



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Eine gemeinsame Initiative von Bundesregierung,
Wissenschaft, Wirtschaft und Kultur

Einsteins unverhofftes Erbe

Quanteninformationstechnologie



FORSCHUNG

Deutschland. Das von morgen.

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Publikationen; Internetredaktion
11055 Berlin

Bestellungen

schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35
53182 Bonn
oder per
Tel.: 01805 – 262 302
Fax: 01805 – 262 303
(0,12 Euro/Min. aus dem deutschen Festnetz)
E-Mail: books@bmbf.bund.de
Internet: <http://www.bmbf.de>

Redaktion

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Dr. Ralph Dieter

Autor

Dr. Mathias Schulenburg, Köln

Gestaltung

Suzy Coppens, Köln
www.bergerhof-studios.de

Bonn, Berlin 2005

Gedruckt auf Recyclingpapier

Bildnachweis

Titelbild: Die Mädchen sehen sich die tunnelmikroskopische Aufnahme eines „Quanten-Geheges“ aus 36 Kobalt-Atomen an. Wenn in einen der Brennpunkte der Ellipse ein einzelnen Kobalt-Atom gesetzt wird, erscheint durch die Wellennatur des Elektrons im anderen Brennpunkt ein Bild des Atoms. Der „Kondo-Resonanz“ genannte Effekt könnte Information über Chips der Zukunft transportieren, wenn Drähte hierfür zu klein geworden sind.

Bild und Montage, BergerhofStudios, Köln; „Quantum Corral“ Don Eigler, IBM

Seite 6, 7: Bergerhofstudios, Köln

Seite 8: Scientific American, 1884, bearbeitet

Seite 9: MPG

Seite 10: BergerhofStudios, Köln

Seite 11, links: Niels Bohr Archive, Kopenhagen

Seite 11, rechts: Library of Congress, Washington

Seite 12: Österreichische Zentralbibliothek für Physik, Wien

Seite 13: CERN, Genf

Seite 14: NASA

Seite 15: Bernd Thaller, Uni Graz

Seite 16: Insert: RWTH, Aachen

Seite 17, links: Cornell University, Ithaca (bearbeitet), Insert: RWTH Aachen

Seite 17, rechts: Institut für Experimentelle und angewandte Physik, Uni Kiel

Seite 18: High Magnetic Field Laboratory, Grenoble

Seite 19, links oben: Ernst Ruska Archiv e.V., Berlin

Seite 19, links unten: IBM, Zürich

Seite 19, rechts: Physik IV, Uni Augsburg

Seite 20: BergerhofStudios, Köln

Seite 22, links: Institut für Angewandte Physik und Zentrum für Mikrostruktur-forschung, Uni Hamburg

Seite 22, rechts: Forschungszentrum Jülich

Seite 23: IBM/Infineon, MRAM Development Alliance

Seite 24, links: WSI, Garching/Laboratorium für Festkörperphysik, ETH-Zürich

Seite 24, rechts: MPI für Festkörperforschung, Stuttgart

Seite 25: Montage, BergerhofStudios, Köln

Seite 26, oben: Technische Physik, Uni Würzburg

Seite 26, unten: CeNS und Sektion für Physik, LMU München

Seite 26, rechts: Institut für Festkörperphysik, Uni Hannover

Seite 27, links: Experimentalphysik, Uni Duisburg-Essen

Seite 27, rechts: Department Physik, Uni Paderborn

Seite 29: unbekannter Künstler, Überarbeitung: BergerhofStudios, Köln

Seite 32: BergerhofStudios, Köln



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Eine gemeinsame Initiative von Bundesregierung,
Wissenschaft, Wirtschaft und Kultur

Einsteins unverhofftes Erbe

Quanteninformationstechnologie

Vorwort



Einsteins Freund und Kollege Max Planck fragte als junger Mann um 1900 den Münchner Physiker von Jolly, ob er Physik studieren solle. Er bekam den Rat: „Lass' die Finger davon. Alles Wesentliche ist erforscht!“

Zum Glück hielten Planck und Einstein sich nicht an diesen Rat und eröffneten kurz darauf der Physik mit ihren Ideen eine völlig neue Weltsicht: Energie wird nicht kontinuierlich frei, sondern in Portionen. Die Welt ist im Kleinsten nicht glatt wie Wasser, sondern körnig wie Sand.

Die Folgen dieser revolutionären und der bisherigen Erfahrung scheinbar völlig widersprechenden neuen Physik waren unabsehbar. Hundert Jahre nach Einsteins Erklärung des Fotoeffekts finden wir diese neue Physik auch in unserem Alltag - Fernseher, Mobiltelefon, DVD-Player - überall sind Quanteneffekte am Werk. Quanteneffekte sind es auch, die die Natur der Materie auf der Nanoskala bestimmen. Wenn sich heute Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler, Ingenieurinnen und Ingenieure daran machen, mit Hilfe der Nanotechnologie einen Innovationsschub für fast alle Bereiche der Technik vorzubereiten, dann profitieren sie entscheidend vom Verständnis der Quanteneffekte.

Ein besonders spannender Bereich ist die Quanteninformationstechnologie. Mit ihr kann ein neues Kapitel der Kommunikationstechnik aufgeschlagen werden. In aller Welt wird mit Hochdruck daran gearbeitet, in Zukunft mit Quanten rechnen zu können oder sichere Kommunikations-

wege zu ermöglichen. Und auch heute gilt - entgegen von Jolly's Ansicht: Noch längst ist nicht alles erforscht!

Im Gegenteil: Bis zur Realisierung ist es ein weiter Weg, auf dem noch viel Grundlagenforschung notwendig ist. Aber die Anstrengung lohnt sich. Vom Quantencomputer verspricht man sich, dass er die Fähigkeiten derzeitiger Rechner bei weitem in den Schatten stellt. Muss ein heutiger Computer noch viele Rechenoperationen nacheinander durchführen, könnte ein Quantencomputer dies in einem einzigen Schritt erledigen. Komplexe Probleme könnten dadurch sehr viel schneller gelöst werden.

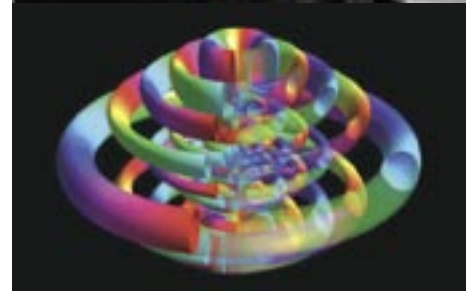
In Deutschland arbeiten Forschergruppen, auch in Förderprogrammen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, intensiv daran, die Grundlagen für die Quanteninformationstechnologie zu erforschen. Gerade im Einsteinjahr 2005 zeigt sich, dass Einsteins Erben auf den Spuren ihres berühmten Vordenkers einen großen Beitrag dazu leisten, Deutschlands Spitzenstellung auf dem Gebiet der Informationstechnologien auch in Zukunft zu erhalten.

Noch ist nicht klar, welcher Weg zur Quanteninformationsverarbeitung führt. Doch wie Einstein sagte: „Nur, wer nicht sucht, ist vor Irrtum sicher.“ Ich bin mir sicher, dass Einsteins revolutionäre Arbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch künftig zu wichtigen technologischen Durchbrüchen und zu wirtschaftlich bedeutsamen Innovationen führen werden.

Edelgard Bulmahn
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Inhalt

| | |
|--|---------|
| Prolog: Neues aus dem Quantenland | 5 |
| Moore's Gesetz am Limit | 6 - 7 |
| Wie die Quantentheorie in die Welt kam | 8 - 13 |
| Zwei schöne Katastrophen | 9 |
| Ein Akt der Verzweiflung | 9 |
| Einstein und das Photon | 10 |
| Niels Bohr | 10 |
| Louis-Victor de Broglie, Erwin Schrödinger | 11 |
| Schrödingers Katze | 11 |
| Das EPR-Paradoxon | 12 |
| John Bell | 13 |
| Quantenzauberei | 14 - 17 |
| Quantenspek am Doppelspalt | 16 |
| Die Stunde der Experimentatoren | 18 - 19 |
| Der Quantencomputer im Prinzip | 20 - 21 |
| Auf dem Weg zum Quantencomputer | 22 - 23 |
| Die Materialisierung des Quantencomputers | 23 |
| nanoQUIT | 24 - 27 |
| Neue Wege für neue Materialien | 24 |
| Nanotechnologie | 26 |
| Quantensysteme und Qubits | 27 |
| Einsteins unverhofftes Erbe | 28 - 29 |
| Glossar | 30 - 31 |
| Literatur | 32 |



Prolog: Neues aus dem Quantenland



„50 Jahre angestrengten Nachdenkens haben mich der Frage ‚Was sind Lichtquanten?‘ nicht nähergebracht“. Mit dieser Aussage kurz vor seinem Tode hat Albert Einstein versucht, die Schwierigkeiten zu verdeutlichen, die die von ihm geforderte Realität von Lichtquanten verursachte. In seinen bahnbrechenden Arbeiten aus dem Jahr 1905 hat Albert Einstein die Konsequenzen gezogen, die einige bis dahin unerklärte experimentelle Tatsachen forderten. Damit wurde unter anderem der Grundstein für die Quantenmechanik gelegt, die wegen ihrer Unanschaulichkeit und ihrer Hauptanwendung im unsichtbaren Kleinen von der Öffentlichkeit nicht angenommen wurde. Dabei ist das oberste Ziel jeder Theorie, Naturphänomene und experimentelle Ergebnisse zu beschreiben oder vorherzusagen.

Erst neuartige experimentelle Verfahren erlauben es, in der Quantenwelt kontrolliert einzugreifen und gerade die Nanotechnologie eröffnet die Möglichkeit, das gesamte Potenzial der Quantentheorie auszuschöpfen. Viele Gedankenexperimente, mit denen sich Einstein beschäftigte, können

1980 entdeckte Klaus von Klitzing, dass ein altbekannter Effekt in einem Halbleiter bei sehr tiefen Temperaturen nicht wie sonst mit einer geraden Linie, sondern abgestuft, quantisiert, wie mit einer Treppe darzustellen war, womit er einen neuen makroskopischen Quanteneffekt gefunden hatte. Der Effekt erlaubt die extrem genaue Messung bestimmter elektrischer Größen. Für die Entdeckung des „Quantenhalleffektes“ erhielt von Klitzing 1985 den Nobelpreis für Physik.

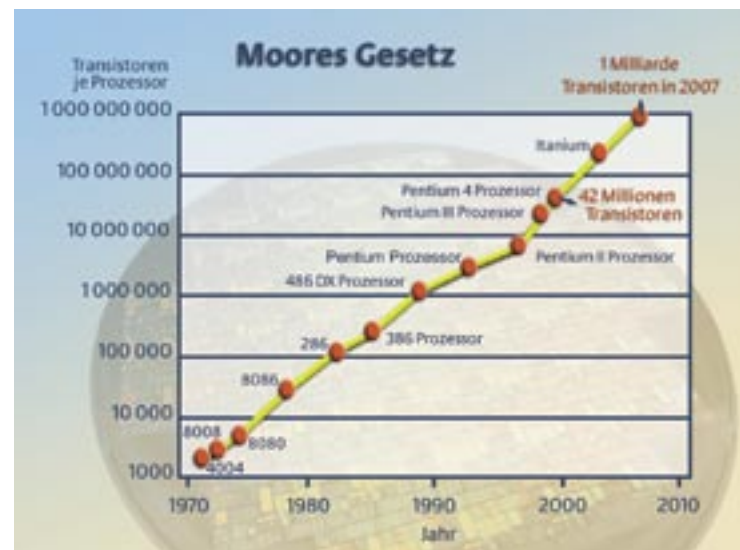
erst heute experimentell realisiert werden und es herrscht eine Aufbruchstimmung Ideen umzusetzen, die unserer Alltagserfahrung widersprechen. Die Experimentalphysik ist aufgefordert, Einsteins Erbe anzutreten und nutzbringend umzusetzen. Es wird jedoch ein langer und steiniger Weg sein, der zu den großen Erfolgen und Durchbrüchen führen wird und es ist noch mit vielen Überraschungen zu rechnen. Die spielerischen Möglichkeiten in der Nanowelt, mit der Quantenmechanik umzugehen, werden mit Sicherheit dazu führen, dass nachfolgende Generationen keine Schwierigkeiten haben werden, sich in der Quantenwelt wohl zu fühlen.

Prof. Dr. Klaus von Klitzing
Nobelpreisträger für Physik des Jahres 1985

Moore's Gesetz am Limit

Ein Rechenzentrum Anfang der siebziger Jahren: Tonnen-schweres Gerät steht herum, Kartons mit Lochstreifen, Lochstreifenlese- und Stanzgeräte, Teletypes (wuchtige, elektrisch angesteuerte Schreibmaschinen) - es rattert und hakt. Meistens hakt es. Das Institutsgebäude ist groß und benötigt einen Hausmeister. Die Rechenleistung damaliger Rechenzentren ließe sich heute in einem Taschenrechner unterbringen.

Die Entwicklung ist einem „Moore's Law“ genannten Zusammenhang zu danken, nach dem sich die Kapazität von Mikrochips etwa alle 18 Monate verdoppelt, während sich zugleich die Fertigungskosten halbieren. Moore's Gesetz ließ sich lange durchhalten, weil die Chipstrukturen durch immer neue Produktionsraffinessen stetig schrumpfen konnten. Diesem Trend sind allerdings Grenzen gesetzt, die sich unter anderem in exponentiell steigenden Kosten für die Lithographie-Masken niederschlagen, den Schlüsselkomponenten für die lichttechnische Strukturierung der Computerchips. Und dann gibt es eine prinzipielle Grenze für die Chipstrukturverkleinerung, die Körnigkeit der Materie. Die nämlich besteht aus Atomen, und in den 30 Nanometer breiten Strukturen der nächsten Chipgeneration liegen nur mehr 130 Siliziumatome nebeneinander, die endgültige Grenze wird erkennbar. Und:



Moore's Gesetz prognostiziert für Prozessoren eine Verdoppelung der Rechenleistung alle 18 Monate. Die Realität ist derzeit schneller.

mit den schrumpfenden Dimensionen schrumpft auch die Zuständigkeit der klassischen Physik, beginnen Quantenphänomene zu dominieren, und die sind überaus merkwürdig. Aber sie bieten auch die Chance, die erkennbare Grenze der konventionellen Computerei zu umgehen.

Die Quantentheorie ist mehr als hundert Jahre alt. Die Gelehrten haben sie von Anfang an mit starken Worten begleitet: „Wer sie nicht verrückt findet, hat sie nicht verstan-

den!“ (Niels Bohr), oder „Wer glaubt, sie verstanden zu haben, ist verrückt!“ (Richard Feynman). Manche Varianten stünden gar für „Schizophrenie mit einer Portion Niedertracht“, so Brice deWitt über sein eigenes Werk, das den fortwährenden Zerfall der Welt in Phantastilliarden, Zentrifugillionen immer neuer, meist nur leicht veränderter Kopien vorsieht, diese Broschüre und ihre Leser eingeschlossen.

Bemerkungen dieser Art werden gewöhnlich eher esoterischen Thesen zuteil; die Quantentheorie aber ist nicht eso-

terisch. Sie bewegt sich mit System abseits des gewöhnlichen Verstandes, und den mit ihrer Hilfe entstehenden Gegenständen werden mittlerweile nicht weniger als 30% der modernen industriellen Wertschöpfung zugeschrieben - nicht schlecht für eine Theorie, deren tiefe Bedeutung seit hundert Jahren umstritten ist.

Die Quantentheorie entstand bei dem Versuch, etwas von Natur aus sehr Flüchtiges, Ätherisches, zu normen, Licht, was Dank eines Ofens mit einem ganz kleinen Loch auch gelang.

Ein Rechenzentrum der 70er Jahre. Die Rechenpower im Saal würde heute in das Volumen des Frühstückspfels passen.

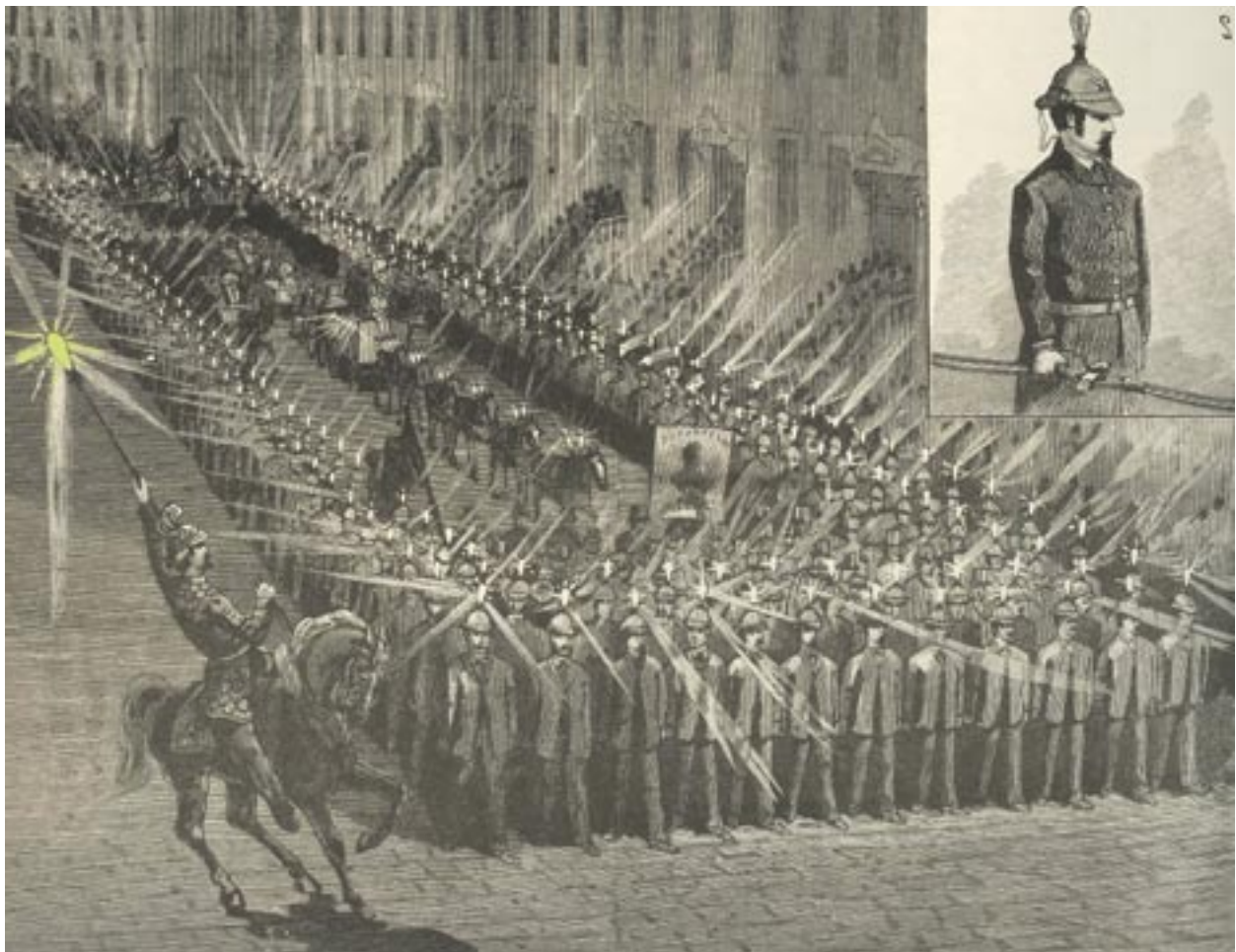


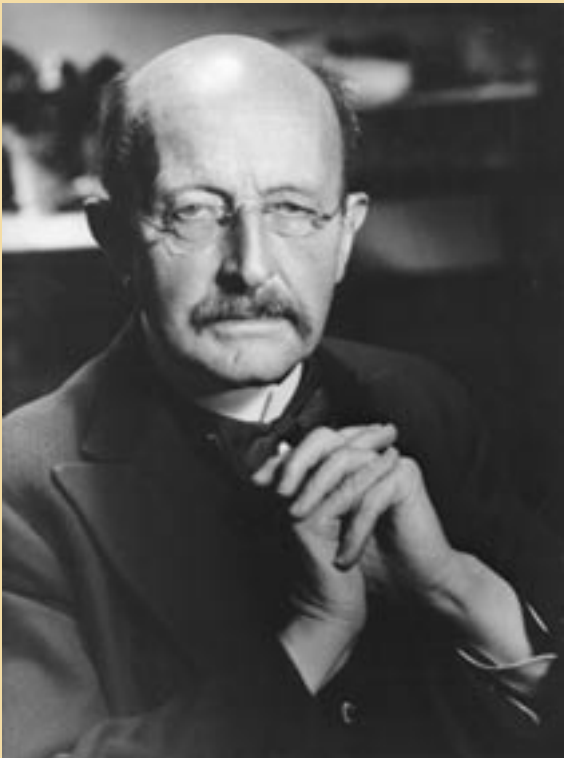
Wie die Quantentheorie in die Welt kam

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts gerieten zwei Technologien zur Beleuchtung der Städte in heftige Konkurrenz zueinander, die Stadtgasindustrie und die neue Elektrizitätswirtschaft. Beide führten, natürlich, die Qualität ihres Lichtes ins Feld, über die aber zu dieser Zeit objektiv nicht zu entscheiden war.

Diesem und anderen Misständen abzuhelpfen, wurde 1887 in Berlin die Physikalisch-Technische Reichsanstalt für die experimentelle Förderung der exakten Naturwissenschaften und der Präzisionstechnik gegründet. Als idealer Lichtstandard hatten sich so genannte Schwarzkörperstrahler herausgestellt, glühende Hohlkörper. Wurden diese Hohlkörper stark genug beheizt, strahlten sie sichtbares Licht ab, dessen Spektrum - vereinfacht: die Farbzusammensetzung - man durch ein kleines Loch in der Wand bestimmen konnte, ohne

Reklame für elektrisches Licht: Edisons Glühbirnenprozession von 1884 in New York. Der Kampf zwischen Strom- und Gasbeleuchtung hatte die Quantenmechanik zur Folge.





Max Planck, unfreiwilliger Begründer der Quantenmechanik. Gemocht hat er sie nie.

das Spektrum wesentlich zu stören. Die Qualität des Lichtes im Hohlraum hing allein von der Temperatur des Hohlkörpers ab, nicht von dessen Wandmaterial oder ausgefallenen Geometrien. Damit war der Lichtstandard da. Die Berliner benutzten unter anderem ein feuerfestes Porzellanrohr der Königlich-Preußischen Porzellanmanufaktur im Format einer Küchenrolle. Zivilisten begegnen einem ungefähren Schwarzkörperstrahler in der Gestalt eines Backofens mit Fenster.

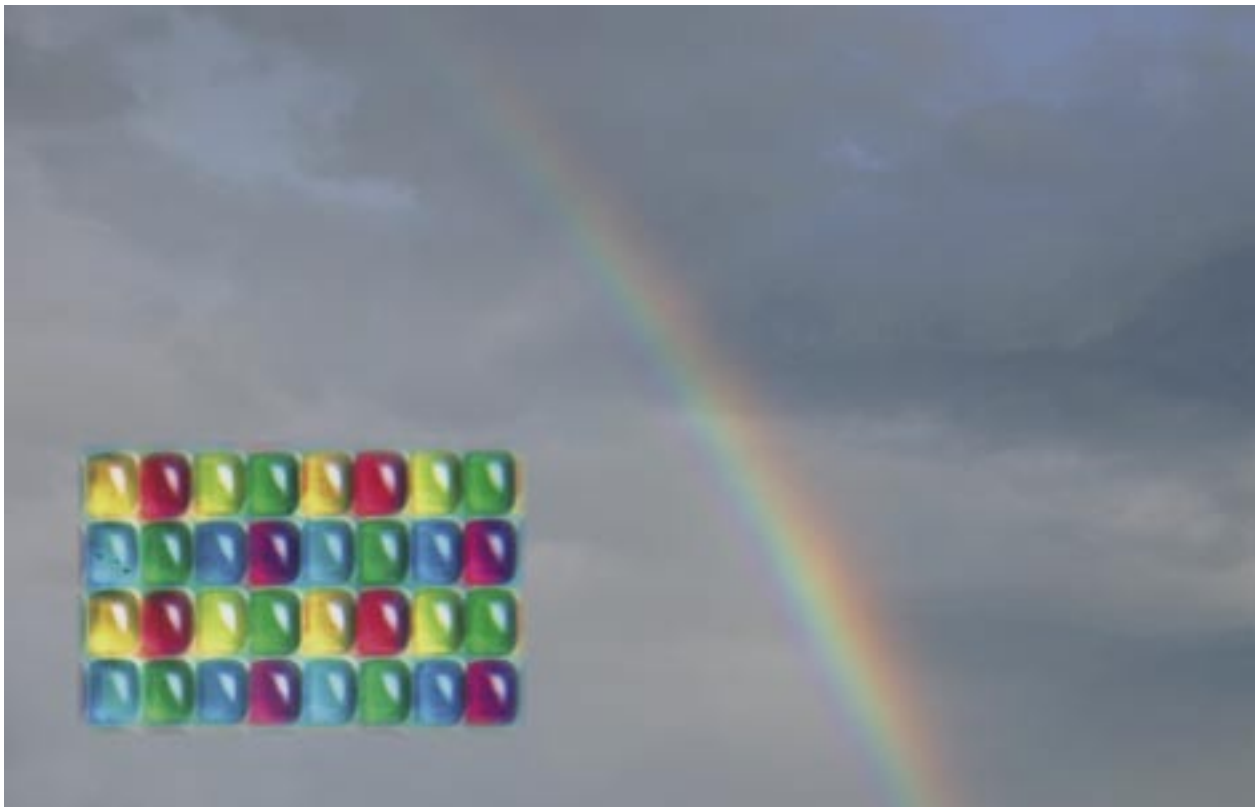
Im Folgenden wurden mit großer Akribie zahlreiche Spektren der neuen Lichtstandards für alle möglichen Temperaturen bestimmt. Da nun genormtes Licht zur Verfügung stand, ließen sich auch die Ergebnisse verschiedener Laboratorien zusammen führen.

Zwei schöne Katastrophen

Die schönen Kurven verlangten nach einer theoretischen Deutung, die sich als unerwartet schwierig erwies. Ein Versuch, das Rayleigh-Jeans-Gesetz, beschrieb eine Kurve, die sich gut an den roten Teil der beobachteten Spektralkurven anschmiegte, in Richtung Blau aber unendliche Intensitäten vorhersagte. Das Wiensche Gesetz beschrieb halbwegs genau den blauen Teil der Spektren, entschwand aber Richtung Rot ebenfalls im Unendlichen. Hätten diese „Gesetze“ eine Entsprechung in der Natur haben können, die Laboratorien wären in Flammen aufgegangen. Die Gelehrten ironisierten ihr Scheitern mit den Begriffen „Ultraviolett-Katastrophe“ und „Infrarot-Katastrophe“. Im Getriebe der klassischen Physik begann es zu knirschen.

Ein Akt der Verzweiflung

Eigentlich hatte Heinrich Hertz Direktor der Berliner Physikalisch-Technische(n) Reichsanstalt werden sollen, den aber zog es nach Bonn. Also kam Max Planck als zweiter auf der Liste nach Berlin. Für einen umstürzlerischen Entdecker war er mit 42 Jahren eigentlich schon zu alt, indes: Max Planck fand Mitte Oktober 1900 durch bloßes Probieren eine Gleichung, die die Spektren gut zu beschreiben schien und teilte das am 19. Oktober der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin mit. Planck notierte: „Am Morgen des nächsten Tages suchte mich der Kollege Rubens auf und erzählte, dass er nach dem Schluss der Sitzung noch in der nämlichen Nacht meine Formel mit seinen Messungsdaten genau verglichen und überall eine befriedigende Übereinstimmung gefunden habe.“ Nur eines störte: In Plancks Formel steckte in der Gestalt eines kleinen „h“ eine Annahme, die aller bisherigen Physik widersprach: In den Hohlraumstrahlern wurde das Licht offenbar nicht kontinuierlich sondern in Portionen, „Quanten“, gehandelt. Planck nannte seine eigene Deutung einen „Akt der Verzweiflung“. Viele Kollegen teilten das Gefühl. Aber das Quantum war ein sehr ergiebiges Saatkorn, aus dem ein Baum der Erkenntnis mit vielen Zweigen und Früchten heranwuchs, mathematischen Schemata, die teils ganz unterschiedlich aussahen aber doch gleichermaßen genau den Mikrokosmos beschrieben, soweit der sich berechnen lässt.



Regenbogen mit Digitalkamera. Der Regenbogen bittet förmlich darum, im Wellenbild gedeutet zu werden, es wäre so einleuchtend ... aber nein: Wenn die Digitalkamera das Bild registriert, arbeiten die Pixel im Partikelbild, nach Einsteins Photoeffekt.

Einstein und das Photon

Die Vorstellung, Energie werde im Mikrokosmos als Päckchen, Quanten, gehandelt, erfuhr durch eine Veröffentlichung Albert Einsteins von 1905 über den „photoelektrischen Effekt“ Unterstützung. Wenn eine Metallplatte im Vakuum mit Licht beschienen wird, lösen sich Elektronen von ihr ab, deren Zahl von der Intensität der Strahlung, deren Energie aber nur von deren Frequenz, ihrer Farbe, abhängt. Einstein zeigte, dass sich der Effekt zwanglos erklären lässt, wenn man sich Licht als einen Strom von Quanten, Photonen, vorstellt. Bis dahin herrschte die Auffassung von Licht als kontinuierlicher Welle vor. Die beiden Bilder leben heute noch nebeneinander, obwohl sie sich gegenseitig ausschließen.

Niels Bohr

Dem dänischen Physiker Niels Bohr gelang 1913 die quantenmechanische Interpretation des Spektrums des Wasserstoffatoms. Das „Bohrsche Atommodell“ stellte sich als bald als unzulänglich heraus, aber ein Anfang war gemacht. Und Bohr gewann die Deutungshoheit, was den philosophischen Hintergrund der Quantenmechanik anging. Seine Denkungsart, die Einstein mit der Frage „Ist der Mond auch da, wenn niemand hinguckt?“ bespöttelte - ging als „Kopenhagener Deutung“ in die Geschichte ein. Ihre Eigentümlichkeiten werden gelegentlich auf den Umstand zurück geführt, dass eine große dänische Brauerei Bohr ein Haus auf ihrem Gelände zur Verfügung gestellt hatte. Aber Bohr ist unverändert aktuell.

Albert Einstein und Niels Bohr, Freunde und Kontrahenten, auf dem Weg zur Solvay-Konferenz.



Louis-Victor de Broglie, Erwin Schrödinger

1924 schlug der französische Edelmann Louis-Victor de Broglie vor, dass die Partikel-Welle-Dualität prinzipiell allen Objekten anhaftet, drei Jahre später wurde die Aussage für Elektronen bestätigt. Heute sind Experimente in der Vorbereitung, die die Wellennatur von Viren belegen wollen und werden. Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger baute de Broglies



Louis-Victor de Broglie, Mann von Adel, schrieb bewegten Teilchen Welleneigenschaften zu.

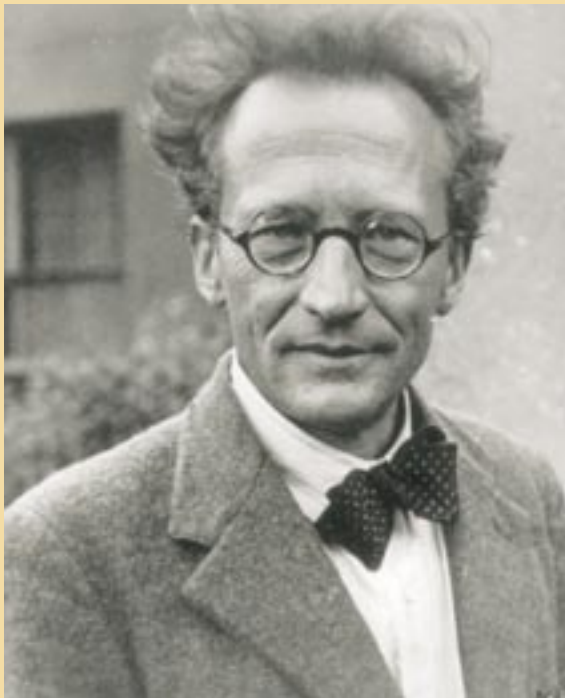
Bild zu einer Wellenmechanik aus, die der Matrizenmechanik Werner Heisenbergs im Ergebnis ähnlich, aber wohl eleganter war. Schrödingers Gleichung $H\Psi = E\Psi$ gilt heute noch als der Schlüssel zur Quantenwelt. Ψ ist die so genannte Wellenfunktion, wenn sie ein Wasserstoff-Atom beschreibt, steckt in ihr die Information, wo dessen Elektron bevorzugt zu finden ist (s.a. „Quantenzauberei“). H steht im Falle des Atoms für die Einschränkung, die der Bewegung eines Elektrons dadurch entgegengesetzt wird, dass es von einem Atomkern angezogen wird. E wiederum steht für die Energiezustände, die das Wasserstoffatom annehmen kann. Ein - wie üblich hinkender - Vergleich wäre der mit einer Trompete: H , die Einschränkung, stünde hier für Bauform und Status der Ventile, das Metall; Ψ für die Luftdichteverteilung in der Trompete und E für das Tonspektrum, das man mit ihr erzeugen kann.

Heisenberg und Schrödinger waren nicht immer nett zueinander, sondern fanden ihre Ideen wechselseitig „schrecklich“ oder „abstoßend“ - nicht selten bei berühmten Leuten.

Schrödingers Katze

Zu den Eigentümlichkeiten der Bohrschen Philosophie gehört, dass Eigenschaften der Gegenstände ihres Vertrauens unter Umständen als bloße Potenz gelten können, solange

niemand hinsieht. Wenn etwa der Spin eines Elektrons, seine Eigendrehung, die es wie eine Kompassnadel magnetisch macht, in einem äußeren Magnetfeld zwei Werte annehmen kann, ist das Elektron vor der Messung als eine Überlagerung der beiden Werte zu denken, als Superposition. Erst nach der Messung liegt der Spin-Wert des Atoms fest. Da sich nun keine scharfe Grenze zwischen Messobjekt und Messapparatur ziehen lässt, kann argumentiert werden, dass die Unbestimmt-



Erwin Schrödinger, Konstrukteur der Wellenfunktion.

heit des Messobjektes ansteckend wirkt und die Messapparatur gleichermaßen unbestimmt sein lässt, das Inventarschild eingeschlossen. Damit nicht genug: Die Quantenzittrigkeit müsste auch noch dem Wissenschaftler zuteil werden und eigentlich erst enden, wenn sich dessen Bewusstsein ein endgültiges Bild gemacht hat. Um zu zeigen, wie unerhört Bohrs Vorstellungen doch wohl waren, sperrte Schrödinger (rein gedanklich) eine Katze in eine Kiste, zusammen mit einer Mordmaschine - Deckel zu -, die loslegte oder auch nicht, wenn nach einer Weile zwei zunächst unbestimmte

Eigenschaften eines quantenmechanischen Zufallsgenerators so oder so bestimmt worden waren. Dann war, solange der Deckel zu blieb, die Katze in der Kiste als tot und lebendig zugleich zu denken - absurd. Das Tier war erst erlöst, froh oder tot, wenn jemand die Kiste öffnete und hinsah. Der Begriff der Superposition hat die Katzenattacke dennoch unbeschadet überstanden.

Das EPR-Paradoxon

Einstein, ebenfalls unzufrieden mit Bohr, ersann mit den Kollegen Podolski und Rosen ein nach den Beteiligten EPR genanntes Gedankenexperiment, das sich - aktualisiert und popularisiert - mit einem Sockengleichnis beschreiben lässt. Die Einzelsocken eines quantenmechanisch bestimmten Sockenpaares etwa wären vor einer Messung weder links- noch rechtsfüßig zu denken, die Paarsocken schwebten vielmehr in einem Links/Rechts-Überlagerungszustand. Ist eine Socke aber als links bestimmt, muss die andere rechts sein, weil Sockenpaare, wenigstens neue, immer in einer Links/Rechts-Kombination existieren. EPR schlugen nun anstelle der Socken ein sockenpaarartig gekoppeltes Photonenpaar vor, dessen Einzelphotonen nach Art dieser Teilchen lichtschnell auseinander stoben, und bestimmte man die Eigenschaft des einen Photons hier, war auch die Eigenschaft des anderen dort bestimmt. „Dort“ konnte aber schon weit weg sein, und wer oder was dem entfernten, fliehenden Photon eine Eigenschaft hätte aufdrücken wollen, hätte schneller als Licht sein müssen. Das aber hätte gegen Einsteins Spezielle Relativitätstheorie verstoßen, nach der keine Wirkung schneller als Licht sein kann, und das war ein Pfund, mit dem sich wuchern ließ. „Spukhafte Fernwirkungen“, knurrte Einstein, und Bohr knickte ein. Aber nicht lange, es war schließlich Bohr, der die meisten Wissenschaftler an seiner Seite versammeln konnte. Wie John Bell später zeigte, wohl zu Unrecht.

Bell, Tierfreund und Vegetarier, nahm auch die Mordmaschine aus Schrödingers Katzenkiste und ersetzte sie durch einen Futterautomaten. Wieder gedanklich. Und Einstein bekam ebenfalls sein Fett weg: Spukhafte Fernwirkungen sind offenbar real.

John Bell

John Stewart Bell, 1928 in Belfast geboren, hatte sich beim Forschungszentrum CERN nahe Genf mit bedeutenden Beiträgen zur Elementarteilchentheorie und Beschleunigertechnik einen Namen gemacht, als er 1963 Gelegenheit bekam, sein „Hobby“, die Quantentheorie, tief und lange zu bedenken. Das wohl wichtigste Ergebnis war die so genannte „Bellsche



John Bell in seinem Büro bei CERN, schuf eine berühmte Ungleichung.

Ungleichung“, die etwas über Messungen an Teilchenpaaren wie den beschriebenen EPR-Socken aussagt und mit klarer, auf Alltagserfahrungen gründender Logik hergeleitet worden war (Bell arbeitete vorzugsweise mit den Socken seines Kollegen Professor Reinhold Bertlmann). Es zeigte sich, dass die klare Logik andere Vorhersagen als die Quantentheorie machte („klare Logik“ der Art: wenn ein Brötchen 20 Cent kostet, kosten einhundert pro Stück nicht mehr, eher weniger, jedenfalls beim gleichen Bäcker, in einer gerechten Welt). Die Bellsche Ungleichung ist eine sehr elementare Aussage, die sich experimentell überprüfen ließ, was denn auch umgehend geschah. Zu den bekanntesten Experimenten zählen die von Alain Aspect und Mitarbeitern an der Universität Paris Sud. An zwei ein paar Meter auseinander liegenden Messplätzen wurden Lichtteilchen, Photonen, die als Paar mit unbe-

stimmter Polarisierung entstanden waren, nach der Passage durch Polarisationsfilter gezählt, und zwar so, dass sich die Messplätze über die jeweils gewählten Stellungen der Polarisationsfilter nicht hätten verständigen können. Die Zahlen bestätigten die Quantentheorie, die nun die Deutung zuließ, ja, nahe legte, dass die von Einstein für spukhaft befundene Fernwirkung real war. Oder, wie es Philippe Grangier, der dabei war, sagte: „Die beiden Photonen bilden ein unteilbares Ganzes.“ Sie sind verschränkt, englisch: entangled. Verschränkungen sind ein weiterer Schlüsselbegriff in der Quanteninformationstechnologie. Zur Nachrichtenübermittlung schneller als Licht taugen die Verschränkungen aber nicht.

Der experimentelle Test quantentheoretischer Grundlagen galt in den achtziger Jahren noch als ziemliches Sakrileg. Als Alain Aspect John Bell bei CERN sagte, was er vorhabe, fragte der als erstes „Haben Sie eine Festanstellung?“

Frage an Philippe Grangier: Kurz nach dem Urknall waren ja mal alle Teilchen miteinander verschränkt, dann müsste ja heute noch Alles mit Allem zusammen hängen? A: Kann man sagen, man muss aber auch sagen, dass die Verschränkungen außerordentlich fragil sind, ein Fingerabdruck nur auf einer Linse und sie sind perdü.

Heute gilt die Nicht-Lokalität als gesichert. Die erste nicht-lokale Banküberweisung ist geglückt. An lokalen Verbindlichkeiten freilich ändert das nichts.

Es gibt viele namhafte Wissenschaftler, die in John Bell einen der größten Physiker des 20. Jahrhunderts sehen und sogar einen Vergleich mit Kopernikus für angemessen halten. Henry Stapp vom Lawrence Berkeley National Laboratory, Kalifornien, zählt Bells Arbeiten zur Quantentheorie zu den wichtigsten Entdeckungen der Wissenschaft mit großem Einfluss auf die kommende Quanteninformationstechnologie. Obwohl Bell in gewisser Weise Einstein widerlegt und Bohr bestätigt hat, war er ein Anhänger Einsteins: „Ich spürte, dass Einstein in dieser Angelegenheit (EPR) Bohr geradezu erdrückend überlegen war.“ John Bell war für den Nobelpreis vorgeschlagen worden, und er hätte ihn wohl auch bekommen, wäre er nicht 1990 viel zu früh verstorben.

Quantenzauberei

Unsere Welt – Flamingos, Felsen, Pflaumenkuchen – besteht aus Atomen. Das einfachste und zugleich häufigste aller Atome ist das Wasserstoff-Atom. Ein winziger Kern wird von einem einzelnen Elektron begleitet, wenn es dabei Kondensstreifen hinterlassen könnte, würde im einfachsten Fall das Bild einer Kugel Zuckerwatte entstehen.

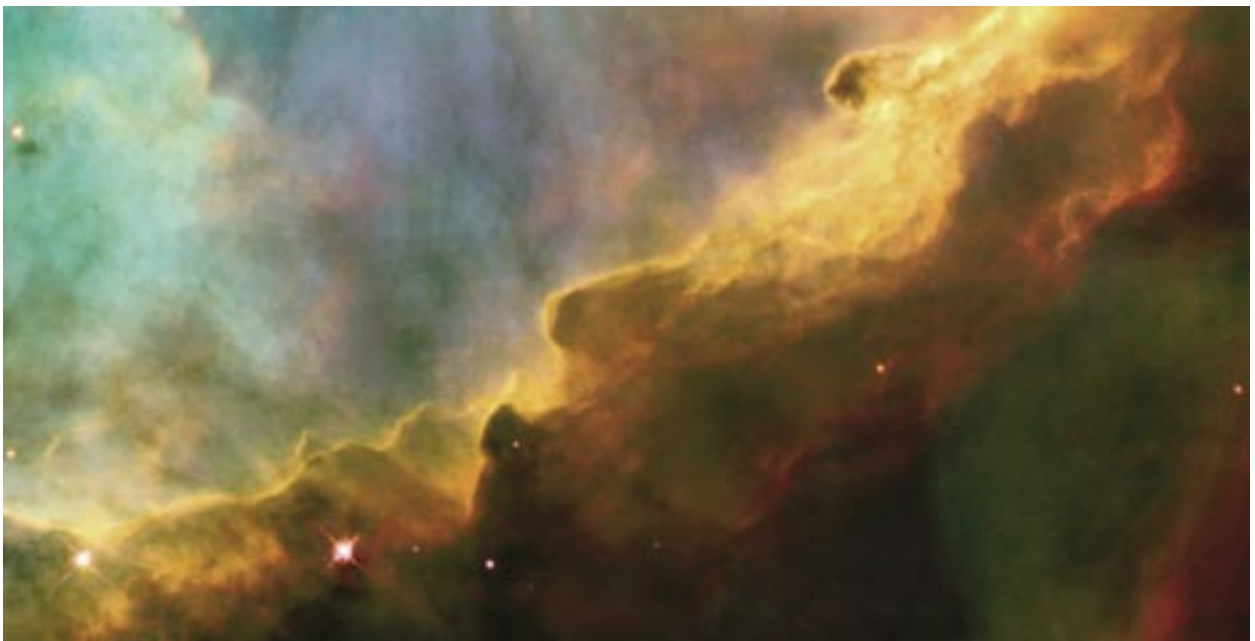
Dieses Bild aber könnte keine Betrachter haben, es ist viel zu filigran, Licht würde es zerstören. Zum Glück gibt es heute Computer, die das Elektronengewusel bildhaft darstellen können. Zu den eindrucksvollsten Bildern gehören die des Mathematikers Bernd Thaller von der Universität Graz. Ihre Grundlage ist die Schrödinger-Gleichung, ein Grundelement der Beschreibung des Nanokosmos. Man sieht: Selbst das einfachste aller Atome ist außerordentlich komplex. Dargestellt sind – um im Zuckerwatttebild zu bleiben – die am dichtesten gewebten Teile des Elektronenkleides eines Wasserstoff-

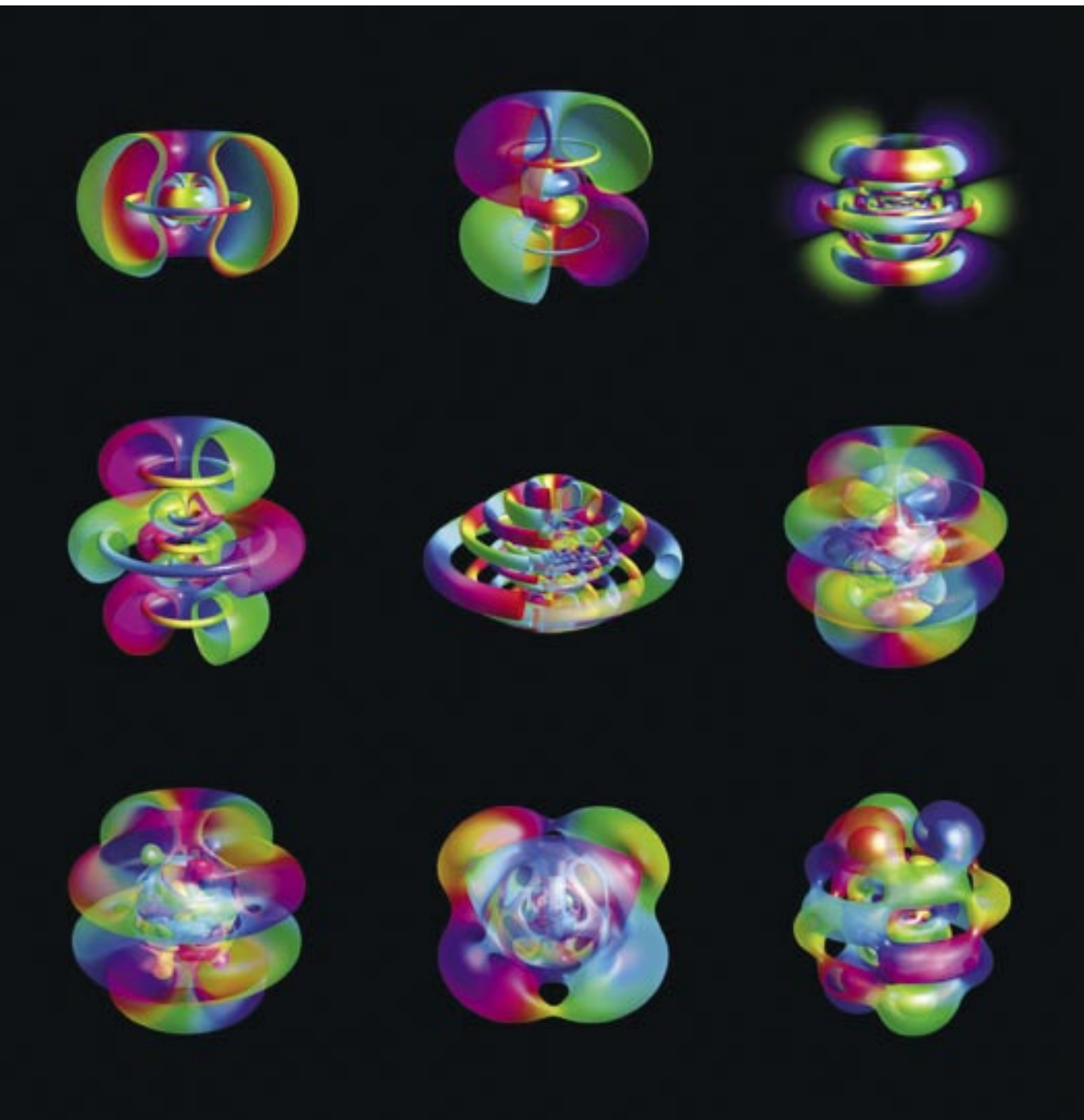
Unten: Wolken angeregten Wasserstoffs im Sternbild Orion.

atoms, abhängig vom „Anregungszustand“ des Elektronenkleides. Das kann nämlich ganz verschiedene Formen annehmen. Jede Form ist mit einer charakteristischen Energie verbunden. Wenn es etwa in einer Kerzenflamme mit einer anderen Wasserstoffatomhülle zusammenstößt – Wärme ist Bewegung –, kann es einen Zustand höherer Energie einnehmen. Fällt es in den müderen Zustand zurück, wird die Energiedifferenz in der Form eines Lichtquants wieder zurückgezahlt. Deshalb, unter anderem, leuchtet die Kerze.

Wird reiner Wasserstoff in einer Leuchtröhre ange-regt, enthüllt die Zerlegung des entstehenden Lichtes mit einem Prisma in seine Einzelfarben, dass die Verhältnisse im Nanokosmos streckenweise streng geordnet sind, die Spektrallinien erscheinen im Normalfall immer bei den gleichen Energiewerten. Und das überall im Universum, weshalb man auch sagen kann, aus welchen Elementen ferne Sterne bestehen. Und aus Abweichungen von der Norm lässt sich ablesen, welche Geschwindigkeiten ferne Galaxien haben. Das führte zu der Idee vom Urknall. Die wunderbaren Strukturen im Atom haben also auch kosmologische Folgen.

Rechts: Thaller-Modelle verschiedener Anregungszustände eines Wasserstoff-Atoms. Die Abfolge der Anregungszustände folgt hier allein ästhetischen Regeln.



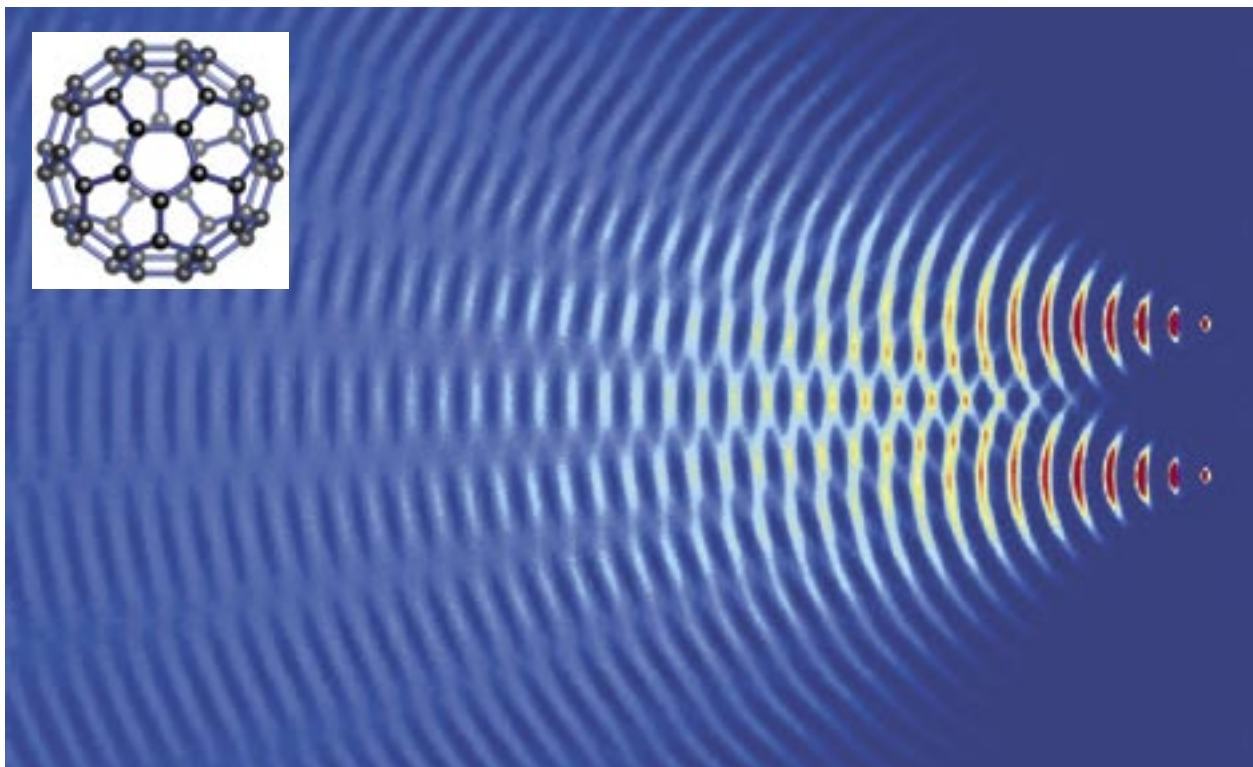


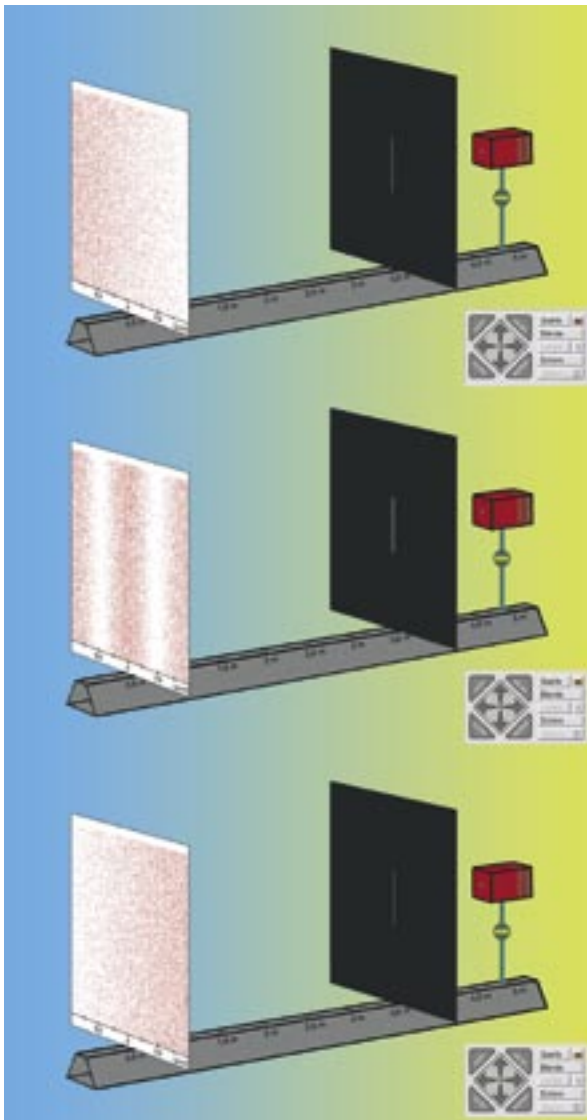
Quantenspek am Doppelspalt

Die Evolution hat den menschlichen Verstand aus guten Gründen auf Äpfel und anderes Essbare konzentriert, weshalb er leicht übersieht, dass schon viel einfachere Gegebenheiten wunderbar, zumindest schwer verständlich sind. Zwei kleine Schlitz in einem schwarzen Karton etwa, die Fachliteratur kennt sie als „Doppelspalt“. David Deutsch, gewichtiger Theoretiker des Quantencomputers, nennt das dazu gehörende Experiment „das mit Abstand Verrückteste, das ich kenne.“ Die Universität Bonn hat eine nette Webseite dazu: <http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/schroedinger/klicker.html>. Der Bonner Doppelspalt besteht aus zwei hellen Streifen auf einem schwarzen Dia, 0,1 mm breit und 0,25 mm auseinander. Wenn man Licht auf den Doppelspalt lenkt, registriert die Kamera dahinter ein Streifenmuster; die Lichtteilchen, Photonen, haben sich offenbar wie Wellen verhalten und einander überlagert. Nur: Das Streifenmuster entsteht ganz allmählich auch dann, wenn einzelne Lichtteilchen hintereinander den Doppelspalt passieren, sich also gar nicht überlagert haben

können. Interferieren Photonen mit sich selbst? Registriert werden sie jedenfalls als Teilchen, was ein an die Kamera angeschlossener Lautsprecher durch gleichförmiges Klicken bestätigt. Mathematisch ist die altbekannte Dualität des Photons kein Problem, für seine hintergründige philosophische Deutung aber nehmen etwa Anhänger der Vielweltheorie Welten ohne Zahl in Anspruch. Bei der pragmatischen Methode aber könne man, versichern die Theoretiker glaubhaft, nicht bleiben, dagegen stünde Bertrand Russells Huhn. Die gedankliche Konstruktion des berühmten englischen Mathematikers und Philosophen beschreibt ein argloses Tier, das sich der Fürsorge des Futter bringenden Farmers erfreut, daraus schließt, dass die stete Versorgung eine Gesetzmäßigkeit sei, bis dieser Irrtum in der Tiefkühltruhe endet. Man müsse sich schon um eine Klärung des Hintergrundes, um Sinn bemühen.

Zwei Kugelwellenquellen erzeugen ein Interferenzmuster, das auch dann auftreten kann, wenn ausgewiesene Teilchen wie Buckyballs (Insert) nacheinander Schlitzze passieren.

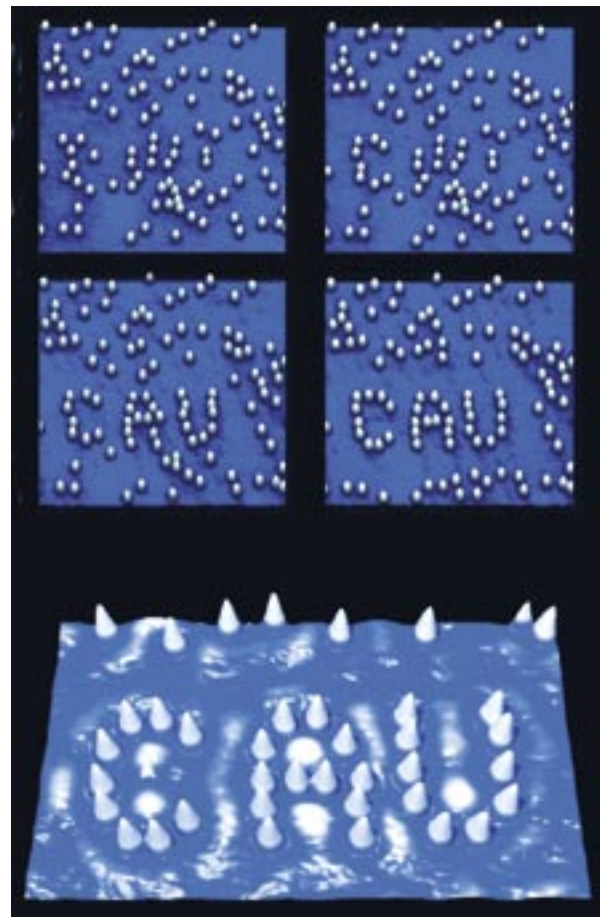




Doppelspaltexperiment mit Lichtteilchen im Computersimulationsprogramm; bei zwei offenen Spalten (Mitte) offenbart der Schirm Interferenzen, die sich zwanglos als Wellenerscheinung (links) deuten lassen. Bei nur einem geöffneten Spalt zeigen die Photonen lediglich ihren Teilchencharakter. Eine sehr gute Webseite dazu ist <http://www.quantenphysik-schule.de/doppelspalt.htm>, sie führt auch auf das instruktive Simulationsprogramm von Klaus Muthsam.

Während man Licht noch etwas Esoterik zugestehen mag: Mittlerweile haben Experimentalphysiker auch Fußballmoleküle, Buckyballs, eines nach dem anderen durch Doppelspalte gezwängt und ein Interferenzmuster erhalten. Die Moleküle müssten sich nach konventionellen Vorstellungen also geteilt haben - ohne sich teilen zu können. Mehr noch: Wer bei Buckyballs oder Photonen versucht, herauszufinden, durch welchen Spalt das jeweilige Teilchen gekommen sein mag, zerstört das Interferenzmuster, egal, wie subtil der Versuch auch sein mag.

An der Universität Kiel werden Manganatome zum Logo der Christian Albrechts Universität zusammen geschoben. Im „C“ ist der Wellencharakter darin eingesperrter Elektronen zu erkennen, sie bilden in den Brennpunkten der Teilellipse Häufungspunkte - analog zu Licht, das in einem Hohlspiegel konzentriert wird.



Die Stunde der Experimentatoren

Die Verbissenheit, mit der um die Deutung der Quantentheorie gestritten wurde, hatte natürlich auch mit den mangelhaften Möglichkeiten der Pioniere des Feldes zu tun, ihre Gedankenexperimente in die Tat umzusetzen. Heute steht Experimentalphysikern ein Instrumentarium zur Verfügung, von dessen Feinheit und Vielfalt die Begründer der Quantentheorie nur hätten träumen können.

Der Transistor wurde erfunden; die Erfindung brachte Computer mit phantastischen Leistungen zu zivilen Preisen hervor, die heute quantentheoretische Eigenheiten in Bilder umsetzen. Mit dem Laser kam eine wunderbare Lichtquelle, die fundamentale Eigenschaften der Wirklichkeit auszu-leuchten begann. Der Laser beruht auf quantenmechanischen Effekten, zu deren Erklärung Einstein maßgeblich beitrug. Verrückt, aber wahr: Mit Laserlicht lässt sich Materie sehr dicht an den absoluten Temperaturnullpunkt herunter kühlen, dann beginnt sie bizarre Eigenschaften zu zeigen: Ganze Wolken unabhängiger Atome beginnen, sich zu einem einzigen Ganzen zusammen zu schließen, einem „Bose-Einstein-Kondensat“ – 1925 quantentheoretisch von Satyendra Nath Bose und Albert Einstein vorher gesagt, heute experimentell bestätigt. Auch die Beschleuniger-Technologie, wie sie bei CERN gepflegt wird, begann etwas für die Festkörperphysik sehr Wichtiges abzuwerfen: Techniken, mit denen sich Nichts, genauer: perfekte Vakua, herstellen ließen. Die Halbleiterindustrie entwickelte Methoden, Verunreinigungen ihrer Materialien an die zehnte Stelle hinter dem Komma zu verbannen. Zugleich wurden lithographische Verfahren entwickelt, feinste Strukturen, das Millionste eines Millimeters, in Silizium und anderen Halbleitern zu erzeugen.

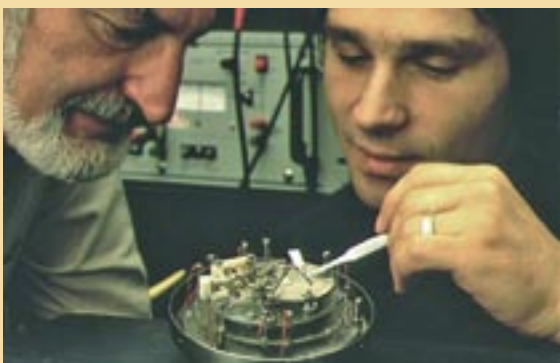
In den achtziger Jahren wurde der deutschsprachige Raum von einer Serie von Nobelpreisen beglückt, die fast alle mit Quantentheorie zu tun hatten: Den Anfang machte 1985 Klaus von Klitzing, der für die Entdeckung des Quantenhalleffektes ausgezeichnet wurde, ihm folgten 1986 Gerd Binnig und Heinrich Rohrer, deren Rastertunnelmikroskop die erste



Am fünften Februar 1980 teilte der ehemalige Werkstudent der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig (PTB) Klaus von Klitzing seinem früheren Arbeitgeber mit, er habe an seinem Messplatz in Grenoble Experimente mit starken Magnetfeldern durchgeführt, die die sehr genaue Bestimmung der Fundamentalkonstanten h/e^2 gestatteten. Einen Monat später fand bei der PTB eine internationale Tagung statt, auf der der neue „Quantenhalleffekt“ als – nach dem Josephson-Effekt – zweiter makroskopischer Quanteneffekt zur Sensation geriet.

Klitzings Entdeckung wurde auch ein Triumph der Metrologie, der Kunst des hochgenauen Messens, in diesem Fall des elektrischen Widerstandes: Seit Januar 1990 ist der Quantenhalleffekt weltweit die Grundlage für die Festlegung der Einheit „Ohm“, das nun hunderttausendfach genauer als mit den früher üblichen Spulenstandards bestimmt werden kann. Dabei ruht das Vertrauen in den Quantenhalleffekt allein auf experimentellen Ergebnissen, eine geschlossene quantitative theoretische Deutung existiert bis heute nicht. Die Entdeckung des Effektes zeigt, wie wichtig das tatsächliche Experimentieren ist, und dass noch Vieles an neuen Phänomenen auf Entdeckung warten mag.

einer Reihe von Rastersonden war, mit denen sich Atome abbilden und herumschieben lassen. Ernst Ruska war der Dritte im Bunde, er hatte die Elektronenmikroskopie entwickelt. Im nächsten Jahr folgten Georg Bednorz und Alex Müller, die einen keramischen Hochtemperatursupraleiter gefunden hat-



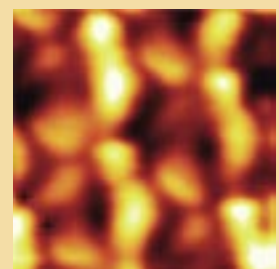
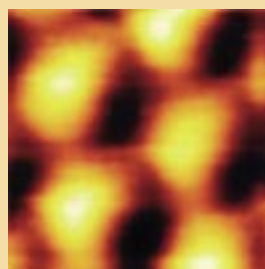
Pioniere im Nanokosmos:

Ernst Ruska (1906-1988), Gerd Binnig und Heinrich Rohrer erhielten 1986 den Physik-Nobelpreis für die Entwicklung von Werkzeugen, die den Nanokosmos erschlossen haben, das schon früh entwickelte Elektronenmikroskop (Ernst Ruska) und das ganz neue Rastertunnelmikroskop. Aus dem konzeptuellen Durchbruch Binnigs und Rohrsers ist eine große Zahl von Rastersonden hervorgegangen, darunter das Rasterkraftmikroskop, das mittlerweile sogar Feinheiten in der Elektronenhülle der Atome ausmachen kann.

ten. Wolfgang Paul erfreute sich 1989 zusammen mit Georg Dehmelt, USA, eines Preises für die Entwicklung von „Fallen“, mit denen sich einzelne Atome, selbst Elektronen isoliert in der Schwebe halten lassen. Im Jahr 2000 war Herbert Krömer wegen der Entwicklung schneller Halbleiter dabei und 2001 Wolfgang Ketterle wegen eingehender Studien an Bose-Einstein-Kondensaten. Die Liste der preisgekrönten Themen zeigt überdies, dass die Dominanz der Hochenergiephysik zu Ende gegangen war und sich die klassische Atomphysik, Optik und Festkörperphysik mit ihren Quanteneffekten neuer Beliebtheit erfreute. Sehr zu Recht, wenn Effekte wie der am Forschungszentrum Jülich gefundene Riesenmagnetowiderstand, GMR, so Bemerkenswertes wie Gigabyte-Festplatten im Format einer Euro-Münze zur Folge haben. Kurzum: Die Instrumente sind geschärft, die Zeit wird reif für den Quantencomputer.

Frage an Uri Meirav, Experimentalphysiker am Weizmann-Institut, Rehovot, Israel: Wenn Sie forschen, haben Sie dann immer die Quantentheorie im Kopf? A: Die Quantentheorie ist so abstrakt, dass Vorhersagen abzuleiten sehr schwierig ist. Hinterher kann man immer sagen, klar, kann man quantentheoretisch verstehen. Wenn man aber nur von den Grundregeln der Quantentheorie ausgeht, kommt man nicht weit, man muss wirklich etwas Praktisches unternehmen, Experimentieren, Realisieren. Wenn wir unendlich smart wären, müsste man keine Experimente machen, wir hätten eine Theorie und aus der würde alles folgen, aber so ist das eben nicht.

Links: Rastertunnelmikroskopaufnahme der Oberfläche eines Wolfram-Kristalls. Rechts: Gleicher Maßstab, gleicher Kristall, das rasterkraftmikroskopische Bild gibt mit 77 pm Auflösung feinste Strukturen im Inneren der Wolframotope wieder. Bildgröße 500 x 500 pm². „pm“ steht für ein Picometer, den tausendsten Teil eines Nanometers.



Der Quantencomputer im Prinzip

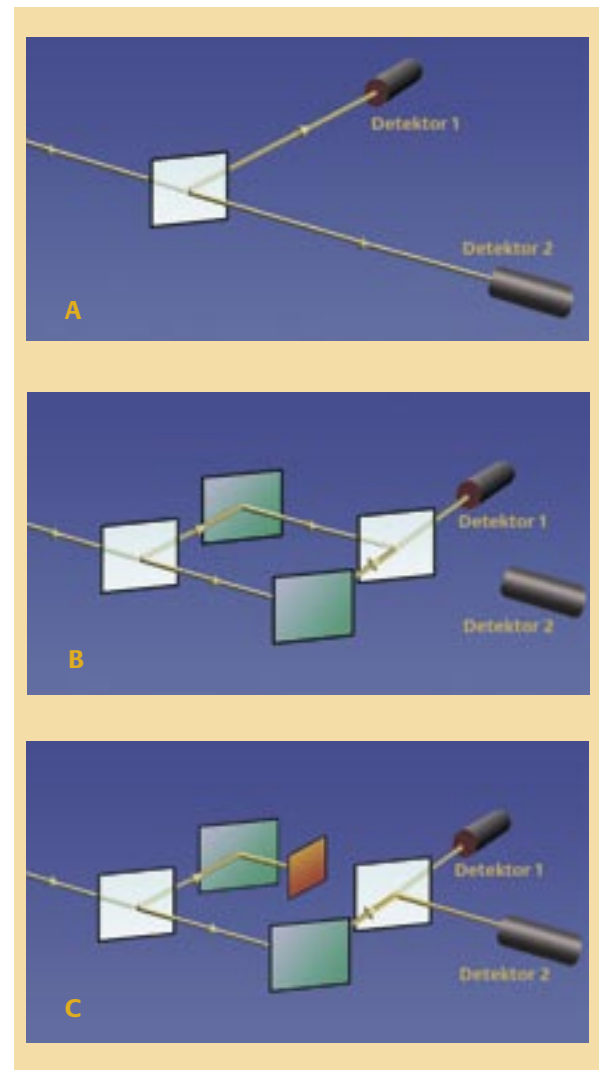
Ein wesentlicher Teil der Idee vom Quantencomputer und seinen Anwendungen ist im englischen Oxford zur Welt gekommen, woran die „Harry Potter“-Atmosphäre der Stadt durchaus beteiligt gewesen sein mag.

Einer der Beteiligten, Artur Ekert, über die Anfänge: „Vieles auf dem Gebiet hat hier in Oxford begonnen, und David Deutsch war der Erste, der das Rechnen mit Quanten formalisiert hat, das wurde damals für Wolkenkuckucksheim-Forschung gehalten. Jetzt sehen wir: Quantengeräte sind da, etwa für Verschlüsselungstechniken, wir wissen ziemlich gut, wie wir Quantencomputer bauen können, und das ganze Feld blüht, gedeiht und wächst rapide.“

Artur Ekert hatte Aufsehen mit substantiierten Hinweisen erregt, dass Quanteninformationstechniken einerseits jeden konventionellen Verschlüsselungscode knacken, andererseits absolut sichere Nachrichtenkanäle schaffen können.

Quantenmechanische Phänomene sind nichts Exotisches, wäre die Welt nicht quantisiert, würde die Materie in sich zusammenfallen, kein Haus, kein Apfelbaum hätte Bestand. Die Eigentümlichkeit des Quantums teilt sich Ungeschulten allerdings nur schwer mit, eines der hilfreichsten Geräte hierzu ist das Mach-Zehnder-Interferometer, ein altes, ehrwürdiges Instrument, das es freilich in sich hat.

Halbdurchlässige Spiegel sind nichts Magisches, obwohl sie in der professionellen Zauberei sehr hilfreich sind. Die in der Wissenschaft verwendeten halbdurchlässigen Spiegel lassen sich präzise so fertigen, dass sie, vom Zufall gesteuert, die Hälfte der auftreffenden Lichtteilchen, Photonen, reflektieren und die andere Hälfte durchlassen. Zwei hinter und neben einem solchen Spiegel aufgestellte Photodetektoren registrieren denn auch jeweils die Hälfte des ursprünglichen Lichtteilchenstroms, die Analyse ihrer Signale zeigt zudem, dass sich die Photonen am Spiegel nicht etwa teilen, jeder Detektor bekommt ganze Portionen. Die Sache wird spannend, wenn der halbdurchlässige Spiegel in der dargestellten Weise (B) um einen weiteren seiner Art und zwei Vollspiegel ergänzt wird: Detektor 2 bekommt dann im Experiment überhaupt kein Licht, obwohl nach der Fifty-Fifty-Regel für die Detektoren 1 und 2 jeweils die Hälfte des Gesamtlichtes zu erwarten wäre. Das Ganze funktioniert auch, wenn die Lichtquanten einzeln nacheinander auf die Strecke geschickt werden. Die



beiden Detektoren werden kurioserweise wieder Fifty-Fifty bedient, wenn der obere Strahlengang wie in (C) blockiert wird. Man darf sich fragen: Woher weiß ein einzelnes, einsames Photon, das in der B-Konfiguration über den unteren Pfad am zweiten halbdurchlässigen Spiegel angekommen ist, ob der erste Pfad blockiert ist? Nur dann hat es ja – das hat das Experiment gezeigt – die Möglichkeit, auch Detektor 2 zu besuchen. Die von den Quantencomputerleuten heute gern ins Feld geführte Antwort: Das Photon hat nach dem Erreichen des ersten halbdurchlässigen Spiegels – ohne sich zu teilen – beide möglichen Pfade besucht, sich im Zustand

einer Überlagerung, Superposition, befunden, die sich über die ganze Apparatur erstreckt hat.

Diese Antwort wird noch delikater, wenn man sich die Spiegel richtig großzügig, etwa an den Ecken eines Fußballfeldes, aufgestellt denkt.

Es ist nun nicht nur möglich, Photonen in eine Überlagerung zu treiben, es geht auch mit Atomen, Atomgruppen, Molekülen, Riesenmolekülen, in Kristalle geätzten Zeichen – die Liste wächst von Jahr zu Jahr. Und es müssen nicht nur zwei Zustände sein, auf die sich geschickt arrangierte Materie verteilen kann, je nach Arrangement sollten auch sehr viele realisierbar sein. Und ordnet man jedem Zustand ein Bit zu – oder besser gesagt ein Qubit, weil es seine Existenz der Quantenmechanik verdankt – wird die Basis für das Rechnen mit Quanteneffekten erkennbar. Artur Ekert erklärt:

Ein Grund, weshalb Quantencomputer leistungsfähiger sind, ist der, dass sie das Quantenphänomen der Superposition, der Überlagerung, nutzen. Anders als klassische Objekte können Quantenobjekte in mehreren Zuständen zugleich existieren. Wenn wir also ein klassisches Objekt wie diese Kaffeetasse hier auf dem Tisch haben, hat die immer nur eine Position. Ich verschiebe sie, und sie hat eine neue Position, verschiebe ... und so fort. In jedem Moment hat die Tasse nur eine Position. Aber in der Quantenmechanik ist es ohne weiteres möglich, dass alle diese Positionen zum gleichen Zeitpunkt koexistieren. Und man kann jeder Position eine logische Bedeutung zumessen, sie etwa für eine Zahl stehen lassen. Und dann gibt es die Situation, dass alle diese Zahlen in einer Quantensuperposition zugleich existieren. Das ist wie eine massive parallele Speicherung in einem Stück Hardware. Man braucht nicht viele verschiedene Teile, nur ein Stück in einer Superposition. Und die Essenz der Quantenrechnung ist dann die, dass man die Superposition stabilisiert, zum Rechnen nutzt und am Ende die richtigen Antworten durch Quanteninterferenz verstärkt.

Wenn es zwei mögliche Zustände sind, die zur Überlagerung kommen und N Qubits in einer Superposition zum Einsatz kommen, ist die Zahl der speicherbaren Zahlen 2^N - im Gegensatz zu N bei klassischen Computern - was bedeutet, dass ein Quantenelement mit 250 verschränkten Atomen mehr Zahlen gleichzeitig speichern könnte als es Atome im Universum gibt. Ein Quantencomputer sollte auch 2^N Rechnungen gleichzeitig durchführen können, statt 2^N Rechnungen hintereinander, wie ein klassischer Computer. Im Prinzip könnte ein Quantencomputer eine Primzahlzerlegung in einem einzigen Schritt durchführen, die Verschränkung der Qubits bewirkt, dass die Rechnung „massiv parallel“ durchgeführt wird, als wäre eine riesige Zahl von Rechnern am Werk. Allerdings wüsste man am Ende nicht, ob das Ergebnis genau das Richtige ist. Abhilfe sollen subtile Fehlerkorrekturverfahren bringen. Rechnungen eines Quantencomputers werden einem Experiment ähneln: Um etwa die genaue Spektrallinie, Farbe, eines angeregten Atomverbandes theoretisch zu ermitteln, wären umfangreiche quantenchemische Rechnungen nötig, die u.U. Jahre in Anspruch nehmen könnten. Eine einfache Messung dieser Farbe, ein Experiment, brächte das Ergebnis sofort – der Atomverband muss sich ja nicht berechnen, er leuchtet einfach, wie die Naturgesetze das vorgeben -, allerdings wäre das Messergebnis mit einer gewissen Unschärfe behaftet. Ähnliches darf man sich für den Quantencomputer vorstellen. Das Interesse an diesen Möglichkeiten stieg sprunghaft, als Peter Shor 1994 einen Algorithmus vorstellte, mit dem Quantencomputer hinreichend schnell große Zahlen in Primzahlen zerlegen können sollten, um das Fundament der gegenwärtigen Verschlüsselungstechnik zu sprengen, von denen Industrie, Bank- und Staatswesen abhängen. Zum Glück für die Forscher und den Rest der Welt kann die Quanteninformationstechnologie aber auch absolut abhörsichere neue Verbindungstechnologien anbieten.

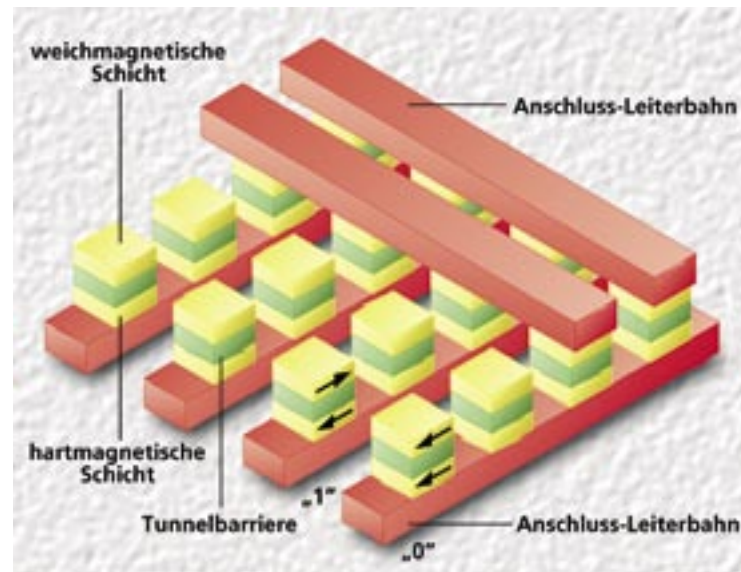
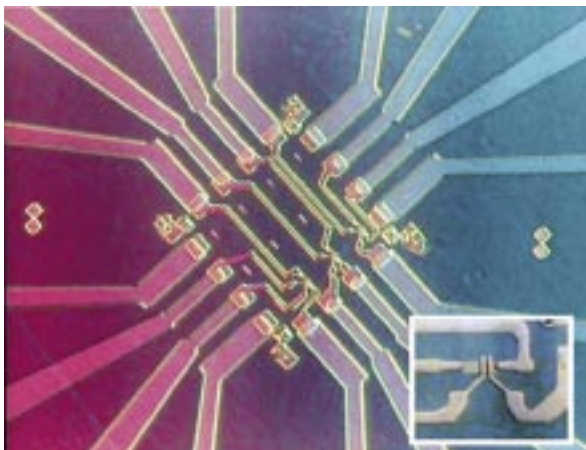
Die Teleportation von Quantenzuständen von einem Quantensystem auf ein Anderes ist ebenfalls möglich. Dabei wird aber nichts Stoffliches teleportiert, da aber gleichartige Quantenzustände nicht voneinander zu unterscheiden sind, hat der Ausdruck „Teleportation“ seine Berechtigung. Wieder wird Einsteins Spezielle Relativitätstheorie respektiert, ist die Übermittlung von Materie, Energie oder Information schneller als Licht nicht möglich. Der Effekt ist aber so schon beeindruckend genug und bestätigt das Phänomen der Verschränkung, des „Entanglement“, Einsteins „spukhafte Fernwirkung“ ist real.

Auf dem Weg zum Quantencomputer

Das bislang bevorzugte Mittel, Moore's Law von der stetigen Steigerung der Prozessorleistungen wahr werden zu lassen, bestand in der Konzentration von immer mehr Elementen auf dem Chip durch die Schrumpfung ihrer Dimensionen.

Die Leistungsfähigkeit eines Prozessors wird aber nicht nur von Kleinheit und Zahl der Komponenten und wachsenden Taktraten bestimmt, auch die Chiparchitektur, die Organisation der Recheneinheiten, ist wichtig. Und dann sind auf dem Weg zum Quantencomputer zahlreiche Effekte zu erwarten, die das eher konventionelle Computing in neue Höhen tragen und Moore's Law fortführen, was die Leistungsfähigkeit der Prozessoren angeht. Raum für Verbesserungen ist da, so

Spintronik-Testchip. Spins werden in einen Indium-Arsenid Halbleiter-Kristall injiziert und detektiert. Der Testchip wurde mit Kontakt- und Elektronenstrahl-Lithographie an der Universität Hamburg hergestellt. Für besonders rauscharme Messungen sind die zentral angeordneten Ferromagnet/Halbleiter-Hybridstrukturen mit supraleitenden Zuleitungen versehen. Der Ausschnitt zeigt Source- und Drain- Kontakte eines FETs, die aus ferromagnetischem Material hergestellt sind und einen 150 nm langen Halbleiter-Kanal kontaktieren. Die Gate-Elektrode auf dem Spin FET ist hier nicht gezeigt.



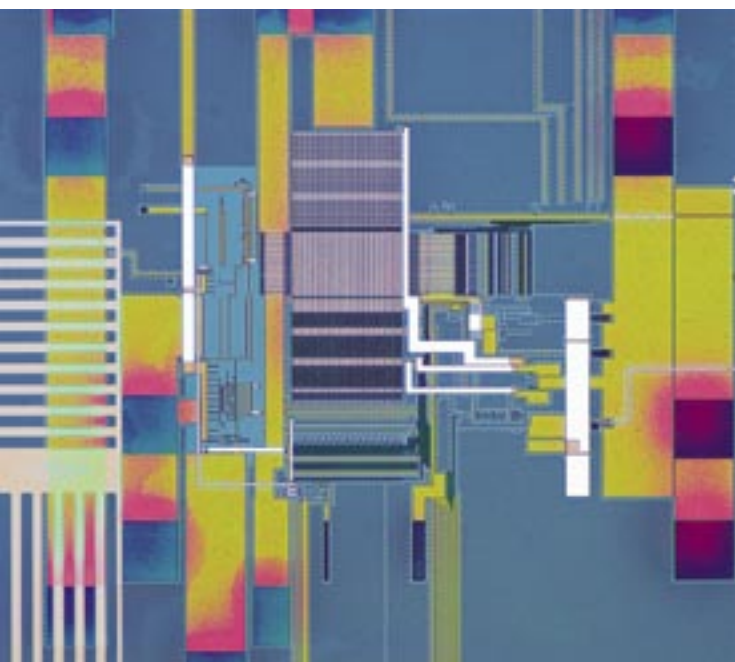
Lückenloses Gedächtnis: In MRAMs - magnetischen Memories, die vom Elektronenspin Gebrauch machen - speichert jede Zelle ein Bit auch ohne Stromversorgung.

nutzen konventionelle CMOS-Schaltungen eigentlich nur eine Eigenschaft des Elektrons, seine elektrische Ladung. Der Schaltzustand eines Logikelementes wird vom Ladungszustand winziger Kondensatoren bestimmt. Elektronen haben aber auch noch einen „Spin“, eine Art Eigendrehung, die sich in einem winzigen magnetischen Moment äußert. Das kann mit einem zweiten Magnetfeld in Kontakt treten, wobei sich wieder das im Mikrokosmos typische gestufte Einstellungsspektrum ergibt, etwa: Magnetfeld des Elektrons parallel oder anti-parallel zum zweiten Magnetfeld. In ein kleines, passendes Bett, einen Punkt auf einer Siliziumkristalloberfläche gebracht und mit empfindlichen Sensoren versehen, könnte im Grenzfall ein einzelnes Elektron durch seinen Drehsinn ein Bit speichern, Null oder Eins, parallel oder anti-parallel. Speicher mit diesem Prinzip stehen vor der kommerziellen Einführung, mit einigen Vorteilen: Der Speicherinhalt geht bei Stromausfall nicht verloren, und da sich die Elektronen zur Umspeicherung etwa von Eins nach Null nicht wie bei der üblichen Elektronik bewegen sondern nur in ihrem „Bett wälzen“, also ihren Drehsinn ändern müssen, versprechen „Spintronik“-Speicher sehr schnell und mit wenig Energie betreibbar zu werden.

Spintronik-Prozessoren werden ebenfalls intensiv ange-dacht, das Grundelement eines Prozessors, der Volladdierer, sollte sich mit magnetischen Methoden, magnetologisch – bei gleicher Geschwindigkeit mit weniger Stromverbrauch - mit nur einem Viertel der CMOS-Transistoren realisieren lassen. Die CMOS-Technologie bliebe für Hilfsstrukturen erhalten. Angesehene Fachleute glauben, dass sich Spintronik-Prozessoren gleichsam im Flug umprogrammieren lassen werden, aus einem Handy würde auf Kommando ein mp3-Player oder ein Rechner oder ...

Spin-Applikationen finden sich im Übrigen schon in jedem neuen Notebook. 1988 war unter anderem im Forschungszentrum Jülich gefunden worden, dass in mehrlagigen metallischen Schichten, die teilweise ferromagnetisch sind, der elektrische Widerstand beim Stromfluss durch diese Schichten ganz extrem von der relativen Orientierung der Elektronenspins in diesen Schichten abhängt – der Riesenmagnetowiderstand, GMR, war entdeckt. Der Effekt ermöglicht die deutliche Erkennung auch sehr schwacher Magnetfelder, was den Bau sehr viel dichter beschreibbarer Festplatten möglich machte. Und die stecken in den Notebooks von heute.

Modernste Kunst: Experimentelle Strukturen für Spintronik-Speicher.



Die Materialisierung des Quantencomputers

Irgendwann in der Zukunft - von der noch nicht einmal sicher ist, ob sie nah oder fern genannt werden kann - wird ein Quantencomputer den ersten wirklich komplexen Code knacken und zugleich unbelauschbare Kommunikationsleitungen bereit stellen. Noch aber weiß niemand, wie ein praxistauglicher Quantencomputer einmal aussehen wird, es gibt im Prinzip zahlreiche Möglichkeiten, ein Quantensystem herzustellen. Denkbar wäre die Realisierung mit Kernspins, Elektronenspins, Photonen, Elektronen, Exzitonen, Flussquanten, Cooperpaaren und so fort.

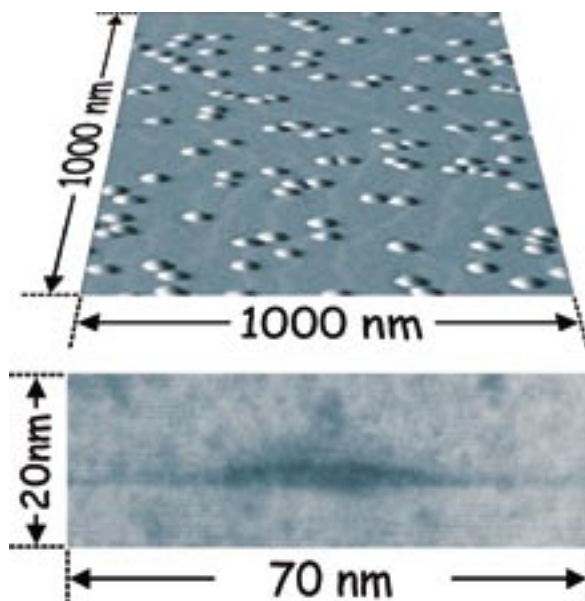
Ebenfalls offen ist die Frage, welche materiellen Einheiten die Qubits tragen werden, sind es Atome, Moleküle, Flüssigkeiten oder Festkörper? Viele Technologen geben Halbleitern, also speziell präparierten Festkörpern den Vorzug, wie sie in der Chipindustrie verwendet werden. Halbleiter haben eine ganze Reihe von Vorzügen:

Die Chipindustrie kennt sich bestens mit Halbleitern aus, und Halbleiter sind langzeitstabil, was viele noch funktionierende Uralt-Computer beweisen. Die Industrie beherrscht zahlreiche Methoden, Strukturen im Sub-Mikrometer-Bereich zu realisieren, mit denen auch 2D-Arrays von Qubits machbar sind. Damit ist die Ausweitung von Prototypen auf kommerziell interessante Dimensionen gegeben. Die Realisierung in vertrauten Materialien garantiert weiter die Kompatibilität mit der vorhandenen Mikroelektronik, die durch einen Quantencomputer keineswegs überflüssig würde. In Halbleitern stehen auch „elementare“ Qubits wie Spins zur Verfügung, die relativ unempfindlich gegenüber Störungen sind, also über viele Rechenzyklen stabil bleiben. Ultraschnelle Operationen sind möglich. Schließlich sind Einzel-Qubit-Messungen bereits demonstriert worden.

nanoQUIT

Der Forschungsschwerpunkt nanoQUIT des BMBF wird zur Beantwortung vieler dieser offenen Fragen beitragen. Jetzt ist die Kompetenz von Einsteins Erben gefragt.

Die mit der Realisierung eines Quantencomputers verbundenen Probleme sind aller Voraussicht nach zu komplex, um im Handstreich gelöst werden zu können. Die Hoffnung, der Sache mit nanoQUIT einen großen Schritt näher zu kommen, ist jedoch gerechtfertigt. Hierfür werden Theoretiker, Experimentatoren und Techniker Hand in Hand arbeiten.

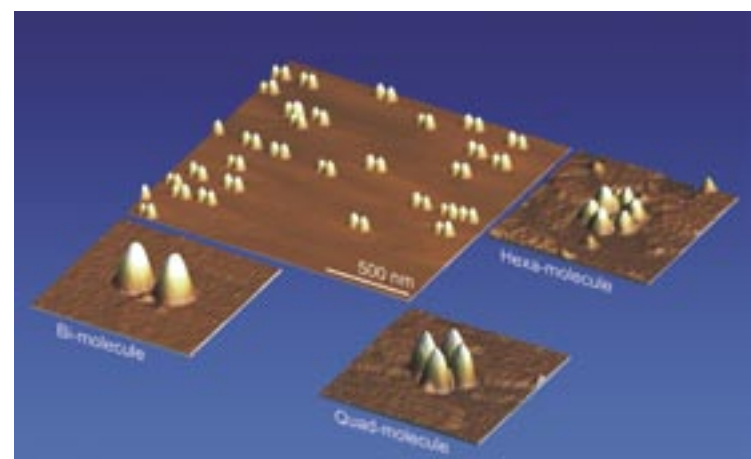


Selbstorganisierte Quantenpunkte, unten: Querschnitt in atomarer Auflösung.

Neue Wege für neue Materialien

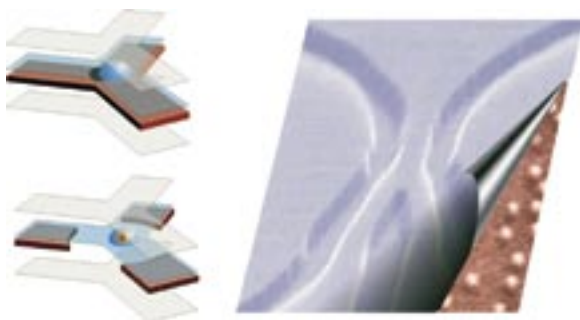
In der Natur gibt es Tendenzen zur Selbstordnung; regelmäßige, ganz von selbst aus einer Zuckerlösung gewachsene Kandiskristalle sind eines von vielen alltäglichen Belegen. Diese Selbstordnungstendenz lässt sich auch für die selbsttätige Bildung quanteninformationstechnisch wirksamer Strukturen wie Quantenpunkten nutzen. Quantenpunkte sind kleine, mit regelmäßig angeordneten Atomen besetzte Areale, die sich unter speziellen Bedingungen von selbst bilden. Für die technisch erforderliche Perfektion der Quantenpunkte ist großer Forschungsaufwand vonnöten. Bei Galliumarsenid, dem Material, aus dem die schnellen Transistoren in den Send- und Empfangsschaltungen eines Handys bestehen, gelingt die Quantenpunkterzeugung schon gut. Auf dieser Erfahrung kann aufgebaut werden, wenn es um Qubits auf Halbleitern geht. Für die Abbildung solcher Strukturen und die Einstellung und Messung ihrer Funktionen ist ebenfalls ein großer Aufwand notwendig.

„Quantenpunktmoleküle“ am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart.



Rechts: Forschungsstätten des nanoQUIT-Forschungsschwerpunktes, in dem Hochschulen und Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft und der Leibniz-Gemeinschaft zusammenarbeiten.

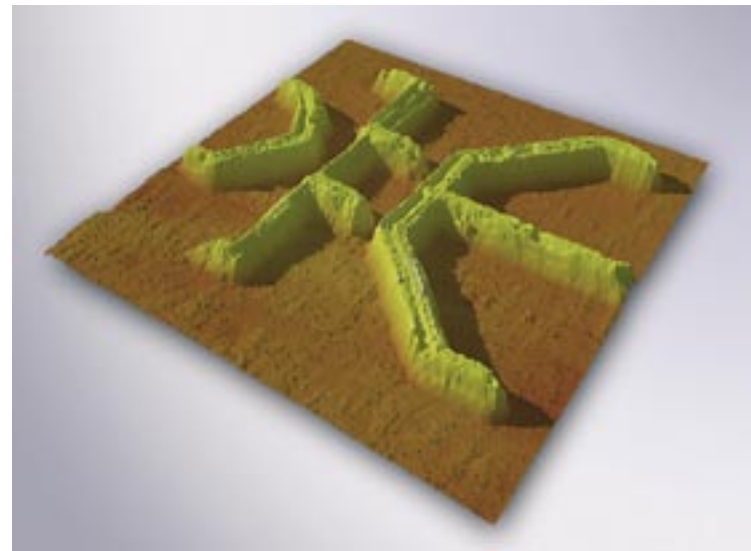
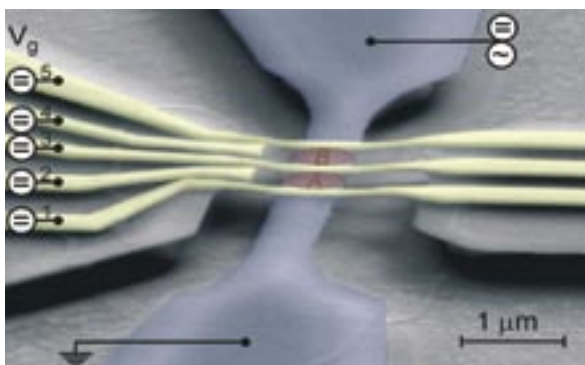




Quanteneffekte für konventionelles Rechnen: Ein durch Selbstorganisation entstandener Quantenpunkt (rechter Bildrand) kann im Verzweigungsteil einer Y-förmigen Halbleiterstruktur (Schema links, Realisation mit 10 Nanometer Kanalbreite Mitte) mit Elektronen beladen werden. Der Ladezustand teilt sich dem Fluss ballistischer Elektronen durch das Y mit, mithin kann die Struktur als Speicherelement oder kompaktes logisches UND-Gatter dienen.

Nanotechnologie

Die Kleinheit vieler der für einen Quantencomputer aussichtsreichen Strukturen hat das Forschungsfeld in Teilen zu einem Bereich der Nanotechnologie werden lassen, genauer: der Nanoelektronik. Die weiß mit immer neuen exotischen Schaltelementen wie „Einzelelektronentransistoren“ zu überraschen. Gut möglich, dass sich unter solchen Elementen technisch attraktive Realisierungsmöglichkeiten für ein Qubit finden.



Mittels eines Rasterkraftmikroskops erzeugtes Bild eines elektrostatisk auslesbaren Quantenpunktes in einem Halbleiter. In naher Zukunft wird eine Fülle solcher Miro-artigen Strukturen realisiert, unter ihnen werden die Zeichen für das Rechnen von morgen sein.

Den Forschern kommt dabei entgegen, dass das Instrumentarium für die planmäßige Erzeugung winziger Strukturen ständig raffinierter wird. Auch Ernst Ruskas Elektronenmikroskop besitzt mittlerweile die Fähigkeit, einzelne Atome abbilden und bei Bedarf herumschubsen zu können. Rasterkraftmikroskope blicken mittlerweile in das Innere der Atomhüllen. Diese Mikroskope sind Abkömmlinge des

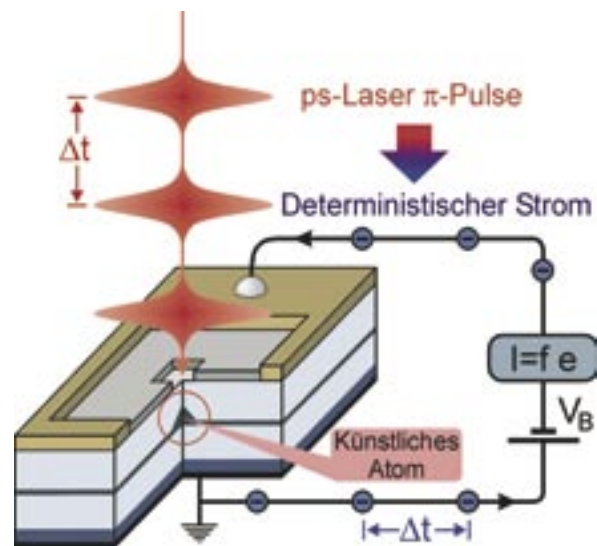
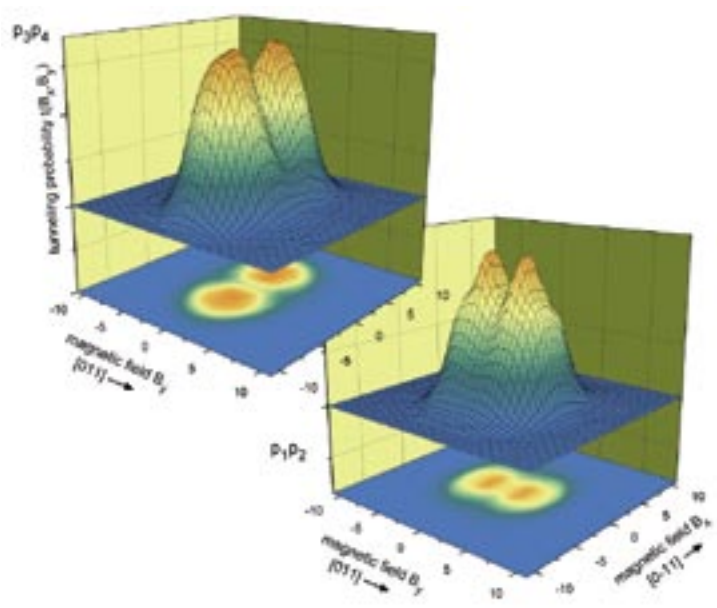
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer nanostrukturierten freitragenden Halbleiterbrücke. Die nur 130 nm dünne, in blau kolorierte, freitragende Brücke ist aus einer Schichtfolge der Materialien GaAs und AlGaAs aufgebaut, in der sich ein zweidimensionales Elektronengas parallel zur Probenoberfläche ausbildet. Durch das Anlegen geeigneter Spannungen an die gelb kolorierten Goldelektroden kann diese leitfähige Fläche lokal verformt werden. Dadurch lässt sich der durch rote Kreise symbolisierte Doppelquantenpunkt erzeugen.

Tunnelmikroskops, dessen Machbarkeit zur Zeit seiner Entstehung vereinzelt mit dem Hinweis auf die Heisenbergsche Unschärferelation verneint worden war – Experimente lohnen sich.

Quantensysteme und Qubits

Sind die Quantensysteme – hoffentlich so wie gewünscht – gewachsen, müssen sie detailliert untersucht, Manipulationsmöglichkeiten erforscht werden. Wie wird das zu berechnende Problem physikalisch an die Struktur herangetragen, wie das Resultat ausgelesen? Wie ist das Problem der Dekohärenz zu lösen, der störenden Wechselwirkung der fragilen Quantenzustände mit der makroskopischen Umgebung?

Quantenmechanik zum Anfassen: Experimentell bestimmte Wellenfunktionen von Elektronen in Indiumarsenid-Quantenpunkten. Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit, Elektronen in den entsprechenden Raumgebieten zu finden. Die gemessenen Strukturen ähneln denen, die in Atomen auftreten, man nennt solche Quantenpunkte denn auch „künstliche Atome“.



Quantenpunkt-Photodiode: In der Quanteninformationstechnologie werden neben die gewohnten Elektronen auch Lichtteilchen, Photonen, als Informationsvermittler treten. Hierfür ist die Erzeugung, Manipulation und Detektion einzelner Photonen nötig - oder, wie hier, das Auslesen eines Qubits mit einer Quantenpunkt-Photodiode.

Leben diese Zustände lange genug, um größere Rechnungen zuzulassen? Viele Effekte funktionieren nur bei extrem tiefen Temperaturen, deren Erzeugung aufwendig ist, was einer größeren Verbreitung des Quantencomputers im Wege stünde. Werden sich Mittel und Materialien finden lassen, diese Effekte auch unter Alltagsbedingungen stabil zu halten? Ohne die gemeinsame Anstrengung vieler kann die große Aufgabe nicht bewältigt werden. Nicht nur die Forscher im nanoQUIT-Förderschwerpunkt, sondern auch viele andere in Deutschland und auf der ganzen Welt tragen dazu bei. Und irgendwann – vielleicht schon früher als wir es heute erwarten – prangt dann auf einem Computer das Logo: Qubit inside...

Wer mehr wissen möchte, sollte die Website von nanoQUIT besuchen, die nähere Informationen zu den einzelnen Projekten bereitstellt. <http://www.nanoquit.de>

Einsteins unverhofftes Erbe

Ist Schrödingers Katze nun tot, lebendig oder beides zugleich? Die endgültige Antwort steht nach wie vor aus. Wahrscheinlich ist sie verblüffend, denn der Weg zum Quantencomputer wird mit Überraschungen gepflastert sein. Und aller Voraussicht nach werden die Forscher nicht nur materielle Früchte ernten, auch der Zeitgeist darf durch die erwarteten neuen Techniken auf neue, belebende Nahrung hoffen.

Der Zeitgeist nämlich hängt nicht nur von den Eingebungen weniger Denker ab, sondern auch von den jeweils verfügbaren Techniken.

Als etwa die Uhr das größte Glanzstück menschlichen Erfindungsgeistes war, stellte man sich auch die Welt wie eine Uhr organisiert vor. Und da in einer Uhr jedes Zahnrad zwingend in das andere greift, sollte auch in der Welt zwanghaft Eines auf das Andere folgen, sollte der Kosmos vorherbestimmt, determiniert sein.

Als die Dampfmaschine den Zeitgeist zu fesseln begann, sorgte man sich sogleich um den „Wärmetod des Universums“, die wachsende Entropie. Dahinter stand die Furcht, dass die Kohle knapp werden könnte.

Als die Atombombe gezündet war, hatten zahlreiche Physiker die Mathematik für einen wirklich großen Knall parat – es ist kein Zufall, dass viele der Beteiligten später Kosmologen wurden und, natürlich, am Modell des Urknalls mitarbeiteten.

Jetzt ist das Zeitalter des Computers. In der Gestalt von Spielekonsolen beginnen Supercomputer sogar in die Kinderzimmer einzuziehen, die Milliarden hochgenauer Rechenschritte pro Sekunde nur auf ein Lächeln der künstlichen Heldin verwenden – das Glanzstück der Gegenwart lässt alles andere verblassen. Die Folgen werden beeindruckend sein, womöglich steht der Naturwissenschaft eine Generalüberholung ihres Weltbildes bevor. „Morgen werden wir gelernt haben, die gesamte Physik in der Sprache der Information zu verstehen und auszudrücken,“ hatte 1989 John Wheeler, berühmter Physiker, in seinem nicht minder berühmten Vortrag

„It from Bit“ gesagt, zehn Jahre später erschien in den *Foundations of Physics* Vol.29 No.4 ein Artikel von Anton Zeilinger, Universität Wien, mit dem Titel „Ein Grundlagenprinzip für die Quantenmechanik“. Das Prinzip: Ein elementares System trägt ein Bit an Information. Mit dem Prinzip lassen sich fundamentale Fragen beantworten, wie die: Warum ist die Welt quantisiert, also an ihrem Grunde portioniert wie Sand und nicht glatt und geschmeidig wie Wasser? „Weil sich unser Wissen über die Natur in Form von Bits quantisieren lässt und daher quantisiert erscheint. Wäre das nicht der Fall, könnten wir sie auch nicht verstehen“, hat Anton Zeilinger Hans Christian von Baeyer bei einem griechischen Salat verraten (in: *Das informative Universum*).

Auch das Phänomen der Verschränkung findet in der Sprache der Informationstheorie eine zwanglose Erklärung, ebenso die Rolle des Zufalls im Mikrokosmos. Zeilinger und Bruckner haben auch den Informationsbegriff Claude Shannons, der unserer gegenwärtigen Informationstechnologie zugrunde liegt, für die Quantenwelt korrigiert. Und würde aus dem Quantencomputer weiter nichts, allein für diese heilsame Unruhe wäre dem Konzept zu danken.

Aber es wird ja was daraus, mit aller Wahrscheinlichkeit: Irgendwann in den nächsten Jahren werden Qubits, in einem Lichtnetz schwebend oder über eine mit geheimnisvollen Zeichen bedeckte Kristalloberfläche verteilt, etwas von sich geben, das den ganzen Aufwand wert war – Einsteins unverhofftes Erbe.

Unverhofft in der Tat, denn Einstein, der die Quantenmechanik mit seiner Partikeltheorie des Lichtes entscheidend vorwärts gebracht hatte, stand ihr Zeit seines Lebens reserviert gegenüber. „Gott würfelt nicht!“, war sein Einwand gegen Zufallselemente der Theorie, und dann hatte er auch noch in einem Brief an Erwin Schrödinger den schrecklichen Verdacht geäußert, dass die Mehrzahl der Physiker die Quantentheorie nicht verstanden haben konnte, jedoch: „... die Kerle weigern sich, es zuzugeben (noch nicht einmal sich selbst gegenüber).“ Den praktischen Wert der Theorie aber leugnete auch Einstein nicht.

Einstein hatte aus heutiger Sicht – wie bei dem Thema nicht anders zu erwarten – Recht und Unrecht zugleich, die Quantentheorie seiner Zeit war noch nicht das Gelbe vom Ei, „spukhafte Fernwirkungen“ sind real, lassen sich aber informationstheoretisch erklären. Und an den Grenzen, die Einsteins Spezielle Relativitätstheorie der Lichtgeschwindigkeit setzt, ändern sie nichts. Neu gegenüber Einsteins Zeit ist,

dass endlich handfeste Experimente gemacht werden können, neu, dass wieder, im Sinne John Wheelers, RBQs, „Real Big Questions“, wirklich große Fragen gestellt werden dürfen, neu, dass phantastische Antworten kommen. Alt, dass die Wissenschaftler unverändert in verschiedenen Fraktionen zu finden sind – was für Felder, auf denen es noch etwas zu holen

Ein „konzeptioneller Durchbruch“ am Beginn der Renaissance: Der Mensch entdeckt die Größe des ihn umgebenden kosmischen Räderwerks und die Tiefe der Zeit. Ein ähnlicher Durchbruch könnte mit der Quanteninformati­onstechnologie zustande kommen, allerdings geht die Reise hier an die Fundamente der Welt.

gibt, normal ist. Bei Ohms Gesetz sind sich (fast) alle einig. Niemand weiß, was auf der mühsamen Reise zum neuen Heiligen Gral der Physik alles gefunden wird (wenn man es wüsste, brauchte man nicht zu forschen), und nicht wenige werden in die Irre gehen. Für die wusste Erich Kästner doppeldeutigen Trost:

*Ein Irrtum ist gewiss was wert,
jedoch nur hier und da.
Nicht jeder, der nach Indien fährt,
entdeckt Amerika.*



Glossar

Aspect-Experiment: Ein Schlüsselexperiment, das Alain Aspect 1982 mit seinen Mitarbeitern durchführte, um die begrifflichen Grundlagen der Quantenmechanik kritisch zu untersuchen. Er prüfte zu diesem Zweck die auf ein Photonenpaar (Zwei-Photonen-Emission) angewandte Bellsche Ungleichung.

Bells Ungleichung: Von John Bell 1965 abgeleitete Formel, die vorgibt, wie genau die an zwei verschiedenen Messplätzen gezählten Treffer von Teilchen übereinstimmen können, die von einer Quelle zwischen den Messplätzen stammen, wo sie quantenmechanisch als Paar verschränkt, also Eins waren - wenn eine Art gusseiserner Logik gilt, ohne die im Alltag nichts funktionieren würde. Dennoch wird die Ungleichung im Experiment widerlegt, wie von der Quantenmechanik vorhergesagt, also ist – was John Bell zeigen wollte – die gusseiserne Logik im Quantenkosmos nicht wirksam. Für die Übermittlung von Signalen etc. bleibt Einsteins Regel von der Lichtgeschwindigkeit als Maximum (im Vakuum) dennoch gültig.

Dekohärenz: Störung der für das Rechnen wichtigen Quantenzustände durch die makroskopische Umgebung.

Doppelspalt-Experiment: Ein zuerst von Thomas Young (1773-1829) durchgeführtes Experiment, bei dem Licht durch zwei eng benachbarte Spalten einer Blende fällt und dann auf einem dahinter befindlichen Bildschirm ein Interferenzmuster bildet. Das Muster lässt sich zwanglos erklären, wenn man annimmt, dass das Licht als Welle durch den Doppelspalt geht. Registriert werden aber immer Teilchen, ob von einem fotografischen Film, den Pixeln einer Digitalkamera oder speziellen Photodetektoren.

Einstein-Podolsky-Rosen-Experiment, EPR: Ein von Einstein und seinen Mitarbeitern 1935 formuliertes Gedankenexperiment, das die Sonderbarkeit der von Bohr gegebenen Deutung der Quantenmechanik aufzeigen sollte. Das Experiment beruht auf gleichzeitigen Messungen an zwei Quantensystemen, die zuerst miteinander in Beziehung stehen und sich danach so weit voneinander entfernt haben, dass sie eigentlich keinen Einfluss aufeinander mehr nehmen können. Es bildet die Grundlage für das von Aspect realisierte Experiment.

Fernwirkung: Die Vorstellung, dass zwei weit auseinander liegende Dinge einen unmittelbaren physikalischen Einfluss aufeinander ausüben können. Die moderne Physik ersetzt diese Fernwirkung durch eine Nahwirkungstheorie, wonach sich etwa Mond und Erde nur über Felder – in diesem Fall ein Gravitationsfeld – beeinflussen können, die den gesamten Raum dazwischen durchdringen. Für Wechselwirkungen gilt die Lichtgeschwindigkeit als Obergrenze.

Kopenhagener Interpretation: Die mit dem Namen von Niels Bohr und seinem Kopenhagener Forschungsinstitut seit 1930 verbundene Interpretation der Quantenmechanik. Ein Ergebnis der Kopenhagener Interpretation ist der Ratschlag, sich mit der Nützlichkeit des mathematischen Formalismus' der Quantentheorie zu begnügen, tiefer gehende Fragen seien sinnlos. Manche Pioniere der Quanteninformationstechnologie finden diesen Ratschlag langweilig oder gar frevelhaft, jedenfalls kommt wieder Bewegung in die Interpretation der Quantenphysik.

Laser: Akronym für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“. Erzeugt einen einfarbigen Lichtstrahl mit hoher zeitlicher und räumlicher Kohärenz. Der erste Laser wurde 1960 von Theodore Maiman gebaut.

Lokalität: In der Postkutschenzeit konnte der Erwerb einer Schachtel Zündhölzer in Köln um 14 Uhr und ein Brand in Düsseldorf um 14 Uhr 30 keinen ursächlichen Zusammenhang haben, weil der Zündholztransport länger als eine halbe Stunde gedauert hätte, die Ereignisse waren durch die bescheidene Postkutschengeschwindigkeit „räumlich getrennt“. In der Physik gelten Ereignisse als räumlich getrennt und damit lokal, wenn die Lichtgeschwindigkeit für einen ursächlichen Zusammenhang nicht reicht.

Nicht-Lokalität: Ein großer Teil der Physiker geht mittlerweile davon aus, dass zwischen „verschränkten“ Dingen im Quantenkosmos beliebige Distanzen liegen können, ohne dass eine einmal hergestellte Verbindung dadurch aufgelöst werden müsste.

Planck'sches Wirkungsquantum h : Grundlegende Naturkonstante, die in der Quantentheorie zur Beschreibung von Quanteneffekten benötigt wird. Planck ging davon aus, dass Energie immer nur in quantisierten Energiepaketen

abgegeben wird und führte h zur Beschreibung der Schwarzkörperstrahlung als Proportionalitätsfaktor erstmals ein. Einstein wandte die Idee der quantisierten Strahlung auf den Photoeffekt an und erhielt 1905 dafür den Nobelpreis.

Quantenhalleffekt: Befindet sich eine Schicht aus Elektronen in einem Magnetfeld, das senkrecht zur Schichtebene steht, und fließt in ihr ein Strom, so kann man in der Schicht eine elektrische Spannung senkrecht zur Richtung des Stroms messen. Dieser Effekt wird nach ihrem Entdecker Edwin Hall Hall-Effekt genannt. 1980 beobachtete Klaus von Klitzing, dass die bei ansteigendem Magnetfeld üblicherweise kontinuierlich anwachsende Hall-Spannung bei sehr tiefen Temperaturen quantisierte Werte annimmt. Für die Entdeckung dieses Effekts erhielt Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis.

Quanteninformationstechnologie: Informationstechnologie, die für bestimmte Problemfelder deutlich bessere technische Lösungen in Aussicht stellt als die konventionelle Elektronik. Vorerst wichtigstes Anwendungsgebiet wäre die sichere Kommunizierbarkeit von Information – und das Knacken der Codes weniger ausgefeilter Nachrichtenverbindungen.

Quantentheorie: Oberbegriff für eine Reihe von zusammengehörenden Theorien, die das Quantum als Grundlage haben. Demnach arbeitet die Natur am Grunde nicht mit Kontinuitäten, sondern Päckchen, etwa von Energie. So kann etwa das Wasserstoffatom, wie andere Atome auch, Energie nur in streng festgelegten Portionen, Quanten, aufnehmen und abgeben. Der Quantentheorie wird universelle Gültigkeit zugeschrieben, allerdings ist ihre Prognosekraft so beschränkt, dass es für Experimentatoren viel zu tun und Neuland zu entdecken gibt.

Qubit: Ein Qubit ist ein beliebig manipulierbares 2-Zustands-Quantensystem. Im Gegensatz zu den üblichen Bits, die nur genau 2 Zustände kennen, können Qubits auch jeden beliebigen Zwischenzustand einnehmen. Qubits werden in Quantencomputern verwendet.

Realismus: Die Vorstellung, dass die Welt unabhängig von bewussten Wesen ist, die sie beobachten, der Mond also auch dann scheint, wenn niemand hinsieht. Einstein und Bell waren Realisten; Bohr, Wheeler, Zeilinger u.a. räumen dagegen der Beobachtung entscheidenden Einfluss ein.

Relativitätstheorie: Die heute allgemein anerkannte Darstellung von Raum, Zeit und Bewegung. Sie bildet einen der Eckpfeiler der Physik des 20. Jahrhunderts. Die von Einstein zuerst 1905 entwickelte „Spezielle“ Theorie enthält einige ungewöhnliche Erkenntnisse, wie die Zeitdehnung und die Gleichwertigkeit von Masse (m) und Energie ($E=mc^2$). Eine Kernaussage der Speziellen Theorie lautet, dass sich kein materieller Körper, physikalischer Einfluss, kein Signal schneller als mit Lichtgeschwindigkeit (c) bewegen kann. Die spätere „Allgemeine“ (1915) Theorie befasste sich mit den Einflüssen der Gravitation auf die Raum-Zeit-Struktur.

Schrödinger-Gleichung: Eine nach Erwin Schrödinger benannte Wellengleichung, die in Analogie zu einem konventionellen Wellenvorgang die Eigenschaften einer Quantenwellenfunktion ausdrückt.

Schrödingers Katzenparadoxon: Ein Paradoxon, das auf einem Gedankenexperiment beruht, in dem ein Quantenprozess dazu verwendet wird, eine Katze in einen scheinbaren Überlagerungszustand von Leben und Tod zu versetzen. Schrödinger wollte damit auf Absurditäten in der Deutung der Quantentheorie hinweisen.

Verschränkung: Quantenmechanisch beschreibbare Dinge können in einer Weise zusammen treten, in der sie als eine Einheit begriffen werden müssen, unabhängig von ihrer Entfernung zueinander. Verschränkungen sind der Schlüssel zum Quantencomputer.

Wellenfunktion: Ein mathematischer Begriff, der den Zustand eines Quantensystems beschreibt. In einfachen Fällen wird das Verhalten der Wellenfunktion durch eine Schrödingergleichung dargestellt.

Welle-Teilchen-Dualismus: Unter dem Begriff Welle-Teilchen-Dualismus versteht man die Erkenntnis der Quantenmechanik, dass einerseits Wellen (wie zum Beispiel Licht) auch Teilchencharakter und andererseits Teilchen (wie zum Beispiel Elektronen) auch Wellencharakter haben.

Literatur

Hans Christian von Baeyer

Das informative Universum, Verlag C.H.Beck; 2005

Jim Baggot

beyond measure – modern physics, philosophy
and the meaning of quantum theory
Oxford University Press; 2004

John S.Bell

Speakable and unspeakable in quantum mechanics
Cambridge University Press; 1991

Jeremy Bernstein

Quantum Profiles, Princeton University Press; 1991

R.A.Bertlmann, A.Zeilinger (Herausgeber)

Quantum [Un]speakables – From Bell
to Quantum Information, Springer Verlag; 2002

P.D.W.Davis, J.R.Brown (Herausgeber)

Der Geist im Atom, Birkhäuser Verlag; 1988

David Deutsch

Die Physik der Welterkenntnis
Deutscher Taschenbuch Verlag; 2002

IT-Forschung 2006

Förderprogramm Informations- und Kommunikationstechnik,
Hrsg. BMBF 2002

Richard P.Feynman

Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie
Piper Verlag, 1988

Richard P.Feynman

Vom Wesen physikalischer Gesetze, Piper Verlag; 1990

Claus Kiefer

Quantentheorie, Fischer Kompakt; 2004

Oliver Morsch

Licht und Materie, Wiley-VCH Verlag; 2003

Bernd Thaller

Advanced Visual Quantum Mechanics
Springer Verlag; 2004

Robert Anton Wilson

Schrödingers Katze, Sphinx Verlag; 1981

Anton Zeilinger

Einsteins Schleier – die neue Welt
der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck; 2005



Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Eine gemeinsame Initiative von Bundesregierung,
Wissenschaft, Wirtschaft und Kultur