte gegen die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik.

- Er nahm dabei an, dass sich in dem Kasten ein radioaktives Atom befindet, welches im Verlauf des Experiments mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit zerfällt.
- Sobald ein Geigerzähler den Zufall registriert, wird ein Mechanismus ausgelöst, der zur Freisetzung des tödlichen Gifts führt.
- Da die Quantenphysik vorhersagt, dass das Atom am Ende des Experiments sowohl zerfallen als auch nicht zerfallen ist, sei die Katze dann gleichzeitig lebendig und tot – was Schrödinger für widersinnig erklärte.

oder, wie es der gesunde Menschenverstand verlangt, stellten sie ein eigenartig spukhaft anmutendes Sowohl-als-auch: Das Licht, so ihr Ratschluss, ist nicht Welle und nicht Teilchen, es ist beides zugleich. In einigen Experimenten – etwa wenn ein Lichtstrahl auf ein fein gerastertes Gitter fällt – gebärdet es sich genau wie eine Welle, andere experimentelle Befunde dagegen – zum Beispiel das Verhalten von Licht, das auf einzelne Atome trifft – lassen sich nur erklären, wenn Licht als aus winzigen Teilchen bestehend verstanden wird.

Die Natur offenbart sich also unterschiedlich, je nachdem welche Brille der Betrachter aufsetzt – ein Kerngedanke, der die gesamte Quantenphysik durchzieht. Nicht einmal der Ort eines Objekts, etwa eines Elektrons, bleibt wohl bestimmt. Es kann sich vielmehr an vielen Orten zugleich befinden, an keinem jedoch mit völliger Gewissheit. Am ehesten noch lässt es sich beschreiben als eine Wolke, die rund um den wahrscheinlichsten Aufenthaltsort des Elektrons verschmiert ist.

Zwar wird, wer das Elektron sucht, es nur an einem einzigen Ort finden. Doch das entkräftet nicht etwa das eigenartige Theoriegebäude der Quantenmechanik – es offen-



ROBERT PAZ

Richard Feynman (1918 – 1988)

1947

Der erste **Transistor**: ein auf quantenmechanischen Effekten basierender Schalter

1960

Der erste Prototyp eines **Lasers**: eine auf quantenmechanischen Effekten basierende Lichtquelle

1965

Moore stellt das nach ihm benannte Gesetz auf (siehe Grafik)

1982

Feynman spekuliert über Quantencomputer

1985

Deutsch präsentiert eine Theorie des Quantencomputers

1997

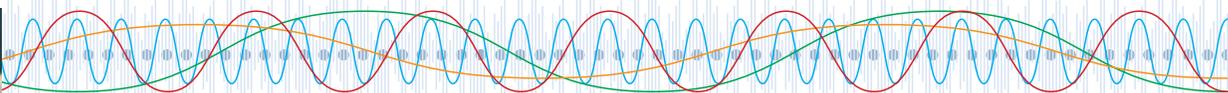
Zeilinger gelingt die erste Quantenteleportation

1998

Ein **Quantencomputer** führt erstmals eine simple Rechnung durch



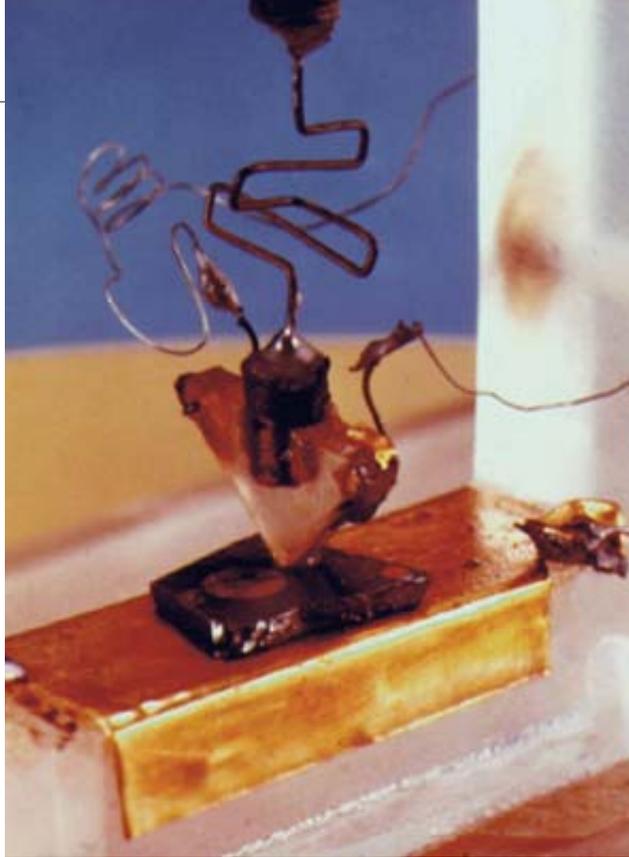
Transistor-Erfinder Brattain (links), Bardeen und Shockley (vorne)



bart vielmehr eine weitere seiner bizarren Eigenheiten: Ihr zufolge legt sich das Elektron nämlich erst in dem Moment, in dem es betrachtet wird, darauf fest, wo es sich gerade aufhält. An welchem Ort es sich dem Betrachter zeigt, ist purem Zufall überlassen. Den Formeln der Quantenmechanik zufolge ist einzig festgelegt, dass es sich bei vielfacher Wiederholung eines Experiments stets dort am häufigsten einfinden wird, wo seine Aufenthaltswahrscheinlichkeit am höchsten ist.

Damit wird dem Betrachter der Natur eine gänzlich neue Rolle zugewiesen. Ist er in der klassischen Physik bloßer Zuschauer des Welttheaters, so betritt er nun als Akteur die Bühne: Indem er die Welt wahrnimmt, greift er in sie ein. Deshalb, so die Quintessenz, kann Wissenschaft stets nur beschreiben, wie wir die Natur sehen, niemals wie sie wirklich ist.

Mehr noch als all dies aber störte Einstein, was er als „spukhafte“ Fernwirkung verspottete. Er meinte damit einen Effekt, der auftritt, wenn zwei der quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitswolken miteinander wechselwirken. Dann nämlich beeinflussen sie sich gegenseitig, „ihre Zustände“, so sagt der Quantenphysiker, „werden verschränkt“. Wenn nun an einem der beiden



Erster Transistor: Irgendwann ist Schluss

Allein war Einstein nicht in seiner Schmollecke. Im Gegenteil: Auch anderen Pionieren der Quantenphysik blieb die Sicht von Heisenberg – später Heisenbergs Mentor, dem Dänen Niels Bohr, zu Ehren „Kopenhagener Deutung“ genannt – suspekt. Nicht nur der alternde Max Planck, der einst den Begriff des Quants geprägt hatte, sondern sogar der Wiener Physiker Erwin Schrödinger, der an der mathematischen Formulierung der Quantenmechanik ähnlichen Anteil hatte wie Heisenberg, verweigerte sich den Ideen der Neuerer.

Seine Zweifel untermauerte Schrödinger mit seinem berühmten Gedankenspiel, in dessen Mittelpunkt eine Katze steht, die, völlig abgeschlossen von der Außenwelt, in einem Kasten lebt. Wenn, so sein Argument, die Welt der Atome unauflöslich mit einer Ungewissheit behaftet ist, dann kann sich diese Ungewissheit doch auch auf die makroskopische Welt, also etwa auf die Katze, auswirken.

Um diesen Gedanken zu verdeutlichen, ersann Schrödinger einen Versuchsaufbau, bei dem der radioaktive Zerfall eines einzelnen Atoms darüber entscheidet, ob ein Hammer eine Gifflasche zerschlägt oder nicht (siehe Grafik Seite 177). Wenn das Atom nun aber, so fragte er dann, nur mit

50-prozentiger Wahrscheinlichkeit zerfällt, was dann? Stirbt dann die Katze auch nur zu 50 Prozent? Und wie, bitte, solle man sich das Dasein einer solchen halb toten und halb lebendigen Katze vorstellen?

Bis heute bereitet Schrödingers Einwand manch einem Experten ein leichtes Unbehagen. Doch was zählte solche Zweifel schon angesichts der spektakulären Erfolge der neuen Theorie?

Sie erlaubte den Physikern, mit immer größerer Präzision das Verhalten der Atome zu berechnen. Und siehe da: Unterschiedslos beugten sie sich den Vorhersagen der Theorie. Elektrischer Widerstand, Leitfähigkeit, Magnetismus – all dies lässt sich mit Hilfe der Quantenmechanik vorzüglich erklären. Ja, selbst Farben sind letztlich ein quantenmechanisches Phänomen. Sie entstehen, wenn Elektronen im Atom Quantensprünge von einem Energieniveau zum anderen vollführen und dabei Licht einer ganz bestimmten Wellenlänge verschlucken oder abstrahlen.

Ihre folgenreichste Anwendung sollte die Theorie gut 20 Jahre nach der legendären Helgoländer Nacht erfahren: Kurz vor Weihnachten des Jahres 1947 lötetten ein paar Physiker in den US-amerikanischen Bell Labs die wohl bedeutendste Erfindung des 20. Jahrhunderts zusammen: den Transistor.

Inzwischen ist er zur meistproduzierten Ware der modernen Industriegesellschaft geworden. Abermilliardenfach tun Transistoren in Handys, Kameras, Autos, Waschmaschinen und natürlich in Computern ihren Dienst. Insgesamt werden genug dieser elektronischen Bauteile in Silizium geätzt, um jeden einzelnen Erdenmenschen alltäglich mit vielen Millionen Transistoren zu versorgen.

Und vor allem: Von Jahr zu Jahr nimmt ihre Zahl in atemberaubender Weise zu. Gordon Moore, einer der Gründer des Chipriesen Intel, erfasste als Erster die Grundlage dieser in der ganzen Menschheitsgeschichte einzigartigen Dynamik: Alle 18 Monate, so das nach ihm benannte Gesetz, verdoppelt sich die Zahl der Transistoren auf einem Chip (siehe Grafik Seite 179).

Seit rund 40 Jahren bestätigt sich nun Jahr für Jahr diese Vorhersage. Und doch: Irgendwann wird auch dieser Trend an ein



300 Atome vollbringen mehr Rechenschritte, als das Weltall Atome hat.

Teilchen eine Messung durchgeführt wird, so wirkt sich diese auch auf das andere aus – selbst dann, wenn beide Teilchen vor der Messung voneinander getrennt werden.

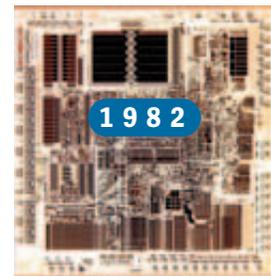
Zeit lebens mochte sich Einstein mit der Vorstellung einer derartigen Verwobenheit weit voneinander entfernter Ereignisse nicht anfreunden: „Eine innere Stimme sagt mir“, schrieb er trotzig an seinen Göttinger Kollegen Max Born, „dass das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher“ – und dann fügte er seinen vielleicht berühmtesten Satz hinzu: „Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt.“



Intel 4004
2300
Transistoren

1971

Chipstruktur:
10,0
Mikrometer



Intel 286
0,1 Mio.
Transistoren

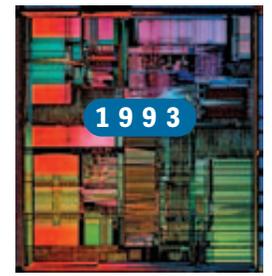
1982

Chipstruktur:
1,5
Mikrometer

Intel Pentium
3 Mio.
Transistoren

1993

Chipstruktur:
0,8
Mikrometer



Ende kommen – wenn nicht wirtschaftliche Umstände ihm Grenzen setzen, dann wird es die Physik tun. Denn Transistoren können nicht unendlich schrumpfen. Spätestens wenn sie den Maßstab von Atomen erreicht haben, ist Schluss.

Und dieser Zeitpunkt ist gar nicht mehr so fern: Schon im Jahr 2020 wird es dem Mooreschen Gesetz zufolge so weit sein. Spätestens dann wird die Chipindustrie das Handwerk der Massenfertigung atomarer Strukturen beherrschen müssen – und das bedeutet, mit Quanten zu rechnen.

Der Mann, der diesen Gedanken radikal zu Ende dachte, ist selbst in der an außergewöhnlichen Figuren nicht gerade armen Welt der Physik eine Besonderheit. Wer David Deutsch, 51, den Erfinder des Quantencomputers und Träger des hochangesehenen Dirac-Preises, daheim im britischen Oxford besucht, dem ist eine Überraschung gewiss.

Gleich hinter der Haustür erwartet ihn ein Hindernisparcours aus Kisten und Kartons, Büchern, Bechern, Videokassetten, Computerzubehör und viel Papier. Vergraben in eine bizarre Welt aus mathematischen Formeln, Science-Fiction jedweder Art, Videospielen und Philosophie, lebt hier ein jungenhaft gebliebener Mann mit hagerer Statur, bleichem Gesicht, wachem Geist und sprühendem Eifer.

„Die Kopenhagener Deutung ist der größte Skandal der Physik“, empört sich Deutsch. „Die hat uns fast 50 Jahre lang aufgehalten“ (siehe Gespräch Seite 185). Von all dem Gerede von Ungewissheit und Wahrscheinlichkeit hält er gar nichts, zu deuteln gibt es seiner Meinung nach an den Quantenformeln wenig: „Es gibt nur eine vernünftige Weise, diese Gleichungen zu lesen.“

Das daraus resultierende Weltbild allerdings mutet mindestens ebenso befremdlich an wie die Heisenbergsche Sicht der Dinge: Deutsch ist davon überzeugt, dass es nicht nur ein Universum gibt, sondern eine unvorstellbar große Zahl parallel existierender Universen – für jeden physikalisch möglichen Ablauf der Ereignisse ein eigenes. Ihm zufolge existieren Welten, in denen kein Meteorit die Dinosaurier auslöschte. In anderen Welten wiederum haben sich die Delfine oder die Ameisen die Erde untertan gemacht, oder aber die Roboter haben längst die Macht ergriffen – Deutsch lädt ein zu den wildesten Spekulationen.

Seine „Multiversum-Theorie“ hat den Vorteil, dass es nicht mehr nötig ist, anzunehmen, ein Elektron oder ein Atom könne sich an vielen Orten zur gleichen Zeit befinden. Es ist vielmehr im einen Universum hier, im anderen dort.

Deutsch kann auf diese Weise zwar den alten Wirklichkeitsbegriff retten: Die Welt existiert wieder unabhängig vom Betrachter, die Allmacht des Zufalls ist abgeschafft. Doch gelingt dem Oxforder Denker diese Rettung nur zu einem hohen Preis: Er bläht die Wirklichkeit aberwitzig auf. Wo zuvor ein Universum existierte, gibt es nun Zillionen. Wo es zuvor einen Betrachter



THOMAS PELAUM / AGENCY / VISUM

Quantenphysiker Blatt
Kalzium-Ionen im Gespräch

gab, bevölkert er das Multiversum nun in Myriaden von Kopien.

Nur eine Minderheit von Physikern ist bereit, Deutsch auf diesem kühnen Pfad des Denkens zu folgen. Die meisten haben sich inzwischen mit den Paradoxien der Kopenhagener Deutung angefreundet, zu monströs scheint ihnen zudem die Deutsch'sche Inflation der Universenzahl. „Noch ist es zu früh für ein endgültiges Urteil“, meint der Wiener Quantenphysiker Zeilinger. „Aber in ein, zwei Generationen werden wir wissen, wer Recht hatte.“

Doch ganz gleichgültig, wie man zu Deutschs exotischer Philosophie steht, eines zumindest lässt sich nicht leugnen: Bei seinen gedanklichen Exkursionen ins Multiversum ist er auf eine Entdeckung gestoßen, die dereinst einmal als eine der wichtigsten des 20. Jahrhunderts betrachtet werden könnte.

Jahrelang lag die Idee in Deutschs Papierbergen begraben. Er hatte sie zwar bei einer Zeitschrift eingereicht, doch die Herausgeber wollten sie nicht veröffentlichen. Zu esoterisch schien ihnen der ver-spinnene Gedankengang des Oxforder Physikers. Deutsch nahm die Ablehnung gelassen hin: „Mir reicht es, wenn ich

selbst einen Gedanken zu Ende gebracht habe. Dann verliere ich schnell das Interesse“, behauptet er und zeigt auf das Chaos rund um ihn herum.

„Hier liegen auch noch andere Sachen rum, die ich nie in Druck gegeben habe.“

Erst als er irgendwann einem Kollegen gegenüber seine Idee erwähnte, drängte der ihn zur Veröffentlichung. So ging das Jahr 1985 als Geburtsjahr des Quantencomputers in die Geschichte ein.

Deutsch griff in seiner Argumentation auf die Tatsache zurück, dass die Quantenmechanik einem einzelnen Atom erlaubt, sich in vielen verschiedenen Zuständen zugleich zu befinden. Wenn Atome nun aber miteinander verschränkt sind, so explodiert die Zahl möglicher Zustände rasch jenseits jeder erdenklichen Grenze.

Wenn sich ein Atom zum Beispiel gleichzeitig in zwei Zuständen befindet, dann wächst bei 2 miteinander wechselwirkenden Atomen die Zahl der möglichen Zustände auf 4, bei 3 Atomen auf 8, bei 10 Atomen auf 1024. Und 300 verschränkte Atome nehmen gleichzeitig bereits mehr Zustände ein, als das gesamte Weltall Atome hat.

Deutsch konnte nun mathematisch beweisen, dass

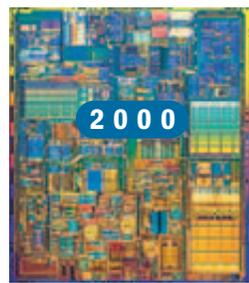
ca. **200**
Milliarden Transistoren
2020
Chipstruktur:
0,001
Mikrometer

Mooresches Gesetz:

Die **Leistungsfähigkeit von Siliziumchips verdoppelt sich etwa alle 18 Monate.**

Die von Intel-Mitgründer Gordon Moore aufgestellte Regel würde in spätestens 15 Jahren an ihre physikalischen Grenzen stoßen:

Um die postulierte Leistungssteigerung beizubehalten, dürften die Chipstrukturen im Jahr 2020 nur noch die Stärke von wenigen Atomen haben.



Intel Pentium 4

42 Mio.
Transistoren

Chipstruktur:
0,18
Mikrometer

ca. **3 Milliarden**
Transistoren

2010

Chipstruktur:
0,01
Mikrometer

Der Hexenmeister von Wien

Mit seinen „Beam“-Experimenten wurde der Physiker Anton Zeilinger zum Medienstar.



MARC STEINMETZ / VISUM

Quantenphysiker Zeilinger
„Vorstellen kann ich mir das auch nicht“

Für den Dalai Lama geriet der Besuch in dem Physiklabor zur Offenbarung. Erst führte ihm Anton Zeilinger ein paar seltsame Tricks mit Photonen vor. Dann erzählte der Forscher auch noch, dass im Mikrokosmos Teilchen einfach so aus dem Nichts entstehen.

Für einen kurzen Moment war es da mit der buddhistischen Gelassenheit vorbei. Das sei unmöglich, erklärte der Dalai Lama irritiert, für jedes Ereignis gebe es eine Ursache. Die Physiker müssten eben einfach noch genauer hinschauen.

„Hier hatten wir eine klare Divergenz unserer Anschauungen“, erinnert sich Zeilinger lächelnd. „Denn für mich steht zweifelsfrei fest, dass in der Quantenwelt die Kausalität tatsächlich verschwindet.“

Der Dalai Lama ist nicht der Einzige, den der 59-jährige Physiker der Universität Wien zum Staunen bringt. Zeilinger tritt bei Ärztekongressen auf, ist Gast in Talkshows und spricht vor Managern von Energiekonzernen. In den nächsten Wochen reist er zu Vorträgen nach Schweden, in die USA und nach Saudi-Arabien – dabei nimmt er nur einen Bruchteil aller Einladungen an. „Alle wollen auf einmal wissen, was wir Quantenphysiker so treiben.“

Alles begann mit jenem wundersamen Experiment, mit dem Zeilinger vor sieben Jahren schlagartig berühmt wurde. In einem Laborversuch war es seinem Team gelungen, ein Photon auszulöschen, um dieses Lichtteilchen im selben Augenblick – Simalabim – wenige Meter entfernt wieder auftauchen zu lassen.

Kaum war der Artikel über die weltweit erste „Quantenteleportation“ im Wissenschaftsmagazin „Nature“ erschienen, rief auch schon CNN an – dann

brach ein Medien-Hype los, der bis heute andauert.

Bis zu dieser Veröffentlichung hatten sich nur Eingeweihte für die schwerverständlichen Experimente der Quantenphysiker interessiert. Erst mit Zeilingers Teleportation konnte auch ein breiteres Publikum etwas anfangen. Denn ein Science-Fiction-Traum schien damit wahr zu werden: das „Beamen“. Wenigstens im Prinzip, so zeigte der Laborversuch, ist es tatsächlich möglich, wie Captain Kirk vom „Raumschiff Enterprise“ koboldartig riesige Entfernungen zurückzulegen.

Der Wiener Hexenmeister beeilte sich zu betonen, dass das Beamen größerer Objekte oder gar eines Menschen so gut wie ausgeschlossen wäre. Doch das Dementi ging unter. Plötzlich wurde die Quantenphysik zu einem Teil der Popkultur – und Zeilinger zu ihrem Guru.

Wann immer österreichische Journalisten heute wissen wollen, was ein Physiker so über Gott und die Welt denkt, rufen sie ihn an. Was sagt er zum neuesten TV-Skandal? Glaubt er an die Möglichkeit von Zeitreisen? Und warum nur spielt das Wetter verrückt?

Medienstar Zeilinger bedient perfekt die Erwartungen des Publikums: Der Herr Professor ist ein freundlicher Mann mit krausem Haar und Rauschebart, der in seiner Freizeit Cello spielt und ansonsten gern herumphilosophiert, wobei er dann so schön rätselhaft klingende Sätze formuliert wie dieses abgewandelte Wittgenstein-Zitat: „Die Welt ist alles, was

der Fall sein kann.“ Genau so stellen sich Laien einen spleenigen Physiker vor.

Inzwischen ist Zeilinger der ganze Rummel allerdings etwas zu viel geworden. Der Forscher hat deshalb eine eigene Pressebeauftragte engagiert. Andrea Aglibut blockt allzu lästige Anfragen ab, damit er weiter ungestört in das geheimnisvolle Quantenreich vordringen kann.

Zu seinem Team gehören auffallend viele junge Wissenschaftler. Die einen bilden die Gruppe der „Photonis“. Mit Hochdruck arbeiten sie daran, die Beam-Technik weiterzuentwickeln.

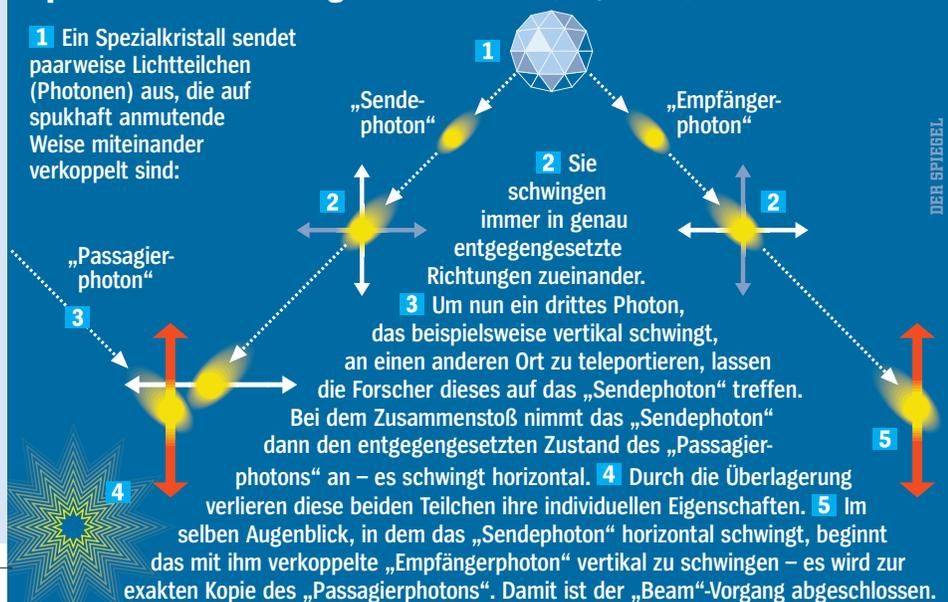
„Zu unserer eigenen Überraschung“, sagt Zeilinger, „hat das Herumspielen mit Photonen sogar zu einer ersten handfesten Anwendung geführt.“ So könnte das dem Beamen zugrunde liegende Quantenphänomen schon bald die vollkommen sichere Verschlüsselung geheimer Daten ermöglichen. Banken und Versicherungen haben bereits Interesse an der Quantenkryptografie signalisiert.

Die Wiener Forscher nutzen einen höchst sonderbaren Effekt der Mikrowelt aus: Wenn zwei Teilchen, etwa zwei Photonen, in Kontakt kommen, kann es passieren, dass sie dauerhaft miteinander in Verbindung bleiben. Was auch immer fortan mit dem einen Teilchen geschieht – es scheint auf beinahe telepathische Weise das andere direkt zu beeinflussen.

Nach ihrer Teilchenhochzeit verhalten sich solche Photonen gleichsam wie gezinkte Würfel: Fällt der eine auf die Sechs, so zeigt automatisch auch der andere die-

Spukhafte Fernwirkung

Wie das „Beamen“ (Teleportieren) von Teilchen funktioniert



DER SPIEGEL

„Beamen“ im TV-Raumschiff „Enterprise“
„Für Menschen viel zu gefährlich“

se Punktzahl. Diese Verkopplung, im Physiker-Jargon „Verschränkung“ genannt, funktioniert über jede beliebige Entfernung – selbst dann, wenn die beiden Partner Lichtjahre voneinander entfernt sind.

Albert Einstein war diese radikale Konsequenz der Quantentheorie unheimlich; er bezweifelte, dass es die „spukhafte“ Fernwirkung wirklich gibt. Doch in den vergangenen Jahren haben Physiker mit immer neuen Laborversuchen gezeigt, dass zwischen manchen Teilchen tatsächlich unsichtbare Drähte gespannt sind.

Bei seinen Beam-Experimenten benutzt Zeilinger solche verketteten Photonen, um ein drittes Photon quer durch den Raum zu befördern. Das eine Photon tastet dabei das zu transportierende Passagier-Teilchen ab und löscht es dadurch aus – woraufhin das Passagier-Teilchen im gleichen Augenblick in dem anderen Photon wiederaufersteht (siehe Grafik).

„Das Verrückte ist, dass zwischen den verschränkten Photonen keinerlei Informationen ausgetauscht werden“, sagt Zeilinger. „Richtig vorstellen kann auch ich mir nicht, was bei diesem Vorgang jenseits von Zeit und Raum vor sich geht.“

Wie sich nun gezeigt hat, sind verkoppelte Photonen zudem ideal geeignet für die Verschlüsselung geheimer Nachrichten. Jeweils paarweise werden sie dazu an Sende- und Empfangsstationen verschickt. Wenn der Sender sodann mit Hilfe seiner Photonen eine Botschaft verschlüsselt, kann der Empfänger die Botschaft mit Hilfe der entsprechenden Partner-Photonen leicht wieder entschlüsseln.

Der Clou daran: Im Unterschied zu allen anderen Verschlüsselungsmethoden ist die Quantenkryptografie absolut abhörsicher. Jede Störung von außen führt unweigerlich dazu, dass die Verkopplung der Teilchen in sich zusammenbricht – jeder Versuch, einen Photonenstrahl anzuzapfen, würde sofort auffallen. Zeilinger: „Die Sicherheit der Verschlüsselung ist naturgesetzlich verbürgt.“

Mit seinem Team hat der Physiker schon Geheimbotschaften übertragen. Für einen Test hatte er mit Hilfe verkoppelter Photonen ein Foto der „Venus von Willendorf“ verschlüsselt, einer in der Nähe von Wien entdeckten Steinzeitfigur. Derzeit arbeitet sein Team an einem Versuch, in dem verschlüsselte Nachrichten per Lichtstrahl sogar acht Kilometer weit verschickt werden sollen – von einem Hochhaus zu einem anderen.

Spätestens in fünf Jahren könnten die ersten Quantenverschlüsselungsgeräte mit verschränkten Photonen auf den Markt



kommen. Eine Kooperation mit der Industrie soll bei der Vermarktung helfen. Die Europäische Raumfahrtagentur Esa prüft sogar, von einem Satelliten aus verschlüsselte Laserstrahlen an jeden Punkt der Erde zu senden.

Doch auch die reine Grundlagenforschung beschäftigt Zeilinger weiter. Ein zweites Team (die „Moleküli“), geleitet von ihm und seinem Kollegen Markus Arndt, versucht herauszufinden, ob die Quantenphänomene wirklich nur auf den Mikrokosmos beschränkt sind. Immerhin traten bizarre Effekte sogar schon bei größeren Molekülen auf. Als Nächstes wollen die Forscher klären, ob sich auch riesige Biomoleküle wie Hämoglobin oder Insulin in bestimmten Experimenten sonderbar verhalten.

Und wie ist es mit Viren? Oder mit Sandkörnern? „Wir wissen einfach noch nicht, ob es eine Grenze gibt, wo die Quanteneffekte aufhören“, gibt Zeilinger zu. „Die einzige Bedingung scheint nur zu sein, dass die Objekte von der Außenwelt abgeschirmt sind.“

Wird also irgendwann doch das Beamen größerer Gegenstände möglich sein? Der Physiker mag das nicht mehr für alle Zeiten ausschließen. „Vielleicht werden wir in tausend Jahren tatsächlich in der Lage sein, eine Kaffeetasse zu teleportieren“, spekuliert Zeilinger. „Aber jede noch so winzige Störung könnte dann dazu führen, dass sie ohne Henkel in der Empfangsstation ankommt – für Menschen wäre eine solche Fortbewegungstechnik sicher viel zu gefährlich.“

Und noch etwas spricht dagegen, dass irgendwann Menschen von einem Ort zum anderen gebeamt werden: Um alle zehn Billionen Milliarden Atome eines Menschen zu erfassen, bräuchten die schnellsten heutigen Computer rund tausendmal so lange, wie das Universum alt ist.

OLAF STAMPF

es möglich ist, diese astronomisch hohe Zahl von Quantenzuständen dazu zu nutzen, eine entsprechend gigantische Zahl von Rechnungen durchzuführen. Er sieht in seiner Beweisführung zugleich eine Bestätigung für die Existenz des Multiversums. Der Quantencomputer, so Deutsch, entleihe seine enorme Rechenkraft anderen Universen: „Jemand, der immer noch daran glaubt, dass es nur ein einziges Universum gibt, der soll mir einmal erklären, wie ein paar Dutzend Atome mehr Rechenoperationen schaffen können, als es Atome im gesamten Universum gibt. Wo finden denn all diese Rechnungen statt – wenn nicht in anderen Universen?“

Anfangs reagierten die Kollegen mit un-verhohlener Skepsis. Solch ein Quantencomputer mag ja auf dem Papier wunderschön aussehen, sagten die einen, doch wie soll man ihm eigentlich sinnvolle Er-

 **Plötzlich horchen
Industrie, Geheimdienste
und das Militär auf.**

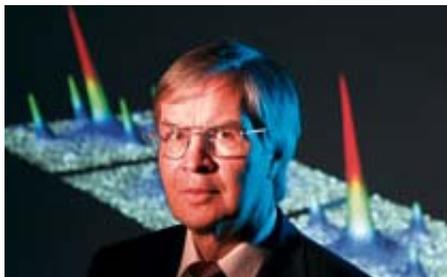
gebnisse entlocken? Und: Lässt sich ein so seltsamer Rechner überhaupt programmieren?

Außerdem werde ein solches Quantenwunderding ohnehin nie funktionieren, wandten andere ein. Dazu sei es viel zu störanfällig. Selbst die kleinste Irritation könne schließlich das schöne Gespinnst rechnender Atome irreparabel verwirren.

Inzwischen jedoch ist diese Form der Grundsatzkritik weitgehend verstummt. Theoretisch zumindest, das gilt nun als bewiesen, lässt sich die Natur überlisten. Denn die Forscher haben raffinierte Tricks erdacht, mit denen sich eventuelle Störungen der Quantenrechnung nachträglich wieder korrigieren lassen.

Und auch der erste Einwand ist ausgeräumt: Die Mathematiker kennen mitt-

lerweile Methoden, mit denen sich dem Quantencomputer, wenn er erst einmal gebaut ist, auch sinnvolle Ergebnisse entlocken lassen. Er wird zum Beispiel mit einer für herkömmliche Computer niemals auch nur entfernt erreichbaren Geschwindigkeit die gewaltigsten Datenbanken durchforsten können. Und er wird die besten derzeit verfügbaren Verschlüsselungscodes knacken können.



Quantenphysiker Hänsch
Eierkartons aus Licht

Vor allem diese Eigenschaft hat urplötzlich Industrie, Geheimdienste und das Militär aufhorchen lassen. Kaum war bewiesen, dass ein Quantencomputer selbst die größten Zahlen in ihre Primfaktoren zerlegen könnte – die entscheidende Voraussetzung, um Codes zu entschlüsseln und so die bestgehüteten Geheimnisse von Banken oder Spionen zu enthüllen –, da schwappte Geld in die Kassen der bis dahin eher als esoterisch verschrienen Quantendenker.

Jetzt will auch das Pentagon die Entwicklung des Quantencomputers energisch vorantreiben. Mit einer gewaltigen Kraftanstrengung, so die Hoffnung, werde es möglich sein, binnen weniger Jahre einen ersten primitiven Prototypen zu bauen, dessen Eigenschaften sich dann auch praktisch erkunden lassen.

Damit sind nun die Experimentatoren gefragt. Es geht nicht länger darum, ob sich ein Quantencomputer bauen lässt, sondern vielmehr darum, wie und wann.

Noch ist unklar, was zum Silizium des Quantenzeitalters werden könnte. Niemand weiß, wie die Bauteile der künftigen Supermaschinen aussehen werden. Auch die Frage, ob am Ende Atome, Photonen, einzelne Elektronen oder irgendwelche Anregungszustände im Festkörper die Rolle der kleinsten Informationseinheiten, der „Qubits“, spielen werden, ist offen.

Am weitesten ist bisher der US-amerikanische Ingenieur Isaac Chuang gekommen. Sein Quantencomputer passt in einen Fingerhut, schimmert leuchtend orange, braucht bis zu einer Zehntelsekunde für eine einzige Rechenoperation, und vor allem: Er ist flüssig.

Anders als die meisten Konkurrenten, hat Chuangs Flüssigcomputer auch schon

Die kleinsten Rechner der Welt

Vier Wege zum Quantencomputer

Kernspinresonanz (NMR)

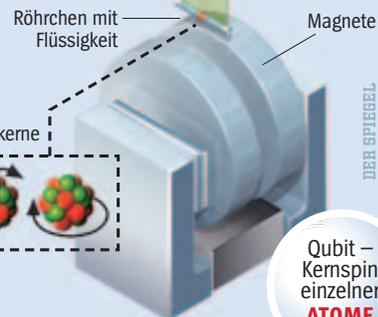
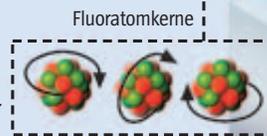
In einem Fluorkohlenstoffmolekül wird der so genannte „Spin“ einzelner Atomkerne gezielt mit Radiowellen präpariert. Indem diese Spins miteinander wechselwirken, lassen sich Quantenrechnungen ausführen.

VORTEILE:

- +** ▶ Funktioniert bei Zimmertemperatur
- ▶ Reichhaltige Erfahrung (z.B. aus der Medizin) mit der NMR-Technik
- ▶ Gute Abschirmung der Kernspins innerhalb eines Moleküls
- ▶ Einfache Faktorisierung (15 = 5 x 3) bereits gelungen

NACHTEILE:

- ▶ Mit der Anzahl der Qubits drastisch zunehmende Störungen
- ▶ Fortentwicklung zu Quantenrechnern mit mehr als etwa 10 Qubits unwahrscheinlich

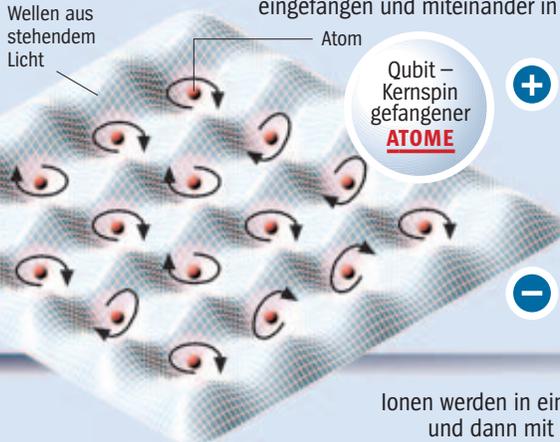


Qubit – Kernspin einzelner **ATOME**

Optisches Gitter

Wellen aus stehendem Licht

Mit Hilfe von Lasern lässt sich ein Gitter aus Licht aufbauen. Darin können einzelne Atome, wie Kugeln in einem Eierkarton, eingefangen und miteinander in Wechselwirkung gebracht werden.



Qubit – Kernspin gefangener **ATOME**

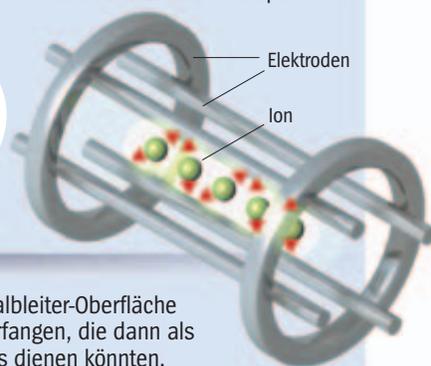
- +** ▶ Präparation von mehr als 100 000 Atomen bereits gelungen
- ▶ Gleichzeitiges Rechnen mit vielen Atomen möglich
- ▶ Starke, leicht nachweisbare Signale
- ▶ Ansprechen einzelner Atome schwierig

Ionenfalle

- +** ▶ Der Bau eines universellen Quantengatters bereits gelungen
- ▶ Leicht präparierbare und gut ablesbare Qubits
- ▶ Handhabung vieler gefangener Ionen noch nicht erprobt
- ▶ Langsame Rechengvorgänge

Ionen werden in einem elektrischen Feld eingefangen und dann mit Hilfe von Lasern abgekühlt, bis sie vollständig in Ruhe sind. Durch elektromagnetische Wellen lassen sich diese Ionen dann manipulieren.

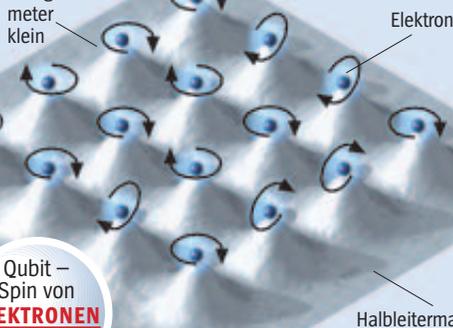
Qubit – Anregungszustände von **ATOMEN**



Quantenpunkte

Quantenpunkt: wenige Nanometer klein

Auf winzigen Unebenheiten einer Halbleiter-Oberfläche können sich einzelne Elektronen verfangen, die dann als Qubits eines Quantencomputers dienen könnten.



Qubit – Spin von **ELEKTRONEN**

- +** ▶ Umfangreiche Erfahrungen bei der Handhabung von Halbleitermaterialien
- ▶ Vermutlich gut geeignet zur industriellen Massenfertigung
- ▶ Schwer zu beherrschende Störungen
- ▶ Verschränkung von Quantenpunkten bisher nur ansatzweise gelungen



THOMAS PFLAUM / AGON / VISUM

Vakuumkammer einer Ionenfalle*: Was wird zum Silizium des neuen Zeitalters?

eine Rechnung geschafft: $15 = 5 \times 3$. Für manch einen Physiker war das ein Einschnitt in die Wissenschaftsgeschichte.

Um seine Maschine zu starten, versenkt Chuang ein Röhrchen mit der rechnenden Flüssigkeit in einem Kernspinresonanzgerät, das entfernt an einen gewaltigen Druckkochtopf erinnert. Wenn er dann die Buchstaben „GA“ für „Go Ahead“ in die Tastatur tippt, setzt er einen Sender von Radiowellen in Gang, dessen Strahlung die Kerne der Kohlenstoff- und Fluoratome in der orange-farbenen Flüssigkeit zu einem bizarren Tanz anregt.

Die Radiowellen, mit denen Chuang die Flüssigkeit bestrahlt, geben seinem eigenartigen Computer die Rechanweisungen, die einzelnen Moleküle führen sie aus. Der Tanz der Atomkerne stellt die eigentliche Rechnung dar, das Signal, das die Moleküle am Ende abstrahlen, das Ergebnis.

Jeweils sieben dieser Qubits wechselwirken innerhalb jedes einzelnen Fluor-Kohlenstoff-Moleküls; von außen lassen sie sich mittels Radiowellen ansprechen; durch die Elektronenhülle sind sie fast perfekt von der Außenwelt abgeschirmt.

Allerdings ist sich Chuang durchaus im Klaren darüber, dass er damit die Möglichkeiten seines Konzepts bereits weitgehend ausgereizt hat. Mit Hilfe der Kernspintechnik, so viel gilt als fast sicher, wird sich ein wirklich leistungsstarker Quantenrechner nicht bauen lassen. Dazu wird es anderer Ansätze bedürfen.

Als vielversprechend gilt besonders die Technik der Ionenfallen, wie sie etwa an der Universität Innsbruck zu besichtigen ist. Leise summen dort die Vakuumpumpen im Halbdunkel des Laserlabors. Über die optische Bank ist ein feines Netz von dunkelroten Lichtstrahlen gewoben. Einzelne Kalzium-Ionen hat Laserphysiker Rainer Blatt in einem elektrischen Feld ge-

fangen und bis auf den absoluten Temperaturnullpunkt abgekühlt. Dann präpariert er ihren Quantenzustand mit Hilfe von eingestrahlem Laserlicht.

Wenn die Innsbrucker Physiker nun eines der gefangenen Teilchen durch einen winzigen Lichtstoß in Schwingungen versetzen, dann beginnen die Ionen ihr Rechenwerk – sie sind verschränkt. Drei Ionen hat Blatts Gruppe auf diese Weise bereits miteinander verkoppelt und viele Sekunden lang von Störfeldern aller Art abgeschirmt – eine Ewigkeit für die beiden Ionen, um miteinander rechnen zu können.

Besonders stolz ist Blatt darauf, dass es ihm gelungen ist, auf diese Weise aus zwei verschränkten Ionen ein sogenanntes CNOT-Gatter zu bauen. Denn dieses logische Bauelement reicht theoretisch aus, um daraus jeden beliebigen Quantencomputer zu konstruieren. „Irgendwann in der Zukunft“, meint Blatt, „wird man vielleicht auf das erste CNOT-Gatter zurückblicken, wie man heute auf den Bau des ersten Transistors zurückblickt.“

Noch allerdings hat auch die Technik der Ionenfallen mit großen Schwierigkeiten zu kämpfen. Denn zwei Kalzium-Ionen miteinander ins Gespräch zu bringen ist eine Sache, Dutzende oder gar Hunderte zu verkoppeln, eine ganz andere. Dazu müsste es gelingen, einzelne gefangene Ionen nanometergenau umherzumanövrieren, sie mit anderen zu verschränken und dann wieder zu trennen. Auf welche technischen Probleme die Ionenjongleure dabei noch stoßen werden, ist schwer abzuschätzen.

Gut möglich also, dass am Ende doch einer der anderen derzeit erkundeten Wege schneller zum Ziel führt. All jene zum Beispiel, die lieber auf den vertrauten Werkstoff Halbleiter setzen, erhoffen sich von den sogenannten Quantenpunkten den Durchbruch. Sie gleichen winzigen Hub-

beln auf einer Festkörperoberfläche, auf denen als möglicher Qubit jeweils exakt ein Elektron wie festgenagelt verharrt.

Theodor Hänsch vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik wiederum ist es gelungen, Käfige aus Licht zu schmieden. „Man kann sich das Ganze vorstellen wie einen Eierkarton, bei dem die Kühlen alle dunkel sind“, erklärt der Laserphysiker. Da Atome grundsätzlich lichtscheu seien, versteckten sie sich in diesen dunklen Mulden. Auf diese Weise lässt Hänsch ein regelmäßiges Gitter von rund 100 000 in Lichtkäfigen eingesperrten Rubidium-Atomen entstehen – wie geschaffen dafür, als Qubits eines Quantencomputers Rechen-dienste zu leisten.

Ziel all dieser Bemühungen ist es, eine möglichst große Zahl von Qubits möglichst lange Zeit zu verschränken. Allerdings ist noch unklar, ob dies bis zu einer beliebigen Zahl von Atomen, Ionen oder Elektronen möglich sein wird.

„Das ist eine der spannendsten Fragen unseres Fachs“, erklärt der Innsbrucker Theoretiker Peter Zoller. „Denn wir kommen damit in die Grenzzone zwischen der klassischen und der Quantenphysik. Das große Rätsel ist, warum aus der Quantenmechanik die klassische Physik, wie sie uns im Alltag begegnet, hervorgehen kann.“

Der Theoretiker Zoller ist es, der immer wieder den Experimentatoren den Weg gewiesen hat. So tüftelte er aus, wie sich aus Ionen in der Falle ein Quantencomputer basteln lässt. Und auch die Idee, Eierkartons aus Licht zu bauen, stammte von ihm.

Falls einer dieser Wege tatsächlich zum ersehnten Quantenhirn führt, dann könnte dies möglicherweise noch weit mehr als nur eine neue Ära des Rechnens einläuten. Vielleicht steht am Ende der Bemühungen um den Quantencomputer sogar die Antwort auf die uralte Frage nach dem Wesen der Wirklichkeit.

Denn noch stehen Alltags- und Quantenphysik unversöhnt nebeneinander. Wie, so fragt sich, kann die prinzipielle Ungewissheit, mit der die Quantenwelt behaftet ist, zur völligen Gewissheit des Alltags führen? Wie passt die eigenartige Sowohl-als-auch-Logik des Mikrokosmos mit der gänzlich anders anmutenden Entweder-oder-Logik aller praktischen Erfahrung zusammen?

Hätten die Väter der Quantenphysik die Lösung dieses Rätsels gekannt, vielleicht hätten sie dann auch Albert Einstein von der Schönheit und Schlüssigkeit ihrer Theorie überzeugen können. Denn den störte gerade die Unvereinbarkeit von Quanten- und Alltagswelt: Ob er denn ernsthaft glaube, so soll er einst einen der jungen Quantenvisionäre gefragt haben, dass auch der Mond da oben am Himmel nicht da sei, wenn gerade keiner hinguckt.

JOHANN GROLLE

* An der Universität Innsbruck.