

Schrödingers Katze

Einführung in die Quantenphysik

Von
Brigitte Röthlein

Mit Schwarzweißabbildungen von
Nadine Schnyder

Inhalt

Vorbemerkung des Herausgebers	7
Eine Katze wird weltberühmt	9
Der Umsturz im Weltbild der klassischen Physik	15
Ist Licht Teilchen oder Welle?	15
Das Bohrsche Atommodell	23
Quantenzahlen bringen Ordnung in die Welt	30
Ein Experiment, an dem sich viele Diskussionen entzündeten	39
Wellenfunktionen und Wahrscheinlichkeiten	46
Heisenbergs Unschärferelation	52
Tunneleffekt - Ereignisse, die eigentlich nicht passieren dürften	60
Die geheimnisvolle Fernwirkung zwischen zwei Teilchen	65
Kosmologie und Multiweiten	74
Neueste Experimente aus der Welt der Quantenphysik	78
Wie die Quantenphysik unseren Alltag verändert	87
Laser	87
Supraleiter.	97
Quantenphysik in der Medizintechnik	103
Mikroelektronik und Datenspeicherung	105
Quantencomputer	109
Anhang	
Glossar	114
Weitere Literatur	120
Register	122



Vorbemerkung des Herausgebers

Die Anzahl aller naturwissenschaftlichen und technischen Veröffentlichungen allein der Jahre 1996 und 1997 hat die Summe der entsprechenden Schriften sämtlicher Gelehrter der Welt vom Anfang schriftlicher Übertragung bis zum Zweiten Weltkrieg übertroffen. Diese gewaltige Menge an Wissen schüchtert nicht nur den Laien ein, auch der Experte verliert selbst in seiner eigenen Disziplin den Überblick. Wie kann vor diesem Hintergrund noch entschieden werden, welches Wissen sinnvoll ist, wie es weitergegeben werden soll und welche Konsequenzen es für uns alle hat? Denn gerade die Naturwissenschaften sprechen Lebensbereiche an, die uns — wenn wir es auch nicht immer merken - tagtäglich betreffen.

Die Reihe Naturwissenschaftliche Einführungen im dtv hat es sich zum Ziel gesetzt, als Wegweiser durch die wichtigsten Fachrichtungen der naturwissenschaftlichen und technischen Forschung zu leiten. Im Mittelpunkt der allgemeinverständlichen Darstellung stehen die grundlegenden und entscheidenden Kenntnisse und Theorien, auf Detailwissen wird bewußt und konsequent verzichtet.

Als Autorinnen und Autoren zeichnen hervorragende Wissenschaftspublizisten verantwortlich, deren Tagesgeschäft die populäre Vermittlung komplizierter Inhalte ist. Ich danke jeder und jedem einzelnen von ihnen für die von allen gezeigte bereitwillige und konstruktive Mitarbeit an diesem Projekt.

Lange stand sie im Zentrum der Ablehnung, die Quantenphysik, geradezu klassisch geworden ist Einsteins Kommentar »Gott würfeln nicht!« Und in der Tat, es ist schon schwer zu

verstehen, daß hinter all den festen und unverrückbaren Naturvorgängen unserer sinnlich erlebbaren Welt im Bereich der kleinsten Dimensionen ausschließlich das Prinzip Zufall herrscht, das sich lediglich statistisch erfassen läßt. Brigitte Röthlein zeigt aufseht lebendige Weise, wie es die Quantentheoretiker dennoch geschafft haben, ihr Ideengebäude in der Physik zu etablieren. Ausgehend von der schon Jahrhunderte alten Diskussion um den Wellen- bzw. Teilchencharakter des Lichts über Max Planck, Erwin Schrödinger, Niels Bohr, Werner Heisenberg oder Richard Feynman führte der Weg, an dessen gegenwärtigem Stand Techniken

stehen, die unser tägliches Leben verändern, allen voran der Laser in seinen unzähligen Anwendungsbereichen.

Olaf Benzinger

Eine Katze wird weltberühmt

Das Szenario könnte von einem Tierquäler stammen: Man stelle sich eine Kiste vor, in die man nicht hineinsehen kann und aus der keine Geräusche nach außen dringen. In dieser Kiste sitzt eine Katze. Sie ist gesund und munter und ahnt nicht, in welcher prekärer Lage sie sich befindet. Denn neben ihr in der Kiste steht ein physikalischer Apparat, der ihren sicheren Tod bedeutet: Ein radioaktives Präparat wird irgendwann in der nächsten Stunde den Zerfall eines Atoms erleben, man weiß nur noch nicht, wann innerhalb dieser nächsten Stunde. Wenn das Atom zerfällt, wird es über einen Geigerzähler einen elektrischen Impuls auslösen, der einen Hammer auf eine Phiole mit Gift fallen läßt. Was nun geschieht, bedeutet für die Katze das Ende: Der Hammer zertrümmert die Phiole, das Gift tritt aus und verdampft, die Katze atmet es ein und stirbt sofort. Nichts von alledem ist von außen zu sehen, zu hören oder zu fühlen. Selbst der aufmerksamste Beobachter wird also nicht feststellen können, ob der radioaktive Zerfall im Inneren der Kiste schon stattgefunden hat oder noch zu erwarten ist. Denn radioaktive Elemente besitzen die Eigenschaft, daß ihre Atome nicht zu einem bestimmten Zeitpunkt zerfallen, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb einer bestimmten Zeitspanne. Mit anderen Worten heißt das, man kann den Zerfall eines bestimmten Atoms nicht zeitlich vorhersagen, man kann nur davon ausgehen, daß er beispielsweise mit großer Sicherheit in der kommenden Stunde eintritt.

Was bedeutet dies für die Katze in der Kiste? Während der Stunde, in der der Zerfall eintreten wird, kann kein äußerer

Beobachter sagen, ob sie noch lebt oder schon tot ist, denn niemand weiß, wann genau das radioaktive Atom zerfällt. In gewisser Weise ist die Katze also gleichzeitig lebendig und tot oder keines von beiden, sie befindet sich in einem Mischzustand zwischen Leben und Tod. Selbstverständlich kann man aber zu jedem Zeitpunkt feststellen, ob die Katze noch lebt oder schon tot ist, indem man die Kiste öffnet und hineinschaut.

Zum Glück für die Katze ist dieses Szenario nur ein Gedankenexperiment, das im Jahr 1935 von dem österreichischen Physiker Erwin Schrödinger erfunden wurde. Er wollte damit ein Beispiel geben für die Unsicherheit, mit der im Grunde unsere ganze Welt behaftet ist. Schrödinger war einer der Väter der sogenannten Quantenmechanik, einer Wissenschaft, die die Vorgänge im Bereich des Allerkleinsten mathematisch beschreibt und deutet. Und in dieser mikroskopischen Welt passieren die skurrilsten Dinge: Da können Teilchen gleichzeitig an verschiedenen Orten sein, sie können sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit miteinander verständigen oder übergangslos von einem Ort zum anderen springen. Mit seinem Katzenbild hat Erwin Schrödinger es verstanden, einen außerordentlich komplizierten Gedankengang so populär darzustellen, daß ihn jeder versteht. Vielleicht ist dies der Grund, warum seine Katze so berühmt wurde.

Trotz der theoretischen Probleme bietet die Quantenmechanik aber eine Beschreibung der realen Welt, die mit unserer Alltagserfahrung gut vereinbar ist. Daß dies so ist, beruht allein auf der Tatsache, daß sie nur für winzigste Abmessungen gilt; sobald man zu Längenmaßstäben übergeht, die unserer wahrnehmbaren makroskopischen Welt entsprechen, treten die Regeln der Quantenphysik nicht mehr in Erscheinung — zumindest im Normalfall nicht.

Genau dies erschwert das Verständnis dieser komplizierten Wissenschaft, und Schrödinger erfand deshalb das Gedan-

kenexperiment mit der Katze, um auch für den Laien die Grundidee der Quantenmechanik verständlich zu machen. Sie sagt nämlich aus, daß alles und jedes, sei es ein Teilchen, das Licht oder eine Kraft, in Wirklichkeit ungewiß ist. Kein Teilchen befindet sich zu einer bestimmten Zeit genau an einem bestimmten Ort, kein Lichtstrahl ist nur hier und nicht gleichzeitig woanders, selbst das Vakuum, die absolute Leere, ist erfüllt von einer Vielzahl von Teilchen und Wellen. Diese seltsame, Ungewisse Welt des Verschwommenen und Ungenauen verwandelt sich jedoch schlagartig in unsere gewohnte festgefügte Welt des Erfahrbaren, wenn man darangeht, etwas zu messen. In dem Augenblick, in dem ein Meßgerät ins Spiel kommt, verändert sich die Wirklichkeit so, daß man sie exakt beschreiben kann, wie man das seit dem berühmten Gelehrten Isaac Newton kennt. Bei der Katze ist das »Meßgerät« der Beobachter, der die Kiste öffnet und hineinschaut.

Man könnte also sagen, Meßgeräte verändern die Welt. Sie verwandeln Ungewisses in Gewißheit und Verschwommenes in exakte Daten. So ungewöhnlich diese Idee klingt, hat sie doch schon viele philosophische Zirkel beschäftigt, und das Ergebnis ist bis heute offen. Trotzdem waren die Diskussionen über die Quantenphysik und ihre Aussagen über die Wirklichkeit nicht fruchtlos. Sie haben eine Vielzahl von genialen Überlegungen hervorgebracht, und Experimentalphysiker ruhten nicht, bis sie Anordnungen ersonnen hatten, die manche der seltsamen Vorhersagen überprüfen sollten. So begannen Wissenschaftler mit ganz konkreten Experimenten, Schrödingers Katze zu realisieren, und daraus entstand eines der spannendsten Kapitel der modernen Physik, das bis heute noch keineswegs abgeschlossen ist.

Mit seinem Bild von der Katze zwischen Leben und Tod wollte Schrödinger nicht nur das Grundprinzip der Quantenmechanik illustrieren, sondern auch seinen Zweifeln Ausdruck verleihen. Denn es war ihm unbehaglich zumute bei

dem Gedanken, daß die Welt grundsätzlich auf Ungewißheiten beruhen sollte. Der geniale dänische Theoretiker Niels Bohr, dem wir das »Bohrsche Atommodell« verdanken, beschäftigte sich in vielen Diskussionen ebenfalls mit dieser Frage. Er antwortete Schrödinger, daß Messungen immer mit einem makroskopischen Meßgerät ausgeführt werden müssen, und daß dieser Apparat, der den Gesetzen der klassischen Physik gehorchen muß, die Überlagerung der Quantenzustände zerstört, er läßt sie kollabieren. Diese Erklärung des Übergangs zwischen klassischer und Quantenphysik erhielt den Namen »Kopenhagener Deutung«.

Im Jahr 1996 jedoch gelang es erstmals einem Forscherteam an der Pariser Ecole Normale Supérieure, ein Experiment durchzuführen, bei dem das Meßgerät eben kein makroskopisches Objekt ist, sondern seinerseits ebenfalls den Gesetzen der Quantenphysik gehorcht. In Anlehnung an Schrödingers Katze nannten die Wissenschaftler es »Quantenmaus«. Serge Harouche und Jean-Michel Raimond versetzten ein einzelnes Rubidium-Atom mit Hilfe von Laserimpulsen in eine Überlagerung von zwei gleichzeitigen, hochangeregten Zuständen. Dieses Atom schickten sie durch einen Hohlraum, der die Schwingungen des Atoms gleichsam übernahm, oder anders ausgedrückt, das Atom erzeugte in diesem Hohlraum eine Resonanzschwingung. Auch diese bestand aus der Überlagerung der beiden Zustände, entsprach also quasi Schrödingers halbtoter Katze. Nun untersuchten die beiden französischen Forscher, wie stabil diese Überlagerung unter verschiedenen Bedingungen blieb. Zu diesem Zweck erfanden sie ein raffiniertes Meßgerät: Es besteht aus einem zweiten Atom, das sie durch den Hohlraum fliegen ließen und das dessen Schwingung abtastete. Anschließend konnte man seinen Zustand in einem Detektor überprüfen. Harouche verglich das zweite Atom mit einer Quantenmaus, die im Vorbeiwandern den Zustand der Schrödingerschen Katze über-

prüft, ohne die Kiste zu öffnen. Und diese geniale Quantenmaus war nicht, wie von Bohr postuliert, ein Gegenstand der klassischen Physik, sondern wegen seiner winzigen Größe selbst ein quantenphysikalisches Objekt.

Das Ergebnis des Experiments zeigte, daß der Übergang vom Quantenzustand zur klassischen Physik nicht schlagartig, sondern allmählich erfolgt. Je größer der Zeitabstand zwischen dem Durchgang des ersten und des zweiten Atoms durch den Hohlraum war, desto wahrscheinlicher wurde es, daß die Überlagerung der beiden Zustände bei der Messung bereits kollabiert war. Das Fazit der Forscher: Beim Übergang vom Mikro- zum Makrokosmos geht die Quantenphysik ganz allmählich in die klassische Physik über. Je größer das betrachtete System ist, desto kurzlebiger sind Überlagerungen zwischen zwei Zuständen, etwa tot und lebendig. Im erlebbaren, makrophysikalischen Alltag wird man ihnen also wohl nie begegnen.

Ein ganz entsprechendes Ergebnis erhielten die amerikanischen Physiker Chris Monroe und David Wineland vom National Institute of Standards and Technology in Boulder/Colorado. Sie erzeugten an einem Beryllium-Atom ebenfalls durch Laserimpulse eine Überlagerung von zwei Hyperfeinzuständen. Diese entstehen durch die Wechselwirkung der Elektronen in der Atomhülle mit den elektromagnetischen Feldern des Atomkerns. Die Überlagerung wurde mit einer Schaukelbewegung des Atoms in einer Ionenfalle verbunden. Monroe verglich die Anordnung mit einem Kind auf einer Schaukel, das hin und her, gleichzeitig aber auch her und hin schwingt. Eine Momentaufnahme, wäre sie möglich, würde das Atom zur selben Zeit an zwei verschiedenen Orten zeigen. Der Abstand zwischen diesen beiden Orten betrug nach den Berechnungen der amerikanischen Forscher rund achtzig Nanometer (Millionstel Millimeter). Sie fanden nun heraus, daß der Überlagerungszustand um so schneller wieder verschwindet, je

größer diese Distanz der gekoppelten Teilatome ist. Auch hieraus lautet die Schlußfolgerung, daß bei den Abmessungen unserer Alltagswelt keine quantenmechanischen Überraschungen zu erwarten sind. j

Achtzig Nanometer ist jedoch ein Abstand, der von den Größenordnungen der elektronischen Schaltkreise, die heute in den Labors der Computerindustrie entwickelt werden, nicht mehr allzu weit entfernt ist. So könnte es sein, daß eine noch weitere Miniaturisierung der Computerchips uns eines Tages in die Wunderwelt der Quantenphysik führt und doch noch eine direkte Verbindung herstellt zwischen unserer Alltagswelt und den Ungewißheiten im Kleinsten, die Schrödinger vorhergesagt hatte.

Der Umsturz im Weltbild der klassischen Physik

Ist Licht Teilchen oder Welle?

Licht ist für die meisten Menschen eine Selbstverständlichkeit, über die sie sich nicht viele Gedanken machen. Für die Physiker ist das Licht jedoch schon seit Jahrhunderten ein Studienobjekt, an dem sich die Geister scheiden. Und Licht ist auch der Schlüssel zur Quantenphysik. Eine der zentralen Fragen im Zusammenhang mit Licht war stets, ob es aus Wellen oder aus Teilchen besteht. Im Lauf der Jahrhunderte gab es wechselnde Schulen für die eine oder die andere Vermutung, und vielfach bekämpften sich die Anhänger der beiden Theorien mit erbitterter Härte.

Der Leidener Mathematikprofessor Willebrord Snellius untersuchte Anfang des 17. Jahrhunderts die Brechung von Lichtstrahlen beim Übergang von einem Medium zu einem anderen, also zum Beispiel von Luft in Wasser. Dabei entdeckte er 1621 das Brechungsgesetz, das bis heute gilt. Es sagt aus, daß sich Licht in unterschiedlichen Medien mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Bekanntgemacht wurde dieses Gesetz jedoch erst 1637 von Rene Descartes, der sich bemühte, es gemeinsam mit anderen optischen Phänomenen durch die Annahme zu erklären, daß das Licht aus kleinen Partikeln bestehe, die sich in schneller geradliniger Bewegung befinden. So stellte er sich auch vor, daß die Reflexion von Lichtstrahlen nichts anderes sei als das Abprallen der Lichtteilchen an elastischen Oberflächen. Für die Wellentheorie des Lichts hingegen entschied sich etwa zur gleichen Zeit

der italienische Mathematiker Francesco Grimaldi in Bologna. Er hatte beobachtet, daß Schatten immer etwas größer sind, als sie bei geradliniger Ausbreitung des Lichts eigentlich sein dürften, außerdem sind die Ränder des Schattens oft gefärbt. Diese beiden Effekte lassen sich gut durch Wellen erklären, denn ähnliche Beobachtungen kann man auch machen, wenn man Wasserwellen betrachtet, die ein Hindernis umlaufen. So glaubte Grimaldi, daß Licht ein Fluidum sei, das sich mit großer Geschwindigkeit bewegt und gleichzeitig schnell schwingt.

Der holländische Wissenschaftler Christian Huygens baute vor rund dreihundert Jahren auf der Theorie Grimaldis auf: Er hielt jedoch das Fluidum, das er Äther nannte, für stationär; in ihm sollten sich die Lichtschwingungen wie Wasserwellen ausbreiten. Der Äther sollte aus winzigen elastischen Teilchen bestehen, die Impulse übertragen können, ohne dabei ihre eigene Lage zu verändern, und sollte alle durchsichtigen Körper ausfüllen, die von Licht durchdrungen werden. Beim Durchgang durch feste Körper, etwa durch Glas, mußten die Lichtwellen jedoch Umwege um die Teilchen des Körpers machen, so daß ihre Ausbreitung verlangsamt würde. Auf diese Weise erklärte Huygens die Brechung des Lichts. Er veröffentlichte seine Erkenntnisse 1690 in seinem Werk >Traites de la Lumiere<.

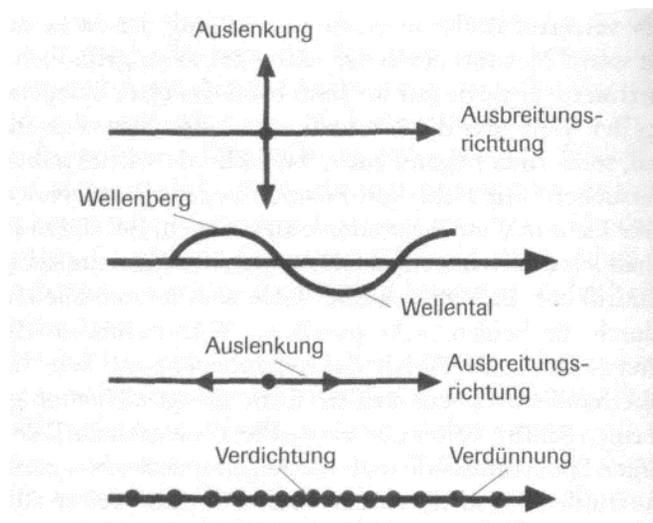
Um diese Theorie entbrannte zwischen ihm und dem englischen Gelehrten Isaac Newton eine der berühmtesten Kontroversen über die Natur des Lichts, denn Newton vertrat im Gegensatz zu Huygens wie Descartes die Ansicht, daß das Licht aus Teilchen bestehe.

Eigentlich hatte sich Newton gar nicht sonderlich für das Wesen des Lichts interessiert, er beschäftigte sich lieber mit Astronomie. Als gutem Beobachter fiel ihm jedoch auf, daß die damals gebräuchlichen Fernrohre, die aus Kombinationen mehrerer Linsen bestanden, an den Rändern stets farbige und

leicht verzerrte Bilder lieferten, und er ging der Sache nach. Und wenn Newton etwas tat, dann tat er es gründlich: So konstruierte er nicht nur im Jahr 1668 das erste Spiegelteleskop der Welt, das die Nachteile der Linsenfernrohre überwand, sondern er begann auch, das Licht als solches näher zu untersuchen. Mit Hilfe von Prismen begann Isaac Newton, weißes Licht in seine Bestandteile zu zerlegen. Bei einem Prisma handelt es sich um einen Glaskörper, der einen dreieckigen Grundriß hat. Läßt man weißes Licht so hindurchfallen, daß es durch die beiden nicht parallelen Wände hindurchtritt, spaltet es sich in die Farben des Regenbogens auf: Wie durch Zauberhand wird so aus weißem Licht farbiges. Newton ging nun einen Schritt weiter und versuchte, die einzelnen Teile des farbigen Spektrums, wie man die Regenbogenfarben nannte, herauszufiltern und durch ein zweites Prisma weiter aufzufächern. Dabei stellte er fest, daß die Spektralfarben nicht mehr weiter zu zerlegen waren.

Im Jahr 1704 veröffentlichte Newton in seinem Buch >Opticks< seine Erklärung für die experimentellen Ergebnisse. Dabei vertrat er die Ansicht, daß Licht aus Partikeln bestehe, die sich auf geraden Linien bewegten, sie sollten im umgebenden Äther Vibrationsbewegungen erzeugen.

Der Gegensatz zwischen Huygens und Newton entzweite eine ganze Generation von Gelehrten. Die Kontroverse wurde nicht immer mit feinen Mitteln ausgetragen, und die wissenschaftlichen Gesellschaften der jeweiligen Länder spielten dabei keine allzu rühmliche Rolle. Der Streit wurde jedoch damals nicht entschieden, er geriet einfach in Vergessenheit, mit leichten Vorteilen für die Korpuskulartheorie Newtons. Nach ihm gab es in der Optik ein Jahrhundert lang keine großen Neuigkeiten, und die Theoretiker fanden andere Gebiete der Physik, mit denen sie sich beschäftigen konnten. Die Natur des Lichts kam erst wieder zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf die Tagesordnung. Inzwischen hatte sich Newtons



Longitudinale und transversale Wellenformen

Ansicht weitgehend durchgesetzt, auch wenn man nicht mehr an den Äther glaubte. Das Licht, so dachte man, bestehe einfach aus schnell fliegenden Teilchen.

Deutsche Naturphilosophen und Gelehrte aus England und Frankreich begannen sich nun jedoch gegen die Newton-schen Anschauungen aufzulehnen, und eine Vielzahl neuer Experimente, etwa zur Doppelbrechung und zur Polarisation, legten den Schluß nahe, daß Licht doch eine Welle sei. Vor allem als der Londoner Arzt Thomas Young im Jahr 1817 erkannte, daß Licht nicht eine longitudinale Schwingung ist, die sich analog zu Schallwellen parallel zur Schwingungsrichtung ausbreitet, sondern eine transversale Schwingung, deren Wellen senkrecht (transversal) zur Ausbreitungsrichtung schwingen, konnten viele Phänomene erklärt werden, die vorher geheimnisvoll erschienen waren.

Die neuen Wellentheorien des Lichts warfen jedoch die Frage auf, welche Eigenschaften der Äther haben sollte - das Medium, in dem sich die Wellen ausbreiteten. Es ist ein spannendes Kapitel der Wissenschaftsgeschichte, die unterschiedlichen, zum Teil abenteuerlichen Vorstellungen der damaligen Gelehrten miteinander zu vergleichen, es würde hier aber zu weit führen. Letzten Endes konnte sich gegen Mitte des 19. Jahrhunderts die Wellentheorie des Lichts durchsetzen. Als in den Jahrzehnten danach elektrische und magnetische Phänomene ins Blickfeld der Wissenschaft rückten, kam dem britischen Physiker Clerk Maxwell der Gedanke, daß Licht womöglich ein elektromagnetisches Phänomen sei. Er glaubte, daß »das Licht aus Transversalschwingungen desselben Mediums besteht, welches auch die Ursache der elektrischen und magnetischen Erscheinungen ist«. Später ließ er seine Äthertheorie ganz fallen und konzentrierte sich auf die mathematischen Gleichungen, die er für wellenartige Störungen im Äther abgeleitet hatte. Seine »Maxwellschen Gleichungen« beschreiben das Verhalten des Lichts und anderer elektromagnetischer Strahlung auch heute noch korrekt und gehören zum Rüstzeug jedes modernen Physikers.

Die Waage hatte sich nun also noch deutlicher zur Seite der Wellentheorie des Lichts hin gesenkt. Trotzdem blieb eine Schwierigkeit: Das Postulat eines Äthers, also eines unsichtbaren Mediums, das die Schwingung transportieren sollte, half zwar dabei, viele Erscheinungen zu erklären, warf allerdings auch neue Fragen auf. Zum Beispiel war es schwierig, zu erklären, warum er die Bewegung der Planeten im Weltall nicht behindere. Es gab aber auch noch andere offene Fragen: Unter anderem konnte man nicht verstehen, warum ein Körper beim Erhitzen erst rot, dann gelb, dann weiß glüht. Nach der Wellentheorie des Lichts müßte jeder heiße Körper nicht sichtbare Farben, sondern ultraviolette Strahlung oder Röntgenstrahlung aussenden.

Max Planck, seit 1889 Professor für Physik in Berlin, fand eine mathematische Lösung für das Problem, indem er annahm, daß die Atome des glühenden Körpers Licht nicht kontinuierlich, sondern in Form kleiner Energiepakete ausstrahlen, die er Quanten nannte. Die Energie eines Quants sollte mit der Frequenz des Lichts zunehmen, blaue Quanten also energiereicher sein als gelbe oder rote. Aus seinen Berechnungen ergab sich eine neue, universell gültige physikalische Konstante, die Planck als elementares Wirkungsquantum bezeichnete und mit dem seitdem dafür üblichen Buchstaben »h« benannte. Es ist eine winzig kleine Zahl, ihr Wert beträgt rund $6,6 \cdot 10^{-35}$ Joule mal Sekunde. In der Praxis verwendet man oft auch die »reduzierte Planck-Konstante« h , sie beträgt $h/2\pi$ und wird bei der Messung des Drehimpulses benutzt. Quanten kann man mit kleinen Paketen oder Körnern vergleichen, aber all dies sind nur Bilder. Ähnlich wie der Geldautomat meiner Bank immer nur Beträge auszahlt, die ein Vielfaches von fünfzig Mark betragen, kann Energie unter bestimmten Bedingungen nur in Quanten bestimmter Größe auftreten. Mein Konto weist einen Betrag auf, der keineswegs durch fünfzig teilbar ist, aber im Geldautomat wird mein Geld eben ge-quantelt, ebenso wie Licht gequantelt wird, wenn es von einem Atom aufgenommen oder abgegeben wird. Planck trug seine Theorie am 14. Dezember 1900 vor der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin vor. Seine These erklärte die beobachteten Phänomene perfekt, aber ihre wirkliche Bedeutung lag zu diesem Zeitpunkt noch im Dunkeln. Zwanzig Jahre später erklärte Planck in seinem Vortrag anlässlich der Verleihung des Nobelpreises: »Aber selbst wenn die Strahlungsformel sich als absolut genau bewähren sollte, so würde sie, lediglich in der Bedeutung einer glücklich erratenen Interpolationsformel, doch nur einen recht beschränkten Wert besitzen. Daher war ich von dem Tage ihrer Aufstellung an mit der Aufgabe beschäftigt, ihr einen wirklichen physikali-

schen Sinn zu verschaffen ... bis sich nach einigen Wochen der angespanntesten Arbeit meines Lebens das Dunkel lichtete und eine neue, ungeahnte Fernsicht aufzudämmern begann.«

In dem Buch »Die Evolution der Physik«, das Albert Einstein 1937 gemeinsam mit Leopold Infeld verfaßte, führen die beiden Gelehrten die neue Idee etwas genauer aus: »... müssen wir annehmen, daß homogenes Licht sich aus Energie->Körnchen< zusammensetzt. Ist dem so, dann lassen sich die Lichtkorpuskeln der alten (Newtons) Lehre durch Lichtquanten ersetzen, die wir Photonen nennen wollen. Es sind dies kleine Energiemengen, die den leeren Raum mit Lichtgeschwindigkeit durchmessen. Die Neubelebung der Newtonschen Theorie in dieser Form hat zur Aufstellung der Quantentheorie des Lichtes geführt. Nicht nur Materie und elektrische Ladungen haben eine »körnige« Struktur; für die Strahlungsenergie gilt genau dasselbe, das heißt, auch sie setzt sich aus Quanten, nämlich Lichtquanten, zusammen. (...) Der Gedanke der Energiequanten wurde zu Anfang unseres Jahrhunderts erstmalig von Planck in die Physik eingeführt, der damit gewisse Phänomene zu deuten suchte.«

Licht, oder allgemeiner gesprochen Energie, gequantelt in kleine Portionen - dies war eine Idee, die nun wieder das gesamte Bild vom Wesen des Lichts über den Haufen warf und die Max Planck so zunächst auch noch nicht postulierte. Erst Einstein zeigte später zwingend, daß diese Vorstellung, die vielen absurd erschien, die Natur erklären konnte. Er baute auf diesem Postulat viele wichtige Arbeiten auf. Eine davon, für die er letztlich 1921 den Nobelpreis erhielt, war die Deutung des sogenannten photo- oder lichtelektrischen Effekts: Einsteins Kollege Philip Lenard hatte festgestellt, daß Licht unter bestimmten Bedingungen in der Lage war, aus Metalloberflächen Elektronen herauszuschlagen. Das Erstaunliche an den Ergebnissen von Lenards Meßreihen war, daß mit zunehmender Helligkeit der Lichtquelle zwar mehr Elektronen

herausgeschlagen wurden, daß aber die Geschwindigkeit dieser Elektronen nicht zunahm. Sie hing jedoch mit der Frequenz des eingestrahnten Lichts zusammen - je höher die Frequenz, desto schneller waren die Elektronen. Außerdem wunderte sich Lenard über die Tatsache, daß schon äußerst winzige Lichtmengen ausreichten, um Elektronen aus der Metalloberfläche herauszulösen. Mit den Vorstellungen der klassischen Physik war dies nicht erklärbar. Um eine Erklärung für die Versuchsergebnisse zugeben, postulierte Einstein im Jahr 1905: Die Lichtenergie wird durch Energiequanten (später Photonen genannt) der Größe $h \cdot \nu$ durch den Raum transportiert (wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und ν die Frequenz des Lichts bedeutet) und von Elektronen im Atom ebenfalls in Form von Energiebündeln aufgenommen.

Treffen nun Energiebündel einheitlicher Größe auf Elektronen, so geben sie diesen jedesmal die gleiche Energiemenge und damit die gleiche Geschwindigkeit mit. Intensiveres Licht bedeutet lediglich, daß mehr Lichtquanten pro Fläche auftreffen, aber die Energie der Quanten ändert sich nicht. Deshalb werden bei größerer Licht Intensität zwar mehr Elektronen aus der Metalloberfläche herausgeschlagen, aber deren Geschwindigkeit erhöht sich nicht. Daß auch geringste Intensitäten ausreichen, um den photoelektrischen Effekt auszulösen, läßt sich mit der Quantenhypothese ebenfalls erklären: Im Grunde genügt schon ein einziges Photon, um ein Elektron herauszuschlagen. Verändert man die Frequenz des Lichts, also seine Farbe, haben die Energiequanten eine andere Größe, deshalb ändert sich damit auch die Geschwindigkeit der herausgeschlagenen Elektronen. So konnte Einstein alle Phänomene aus Lenards Experimenten befriedigend erklären.

Dennoch war sich der Forscher der Merkwürdigkeit seiner Hypothese bewußt. Sie wurde von seinen Fachkollegen mit größter Skepsis aufgenommen, gerade auch von Max Planck, der 1913 anläßlich der Aufnahme Einsteins in die Berliner

Akademie der Wissenschaften sagte: »Daß Einstein in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag wie bei seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzusehr anrechnen dürfen, denn ohne ein Risiko zu tragen, läßt sich auch in den exakten Wissenschaften keine wirkliche Neuerung einführen.« Heute wissen wir, daß der Irrtum damals auf Plancks Seite lag.

Bald schon gab es auch eine experimentelle Bestätigung für Einsteins Theorie. Der amerikanische Physiker Robert A. Millikan, ein begnadeter Experimentator, führte 1914 exakte Versuche zum lichtelektrischen Effekt durch, und diese bestätigten aufs Genaueste die Voraussagen Einsteins.

Trotz großer Widerstände in der älteren Generation der Wissenschaftler mußte man nun allmählich zugeben, daß Licht sich einerseits als Welle verhalten konnte, gleichzeitig aber auch aus Teilchen bestehen mußte. Es dauerte aber noch etliche Jahre, bis eine jüngere Generation von Forschern bereit war, diesen Bruch der Denkgewohnheiten ernsthaft und mit allen Konsequenzen zu vollziehen.

Das Bohrsche Atommodell

Die Vorstellung, Energie sei quantisiert und trete also in Form von Paketen auf, konnte sich zwar zunächst nicht allgemein durchsetzen, aber sie regte einige geniale Geister dazu an, sie mit anderen Denkmodellen zu kombinieren. Eines davon war das damals noch nicht recht ausgegorene Atommodell.

Der neuseeländische Physiker Ernest Rutherford hatte 1911 aufgrund experimenteller Ergebnisse ein Atommodell vorgeschlagen, das von der Idee ausging, daß der größte Teil der Masse eines Atoms im Kern des Atoms konzentriert sei. Dort befindet sich auch eine positive Ladung, die durch die

sehr leichten, negativen Elektronen ausgeglichen werde, die diesen Kern wie Planeten die Sonne umkreisen sollten. Die elektrische Anziehung zwischen dem positiven Kern und den negativen Elektronen sollte das Atom zusammenhalten und die Zentrifugalkräfte ausgleichen. Daß bei einem solchen Modell nach der klassischen Vorstellung der Elektrodynamik die kreisenden Elektronen ständig Energie abstrahlen müßten und deshalb schnell abgebremst würden und in den Kern hineinfielen, hat Rutherford vielleicht erkannt, sich aber nicht weiter darum gekümmert. Eine Lösung dieses Problems schlug zwei Jahre später der dänische Physiker Niels Bohr vor, Er postulierte etwas, was dem gesunden Menschenverstand völlig widersprach und deshalb auch bei manchen seiner Kollegen auf erbitterte Ablehnung stieß. Es gibt, so glaubte Bohr, bestimmte Bahnen, die die Elektronen im Atom einnehmen können und auf denen sie keine Energie nach außen abstrahlen. Auf weiter außen gelegenen Bahnen haben die Elektronen mehr Energie als auf den weiter innen gelegenen. Die Bahnen seien dadurch charakterisiert, daß der Drehimpuls der Elektronen ganzzahlige Vielfache des Wertes \hbar beträgt. Die Elektronen können sich nur auf diesen Bahnen bewegen und nirgendwo sonst. Sie können aber zwischen den Bahnen hin und her wechseln. Dabei nehmen sie entweder Energie auf (wenn sie von innen nach außen springen) oder sie geben Energie ab (im umgekehrten Fall). Die Differenz zwischen den Energieniveaus der einzelnen Bahnen solle dann gerade jeweils einem Energiequant entsprechen. Ein Atom, oder genauer gesagt, seine Elektronen, können also nur Licht ganz bestimmter Frequenz aufnehmen und abgeben. Eine seltsame Vorstellung: Elektronen springen zwischen Bahnen hin und her, indem sie auf der einen Bahn plötzlich verschwinden und auf der anderen neu auftauchen. Und sie folgen nicht mehr den Gesetzen der Elektrodynamik. Max von Laue, der berühmte deutsche Physiker, empfand dies

empört als Zumutung und sagte: »Das ist Unsinn, die Max-wellschen Gleichungen gelten unter allen Umständen, ein Elektron auf Kreisbahn muß strahlen.« Im Grunde berühre Bohrs Atommodell auf reiner Spekulation. Es zeigte sich aber, daß es einige schon lange bekannte experimentelle Befunde gut deuten konnte, für die man vorher keinerlei Erklärung gehabt hatte, nämlich die Anordnung der Spektrallinien des Wasserstoffs und anderer Elemente. Wenn man Sonnenlicht durch ein Prisma schickt, wird es, wie schon Newton erkannte, in seine Spektralfarben aufgefächert. Bei genauer Betrachtung zeigt sich jedoch, daß diese Farben nicht ganz komplett sind; an einigen Stellen existieren dunkle Linien. Der Schweizer Zahlen akrobater Johann Jakob Balmer hatte für die Abstände zwischen diesen Linien eine bis dahin unerklärliche Formel gefunden, aber wie sie entstanden war nach wie vor unklar.

Bohrs Hypothese brachte — im wahrsten Sinn des Wortes — Licht in dieses Dunkel. Wenn man seinem Atommodell folgte, entsprachen die Energiepakete, die das Elektron eines Wasserstoffatoms aufnehmen konnte, genau den Positionen der dunklen Linien. In der Tat entstehen diese dadurch, daß das Sonnenlicht durch Wasserstoffwolken hindurchscheint und dabei viele Wasserstoffatome anregt. Sie nehmen Energiequanten aus dem Sonnenlicht auf, und zwar genau diejenigen, deren Größe den Energieunterschieden zwischen ihren Elektronenbahnen n entspricht. Man nennt diesen Vorgang Absorption. Im restlichen Sonnenlicht, das auf der Erde ankommt, fehlen also genau diese Lichtquanten, an ihrer Stelle herrscht Dunkelheit in Form feiner Linien. Da diese für Wasserstoffatome ganz charakteristisch sind, nennt man sie auch Wasserstofflinien.

Ganz entsprechende Vorgänge laufen ab, wenn man Atome anderer Elemente betrachtet, die komplizierter aufgebaut sind, Auch dort findet man charakteristische Absorptionslinien, die dadurch entstehen, daß Elektronen des jeweiligen

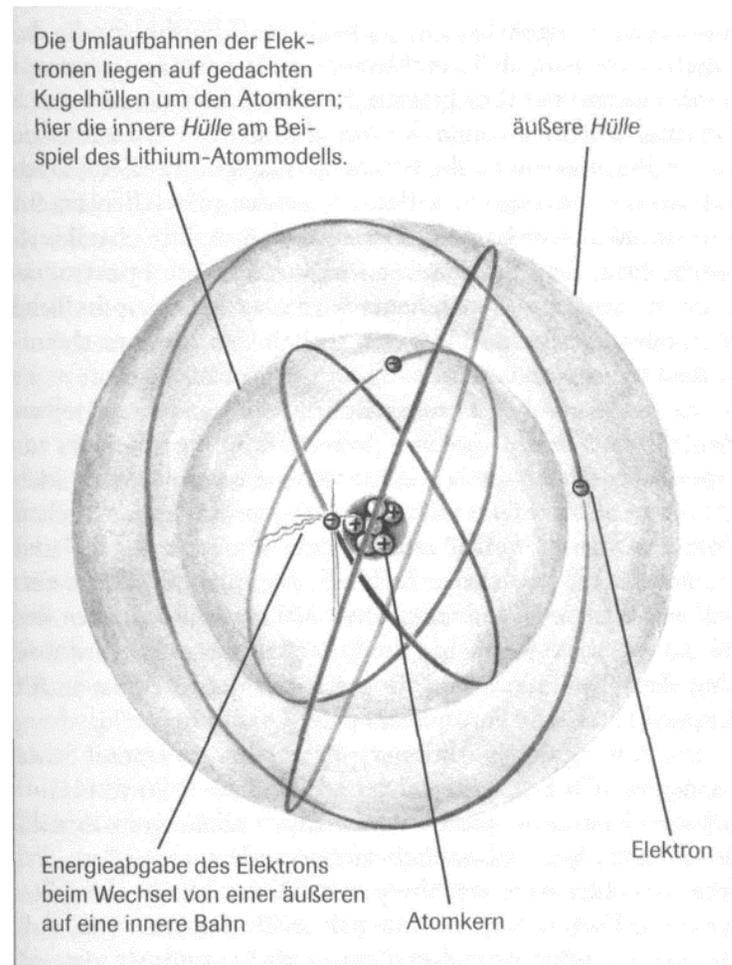
Der Physiker Niels Bohr entwickelte das folgende Atommodell, das in Teilen bis heute gültig ist:

Atome bestehen aus Kern und Hülle. Der Atomkern ist positiv geladen, die Hülle besteht aus Elektronen, die den Kern umkreisen. Sie bewegen sich auf Bahnen, bei denen zwischen der Fliehkraft und der elektrischen Anziehung durch den Kern stets Gleichgewicht herrscht. Es sind für die Elektronen aber nur ganz bestimmte Bahnen erlaubt, auf denen sie - entgegen den Vorhersagen der klassischen Physik - keine Energie verlieren. Man nennt diese Bahnen Quantenbahnen, die außen liegenden Bahnen sind energiereicher als die Bahnen weiter innen.

Elektronen können von einer Quantenbahn auf eine andere springen. Springt ein Elektron von einer inneren auf eine äußere Bahn, muß es dazu Energie aufnehmen, fällt es von einer äußeren Bahn auf eine innere, gibt es Energie ab. Die Energiedifferenz wird jeweils in Form eines sogenannten Energiequants entweder geschluckt oder freigesetzt, man nennt diese Energiequanten auch Photonen. Durch seine Annahmen konnte Bohr erklären, warum beispielsweise eine Wasserstoffflamme nur Licht mit ganz bestimmten Linien, also Frequenzen, abstrahlt. Diese Frequenzen entsprechen genau den Übergängen zwischen verschiedenen Bahnen. Die jeweilige Frequenz berechnet sich nach der Formel

$$E = h \cdot \nu$$

wobei h eine Konstante ist, die man Plancksches Wirkungsquantum nennt, und ν die Frequenz des Photons bezeichnet.



Atome bestimmte Lichtquanten aus dem weißen Licht herausfangen. Umgekehrt gibt es auch Emissionslinien, die dadurch entstehen, daß ein Element zum Leuchten angeregt wird, indem man ihm Energie zuführt, beispielsweise durch Erhitzen. Die Elektronen der Atomhülle nehmen die Energie auf und springen auf höhere Bahnen. Nach kurzer Zeit jedoch verlassen sie die höheren Bahnen wieder und fallen erneuert zurück auf tiefere Bahnen. Dabei senden sie ihre charakteristische Strahlung aus, die man in sogenannten Spektrographen messen kann. Noch heute wird diese sehr empfindliche Methode dazu verwendet, das Vorhandensein eines chemischen Elements in einem Stoffgemisch nachzuweisen.

Genau genommen beruhte Bohrs Atommodell auf reinen Zahlenspielerien. Der Autor John Gribbin nennt es ein zusammengesetztes »Mischmasch-Atom«, in dem sich Quantenvorstellungen mit Vorstellungen aus der klassischen Physik vermengten. Daß es die Spektrallinien so gut erklären konnte, hätte vielleicht auch Zufall sein können. Wieder einmal war es aber Einstein, der Ideen aus unterschiedlichen Bereichen zusammenbrachte und daraus neue Erkenntnisse über die Physik gewann. Er legte damit den Grundstein für die mathematische Formulierung der Quantenphysik.

Seit Anfang des Jahrhunderts hatte man ein erstaunliches Phänomen näher untersucht, das erst im Jahr 1896 von Henri Becquerel entdeckt worden war: den radioaktiven Zerfall. Bestimmte Elemente wandeln sich in andere um und senden dabei Teilchen oder Strahlung aus. Dieser »Radioaktivität« genannte Prozeß barg zwei Geheimnisse: Das eine war, daß man nicht wußte, woher die Energie dafür stammte, das andere, daß man nie vorhersagen konnte, wann ein Atom zerfiel. Das einzige, was man wußte, war, daß innerhalb eines bestimmten charakteristischen Zeitraums jeweils die Hälfte des vorhandenen radioaktiven Stoffes zerfällt. Dies ergab sich aufgrund der Statistik, denn auch kleine Materialmengen ent-

halten unzählig viele Atome. So war also der radioaktive Zerfall eines Atoms mit einer großen Unsicherheit behaftet: Man konnte seinen Zeitpunkt nicht vorhersagen. Natürlich glaubte man damals, daß dies nur daran lag, daß man noch nicht alle Geheimnisse des Zerfalls kannte. Man war sicher, daß weitere Forschung eines Tages die genauen Ursachen für den Zerfall finden würde und damit auch eine exakte Vorhersage des Zerfallszeitpunkts ermöglichen werde, denn »Gott würfelt nicht«, wie Einstein einmal sagte - wie wir heute wissen, ein fundamentaler Irrtum.

Einstein war aufgefallen, daß das Bohrsche Atommodell [einen ähnlichen Mechanismus aufwies: Man konnte nie genau vorhersagen, zu welchem Zeitpunkt ein Elektron von einer auf eine andere Bahn springen würde. Irgendwie schienen diese Übergänge zwischen den Energieniveaus auch nur der Statistik zu gehorchen, ebenso wie der radioaktive Zerfall. Im Jahr 1916 brachte er seine Gedankengänge dazu in eine mathematische Form und berechnete, was diese Formeln ergaben, wenn man einen Körper extrem heiß werden ließ. Das Erhoffte trat ein: Einstein erhielt auf diese Weise genau die Plancksche Formel, die dieser aus ganz anderen Überlegungen hergeleitet hatte und die ihn im Jahr 1900 dazu bewogen hatte, Energiequanten zu postulieren.

Die Überlegung, daß bestimmte physikalische Vorgänge keine konkrete Ursache haben und einzig und allein dem Zufallsprinzip gehorchen, stellte eine Idee dar, die für die Physik völlig neu war. Sie brach mit der Vorstellung, daß Ursache und Wirkung die Welt bestimmten, was spätestens seit Newton als ehernes Gesetz galt. Und in der Tat gilt dieses Gesetz auch heute noch für die klassische Physik: Angenommen, man kennt den Zustand der Welt so genau, daß man den Ort i und die Bewegung aller Teilchen kennt, dann kann man daraus theoretisch genau vorhersagen, wie sich der Zustand der Welt weiterentwickeln wird. Daß wir dies in der Praxis nicht

können, liegt lediglich an der Unzahl von Informationen, die dafür nötig wären. Aber es gibt keinen prinzipiellen Hinderungsgrund. In der Welt der Quantenphysik ist dies ganz anders. Hier gelten die Gesetze des Zufalls und der Wahrscheinlichkeit. Einstein hat dies in sein mathematisches Kalkül mit einbezogen, auch wenn er persönlich nicht daran glaubte, daß dies der Weisheit letzter Schluß sei. Erst die Physiker, die auf seinen Arbeiten aufbauten und die Quantenmechanik entwickelten, bekannten sich konsequent zu den »neuen« Regeln,

Quantenzahlen bringen Ordnung in die Welt

Wie alle physikalischen Modellvorstellungen ist auch das Bohrsche Atommodell nur eine bildliche Betrachtungsweise für einen viel komplizierteren Sachverhalt. Es greift einige Eigenschaften von Atomen heraus und erklärt sie anhand vereinfachter Darstellung. Das Bild vom Atomkern, der von den Elektronen wie von Planeten auf Bahnen umkreist wird, hat mit der Realität wenig zu tun. Dennoch erklärt es - wie wir schon gesehen haben - beispielsweise das Spektrum des Wasserstoffs sehr gut. [

Nun ist aber Wasserstoff das einfachste aller Atome, es besitzt nur ein Elektron. Dieses läuft nach Bohrs Modell auf einer Bahn, deren Drehimpuls ein ganzzahliges Vielfaches von h beträgt. Wenn es Energie aufnimmt, kann es auf höhere Bahnen springen und umgekehrt. Die möglichen Bahnen wurden nun anhand sogenannter Quantenzahlen geordnet.

Zunächst hat man die Bahnen des Elektrons von innen nach außen durchnummeriert und mit dem Buchstaben »n« bezeichnet, n ist die Hauptquantenzahl, steht für die Energie und kann die Werte 1, 2, 3, 4 und so weiter annehmen. Dieses Grundmodell wurde weiter verfeinert. Man lernte, die

Elektronen nicht nur nach ihrer Gesamtenergie auf den Bahnen einzuordnen, sondern auch den Bahndrehimpuls sowohl nach Betrag und Richtung als auch den Eigendrehimpuls mit zu berücksichtigen. So wurde die ebenfalls ganzzahlige Drehimpulsquantenzahl »l« eingeführt, die von 0 bis n-1 gehen kann, sie charakterisiert die Bindungsgeometrie der Elektronen rund um den Kern. Die magnetische Quantenzahl »m« steht für die Richtung, die die Elektronenbahnen relativ zu einem äußeren Magnetfeld einnehmen, und umfaßt im einfachsten Beispiel die Zahlen -1, 0 und +1. Und schließlich die Spinquantenzahl »s«: Sie hat den Wert -1/2 oder +1/2, den Elektronen kann man sich bildhaft vorstellen wie winzige geladene Kugeln, die sich um ihre eigene Achse drehen, wöbe der Nordpol einmal nach oben und einmal nach unten zeigt. Diese Rotation bezeichnet man als Spin.

Für sich allein genommen, bedeuten diese Zahlen noch recht wenig, sie dienen nur dazu, ein Ordnungsschema aufzustellen. In den Jahren 1925/26 hat ihnen jedoch der geniale Physiker Wolfgang Pauli eine Bedeutung gegeben. Zunächst nur durch intuitives Herumprobieren stellte er fest, daß man die Spektrallinien aller Atome erklären konnte, wenn man eine Regel aufstellt, die folgendes aussagt: In einem Atom dürfen keine zwei Elektronen im gleichen Quantenzustand sein. Das heißt, sie dürfen nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen. Diese Regel wird »Pauli-Prinzip« oder »Paulische Ausschlußregel« genannt. Erst später gelang es dem Forscher, sie auch mathematisch aus der Quantenmechanik abzuleiten. Sie begründet das Schalenmodell, das bis heute gute Dienste leistet, und gilt, so erkannte man nach und nach, nicht nur für Elektronen, sondern für alle Teilchen mit halbzahligem Spin. Sie werden Fermionen (nach dem italienischen Physiker Enrico Fermi) genannt, im Gegensatz zu den Bosonen (nach dem indischen Physiker Satyendra Nath Bose). Diese besitzen ganzzahligen Spin und können sich in beliebiger Anzahl auf

dem gleichen Niveau aufhalten — bevorzugen dies sogar, was beispielsweise in der Praxis die Möglichkeit eröffnet, Laser zu konstruieren.

Nach dem Pauli-Prinzip hingegen können sich also auf der innersten Bahn (oder Schale) eines Atoms nur zwei Elektronen aufhalten: eines mit Spin nach oben und eines mit Spin nach unten. Dann ist diese innerste Schale voll, weitere Elektronen können nur in der nächsthöheren Schale Platz finden. Eine volle innerste Schale mit zwei Elektronen hat das Helium-Atom. Die Quantenzahlen brachten eine gewisse Ordnung in den Aufbau der Elektronenhüllen und schufen einen Übergang vom Wasserstoffspektrum zu den Spektren der schwereren Atome. In der innersten Schale eines Atoms - so sagen die Quantenregeln - ist $n=1$. Also müssen l und m gleich Null sein. Lediglich s kann noch die Werte $+1/2$ und $-1/2$ annehmen. Mit anderen Worten heißt das: Auf dieser innersten Schale kann es nur zwei Elektronen geben, dann ist die Schale voll. Für die nächsthöhere Schale, also die mit der Nummer 2, gilt: $n=1$ und 2, damit kann l die Werte 0 und 1 annehmen, m erhält die Werte $-1, 0, +1$, und s bleibt bei seinen zwei Möglichkeiten. Systematisch dargestellt können also in der zweiten Schale Elektronen mit den folgenden Kombinationen auftreten:

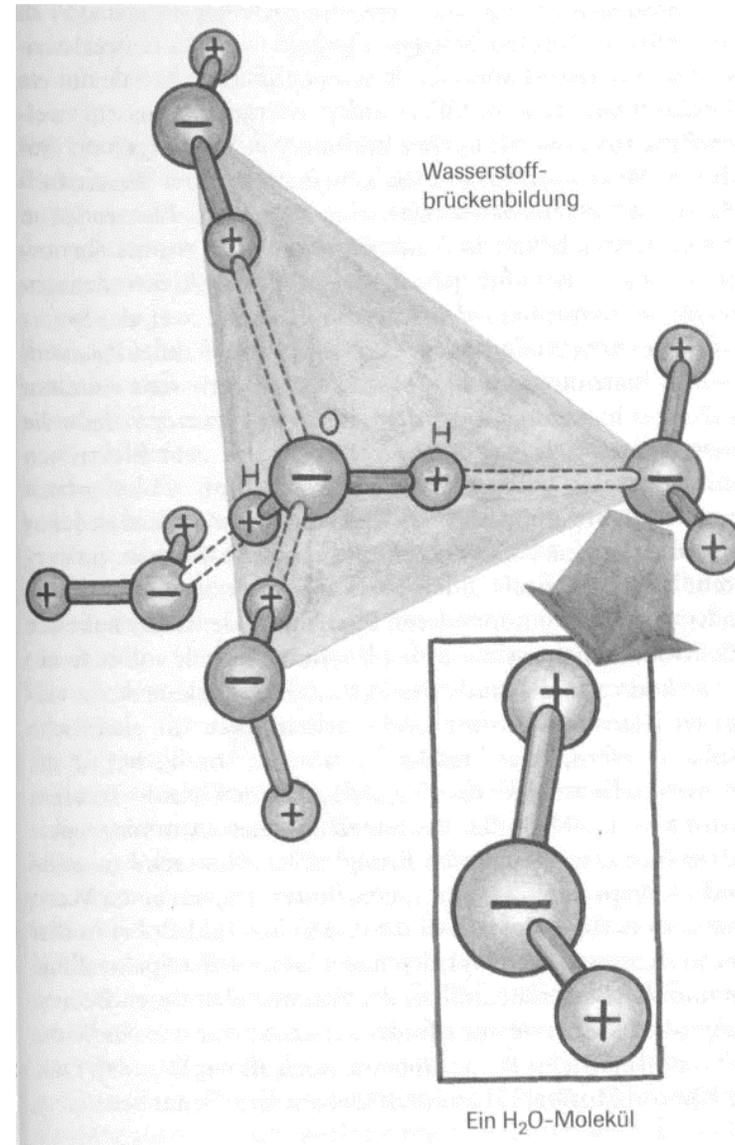
n	l	m	s
1	0	0	+1/2
1	0	0	-1/2
2	0	0	+1/2
2	0	0	-1/2
2	1	-1	+1/2
2	1	-1	-1/2
2	1	+1	+1/2
2	1	+1	-1/2

Auf der zweiten Schale sind also acht Elektronen mit unterschiedlichen Kombinationen von Quantenzahlen unterzubringen, dann ist auch diese Schale voll. Entsprechend geht es weiter. Berechnet man nach diesen Vorschriften die Energieniveaus der Elektronenbahnen, lassen sich die Spektrallinien gut vorhersagen. Bedenkt man dann noch, daß der Atomkern mit seinen elektrischen und magnetischen Eigenschaften die Energieniveaus der Elektronen in der Hülle geringfügig »stört«, erhält man eine Aufspaltung der Spektrallinien, die nach und nach in Experimenten perfekt nachgewiesen werden konnte. Man spricht dabei von der Hyperfeinstruktur. Aber weitaus bedeutender als die Erklärung der Atomspektren ist, daß die hier geschilderte Ordnung das Periodensystem der Elemente und ihr chemisches Verhalten erklären kann. Ursprünglich entstand das Periodensystem - im Jahr 1869 unabhängig voneinander vom Russen Dimitrij Mendelejew und dem Deutschen Lothar Meyer entdeckt - dadurch, daß man die chemischen Elemente nach ihrem Atomgewicht ordnete, später nach ihrer sogenannten Ordnungszahl, die mit der Anzahl der positiven Ladungen im Atomkern übereinstimmt. Da die Anzahl der negativ geladenen Elektronen in der Hülle jeweils ebenso groß ist, sind damit die Elemente auch nach der Struktur ihrer Elektronenhülle eingeteilt. Betrachtet man das Periodensystem in der heute üblichen Form, stellt man fest, daß Elemente mit ähnlichen chemischen Eigenschaften untereinander stehen, etwa die Edelgase oder die Halogene oder die Halbleiter. In den waagrechten Reihen des Grundsystems sind jeweils Gruppen von acht Elementen angeordnet. Dies entspricht den acht Elektronen der zweiten Schale, insofern stimmt es mit der Theorie überein. Aber das Grundschema des Periodensystems ist nicht so gleichförmig. Die erste Reihe enthält nur zwei Elemente, Wasserstoff und Helium. Die zweite und dritte Reihe enthalten je acht Elemente, die vierte wird nach dem zweiten Element unterbro-

chen durch zehn sogenannte »Übergangsmetalle«, Scandium bis Zink. Ganz ähnlich wird die fünfte Reihe durch zehn weitere Übergangsmetalle unterbrochen, Yttrium bis Cadmium. Die sechste Reihe wird zweimal unterbrochen: durch 14 »Seltene Erden« und zehn weitere Übergangsmetalle. Entsprechend ist die siebte und letzte Reihe aufgebaut. Die Übergangsmetalle haben untereinander recht ähnliche chemische Eigenschaften, aber sie lassen sich gut voneinander unterscheiden. Die Seltenen Erden hingegen sind sich so ähnlich, daß man sie chemisch nur mit Mühe trennen kann.

Wendet man nun die oben geschilderten Regeln für den Aufbau der Elektronenhüllen auf die einzelnen Elemente an, wird also das Atom von innen nach außen mit Elektronen besetzt, wobei die Schalen in der Reihenfolge ihrer Energie aufgefüllt werden. Es gibt bestimmte Elektronen auf weiter außen gelegenen Schalen, die eine geringere Energie besitzen als andere auf weiter innen gelegenen Schalen, dadurch kommen die Übergangsmetalle und die Seltenen Erden zustande. Bei der geschilderten Anordnung haben jeweils übereinander stehende Elemente in der äußersten Schale gleich viele Elektronen; damit liegt die Vermutung nahe, daß das chemische Verhalten der Stoffe von der Anzahl der äußersten Elektronen gesteuert wird.

Auch hier ergibt sich wieder eine Querverbindung, die nicht ohne weiteres zu erwarten war. Die Quantenzahlen entspringen rein mathematisch-physikalischen Überlegungen. Die Chemie beschäftigt sich damit, wie Atome reagieren und sich zu Molekülen verbinden. Warum reagiert Natrium mit Chlor so, daß ein Kochsalzmolekül NaCl daraus entsteht? Wie kommt es, daß zwei Atome Wasserstoff und ein Sauerstoff sich zu Wasser vereinigen? Wieso kommen alle gasförmigen Elemente außer den Edelgasen in der Luft nur als Zweier-Moleküle vor? Auf diese und ähnliche Fragen gibt das Schalenmodell des Atoms eine verblüffend einfache Antwort,



Es hat sich gezeigt, daß »gefüllte« Schalen stabiler sind als nur teilweise besetzte Schalen. Deshalb versucht beispielsweise das Wasserstoffatom, das in seiner äußersten Schale nur ein Elektron hat, diese zu füllen, indem es irgendwoher ein zweites Elektron erwirbt. Bei der Bildung von Wasser gelingt ihm dies, indem es sich zusammen mit einem zweiten Wasserstoff-Atom und einem Sauerstoff-Atom (das sechs Elektronen in der äußersten Schale hat) zusammennut. Die Atome »benutzen« dann quasi ihre jeweiligen äußersten Elektronen gemeinsam, damit hat jedes Wasserstoff-Atom zwei, der Sauerstoff aber acht Außenelektronen - ein recht stabiler Zustand

Ein Natriumatom hingegen möchte gern sein einzelnes äußerstes Elektron aus der dritten Schale loswerden, denn die weiter innen gelegene zweite Schale ist mit acht Elektronen voll besetzt. Es gelingt ihm, indem es sich mit Chlor zusammennut, dem gerade noch ein Elektron in der äußersten Schale fehlt, um eine Achter-Konfiguration zu erreichen. So entsteht NaCl, Kochsalz. Edelgase hingegen reagieren nur unter massivem Zwang mit anderen Elementen, denn ihre äußerste Elektronenschale ist mit acht Elektronen jeweils voll besetzt.

So kann also die mathematische Zahlenspielerei des erweiterten Bohrschen Atommodells Erklärungen für chemische Abläufe liefern, eine Tatsache, die um so erstaunlicher ist, als sie mehr oder weniger durch Zufall gefunden wurde. Einstein schrieb noch 1949 voller Erstaunen in seinen > Autobiographischen Notizen< über diesen Erfolg: »Daß diese schwankende und widerspruchsvolle Grundlage hinreichte, um einen Mann mit dem einzigartigen Instinkt und Feingefühl Bohrs in den Stand zu setzen, die hauptsächlich Gesetze der Spektrallinien und der Elektronenhüllen der Atome nebst deren Bedeutung für die Chemie aufzufinden, erschien mir wie ein Wunder - und erscheint mir auch heute noch als ein Wunder. Dies ist höchste Musikalität auf dem Gebiete des Gedankens.«

Ein Experiment, an dem sich viele Diskussionen entzündeten

Die Physik soll die Welt erklären, sie soll Gesetze aufstellen, nach denen das Sichtbare und das Unsichtbare funktioniert, und diese Gesetze sollen auch dazu dienen, Vorhersagen für das zukünftige Verhalten von Teilchen und Kräften zu ermöglichen. Außerdem sollen ihre Regeln immer und überall gültig sein, sei es nun auf der Erde oder auf einem anderen Stern, sei es bei Tag oder Nacht, sei es im großen oder im kleinen. Mit anderen Worten: Die Gesetze der Physik sollen universell gültig sein.

Nach vielen unterschiedlichen philosophischen und methodischen Ansätzen, die in den vergangenen Jahrhunderten entwickelt wurden, hat man sich im 20. Jahrhundert darauf geeinigt, daß die Beobachtung und damit das Experiment in der Physik die überragende Rolle spielt. Die Theorie bleibt ihnen untergeordnet. Wenn also ein Experiment oder eine Beobachtung der Natur ein Ergebnis erbringt, das mit der Theorie nicht zu erklären ist, dann muß diese hinterfragt werden - jede Theorie gilt immer nur vorläufig: nur so lange, bis das Gegenteil im Experiment bewiesen wurde.

Dies ist der Grund, warum sich auch Theoretiker, die normalerweise nur im stillen Kämmerlein ihren Gedanken nachhängen, Experimente ausdenken. Manche dieser Experimente werden dann auch wirklich durchgeführt, andere bleiben Fiktion. Berühmte Beispiele für letzteres sind Experimente, bei denen der Beobachter sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt oder sich weit draußen im Weltall befindet. Ein anderes sehr bekanntes Gedankenexperiment ist die eingangs beschriebene Schrödingersche Katze - ein Experiment, das nicht nur aus Tierschutzgründen nicht durchgeführt wurde, sondern auch deshalb, weil es einfach nicht nötig ist. Es reicht

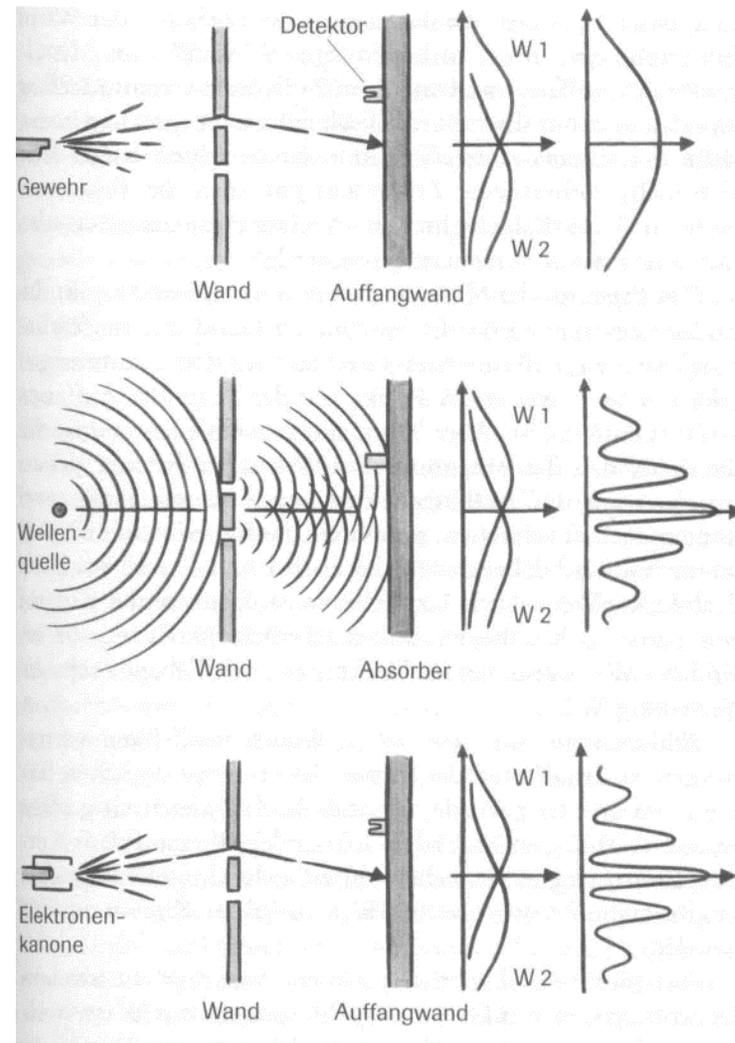
vollständig aus, die Anordnung zu analysieren, denn der Ausgang des Versuchs ist bekannt.

Ein Experiment jedoch, das tausendfach durchgeführt wurde und zur Erklärung ebenso wie zur Widerlegung der Quantenphysik diente, ist jenes mit dem Doppelspalt. Was haben Physiker nicht alles durch diesen Spalt gejagt: Licht aller Wellenlängen, Schrotkugeln, Elektronen, Protonen, Bälle, Röntgenstrahlen. Sie haben die Detektoren verändert, verfeinert, bewegt, den Doppelspalt verschoben und bewegt, Meßgeräte dazwischengeschoben, und trotzdem sind die Ergebnisse dieses Experiments immer wieder verblüffend, und ihre Analyse gab den Forschern lange Zeit Rätsel auf.

Das Experiment vergleicht das Verhalten von verschiedenen Objekten, wenn sie durch einen Doppelspalt fliegen. Die Grundanordnung besteht aus einer Wand mit zwei Löchern (oder schmalen Schlitzen), hinter der ininigem Abstand eine zweite Wand steht, die mit Detektoren ausgerüstet ist. Woraus diese im einzelnen bestehen, ist unterschiedlich, je nachdem, welche Objekte beobachtet werden sollen. Die Detektoren haben aber immer die Fähigkeit, das eintreffende Objekt und seinen Einschlagpunkt zu registrieren. Vor der Wand mit den beiden Löchern befindet sich die Quelle. Sie sendet die Objekte aus, die man beobachten will.

Das erste Gedankenexperiment geht davon aus, daß die Objekte Gewehr kugeln sind, also relativ große Geschosse. Vor der Wand mit den zwei Löchern steht ein Maschinengewehr und schießt mit einer gewissen Streuung Kugeln auf die Anordnung. Manche dieser Kugeln fliegen durch Loch 1, andere durch Loch 2. Viele werden von den Rändern der beiden Löcher abgelenkt. Dies hat zur Folge, daß die auf der hinteren* Wand auftreffenden Kugeln über die ganze Fläche verteilt sind.

Mit dieser Anordnung will man experimentell die Antwort auf die Frage finden: »Wie groß ist die Wahrscheinlich-



Interferenz-Experimente: oben mit Gewehr kugeln, in der Mitte mit Wasserwellen, unten mit Elektronen. Loch 1 befindet sich in der Wand jeweils oben, Loch 2 unten.

keit, daß eine Kugel, die durch eines der Löcher in der Wand hindurchfliegt, in einem bestimmten Abstand vom Mittelpunkt der Auffangwand ankommt?« Es leuchtet unmittelbar ein, daß man nur über die Wahrscheinlichkeit sprechen kann, denn der genaue Auftreffpunkt einer einzelnen Kugel läßt sich nicht vorhersagen. Außerdem gilt noch die Voraussetzung, daß die Kugeln immer als Ganzes ankommen, also durch den Aufprall nicht zerstört werden.

Das Ergebnis der Messungen mit vielen Kugeln ergibt die im Bild gezeigte Kurve. Es liegt auf der Hand, daß die Wahrscheinlichkeit, daß eine Kugel weit außen auftrifft, immer geringer wird, je weiter der Punkt von der Mitte des Auffangschirms entfernt ist. Aber längst nicht so einleuchtend ist die Tatsache, daß das Maximum der Wahrscheinlichkeit genau im Zentrum des Auffangschirms liegt. Diesen Tatbestand kann man aber verstehen, wenn man das Experiment zweimal wiederholt und dabei einmal das Loch 1 und einmal das Loch 2 abdeckt. Wenn Loch 1 abgedeckt ist, können alle Kugeln nur durch Loch 2 fliegen, und man erhält die Kurve, die in Bild mit W2 bezeichnet ist. Deckt man Loch 2 ab, entsteht die Verteilung W1.

Addiert man nun diese beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungen, so erhält man die Kurve, die im ursprünglichen Experiment ermittelt wurde, als beide Löcher gleichzeitig offen waren. Auffällig ist außerdem, daß jeder Wert auf dem Auffangschirm einem Vielfachen einer Gewehr-kugel entspricht es gibt keine Zwischenwerte, da ja nur ganze Kugeln gezählt wurden.

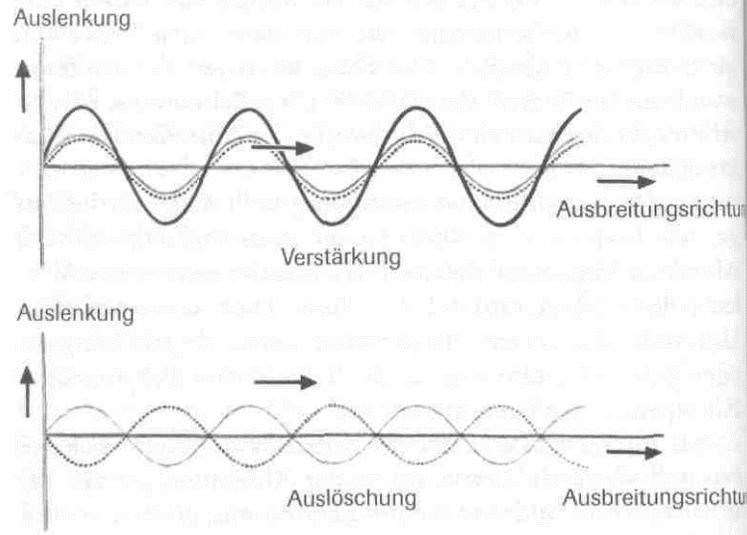
Das hier geschilderte Experiment soll nun im zweiten Durchlauf nicht mit Gewehr-kugeln, sondern mit Wasserwellen wiederholt werden. Man stellt also die zwei Wände ins Wasser und plaziert vor der Wand mit den zwei Löchern nicht mehr ein Maschinengewehr, sondern einen sogenannten Wellengenerator, beispielsweise einen Stift, der regelmäßig auf

und ab bewegt wird und beim Eintauchen ins Wasser eine ringförmige Welle erzeugt, die sich nach allen Seiten hin gleichförmig ausbreitet. Die Detektoren auf der Auffangwand (die im übrigen die Wellen nicht reflektieren soll) registrieren in diesem Fall die Intensität der eintreffenden Wasserwelle.

Analog zur vorherigen Anordnung stellt man nun die Frage, wie hoch diese in Abhängigkeit vom Auftreffpunkt ist. Als erstes findet man, daß die Intensität der gemessenen Wellen jede beliebige Größe haben kann. Dies ist ein wichtiger Unterschied zum ersten Experiment, wo die Kugeln nur ganz oder gar nicht, also sozusagen in Form von Paketen oder Klumpen, auftreten konnten.

Als Intensitätskurve auf der Auftreffwand ergibt sich die exotisch wirkende Kurve, die in der Abbildung gezeigt ist. Wie ist sie entstanden? Um dies zu ermitteln, deckt man nun wieder zuerst das Loch 1 ab und läßt die Wellen allein durch Loch 2 hindurchgehen, anschließend vertauscht man die Abdeckung. Es zeigt sich, daß an jedem der beiden Löcher eine kreisförmige Welle erzeugt wird, die sich in Richtung auf die Aufprallwand hin ausbreitet. Jede einzelne dieser beiden Wellen aus Loch 1 und 2 erzeugt dort eine Intensitätsverteilung, die genau der entspricht, die bei den Gewehr-kugeln auftrat, wenn man je ein Loch abdeckte.

Verblüffend ist jedoch, daß die Überlagerung der beiden Wasserwellen ein völlig anderes Muster erzeugt als die Überlagerung der Gewehr-kugel-Verteilung. Der Unterschied beruht darauf, daß es sich einmal um eine schlichte Häufigkeit, das andere Mal aber um eine Welle handelt. Häufigkeiten werden einfach addiert. Wellen aber können sich gegenseitig auslöschen oder verstärken; man nennt dieses Phänomen Interferenz. Die Gesamtintensität der Wasserwellen auf der Auffangwand entsteht also durch Interferenz der beiden Einzelwellen, die von den Löchern 1 und 2 ausgehen.



Das Prinzip der Interferenz: Verstärkung und Auslöschung.

Bis jetzt hat diese weltberühmte Untersuchung gezeigt, wo der entscheidende Unterschied zwischen Teilchen und Welle verborgen ist: Teilchen können nur in Form von »Paketen« registriert werden, Wellen können interferieren, also sich gegenseitig verstärken und auslöschen.

Das Experiment ist aber noch nicht zu Ende. Es wird nun zum dritten Mal durchgeführt, diesmal jedoch sind die Objekte Elektronen. Man kann sich als Quelle beispielsweise einen hocherhitzten Metalldraht vorstellen, der Elektronen aussendet, die mit Hilfe eines elektrischen Feldes in Richtung auf die Wand mit den zwei Löchern beschleunigt werden.

Welches Ergebnis ist in diesem Fall zu erwarten? Elektronen sind Teilchen, deshalb spricht viel dafür, daß sie ebenso wie die Geschosse päckchenweise ankommen, denn ein

halbes Elektron ist nicht denkbar. Dies läßt sich dadurch nachprüfen, daß man die Detektoren an der Aufprallwand zum Beispiel wie kleine Geigerzähler aufbaut, die immer dann ein Knackgeräusch hören lassen, wenn ein Elektron ankommt. (Man kann in der Tat das Auftreffen der Elektronen bei diesem Versuch als Abfolge von vielen Knackgeräuschen hören.) Die Elektronen kommen tatsächlich einzeln und in Form von Paketen an, sind also offenbar Teilchen. Verschließt man wieder je ein Loch und läßt die Elektronen nur durch das andere fliegen, erhält man wieder die Kurven W1 und W2.

Registriert man nun aber die Häufigkeit, mit der die Elektronen an bestimmten Punkten der Aufprallwand einschlagen, so bekommt man — und dies ist wirklich erstaunlich — keineswegs die gleiche Verteilung wie bei den Geschossen, sondern die Kurve, die sich bei den Wasserwellen eingestellt hat. Wie kann mit Teilchen eine solche Interferenz entstehen?

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

Wellenfunktionen und Wahrscheinlichkeiten

Albert Einstein war derjenige gewesen, der einen ersten Schritt getan hatte, um die Teilchen- mit der Wellennatur des Lichts unter einen Hut zu bringen. Aber von einer in sich geschlossenen Theorie war man im ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts noch weit entfernt. Einstein selbst erkannte diesen Mangel und sagte 1909: »Deshalb ist es meine Meinung, daß die nächste Phase der Entwicklung der theoretischen Physik uns eine Theorie des Lichts bringen wird, welche sich als eine Art Verschmelzung von Undulations- und Fimissions-theorie des Lichtes auffassen läßt.« Genau dies leistete die Quantentheorie, die in den zwanziger Jahren von einer neuen Generation junger Wissenschaftler entwickelt wurde.

Der berühmte Physiker Emilio Segre schreibt über diese Zeit in seinen Erinnerungen: »Das war die größte Herausforderung des Jahrhunderts, und wollte man sich ihr stellen, so mußten neue Denkrichtungen eingeschlagen werden. Und hier haben wir eine seltsame Erscheinung vor uns. In einem Zeitraum von nur wenigen Jahren wurde das Geheimnis von drei Seiten her angegangen. Es sah anfänglich so aus, als gäbe es nicht eine, sondern drei voneinander völlig verschiedene und doch jede für sich konsistente Formen der Quantenmechanik. Man erkannte erst einige Zeit später, daß es sich um drei un. terschiedliche mathematische Formulierungen ein und derselben Theorie handelte, die im Grunde gleichwertig waren.«

Es ging also darum, mathematisch korrekt zu formulieren, daß Licht sowohl als Teilchen als auch als Welle auftreten konnte. Es würde zu weit führen, hier die einzelnen Wege und Irrwege zu diesem Ziel aufzuzeigen. Was der Nachwelt erhalten blieb, ist eine Mischung aus den drei mathematischen Versionen, die von den Theoretikern Louis de Broglie, Werner Heisenberg und Paul Dirac in den zwanziger Jahren erdacht

und ausgearbeitet wurden. John Gribbin erläutert dies anhand eines Schachspiels anschaulich so: »Man kann ein Schachbrett abbilden, auf dem die Positionen aller Figuren markiert sind; doch wenn wir auf diese Weise ein ganzes Spiel dokumentieren wollten, würden wir sehr viel Platz brauchen. Man kann die Züge der einzelnen Figuren auch so beschreiben: Damenbauer-Eröffnung. Benutzt man aber die bündigste algebraische Notierung, so wird aus diesem Zug einfach $d2 - d4$. Drei verschiedene Beschreibungen liefern die gleiche Information über ein Ergebnis, den Übergang eines Bauern aus einem Zustand in einen anderen. Mit den verschiedenen Formulierungen der Quantenmechanik verhält es sich genauso. Diracs Quantenalgebra ist die eleganteste und im mathematischen Sinne die schönste Formulierung; die Matrizenmethoden, die Born und seine Mitarbeiter im Anschluß an Heisenberg entwickelten, sind umständlicher, aber nichtsdestoweniger gültig.«

Die Quantenmechanik, wie man die neue Wissenschaft nannte, beschreibt das Verhalten in der Welt der atomaren Dimensionen. Dort benehmen sich weder Licht noch Teilchen so, wie wir das aus unserer Erfahrung mit makroskopischen Maßstäben erwarten würden. Um in die Grundzüge der Quantenmechanik einzudringen, muß man bereit sein zu akzeptieren, daß sich hier eine andere Welt auftut, in der weder die Logik noch die Eindeutigkeit der klassischen Physik Gültigkeit besitzt. Es wird sich aber zeigen, daß die Quantenmechanik in sich ebenso schlüssig ist wie die klassische Physik und daß sie bei größeren Dimensionen in diese übergeht.

Daß sich Licht manchmal wie eine Welle und manchmal wie ein Teilchenstrom verhält, wurde bereits geschildert. Diese Beobachtung brachte den jungen Physiker Louis de Broglie auf die Idee zu untersuchen, warum ein solches Verhalten nicht auch für Elektronen gelten sollte. Könnte es nicht möglich sein, daß sich auch Elektronen wie Wellen verhalten?

Und in der Tat: Das Bohrsche Atommodell besagt, daß Elektronen nur auf Bahnen den Kern umkreisen dürfen, deren Bahndrehimpuls ein ganzzahliges Vielfaches von h beträgt. Formt man dies mathematisch ein wenig um, ergibt sich daraus ebenso die Forderung, daß die Umlaufbahn des Elektrons ein ganzzahliges Vielfaches der »Wellenlänge« des Elektrons sein muß. Man kann also das Elektron, das vorher immer als Teilchen angesehen wurde, auch als Welle betrachten.

Experimentelle Befunde stützten diese These: Schon Anfang der zwanziger Jahre hatte man in den USA beobachtet, daß sich Elektronen an Kristallen streuen ließen und sich überlagerten wie Lichtwellen. Weitere Untersuchungen, an denen George Thomson, der Sohn des Forschers J. J. Thomson, beteiligt war, mehrten die Beweise für die Wellennatur der Elektronen. Und so kam es, daß J. J. Thomson, der 1906 den Nobelpreis für den Beweis erhalten hatte, daß Elektronen Teilchen sind, Zeuge wurde, wie sein Sohn George 1927 den Nobelpreis für den Beweis erhielt, daß Elektronen Wellen sind. Beide, Vater und Sohn, hatten gleichermaßen recht, um beide hatten die Auszeichnung verdient.

Noch im Jahr 1925 war die Idee der Materiewellen aber nur eine nebelhafte Vorstellung. Erst als der österreichische Physiker Erwin Schrödinger daranging, eine mathematische Wellenfunktion aufzustellen, die sowohl das Wellen- als auch das Teilchenverhalten der Elektronen beschreiben konnte, wurden die damit verbundenen Ideen konkreter. Er nannte die Funktion ψ , und derartige Ausdrücke entwickelte er nun nicht nur für Photonen und Elektronen, sondern für alle Teilchen der physikalischen Welt. Zunächst ging er dabei noch von der einigermaßen anschaulichen Vorstellung aus, daß Elektronen und andere Teilchen Wellen sind. Als er im Jahr darauf von Bohr nach Kopenhagen eingeladen wurde, um dort gemeinsam mit dem Altmeister seine Theorie weiter zu arbeiten, mußte er sich jedoch, wenn auch ungern, eingeste-

hen, daß es sich doch nicht um reale Wellen im Raum handelte, sondern um eine komplizierte Form von Schwingungen in einem imaginären mathematischen Raum. Jedes einzelne Teilchen wird durch eine Wellengleichung im dreidimensionalen Phasenraum dargestellt. So benötigen zwei Teilchen sechs Dimensionen, drei Teilchen neun und so weiter. Hinzu kam noch das Problem, die Quantensprünge in die Theorie mit einzubauen. Schrödinger war die Kompliziertheit der mathematischen Ausdrücke bald leid, er soll gesagt haben: »Wenn es doch bei dieser verdammten Quantenspringerei bleiben soll, so bedaure ich, mich überhaupt jemals mit der Quantentheorie abgegeben zu haben.«

Trotzdem gelang es ihm schließlich, ein Atommodell zu entwickeln, das nun nicht mehr darauf beruhte, daß Elektronen auf einzelnen Schalen den Kern umrundeten, sondern daß sich der Atomkern im Mittelpunkt eines Feldes stehender Wellen befindet. Je nach Energieniveau nimmt diese Ladungswolke unterschiedliche geometrische Formen an. Sir Arthur Eddington hat dieses Erkenntnis in seinem Buch »Das Weltbild der Physik«, das im Jahr 1929 erschien, so ausgedrückt:

»Etwas Ähnliches habe ich an anderer Stelle gelesen:

Die glittigen Tobs

Drehn und wibbeln in der Walle.«

Mit diesem Phantasiesatz hat er den Kern der Schrödingerschen Erkenntnis hervorragend getroffen: Man weiß nicht genau, wo sich ein Elektron im Atom gerade befindet, da es »glittig« ist und »wibbelt«, es ist also unfaßbar und ungenau. Die Ladungswolke, wie Schrödinger sie sich vorstellte, kann man auch als »stehende Welle« bezeichnen. Stehende Wellen erzeugt man beispielsweise bei Musikinstrumenten, etwa wenn man eine Gitarrensaite in der Mitte zupft. Sie beginnt dann zu schwingen, und zwar so, daß der Bauch der Welle in der Mitte ist. Schaut man auf die Saite, kann man die stehen-

de Welle richtiggehend sehen, da unser Auge nicht in der Lage ist, so schnelle Vibrationen aufzulösen. Drückt man die Saite in der Mitte nieder, erzwingt man dort einen Wellenknoten und erzeugt die nächsthöhere Oberschwingung, alsü einen Ton, der eine Oktave höher Hegt und dessen Wellenlänge genau die Hälfte beträgt. Es gibt sogar noch weitere Oberschwingungen, die aber immer unwahrscheinlicher und schwächer werden, wenn man die Grundschiwung angeregt hat Ganz ähnlich kann man sich die stehenden Elektronenwellen im Atom vorstellen.

Schrödinger glaubte, und dieses Bild ist bis heute nützlich, daß diese Ladungswolken den Atomkern umgeben. Natur lieh sind sie komplizierter geformt als bei der Vibration eine Saite, da das Atom dreidimensional ist. Die Grundschiwung hat die Form einer Kugel um das Zentrum, die nächst Oberschwingung ist keulenförmig mit je zwei gegenüberlie genden Keulen, die nächste besitzt vier Keulen, weitere Oberschwingungen haben schwierigere Muster.

Am Bedeutungswandel der Schrödinger-Gleichung zeig sich der Übergang vom noch etwas konventionelleren Den ken Bohrs zu den fortschrittlichen Ansichten der jüngeren Generation. Bohr hatte gelehrt, daß Licht ebenso wie Elektronen oder andere Teilchen, ja sogar ganze Atome, sowohl als Welle wie auch als Teilchen auftreten können. Je nachdem, welches Experiment man durchführt, zeigt sich das Objekt jeweils in anderer Gestalt. Er nannte dies das »Prinzip der Komplementarität«. Niemals konnten aber beide Aspekte in einem Experiment gleichzeitig auftreten.

Max Born, der die Universität Göttingen in den zwanziger Jahren zu einem Zentrum der Quantenmechanik macht fand für Schrödingers Gleichung eine neue Deutung: Die Stärke der Welle - mathematisch ausgedrückt durch das Quadrat der Wellenfunktion - an irgendeinem Punkt im Raum ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen an

diesem Punkt anzutreffen. Damit ähnelt die Teilchenwelle etwa einer Grippewelle. Wenn eine Grippewelle eine Stadt erreicht, so bedeutet dies: Die Wahrscheinlichkeit, daß man in dieser Stadt an Grippe erkrankt, hat zugenommen. Die Wel-e beschreibt also das statistische Muster der Erkrankungen, nicht aber das Wesen der Grippe selbst. Auf die gleiche Weise beschreiben Teilchenwellen nur ein statistisches Muster der Wahrscheinlichkeit, nicht aber das Teilchen selbst.

Wo genau sich also beispielsweise ein Elektron in einem lestimmten Augenblick befindet, wird man nie mit Sicher-leit sagen können, aber die Wellenfunktion erlaubt es, die Wahrscheinlichkeit dafür zu berechnen, es bei einem Experiment an einem bestimmten Ort anzutreffen. Theoretisch :ann ein Elektron überall gleichzeitig sein, aber gemäß seiner Wellenfunktion gibt es Orte, an denen es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit aufhält, und Orte, an denen es kaum anzutreffen ist.

So machte die Quantenmechanik die Welt zu einem unsicheren Ort, an dem man nichts mehr genau vorhersagen :onnte. Ob sich nun ein Teilchen an einem bestimmten 'unkt befindet, ob ein Elektron einen höheren oder äeferen Energiezustand im Atom einnimmt, ob es in einem Molekül mm einen oder anderen Atom gehört, all dies wurde durch die neue Theorie zu einem Vabanquespiel mit großen Unsicherheiten. Gottes Würfel: Nur die Statistik gibt Auskunft über den Lauf der Natur, Ursache und Wirkung sind aufgehoben.

Daß die Welt in ihren makroskopischen Dimensionen weiterhin existieren konnte und dort auch weiterhin den Gesetzen der klassischen Physik gehorchte, lag lediglich daran, daß sich bei der ungeheuer großen Anzahl der Teilchen die Unsicherheiten ausmittelten, etwa so wie bei den Molekülen eines Gases, die sich gleichmäßig in einem Raum verteilen, weil die Richtungen ihrer Geschwindigkeit gleichmäßig verteilt sind.

Kein Wunder, daß diese Deutung der Quantenmechanik anfangs auf große Widerstände stieß. Auch die meisten der Physiker, die sich ursprünglich an der Ausarbeitung der Theorie beteiligt hatten, lehnten diese radikalen Vorstellungen ab, zu ihnen zählten so berühmte Namen wie Schrödinger, Planck, Einstein und de Broglie. Es dauerte noch Jahrzehnte, bis die Bornsche Deutung der Wellenfunktion allgemein akzeptiert war; erst im Jahr 1954 erhielt er dafür endlich den Nobelpreis.

Heisenbergs Unschärferelation

in der klassischen Physik kann man die Welt genau beschreiben, wenn man für jedes Objekt in einem bestimmten Augenblick Ort und Geschwindigkeit angibt. Nach Newtons Trägheitsgesetz sind damit die weiteren Bewegungen und auf diese Weise der Fortgang des Universums genau festgelegt, wir kennen dies als das »Gesetz von Ursache und Wirkung«. Der junge Physiker Werner Heisenberg, der in den zwanziger Jahren intensiv an der Ausarbeitung der Quantentheorie beteiligt war, machte nun aber folgendes Gedankenexperiment: Angenommen, ich will den Ort und die Geschwindigkeit eines Elektrons ganz genau messen. Ich beschließe dazu ein sehr gut auflösendes Mikroskop zu verwenden. Dies bedeutet aber mit anderen Worten, daß ich das Elektron mit einem Lichtstrahl beleuchte, damit ich es sehen kann. Im Grunde genügt dazu natürlich schon ein einzelnes Lichtquant. Da das Elektron aber extrem klein ist, muß die Wellenlänge des Lichts, mit dem ich es betrachten will, noch erheblich kleiner sein; dies ist ein festes Gesetz in der Optik. Ich benutze also ein Photon mit einer besonders kurzen Wellenlänge und »beleuchte« damit das Elektron, um dessen Ort ge-

nau messen zu können. Ein Photon mit einer extrem kurzen Wellenlänge hat aber eine sehr hohe Frequenz und damit gleichzeitig (nach Plancks Formel $E = h \cdot \nu$) eine hohe Energie.

Trifft nun bei der Messung das energiereiche Photon auf das Elektron, so vermittelt es wegen seiner hohen Energie diesem einen großen Rückstoß. Das Elektron wird quasi weggeschubst, sein genauer Ort ist nicht mehr feststellbar. Je höher die Energie des Photons, desto stärker der Rückstoß. Die Messung bedeutet also einen Eingriff in das System, der eine genaue Messung verhindert.

Aus seinen theoretischen Überlegungen leitete Heisenberg die Formel ab, daß die Meßgenauigkeit oder — wie er das nannte — die »Unbestimmtheit von Ort und Geschwindigkeit« (oder Impuls, der Masse mal Geschwindigkeit ist) bei jeder Messung zueinander reziprok sind. Miteinander multipliziert ergeben sie einen Betrag, der größer ist als h . Dies ist eine winzig kleine Zahl, denn h beträgt nur $6,6$

• 10^{-35} Joule mal Sekunde. Makroskopisch gesehen fällt diese Unge nauigkeit überhaupt nicht ins Gewicht, aber für atomare Maßstäbe ist sie riesengroß.

Heisenberg war sich über die tiefgreifenden Konsequenzen dieser Erkenntnis sehr wohl im klaren, stellte sie doch nichts anderes dar als die Abkehr von der Kausalität. Er schrieb 1927: »In prinzipieller Hinsicht hat die oben genannte, von der Natur festgestellte Genauigkeitsgrenze die wichtige Folge, daß das Kausalitätsgesetz in gewisser Weise gegenstandslos wird.« Im atomaren Maßstab gilt also nicht mehr Ursache und Wirkung, sondern Zufall und Wahrscheinlichkeit. Er schreibt weiter: »An der scharfen Formulierung des Kausalgesetzes: Wenn wir die Gegenwart kennen, können wir die Zukunft berechnen, ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch.«

Die Heisenbergsche Unschärferelation, die 1927 in der »Zeitschrift für Physik« veröffentlicht wurde, gilt im übrigen

nicht nur für die Werte von Ort und Impuls eines Teilchens, sondern auch für die Werte von Energie und Zeit sowie für andere Meßgrößenpaare.

Obwohl Heisenberg sein Gesetz rein theoretisch hergeleitet hatte, beunruhigte es *zu* Recht von Anfang an auch die Experimentalphysiker. In der Tat sagt die Unschärferelation aus, daß man Ort, Impuls oder Energie von Teilchen nicht gleichzeitig exakt messen kann. Dies liegt nicht daran, daß die verwendeten Meßgeräte unzulänglich wären, sondern es liegt in der Natur der Sache. Dies wollten Experimentatoren anfangs allerdings nicht glauben und erdachten immer ausgefeiltere experimentelle Anordnungen, die das Heisenbergsche Gesetz überlisten sollten. Es gelang indes niemand, sich darüber hinwegzusetzen, und etwa ein Jahrzehnt nach seiner Aufstellung war die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation allgemein anerkannter Bestandteil der modernen Physik.

Nur sehr selten ist es der Nachwelt vergönnt, den Gedankengängen eines Forschers in allen Einzelheiten zu folgen, wenn er eine neue Entdeckung macht. Dadurch, daß Werner Heisenberg zusammen mit Bohr in der sogenannten »Kopenhagener Deutung« seine Ideen genauestens geschildert hat, und dies außerdem noch in einer relativ allgemeinverständlichen Darstellung, können wir heute den Zugang zu den philosophischen Folgen der Unschärferelation nachvollziehen. Das Experiment mit dem Doppelspalt, das bereits erklärt wurde, gibt die anschauliche Hinführung zu dem, was Heisenberg meinte.

Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie früher geschildert. Diesmal wird das Experiment nicht mit Gewehrkugeln, Elektronen oder Wasserwellen, sondern mit Licht durchgeführt. Man schickt also ein Lichtbündel durch die Wand mit den zwei Eöchern und registriert auf der dahinter stehenden Auffangwand, wo wieviel Licht ankommt. Dies geschieht am besten mit einem Film, den man auf dieser Wand befestigt. Die

Schwärzung des Films ist dann ein Maß für die Intensität des auftreffenden Lichts, denn jedes Photon, das ankommt, bewirkt im Inneren des Filmmaterials eine chemische Umwandlung, die ein (schwarzes) Silberatom erzeugt. Je schwärzer der Film an einer Stelle ist, desto mehr Photonen sind dort angekommen. Heisenberg schreibt: »Die Schwärzung der photographischen Platte ist im Quantenprozeß ein chemischer Vorgang, der durch einzelne Lichtquanten hervorgerufen wird. Daher muß man das Experiment auch in der Lichtquanten-vorstellung beschreiben können.«

Was sich jedoch auf dem Film zeigt, sind helle und dunkle Streifen, die dunkelsten Streifen in der Mitte, nach außen zu werden die Streifen heller. Für den Fachmann ist es klar: Dies ist ein typisches Interferenzbild. Beim Experiment mit den Wasserwellen, die durch einen Doppelspalt laufen, hatte sich das gleiche Bild ergeben, nur wurde es durch den Detektor als Kurve registriert. Die schwarzen Streifen auf dem Film sind ganz einfach in eine derartige Kurve umzuwandeln: Trägt man den Grad der Schwärzung als Höhe der Kurve in ein Diagramm ein, erhält man genau das von den Wasserwellen bekannte Bild.

Die Lichtquanten, die durch den Doppelspalt fallen, erzeugen also, obwohl sie sich wie Teilchen verhalten, ein Interferenzbild, das ihre Wellennatur beweist. Über dieses seltsame Phänomen machte Heisenberg sich seine Gedanken; »Das einzelne Lichtquant kann entweder durch das erste oder durch das zweite Loch gehen. Wenn es durch das erste Loch geht und dort gestreut wird, so ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß es später an einem bestimmten Punkt der photographischen Platte absorbiert wird, davon unabhängig, ob das zweite Loch geschlossen oder offen ist. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung auf der Platte muß die gleiche sein, als wenn nur das erste Loch offen wäre.« Entsprechend verhält es sich mit dem zweiten Loch. Beide Verteilungen ergeben wie-

der die zwei Einzelkurven, die wir bereits bei den Gewehrkugeln, den Elektronen und den Wasserwellen kennengelernt haben. Die Gesamtschwärzung auf dem Film müßte dann die Überlagerung dieser beiden Kurven sein, es dürfte keine Interferenzstreifen geben. Das Experiment zeigt aber eindeutig diese Streifen. Heisenberg zieht daraus den Schluß: »Daraus erkennt man, daß die Aussage, das Lichtquant müsse entweder durch das eine oder durch das andere Loch gegangen sein, problematisch ist und zu Widersprüchen führt. (...) Dies bedeutet, daß schon der Begriff >Geschehen< auf die Beobachtung beschränkt werden muß. Die Beobachtung selbst ändert die Wahrscheinlichkeitsfunktion unstetig [sprunghaft, Anm. d. A.]. Sie wählt von allen möglichen Vorgängen den aus, der tatsächlich stattgefunden hat. Da sich durch die Beobachtung unsere Kenntnis des Systems unstetig geändert hat, hat sich auch ihre mathematische Darstellung unstetig geändert, und wir sprechen daher von einem >Quantensprung<. (...) Bei Übergang vom Möglichen zum Faktischen findet also während des Beobachtungsaktes statt. Wenn wir beschreiben wollen, was in einem Atomvorgang geschieht, so müssen wir davon ausgehen, daß sich das Wort »geschieht« nur auf die Beobachtung beziehen kann, nicht auf die Situation zwischen zwei Beobachtungen.«

Diese Bemerkung läßt sich auch auf Schrödingers Katze anwenden. Niemand kennt den Zustand der Katze, ohne die Kiste zu öffnen. Um den Zustand zu beschreiben, benötigt man also eine Wahrscheinlichkeitsangabe dafür, ob das Tier zu einem bestimmten Zeitpunkt tot oder lebendig ist. Die eigentliche Erkenntnis kann man erst durch eine Messung gewinnen, also durch Öffnen der Kiste. Damit aber verändert man ebenso wie bei der Messung der Energie einzelner Teilchen die »objektive« Realität. Die Frage, die seither Philosophen beschäftigt, ist, ob man überhaupt von einer realen Welt sprechen kann, wenn die Objekte doch erst dann real werden,

wenn man sie beobachtet. Die Katze ist erst dann tot oder lebendig, wenn man die Kiste öffnet. Das Elektron befindet sich in einem bestimmten Energiezustand erst dann, wenn man diesen mißt. Und es springt von einer Schale im Atom auf eine andere, ohne daß jemand wüßte wie, weil man den Vorgang nicht beobachten kann.

Mitunter haben Physiker dieses Dilemma für ihre Zwecke auszunutzen versucht: Sie haben Ergebnisse von Gedankenexperimenten, die absolut nicht zu erklären sind, als unreal hingestellt, weil die Welt ja erst durch die Messung real wird. In jüngster Zeit jedoch wurden diese Vermutungen Lügen gestraft: Echte Messungen bestätigten die fiktiven Experimente. Dazu später mehr.

Betrachtet man das noch klare, eindeutige, festgefügte Weltbild der Physiker zu Beginn des Jahrhunderts und vergleicht es mit der Situation nach der »Erfindung« der Quantenmechanik, kann man erst ermessen, wie gründlich der Umschwung war, den diese Neuerung im Denken der Wissenschaftler brachte. Seit Jahrhunderten war man es gewohnt, in Beziehungen von Ursache und Wirkung zu denken, und Messungen konnten so genau sein, wie das Meßgerät es erlaubte. Teilchen waren Teilchen, und Wellen waren Wellen.

Nun hatte sich alles verwandelt und verwischt. Teilchen waren nun auch Wellen und umgekehrt, Messungen mußten zwangsläufig ungenau sein, und es gab keine festgefügte Gewißheit mehr darüber, was an welcher Stelle in der Welt der kleinsten Teilchen passierte. Wo befand sich ein Teilchen zu welcher Zeit? Welche Eigenschaften hatte es zu diesem Zeitpunkt? Mit Hilfe der Quantenmechanik kann man all diese Fragen nur noch ungefähr beantworten. Statistische Wahrscheinlichkeiten haben die Gewißheiten ersetzt. Niemand kann mehr errechnen oder messen, wo sich ein Teilchen befindet. Man konnte nur noch ausrechnen, mit welcher Wahr-

scheinlichkeit es sich zu einem bestimmten Zeitpunkt an einer bestimmten Stelle befindet. Dabei hatte man doch immer die Aufgabe der Physik darin gesehen, die Natur *zu* erklären und ihren Zustand und ihre Gesetze so genau wie möglich zu beschreiben.

Von dieser Aufgabe hatte sich die Physik zumindest im anschaulichen Sinne weit entfernt — im Sinne der Mathematik dagegen hatte sie die Anforderung genau erfüllt: Die Quantentheorie gibt Rechenvorschriften für alle Phänomene der kleinen wie der großen Welt, sie erklärt alles, von der Bewegung eines Elektrons in einem Magnetfeld bis hin zur Entstehung von Sternen im Weltall.

Auch das Atom wurde von der Quantenmechanik neu erklärt. Es war nun nicht mehr eine Kugel, auch kein Planetensystem mehr aus Kern und Elektronen, sondern es hatte sich verwandelt in ein anschaulich nicht mehr greifbares Gebilde. Die Formeln gaben nur noch an, welche Wahrscheinlichkeiten sich an bestimmten Stellen des Atoms ergaben, daß dort ein Elektron, ein Proton oder ein Neutron (oder ein noch komplizierteres Teilchen) sich in einem ganz bestimmten Energiezustand befand.

Wenn man sich all dies vor Augen führt, ist es verständlich, daß die Theorie der Quantenmechanik selbst in den Köpfen der großen Genies wie Einstein, Planck oder Schrödinger große Hürden überwinden mußte — gar nicht zu reden von der Durchsetzungskraft des Modells in der breiten Öffentlichkeit, die es bis heute kaum wahrgenommen hat.

In der »Kopenhagener Deutung« widmeten sich Bohr und Heisenberg abschließend der Frage, ob die neuen Erkenntnisse nicht unsere gesamte Weitsicht zum Einsturz bringen: »Die klassische Physik beruhte auf der Annahme - oder sollten wir sagen, auf der Illusion —, daß wir die Welt beschreiben können, ohne von uns selbst zuzusprechen. (...) Wir wissen zum Beispiel, daß es die Stadt London gibt, unabhängig davon, ob

wir sie sehen oder nicht sehen. Man kann sagen, daß die klassische Physik eben die Idealisierung der Welt darstellt. (...) Ihr Erfolg hat zu dem allgemeinen Ideal einer objektiven Beschreibung der Welt geführt. Objektivität gilt seit langem als das oberste Kriterium für den Wert eines wissenschaftlichen Resultats. Entspricht die »Kopenhagener Deutung« der Quantenphysik noch diesem Ideal? (...) Sicher enthält die Quantentheorie keine eigentlich subjektiven Züge, sie führt nicht den Geist oder das Bewußtsein des Physikers als einen Teil des Atomvorgangs ein. Aber sie beginnt mit der Einteilung der Welt in den Gegenstand und die übrige Welt und mit der Tatsache, daß wir jedenfalls diese übrige Welt mit den klassischen Begriffen beschreiben müssen.«

Trotz aller Erkenntnisprobleme und philosophischer Erörterungen ist die Quantenmechanik jedoch keine brotlose Spielerei, die nur der intellektuellen Befriedigung einiger Physikerköpfe diene, sie erklärte viele physikalische Phänomene, die vorher rätselhaft geblieben waren. Aber dies ist nur eine Seite einer Theorie. Wirklich nützlich wird sie immer erst dann, wenn sie auch Vorhersagen für praktische Dinge und Experimente treffen kann, wenn sie Anwendungen nahelegt, die im günstigsten Fall das Alltagsleben der Menschen beeinflussen oder verändern. Das war so bei Newtons Gravitationstheorie, die es erlaubte, das Getriebe und den Mechanismus kompliziertester Maschinen zu erdenken und zu berechnen. Das war ebenso bei Maxwells Theorie der Elektrodynamik, aufgrund derer die Elektrizität und die Nutzung der elektromagnetischen Wellen für Telefon, Radio und Fernsehen gelang.

Und so erstaunlich es klingt, es war auch so bei der Quantenmechanik, trotz ihres esoterischen Charakters. Ohne sie gäbe es heute keine Halbleiter und damit keine Computertechnologie, es gäbe keine Laser, keine Kernspintomographie, keine Supraleitung und keine Atomuhren. Die Wissenschaft,

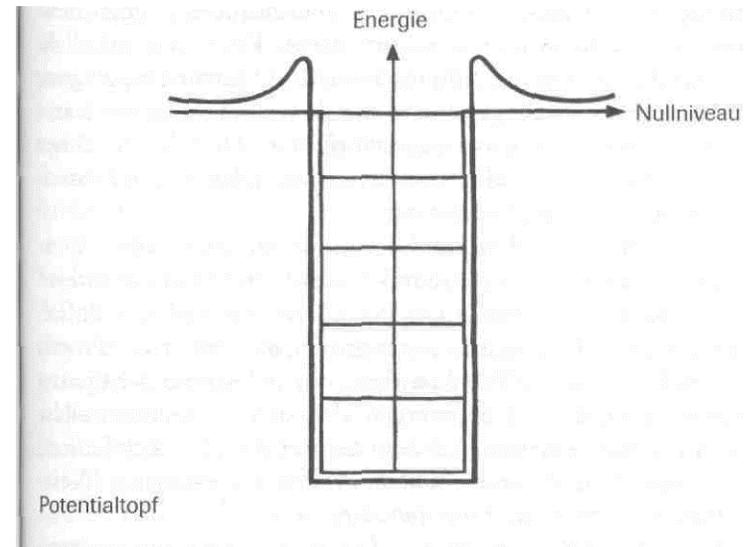
die sich für den Laien als so abgehoben und meist gar nicht mehr nachvollziehbar darstellt, hat sehr wohl unser aller Leben beeinflusst. Und ihre Geschichte ist mit Sicherheit noch nicht zu Ende.

Tunneleffekt - Ereignisse, die eigentlich nicht passieren dürften

Das quantenmechanische Prinzip, daß man für den Aufenthaltsort eines Teilchens immer nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angeben kann, hat auch praktische Konsequenzen, die sich im Experiment überprüfen lassen. Mehr noch: Einige Phänomene der Physik kann man überhaupt nur dadurch erklären, daß Teilchen nie ganz genau lokalisierbar sind.

So ausgefeilt die Theorien sind, die inzwischen über die Elektronenhülle des Atoms entwickelt wurden, so ungenau sind auch heute noch die Vorstellungen über den Aufbau des Atomkerns. Alles, was man weiß, ist, daß er aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen besteht und daß er in der Hauptsache durch die Kernkräfte zusammengehalten wird. Manche Theorien gehen davon aus, daß auch im Kern ähnliche Schalen wie in der Hülle des Atoms existieren, und sie versuchen damit die Tatsache zu erklären, daß es Elemente mit besonders stabilen Konstellationen im Kern gibt. Diese treten bei den sogenannten »magischen Zahlen« auf wie 2, 8, 20, 28, 50, 82 und 126. Mit ähnlichen Zahlenspielerereien wie einst für die Elektronenhülle versucht man, die Entstehung der magischen Zahlen zu ergründen. Aber diese Theorien sind bis heute nicht vollständig befriedigend.

Eine der Modellvorstellungen, die man für den Atomkern hat, ist das Bild vom sogenannten »Potentialtopf«. Er entsteht, wenn man die Kräfte, die dort auftreten, einander über-



lagert und in einem Diagramm aufträgt. In seiner Wirkung entspricht dieses Potential wirklich einem Topf, denn füllt man beispielsweise einen echten Topf mit Kugeln, so benehmen diese sich dort ähnlich wie die Protonen und Neutronen in ihrem gedachten Potentialtopf.

Im Zentrum des Kerns herrschen die Kernkräfte vor, die sehr stark sind. Je weiter man sich vom Mittelpunkt entfernt, desto mehr nehmen diese Kräfte ab, dafür treten nun zunehmend die abstoßenden elektrischen Kräfte zwischen den gleichnamig geladenen Protonen in den Vordergrund. Der »Rand« des Kerns, symbolisiert durch den Rand des Potentialtopfes, ist also gerade der Bereich, in dem ein Proton nicht mehr von den Kernkräften festgehalten, sondern von den elektrischen Abstoßungskräften nach außen weggedrückt wird.

Normalerweise überschreiten Protonen und Neutronen im Kern diese Grenze nie. Da jedes Atom stets versucht, den

stabilsten und damit niedrigsten Energiezustand einzunehmen, liegen sie so weit unten im Potentialtopf wie möglich. Ihnen fehlt die Energie, um über den Rand hinauszuspringen, ebenso wie es den Kugeln nicht möglich wäre, über den Rand eines echten Topfes hinwegzukommen. Die dafür nötige Energie könnten sie allenfalls von außen erhalten, etwa durch einen Stoß oder durch Erhitzen.

Nun zeigt sich aber wieder einmal der Unterschied zwischen makroskopischer und mikroskopischer Welt: Während es den Kugeln unseres Alltagslebens nie von selbst möglich sein wird, aus dem Topf zu entkommen, gehorchen die Protonen im Potentialtopf des Atomkerns den Gesetzen der Quantenmechanik. Und diese besagen, daß sich die Teilchen nicht mit absoluter Sicherheit auf dem Grund des Topfes befinden, sondern nur mit einer wenn auch großen Wahrscheinlichkeit. Es bleibt ein Rest von Unsicherheit.

Und so kann es geschehen, daß ab und zu — zwar selten, aber immerhin — ein paar Kernteilchen entkommen. Wir kennen dies aus der Natur: Man spricht von radioaktiver Strahlung. Alphastrahlen bestehen beispielsweise aus je zwei Protonen und Neutronen, aber es gibt auch Neutronenstrahlung, bei der Neutronen aus dem Kern ausgestoßen werden. Ohne die Quantenmechanik wäre es nicht zu erklären, wie diese Phänomene zustande kommen.

Es beweist auch erneut die Gültigkeit von Heisenbergs Unschärferelation. Wenn es beispielsweise nicht möglich ist, Energie und Zeitpunkt eines Zustandes gleichzeitig ganz genau zu bestimmen, dann kann es passieren, daß für eine ganz winzig kleine Zeitspanne ein Teilchen eine weit höhere Energie hat, als ihm eigentlich zusteht. Und in diesem Augenblick kann es aus dem Potentialtopf entkommen. Die Regeln sagen ja nur aus, daß die Ungenauigkeit der Energie multipliziert mit jener der Zeit kleiner sein muß als h . Man nennt dieses Phänomen, bei dem Teilchen aus einem Potentialtopf ent-

kommen, »Tunneleffekt«, da es auf den ersten Blick so wirkt, als hätte sich das Teilchen durch einen Tunnel in der Topfwand davongemacht. Der Tunneleffekt ist nicht nur verantwortlich für die radioaktive Alpha- und Neutronenstrahlung, sondern auch für eine Reihe anderer Erscheinungen. So war es beispielsweise in den zwanziger Jahren noch rätselhaft, warum eichte Kerne im Inneren von Sternen miteinander verschmelzen können. Die gemessenen Temperaturen dort waren nicht hoch genug, um erklären zu können, wie die positiv geladenen Atomkerne die gegenseitige elektrische Abstoßung überwinden könnten. Sie hatten aufgrund der Beobachtungen nicht genügend Energie, um die Wände des Potentialwalles zum nächsten Atomkern zu überspringen. Erst der Tunneleffekt konnte erklären, daß ein geringer Prozentsatz der Teilchen diesen Wall einfach durchdrang. Bei der ungeheuren Anzahl der Atome in der Materie reichen jedoch diese vergleichsweise wenigen Teilchen schon aus, um den hohen Energiegewinn im Inneren der Sonne und der Sterne zu erklären.

Der Tunneleffekt tritt ständig und überall auf, nur wird er wegen seiner Winzigkeit im allgemeinen nicht wahrgenommen. In den achtziger Jahren haben jedoch zwei Forscher, Gerd Binnig und Heinrich Rohrer, ein geniales Gerät erfunden, das genau auf diesem Effekt beruht. Das sogenannte Raster-Tunnel-Mikroskop, für dessen Erfindung die beiden 1986 den Nobelpreis erhielten, ist in der Lage, Strukturen abzutasten, die bis hinab zur Größe eines Atoms reichen.

Das Herzstück des Mikroskops ist eine Sonde, bestehend aus einer extrem feinen Wolframnadel, deren Spitze im Idealfall aus nur einem einzigen Atom besteht. Sie wird in geringem Abstand beispielsweise über eine Kupferoberfläche geführt, deren Atome man abtasten will. Selbstverständlich besteht diese Nadel ihrerseits auch aus Atomen mit ihren Elektronenhüllen. Weil es sich bei Wolfram um ein Metall

handelt, kann sich ein Teil der Elektronen so gut wie frei in der Nadel umherbewegen, sie können aber die Nadel nicht verlassen, aufgrund der Quantenregeln ist ihnen dies verboten. Das Gleiche gilt für das Kupfer. Befindet sich nun die Nadelspitze unmittelbar über der Kupferoberfläche, ohne sie indes zu berühren (etwa im Abstand von Tausendstel Millimetern), sollte man meinen, daß stets die Wolfram-Elektronen in der Nadel und die Oberflächenelektronen im Kupfer blieben. Aber in Wirklichkeit kann hin und wieder ein Elektron zwischen Nadel und Kupfer hüpfen, es tunnelt durch den verbotenen Zwischenraum hindurch. Wie häufig das geschieht, hängt natürlich von dem Abstand zwischen Spitze und Kupferoberfläche ab. Je dichter sie beisammen sind, desto leichter fällt der Wechsel. Wenn man noch zusätzlich eine elektrische Spannung zwischen Nadel und Kupferoberfläche anlegt, schlüpfen noch mehr Elektronen durch den fiktiven Tunnel: Es fließt ein wenn auch winziger Strom, der sogenannte Tunnelstrom.

Tastet man nun mit der Sonde systematisch die Oberfläche ab und registriert an jedem Punkt die Stärke des Tunnelstroms, so erhält man ein Bild dieser Oberfläche, das so fein ist daß es sogar noch die Erhebungen der einzelnen Kupferatome zeigt. Inzwischen wurde diese Technik weiterentwickelt, Geräte im Aktenraschenformat haben den Markt erobert.

Eine andere Entdeckung, die auf dem Tunneleffekt beruht, machte der Brite Brian Josephson. Im Jahr 1973 erhielt er als einer der jüngsten je geehrten Physiker den Nobelpreis. Er wurde ausgezeichnet für den sogenannten Josephson-Effekt. Es handelt sich dabei um das Phänomen, daß bei sehr tiefen Temperaturen ein winziger Strom auch durch sehr dünne Isolatorschichten hindurchfließt. Es gelang Josephson — und mit ihm zugleich Leo Esaki und Ivar Giaever in den USA —, diesen Effekt in supraleitenden Medien zu erklären. Die Anwendung des Josephson-Effekts in elektronischen Dünnschicht-

Elementen steigerte die Meßgenauigkeit von Spannungsdetektoren erheblich und führte zu einer verbesserten Bestimmung der Feinstrukturkonstante, einer atomaren Grundkonstante.

Die geheimnisvolle Fernwirkung zwischen zwei Teilchen

Die Aussage der Quantenmechanik, daß die Kausalität aufgehoben sei und nur noch statistische Wahrscheinlichkeiten gelten, versetzte die wissenschaftliche Welt in eine Unruhe, die bis heute nicht vorüber ist. Zwei der herausragendsten Köpfe, Albert Einstein und Niels Bohr, fochten ihr ganzes Leben lang einen wissenschaftlichen Streit über die Frage aus, ob es das Grundprinzip der Welt sei, unbestimmt zu sein, oder ob es noch sogenannte verborgene Variablen gebe, die nur noch nicht entdeckt sind und die eigentliche Ursache für die Phänomene der Quantenmechanik darstellen. Einstein glaubte an letzteres, Bohr hingegen hielt die Wahrscheinlichkeitsdarstellung für grundlegend. Zu Lebzeiten beider wurde der Disput nicht entschieden, erst in den letzten Jahren mehrten sich die Hinweise, daß Bohr recht hatte.

Wenn zwei so geniale Köpfe wie Einstein und Bohr über ein Thema streiten, kann dies nur auf höchstem Niveau geschehen, und so ist es spannend, die Argumente und Gegenargumente nachzulesen, die beide gegeneinander schleuderten. Vor allem Einstein dachte sich ständig Experimente aus, die beweisen sollten, daß beispielsweise die Heisenbergsche Unschärfe-Relation nicht immer gilt. Bohr ging dann stets daran, die Argumente Einsteins zu zerpfücken. Der Streit zog sich über Jahrzehnte hin, und es würde zu weit führen, ihn in allen Einzelheiten hier aufzurollen. Eines der Gedankenexperimente

überdauerte aber die Zeiten und ist auch heute noch hoch aktuell. Es handelt sich um einen fiktiven Versuch, den Einstein sich 1935 zusammen mit seinen Kollegen Boris Podolsky und Nathan Rosen ausdachte, und er wurde nach den Anfangsbuchstaben der drei Erfinder EPR-Experiment genannt.

Man stelle sich vor, so hatten die drei Theoretiker gefordert, daß man zwei Photonen gemeinsam erzeugt, die physikalisch miteinander gekoppelt sind. Solche Photonenpaare können beispielsweise entstehen, wenn ein Teilchen, etwa ein Elektron, mit seinem Antiteilchen, dem Positron, zusammenstößt und sich dabei in Energie verwandelt. Die beiden entstehenden Photonen fliegen mit Lichtgeschwindigkeit auseinander und stehen in keiner Verbindung zueinander. Dies wäre nach der Relativitätstheorie auch gar nicht möglich, da eine Informationsübermittlung zwischen zwei Objekten höchstens mit Lichtgeschwindigkeit geschehen kann.

Angenommen, man mißt nun genau die Emissionszeit des ersten (und damit automatisch auch des zweiten) Photons, dann kennt man nach der Heisenbergschen Regel seine Energie zu diesem Zeitpunkt nicht genau. Da man aber die Energie des anderen Teilchens genauestens messen kann (dafür muß man dessen Emissionszeitpunkt nicht), läßt sich daraus die Energie des ersten Photons ebenfalls genau ermitteln, denn die Summe der beiden Energien ist durch das Teilchen/Antiteilchen-Paar bekannt. So ließe sich sowohl Energie als auch Emissionszeitpunkt exakt bestimmen und die Unschärferelation umgehen. Wie läßt sich dieser Widerspruch auflösen?

Eine Erklärung wäre, daß es irgendeine Art von »spukhafter Fernwirkung«, wie Einstein das nannte, gibt, über die die beiden Teilchen sich miteinander verständigen können. Dann aber wäre die Relativitätstheorie falsch, nach der sich Informationen nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übermitteln lassen. Eine andere Erklärung wäre, daß die beiden

Photonen auf irgendeine nicht bekannte Art miteinander korrelieren, also in ihren Eigenschaften verbunden bleiben, so daß Messungen an einen auch Rückschlüsse auf das andere zulassen und umgekehrt. Einstein, Podolsky und Rosen folgten dieser zweiten Auffassung und glaubten, es gebe noch unbekannte verborgene Variablen, die eine Wechselwirkung zwischen den Teilchen herstellten,

Das EPR-Rätsel ließ die Physiker nicht ruhen, und im Jahr 1964 gelang es schließlich dem amerikanischen Forscher John S. Bell, auf mathematischem Wege zu zeigen, daß alle Annahmen von derartigen verborgenen Variablen Voraussagen ergeben, die nicht im Einklang mit der Quantentheorie stehen. Dieser Schritt war wichtig, denn er bot die Voraussetzung dafür, daß nun nicht mehr nur mit Gedankenexperimenten, sondern mit echten Laborexperimenten die Fundamente der Quantenmechanik untersucht werden konnten.

Geradezu als Jahrhundertexperiment gilt in diesem Zusammenhang die Versuchsanordnung des französischen Physikers Alain Aspect aus dem Jahr 1982, sie verwendet das Phänomen der Polarisation von Lichtwellen.

Die Polarisation ist eine Eigenschaft des Lichts, die eine bestimmte Richtung im Raum definiert. Man kennt das Phänomen von den Polaroid-Sonnenbrillen, die nur einen Teil der Lichtstrahlen (oder -teilchen) hindurchlassen. Sie wirken also ähnlich wie eine Jalousie. Der Physiker John Gribbin hat ein einleuchtendes Bild für einen derartigen »Polarisationsfilter« gefunden: Es ist, so schreibt er, »als trügen die Photonen lange Speere. Alle Photonen, die ihre Speere quer vor der Brust tragen, können zwischen den Stäben hindurchschlüpfen und werden von Ihren Augen gesehen; alle Photonen, die ihre Speere hochhalten, können durch die schmalen Spalten nicht hindurch und werden abgeblockt. In normalem Licht kommen alle Arten der Polarisation vor — die Speere der Photonen weisen die unterschiedlichsten Neigungswinkel auf.«

Die Polarisation eines Teilchens ist wie sein Spin eine quantenmechanische Ja/Nein-Eigenschaft. Das Teilchen ist entweder in eine Richtung polarisiert oder in die andere, nie aber in beide Richtungen gleichzeitig. Richtet man also beispielsweise einen Lichtstrahl auf einen Polarisationsfilter, so wirkt dieser wie die oben geschilderte Jalousie: Die Photonen, deren Spin parallel zu den "Lamellen« {der Fachmann spricht von Polarisations Ebenen) steht, kommen durch, die anderen nicht. Die Photonen, die hinter dem ersten Filter ankommen, sind also alle in eine bestimmte Richtung polarisiert, die parallel zu den Lamellen des ersten Filters ist.

Angenommen, diese Richtung soll waagrecht sein. Baut man nun hinter dem ersten Filter einen zweiten auf, dessen Lamellen senkrecht stehen, werden alle Photonen abgeblockt, da ihre Polarisationsrichtung ja waagrecht ist. Mit zwei zueinander senkrecht stehenden Polarisationsfiltern kann man also jeden Lichtstrahl zu hundert Prozent unterbrechen.

Nun gibt es aber eine Erweiterung dieses Experiments, die ein verblüffendes Ergebnis erbringt, das nur mit Hilfe der Quantenmechanik zu verstehen ist. Angenommen, man stellt zwischen die beiden Filter einen dritten, dessen Lamellen mit denen des ersten Filters einen Winkel von 45 Grad bilden. Die dort ankommenden Photonen haben einen Polarisationswinkel, der von dem der Lamellen um 45 Grad abweicht, das heißt, nach der klassischen Vorstellung dürfte keines der Photonen hindurchgehen. Das Experiment zeigt aber, daß in Wirklichkeit fünfzig Prozent der Photonen durchkommen, Dies läßt sich nur erklären mit der quantenmechanischen Wahrscheinlichkeit. Sie gibt nämlich jedem Teilchen die fünfzigprozentige Chance, den Filter zu durchdringen. Und es gibt noch eine zweite Merkwürdigkeit: Die Polarisations Ebene der durchgekommenen Photonen wurde parallel zu den Lamellen des zweiten Filters ausgerichtet, also auch um

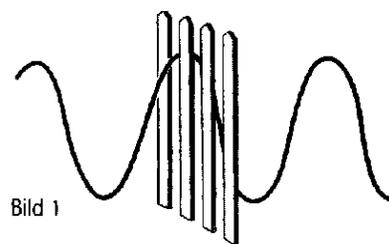


Bild 1

Polarisationsfilter lassen nur die Lichtwellen hindurch, deren Polarisations Ebene parallel zu der Lamellen-Richtung ist. Die Lichtwelle kommt hier jeweils von links.

Bild 1: Beide stehen senkrecht, die Welle kann durch.

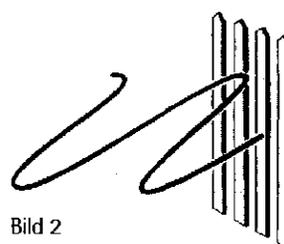


Bild 2

Bild 2: Die Polarisations Ebene der Welle ist waagrecht, die Lamellen stehen senkrecht: die Welle kann nicht durch.

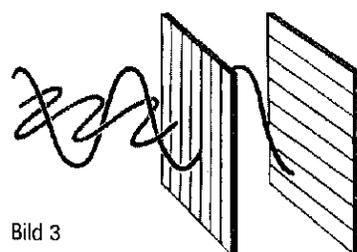


Bild 3

Bild 3: Bei einer Welle mit mehreren Polarisations Ebenen wird durch den Filter der Teil der Welle herausgefiltert, deren Polarisations Ebene parallel zu den Lamellen ist. Der linke Filter läßt nur die senkrechte Ebene hindurch, der rechte, waagrechte Filter gar nichts mehr.

Bild 4: Ein seltsamer quantenmechanischer Effekt: Stellt man zwischen die beiden Filter von Bild 3 einen dazu um 45 Grad verdrehten Filter, kann ein Teil der Wellen hindurch, ist aber am Ende gedreht.

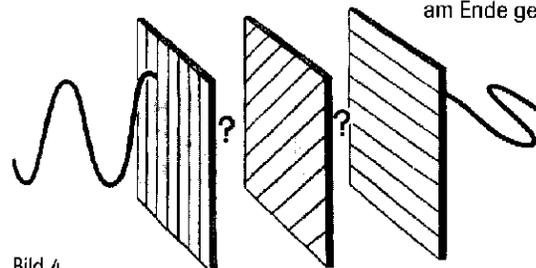


Bild 4

45 Grad gedreht. Diese Photonen sind noch die Hälfte der ursprünglich losgeschickten — kommen nun also an dem hinteren Filter an, der senkrecht zum ersten und im Winkel von 45 Grad zum zweiten steht. Und wie schon beim zweiten Filter geht auch hier wieder die Hälfte der Photonen hindurch. Es ergibt sich also insgesamt ein paradoxes Resultat: Stellt man dem Licht zwei gekreuzte Filter in den Weg, kommt keines der Photonen hindurch, stellt man aber dazwischen noch einen dritten, gedrehten Filter, kommen am Ende ein Viertel aller Photonen an. Wie sich ein einzelnes Photon verhält, läßt sich auch in diesem Experiment, ebensowenig wie beim Doppelspalt, vorhersagen, man kennt nur die Wahrscheinlichkeit, mit der es die Anordnung durchdringt oder nicht. Was zwischen den Filtern wirklich geschieht, darüber läßt sich keinerlei Aussage treffen.

Alain Aspect hat nun dieses Phänomen zum Inhalt seines berühmten Experiments gemacht. Vereinfacht gesprochen, erzeugt er gleichzeitig zwei Lichtteilchen, die auseinanderfliegen. Diese schickt er dann durch je einen Polarisationsfilter und mißt auf jeder Seite, wie viele Teilchen durchkommen. Je nach der Polarisationsrichtung der Photonen können sie den Filter mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit durchdringen. Was Aspect nun fand, war, daß die beiden gleichzeitig erzeugten Photonen immer gleich reagierten; Kam das eine am einen Filter durch, dann kam auch das andere bei seinem Filter durch und umgekehrt.

Dies ist noch nicht allzu erstaunlich, da man davon ausgehen kann, daß die beiden Photonen durch ihre gemeinsame Erzeugung miteinander korrelieren, also in ihrem Verhalten verbunden sind. Sie würden sich dann lediglich so verhalten wie die beiden Würfel in folgendem Beispiel: Man hat zwei Würfel, einen roten und einen schwarzen. Der eine wird in eine Schachtel gepackt, der andere in eine andere. Dann werden beide verschickt. Der Empfänger weiß nicht, in welchem

Päckchen welcher Würfel ist. Er kennt aber sofort die Farbe des zweiten Würfels, sobald er die erste Schachtel öffnet, denn ist der darin enthaltene Würfel rot, muß der andere schwarz sein und umgekehrt. Auch dies ist genaugenommen eine überlichtschnelle Verbindung zwischen den beiden Würfeln und gibt bei eingehender Überlegung zu manchen Theorien Anlaß.

Insofern ist also das Resultat von Aspects Experiment bisher noch nicht weiter verwunderlich. Aber er beließ es dabei nicht, sondern erweiterte die Versuchsanordnung. Er baute vor den beiden Polarisationsfiltern »Schalter« ein, welche die Polarisationsrichtung des durchfliegenden Photons ändern. Diese Schalter werden gesteuert von einem Zufallsgenerator, das heißt, der Schalter wird ganz zufällig an- oder ausgeschaltet. Außerdem arbeitet er so schnell, daß er noch in der Lage ist umzuschalten, wenn das Photon bereits unterwegs ist. Die beiden Photonen wissen also, wenn sie losfliegen, noch nicht, ob sie durch den Filter durchkommen können oder nicht.

Das Experiment, das natürlich in Wirklichkeit sehr viel komplizierter aufgebaut war und hier nur in seinen Grundzügen geschildert werden kann, ergab folgendes Ergebnis: Die jeweils »zusammengehörigen« Photonen verhielten sich trotzdem wie Zwillinge immer gleich. Konnte das eine das Polarisationsfilter durchdringen, so konnte es auch das andere, wurde das eine zurückgehalten, dann auch das andere. Und das, obwohl die Bedingungen unterwegs geändert wurden. Woher wußte das eine Photon, ob der Schalter beim anderen Photon eingeschaltet war oder nicht? Durch irgendeine Art von Informationsübertragung konnte es nicht geschehen sein, denn die Photonen bewegten sich mit Lichtgeschwindigkeit auseinander.

Die Lage war und bleibt geheimnisvoll. Was Aspect und tiner ganze Reihe von N adriahrnern seines Experiments ge-

lang, war, anhand von Beils Vorhersagen die Entscheidung zu treffen, daß es keine verborgenen Variablen sein konnten, die das merkwürdige Zwillingverhalten der Photonen steuern. Immerhin weiß man dadurch, daß Bohr in seinem Streit mit Einstein recht hatte.

Was aber nach wie vor unklar ist und eigentlich mit jedem Experiment, das dazu durchgeführt wird, rätselhafter wird, ist die Frage, wie die beiden Photonen ihr Verhalten aufeinander abstimmen können. Woher weiß das erste vom Verhalten des zweiten? Wie erfährt das eine, daß das andere gerade einen Schalter durchflogen hat, der seine Polarisationsrichtung geändert hat/ Und wie erhält es die Information, ob sein Kollege mit der gedrehten Polarisationsrichtung noch in der Lage ist, den Filter zu durchdringen, um dann selbst das gleiche Verhalten zu zeigen?

Manche Forscher ziehen sich auf die Deutung zurück, die Heisenberg schon gab: Über das, was man nicht beobachten kann, darf man auch keine Aussagen machen. Ebensowenig, wie ein Elektron in einem Atom eine bestimmte Bahn beschreibt oder durch das eine oder andere Loch in einem Doppelspaltversuch fliegt, kann man sich eine Vorstellung davon machen, was zwischen den beiden Photonen abläuft, die Aspects Experiment durchlaufen.

Andere Forscher sind mutiger: Sie glauben, daß hinter dem merkwürdigeren Verhalten eine geheime Art von Verbundenheit steckt. David Bohm, Physikprofessor in London, glaubt, daß das, was wir als getrennte Teilchen sehen, gar nicht getrennt ist, sondern zu einem »tieferen Realitätsbereich« gehört, der eine uns unbekannt, implizite Ordnung enthält. John Bell hingegen, der mit seiner Ungleichung die Gültigkeit der Quantenmechanik beweisen konnte, glaubt, daß dies nur ein Wiederaufleben von Einsteins verborgenen Variablen wäre und lehnt solche Theorien, die alles mit allem verbinden wollen, ab.

Trotzdem: Wenn man bedenkt, daß bis zurück zum Urknall alle Atome irgendwann einmal mit anderen Atomen oder Teilchen in Wechselwirkung gestanden haben und dadurch eine gewisse Beziehung bestehen bleiben könnte, dann ist der Gedanke nicht mehr ganz abwegig, daß im Weltall alles mit allem verbunden sein könnte. Auf jeden Fall würde dies ein völlig anderes Weltbild liefern, als unser Alltagsverstand es hat. Vielleicht steht die Physik damit an der Grenze zum Aufbruch in ein neues Zeitalter? Immerhin war es bei der Erfindung der Quantenmechanik mindestens ebenso merkwürdig, was man damals plötzlich als Realität annehmen sollte. Richard Feynman hat in seinen Vorlesungen einmal gesagt: »Das Paradoxe ist lediglich ein Konflikt zwischen der Realität und dem Gefühl, was Realität sein sollte.«

Bleibt aber immer noch die Frage, ob Einsteins Relativitätstheorie durch Aspects Experiment widerlegt wurde. Die Forscher Raymond Y Chiao, Paul G. Kwiat und Aephraim M. Steinberg, die in Berkeley mit einem ähnlichen Experiment Aspects Resultate untermauerten, machten sich auch darüber Gedanken. Im Jahr 1993 schrieben sie in »Spektrum der Wissenschaft«: »Ist demnach Einsteins Relativitätstheorie in Gefahr? Erstaunlicherweise nicht, denn es gibt keine Möglichkeit, die Korrelation zwischen Teilchen zur Nachrichtenübermittlung mit Überlichtgeschwindigkeit zu nutzen. Der Grund dafür liegt darin, daß es ausschließlich vom Zufall abhängt, ob ein Photon auf den Detektor gelangt. (...) Nur durch den direkten Vergleich zweier Messungen der offensichtlich zufälligen Zählergebnisse können wir die nichtlokalen Korrelationen nachweisen. Das Kausalitätsprinzip wird also nicht verletzt. Science-fiction-Fans werden sich aber damit zufriedengeben müssen, daß Nachrichtenübermittlung mit Überlichtgeschwindigkeit auch weiterhin physikalisch unmöglich zu sein scheint.«

Kosmologie und Multiwelten

Die Katze in Schrödingers Gedankenexperiment ist zugleich lebendig und tot. Der Physiker nennt dies eine Überlagerung von zwei Zuständen. Mathematisch wird die Situation gedeutet durch die Wellenfunktion der Zustände. Bleibt man in der Ausdrucksweise der Physiker, so bringt man dadurch, daß man die Kiste öffnet, also eine Messung macht, die Wellenfunktion dazu zu kollabieren. Bei diesem Kollaps entsteht aus Wahrscheinlichkeit Realität, im Fall der Schrödingerschen Katze ist es Leben, oder Tod.

In dieser Interpretation, die in der schon erwähnten Kopenhagener Deutung festgeschrieben ist, bringt jede Messung und jede Beobachtung die beteiligte Wellenfunktion dazu zu kollabieren. Bei genauerem Nachdenken verursacht sie aber eine Reihe von Schwierigkeiten, Was passiert zum Beispiel, wenn man die Kiste mit der Katze öffnet, dann aber nicht hineinschaut? Ist dann die Wellenfunktion trotzdem kollabiert? Oder wenn ich hineinschaue und dann das Ergebnis meinem Nachbarn mitteile, kollabiert die Wellenfunktion für ihn dann erneut? Irrn Grunde sind dies skurrile Fragen, die den Normalbürger sicherlich nicht beschäftigen, aber die Physiker und Philosophen haben sie nicht ruhen lassen.

Unser Alltag, überhaupt der Ablauf der Welt besteht nach der Kopenhagener Deutung in einem unablässigen Kollabieren von Wellenfunktionen. Dies ist zudem eine sehr spröde Interpretation der Welt, wenn es auch vielleicht für Naturwissenschaftler nicht so erscheinen mag. Aber sie hat eine Reihe von Theoretikern nicht befriedigt, so daß sie versuchten, eine alternative Deutung der Quantenmechanik zu entwickeln. Sie wurde bekannt unter dem Namen Multiwelt-Theorie. Vorreiter dieser Theorie war Hugh Everett, der in den fünfziger Jahren an der Princeton Universität bei John

Wheeler promovierte. Beiden erschien es merkwürdig, daß Wellenfunktionen auf magische Weise kollabieren sollten, wenn man sie beobachtet. Da ja das gesamte Universum aus einer Unzahl einander sich überlagernder Wellenfunktionen Ksteht, müsse es, so meinten sie, letzten Endes auch jemanden geben, der dieses Universum beobachtet, um seine Wel-enfunktionen zum Kollabieren zu bringen und es damit letztendlich in die Realität zu versetzen.

Um dieses Dilemma aufzulösen, postulierte Everett, daß die einander überlagernden Wellenfunktionen des Universums, die ja, bevor sie kollabieren, eine Vielzahl alternativer Möglichkeiten offenlassen, alle parallel zueinander existieren, ohne jemals zu kollabieren. Der Beobachter bringt die Wellenfunktion dann nicht mehr zum Einsturz, sondern er entscheidet sich lediglich für eine der vielen Möglichkeiten der Realität. Es existieren also ebenso viele Welten parallel zueinander, wie es Überlagerungen von Wellenfunktionen gibt.

Abschätzungen sprechen von 10^{100} , was eine Zahl ist, die alles Vorstellbare weit überschreitet. Für den Betrachter existiert aber jeweils nur eine mögliche Welt, nämlich die, für die er sich mit seiner Beobachtung soeben entschieden hat, ohne daß er Zugang zu den anderen, parallelen Welten erhalten kann.

Angewandt auf das Bild der Schrödingerschen Katze bedeutet dies: Es gibt nicht eine, sondern zwei Katzen. Eine ist lebendig, die andere tot. Die Kopenhagener Deutung sagt, daß der Beobachter durch das Öffnen der Kiste die eine der beiden Möglichkeiten in die Wirklichkeit hebe. Everett hingegen meint, daß beide Möglichkeiten weiterhin real sind, daß sich nur der Beobachter für eine der beiden entscheide. Das radioaktive Atom in der Kiste ist nicht zerfallen oder nicht, sondern es gibt eine Welt mit zerfallenem Atom, eine mit nicht zerfallenem Atom. Beide sind - glaubt man der Multiwelt-Theorie — gleichermaßen real. Und in der echten

Welt gibt es eben nicht nur zwei derartige Alternativen, sondern unzählige.

Auch das EPR-Gedankenexperiment und seine realen Nachfolger kann die Vielwelten-Theorie erklären. Nach Everett ist es nicht so, daß unsere Entscheidung, welche Polarisationsrichtung eines Photons wir messen wollen, die Polarisation eines Photons irgendwo anders im Universum auf magische Weise zwingt, einen entsprechenden Zustand einzunehmen, vielmehr entscheiden wir lediglich darüber, welche der vielen existierenden Realitäten wir wahrnehmen wollen.

Diese Art, die Welt zu betrachten, ist, wie Everett bewies, mit der Quantenmechanik mathematisch völlig in Einklang zu bringen. Sie erscheint uns nur deshalb unverständlich, weil sie unseren Denkgewohnheiten nicht entspricht. Aber diese Hürde mußten die Quantenphysiker ja schon häufiger überspringen. John Gribbin, der nach eigenem Bekunden die Multiwelt-Theorie für durchaus glaubwürdig hält, hat den grundlegenden Unterschied zwischen der Kopenhagener Deutung und dieser Theorie in einen einzigen Satz gefaßt: »Entweder ist nichts real, oder alles ist real.«

Er bringt diese Theorie damit in Zusammenhang, daß die Vergangenheit bestimmt, die Zukunft aber ungewiß ist. In der Vergangenheit »haben wir aus den vielen Realitäten eine reale Geschichte ausgewählt, und sobald jemand in unserer Welt einen Baum gesehen hat, bleibt er dort, auch wenn niemand nach ihm schaut. Dies gilt auch rückwirkend bis hin zum Urknall. (...) In die Zukunft führen jedoch viele Wege, und jeden davon wird irgendeine Version von uns einschlagen. Jede Version von uns wird glauben, einen eindeutigen Weg zu gehen, und auf eine eindeutige Vergangenheit zu blicken, aber die Zukunft wird unerkennbar sein, da es so viele Arten von Zukunft gibt.« Fairerweise sollte man noch sagen, daß einer der Väter dieser Multiwelt-Theorie, John Wheeler, sich später wieder davon lossagte, »weil ich fürchte,

daß sie ein zu schweres metaphysisches Gepäck mit sich herumschleppt«, sagte er 1979.

Unabhängig davon, ob man daran glauben mag oder nicht, das Bild von den Multiwelten gibt es auch in der Kosmologie. Andrei Linde, ein russischer Physiker, hat ein Szenario entwickelt, das die Idee der Multiwelten in letzter Konsequenz durchdenkt und die Entstehung der Welt auf diese Weise erklärt. Er kommt zu dem Ergebnis, daß das Weltall ein unendliches Ganzes ist, das sich ständig in Form von Mini-Universen in einem chaotischen Prozeß selbst reproduziert, die entstehen und irgendwann wieder zusammenbrechen. Einer dieser Mini-Kosmen ist unser Universum. Aber ununterbrochen entstehen neue Raumwelten, die sich so stark voneinander unterscheiden können, daß sie sogar eine andere Dimensionenzahl besitzen als unsere Welt.

Linde geht wie alle Theoretiker davon aus, daß es für die Zeit kurz nach dem Urknall sinnlos wäre, von Ort oder Zeit zu sprechen, beides gab es damals noch nicht. Er schlägt vor, sich die Bedingungen damals eher wie einen wabernden Schaum aus Raum und Zeit vorzustellen. Das Entscheidende ist, daß dieser Schaum anfangs völlig ungeordnet, chaotisch verteilt ist. In der Wissenschaft spricht man bei einem solchen Zustand von Fluktuationen, zufälligen Schwankungen, die überall und ständig auftreten.

Unter bestimmten Bedingungen kann sich aus einer solchen Fluktuation eine Situation ergeben, in der ein Teil der Schwankungen sozusagen »eingefroren« wird. Aus diesem Teil entwickelt sich ein ganzes, neues Universum. Der andere Teil wächst weiter und weiter und erzeugt neue Fluktuationen, die wiederum neue Universen hervorbringen können. So konnte das gesamte All aus einer Vielzahl von Mini-Universen bestehen, die sich jeweils gerade aufblähen oder zusammenziehen. Das Besondere an ihnen ist, daß sie nur für den jeweiligen Bewohner beobachtbar und wahrnehmbar sind. So wie

die Katze, die nur für den Beobachter lebend oder tot ist, muß nach Linde das Universum beobachtet werden, damit es seine Existenz offenbart.

Linde erklärt mit Hilfe der Quantenphysik auch die Entstehung von Galaxien. Normalerweise gilt diese Theorie nur für mikroskopische Abmessungen, aber sie spielt im Universum ebenfalls die entscheidende Rolle. Die Quantenfeldtheorie lehrt nämlich, daß der leere Raum nie vollkommen leer, sondern Immer mit winzigen Schwankungen aller möglichen physikalischen Felder angefüllt ist. Wenn diese Schwankungen manchmal zufällig bestimmte Werte überschreiten, werden sie eingefroren und verwandeln sich in richtige, meßbare Felder. Solche Felder stören das Gleichgewicht und führen schließlich wie kleine Samenkörner zur Bildung von Masse, aus der sich letztlich die Galaxien zusammenballen. Da diese Schwankungen vollkommen zufällig verteilt sind, erklärt sich aus ihnen sowohl die Gleichmäßigkeit unseres Universums, würde man es aus sehr großer Entfernung betrachten, als auch die Ungleichmäßigkeit der Massenverteilung im Detail.

Für unser eigenes Universum bleibt also die Urknalltheorie, wie sie bisher galt, erhalten. Lindes Theorie der chaotischen Inflation - wie sie offiziell heißt — sagt lediglich aus, daß dies nicht der einzige und nicht der erste oder letzte Urknall war, sondern daß sich das gesamte Universum unendlich in vielen Urknallen ständig weiter fortpflanzt.

Neueste Experimente aus der Welt der Quantenphysik

Atome, in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts noch Modelle der Theorie, an denen man beispielsweise die quantenmechanischen Gesetze erproben konnte, sind inzwischen zu sichtbaren, handfesten Objekten geworden, die von Experi-

mentatoren eingesperrt, fotografiert und aufs genaueste vermessen wurden. Neueste Entwicklungen bei den Meßgeräten und in der Elektronik haben dies möglich gemacht. Vor allem ein Gerät steht dabei im Vordergrund, das nicht größer ist als eine Faust und deshalb in jedem Labor Platz hat; die Ionenfalle. Auch wenn ihr Prinzip schon seit über vierzig Jahren bekannt ist, haben die präzisen Winzlinge erst mit der jüngsten technologischen Entwicklung ihre Blüte erlebt. Die Verbesserung der Hochvakuumtechnik und neue Möglichkeiten der Computersteuerung spielten dabei eine Rolle, hinzu kam die Möglichkeit, mit supraleitenden Spulen starke und gleichmäßige Magnetfelder zu erzeugen sowie die Erfindung der Laser mit veränderbarer Frequenz.

In der Ionenfalle wird ein Ion, ein Rumpfatom, das eines oder mehrere seiner äußersten Elektronen verloren hat, von elektrischen und magnetischen Feldern so eingesperrt, daß es nicht entweichen kann. Wenn das Ion sich nur um eine Spur aus dem Zentrum der Falle entfernt, wird es durch die dort ansteigenden Felder sofort wieder zurückgezogen.

Was auf den ersten Blick wie ein Spielzeug der Grundlagenforscher aussieht - und es auch ist -, hat inzwischen längst seinen praktischen Nutzen bewiesen. Kein anderes Gerät läßt so genaue physikalische Messungen zu wie die Ionenfalle. Der Grund hierfür liegt in der Heisenbergschen Unschärferelation. Bekanntlich sagt diese aus, daß das Produkt aus Meßzeit und Energie einen bestimmten Wert nicht unterschreiten kann, nämlich das Plancksche Wirkungsquantum. Wenn man nun aber mit Hilfe der Falle die Meßzeit stark verlängern kann, läßt sich damit die Ungenauigkeit der Energiemessung reduzieren. Und die Aufenthaltsdauer eines Ions in einer Ionenfalle kann sehr lang sein — der Rekord liegt derzeit bei zehn Monaten. Dies erlaubt Messungen mit extrem hoher Präzision.

Ein Beispiel für eine derartige Messung ist es, die Genauigkeit der Zeitmessung in Atomuhren noch weiter zu verbes-

sern. Man verwendet dafür den Übergang zwischen zwei Elektronenschalen des Ytterbium-Ions. Durch den Einfluß des magnetischen Feldes des Atomkerns auf den Spin der Elektronen in der Hülle spalten sich die Energieniveaus der Elektronen sehr fein auf, man nennt dies die Hyperfeinstruktur.

Für das Experiment benutzt man eine doppelte Resonanz: Ein Laserstrahl, dessen Frequenz sich genau abstimmen läßt, «entvölkert» ein bestimmtes Energieniveau der aufgespaltenen Linie, indem er die Atome auf ein höheres Niveau hebt. Wenn sie dieses wieder verlassen, geben sie den Energieunterschied in Form von Fluoreszenzlicht ab. Gleichzeitig werden Mikrowellen eingestrahlt, deren Energie genau dem Unterschied zwischen zwei benachbarten Hyperfeinstruktur-niveaus entspricht. Dadurch füllt sich das entvölkerte Niveau wieder auf. Wenn die Resonanzfrequenz erreicht wird, kann man dies aus einer drastischen Erhöhung des Fluoreszenzlichts ablesen. Diese Messung ist so genau, daß sie alle Rekorde in der Mikrowellenspektroskopie bricht, das heißt, man kann damit die Frequenz des Lasers so exakt einstellen, daß sie zur Zeitmessung verwendet werden könnte. Eine solche Uhr wäre so genau, daß sie in dreißig Millionen Jahren nur um eine einzige Sekunde falsch gehen würde.

Eine weitere Anwendung von Ionenfallen ist die Möglichkeit, eine Masse sehr genau zu bestimmen. Bisher wird die Masse immer noch am Urkilogramm geeicht, das im Internationalen Büro für Maße und Gewichte in Sevres bei Paris steht. Dieses ist ein Zylinder aus Platin-Iridium - im Grunde ein Anachronismus in unserer Zeit der hypergenauen Meßverfahren, denn für die anderen beiden Grundlagen unseres Maßsystems, Meter und Sekunde, gelten längst High-Tech-Maßstäbe.

Endlich auch für das Kilogramm eine genaue und überall auf der Welt nachvollziehbare Definition zu entwickeln, ist

ein Ziel, das die Erfindungsgabe auch der Quantenmechaniker herausfordert. Gute Realisierungschancen hat die Idee, die Masse eines Atoms extrem genau zu bestimmen und dann abzuschätzen, wie viele Atome in einem Kilogramm enthalten sind. So könnte es gelingen, das Kilogramm auf die gebräuchliche atomare Masseneinheit zurückzuführen, das Atomgewicht des Kohlenstoff-Isotops ^{12}C .

In einer Ionenfalle werden Silizium-Atome eingefangen und rotieren dort um die Feldlinien des Magnetfeldes. Die Frequenz dieser »Zyklotron-Schwingung« genannten Rotation hängt von der Stärke des Magnetfeldes und von der Masse der Ionen ab. Mit einigen experimentellen Feinheiten gelingt es, diese Frequenz auf ein Milliardstel genau zu messen. Wenn es nun auch noch möglich wird, einen Silizium-Einkristall höchster Güte herzustellen und ihn mit einem Raster-Tunnel-Mikroskop zu vermessen, ließe sich damit die Anzahl der Atome pro Volumen in dem Kristall zählen. Hat dieser Ansatz Erfolg, wird das Urkilogramm in Sevres überflüssig.

Daß quantenphysikalische Objekte nicht immer extrem winzig sein müssen, bewiesen vor kurzem Forscher in den USA und in Österreich. An mehreren Hochschulen gelang es, Atome in einer Falle fast bis zum absoluten Nullpunkt zu kühlen, ohne daß sie sich zu einer Flüssigkeit oder zu einem Festkörper zusammengeballt hätten. Sie bilden dann ein sogenanntes Bose-Einstein-Kondensat, eine Art von Materie, wie sie sonst in der Welt nicht vorkommt. Es handelte sich dabei um Teilchen mit ganzzahligem Spin, also um Bosonen, von denen sich nach den Gesetzen der Quantenmechanik beliebig viele im gleichen Zustand aufhalten können. In den hier geschilderten Versuchen fielen bis zu zehn Millionen von Atomen in den tiefstmöglichen Energiezustand und wurden dadurch vollkommen ununterscheidbar. Sie verhielten sich also wie ein einziges Riesenatom. Trotzdem waren die Zusammenballungen noch mit dem bloßen Auge sichtbar.

Von derartigen Experimenten erwartet man sich weitete Einblicke in den Zustand der Materie, aber auch praktische Anwendungen; So können sie ähnlich wie oben geschildert zur noch genaueren Messung von Zeit und Längenmaßstäben dienen. Forscher sprechen auch schon davon, sogenannte Atomlaser herzustellen - man meint damit Geräte, die nicht wie ein Laser Photonen, sondern Atome aussenden, die völlig gleich orientiert und sehr eng gebündelt sind. Sie könnten helfen, ähnlich einer Airbrush-Pistole winzigsten Maßstabs sehr dünne und exakte Strukturen auf elektronische Halbleiterchips aufzutragen.

Eine der Besonderheiten des Bose-Einstein-Kondensats ist die Tatsache, daß sich hier Materie fast am absoluten Temperatur-Nullpunkt befindet. Noch vor wenigen Jahren brauchte es wochenlange Kühlung und einen extrem hohen Aufwand, um Temperaturreiche zu erreichen, die nur noch ein Millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt (er entspricht $-273,15$ Grad Celsius oder Null Kelvin) liegen. In den neunziger Jahren entdeckten die Physiker jedoch einen quantenphysikalischen Trick, mit dem es ihnen seither gelingt, Atome innerhalb von Minuten so stark zu kühlen.

Wärme ist im Grunde nichts anderes als Bewegung. Die Atome eines Gases fliegen ungeordnet durch den Raum und stoßen häufig zusammen. Je schneller sie fliegen, desto wärmer ist das Gas. Selbst in einem Feststoff schwingen die Atome noch um ihren Ruhepunkt. Bleiben die Atome völlig ruhig liegen, ist der absolute Nullpunkt erreicht. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik kann dies aber nie ganz geschehen, da die Heisenbergsche Unschärferelation stets einen winzigen Energiebetrag vorschreibt, den ein Teilchen besitzen muß, wenn sein Ort ganz genau festgelegt ist. Man nennt diesen Betrag die Nullpunktsenergie.

Um bereits vorgekühlte Atome in einer Falle (sie werden dort durch den Strahlungsdruck von Laserlicht zusammenge-

halten) fast bis zum absoluten Nullpunkt zu kühlen, macht man sich die Tatsache zunutze, daß Atome Energie nur in Form von Quanten einer bestimmten Größe aufnehmen können. Diese Größe muß genau dem Abstand zwischen zwei Energieniveaus eines Elektrons entsprechen. Man bestrahlt nun das Atom mit Laserlicht, dessen Photonen geringfügig unterhalb dieser Energie, also auch unter dieser Frequenz, liegen. Da sich die Atome in der Falle immer noch ein wenig bewegen, reagieren diejenigen, die dem Laserlicht entgegenfliegen, wegen des Dopplereffekts auf eine etwas niedrigere Frequenz. Sie entspricht dann genau der nötigen Absorptionsfrequenz. Das Atom schluckt also das Photon. Da dessen Energie in Wirklichkeit aber nicht ausreicht, um das Elektron auf eine höhere Bahn zu heben, wird die fehlende Energie aus der Bewegungsenergie des Atoms genommen. Die Folge ist, daß das Atom abgebremst wird. Wenn es das eingefangene Photon später wieder abgibt, fällt es wieder in den Grundzustand zurück, ist aber langsamer als vorher. Dieses »Laserkühlung« genannte Verfahren wurde inzwischen zu einem Standardinstrument der Quantenphysiker.

Nicht nur die Zeit-, Abstands- und Massenmessung, auch die physikalische Grundlagenforschung benötigt immer feinere Instrumente. Laserlicht, also Licht, das sehr gleichmäßig schwingt, gehört zu den beliebtesten »Sonden«, mit denen man Atome, Ionen oder einzelne Teilchen untersuchen kann. Inzwischen reicht die Exaktheit des Laserlichts jedoch für manche Experimente nicht mehr aus. Physiker sind deshalb zur Zeit dabei, eine völlig neue Art von Licht zu erfinden: sogenanntes nichtklassisches Licht, dessen Teilchen wie an einer Perlenschnur aufgereiht sind. Benutzt man das Teilchenbild zur Beschreibung eines Lichtstrahls, so besteht er aus einer Abfolge von Lichtquanten, sogenannten Photonen. Von ihrer Menge pro Zeiteinheit hängt die Intensität des Lichtstrahls ab, von ihrer Energie seine Farbe.

Leider enthält jeder »normale« Lichtstrahl aber eine große Unsicherheit, die um so störender wirkt, je geringer seine Intensität ist: Die Photonen kommen - auch bei einem Laserstrahl — nicht in regelmäßigen Abständen nacheinander an, sondern sind statistisch verteilt. Das fällt kaum auf, wenn der Lichtstrahl aus unzähligen Teilchen besteht, denn dann gleichen sich die Intensitätsunterschiede aus. Ist jedoch die Lichtstärke extrem gering, mit anderen Worten, besteht der Strahl nur aus wenigen Photonen, prasseln sie ins Meßgerät wie Regentropfen auf den Schirm. Vergleichbar ist dieses Phänomen etwa einem Schuß aus einer Schrotflinte. Auch dort treffen die einzelnen Kügelchen nicht in einer exakt vorhersehbaren Reihenfolge, sondern nur statistisch beschreibbar am Ziel ein. Die Intensitätsschwankungen, die sich aus dieser Erscheinung ergeben, bezeichnet man deshalb beim Licht ganz analog als »Schrottruschen«. Dieses Rauschen macht sich insbesondere dann äußerst unliebsam bemerkbar, wenn man mittels eines Lichtstrahls sehr genaue Messungen durchführen möchte. Damit bei der Überlagerung der beiden Teilstrahlen am Ende die durch das Schrottruschen erzeugten Intensitätsschwankungen das Meßergebnis nicht zu stark verfälschen, muß der Laserstrahl eine bestimmte Stärke haben. Technische und finanzielle Gründe sowie die Wärmeausdehnung der optischen Komponenten setzen dem aber häufig eine Grenze.

Im Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München und an der Universität Konstanz stellt man deshalb Überlegungen an, wie man das klassische Licht mit seinen natürlichen Unregelmäßigkeiten so verändern könnte, daß es »nichtklassisch«, also ganz gleichmäßig, würde.

Im Normalfall entsteht ein Lichtquant dadurch, daß ein Atom von einem energiereicheren Zustand in einen energieärmeren springt. Die Energiedifferenz zwischen den bei-dabei furiuri Form eines Photons aus-

gesandt. Nun haben aber solche Übergänge die fatale Eigenschaft, daß sie zufällig passieren. Man kann also ihren Zeitpunkt nicht exakt vorhersagen — und genau aus diesem Grund »tröpfeln« die Photonen beim normalen Licht so ungleichmäßig.

Ein einzelnes Ion in einer Ionenfalle läßt sich jedoch unter bestimmten Bedingungen dazu zwingen, regelmäßig Photonen von einem Laser aufzunehmen und kurz darauf wieder abzugeben. Je höher die Intensität des Lasers ist, desto kürzer werden die Pausen. Man spricht bei diesem Licht, das man sich vorstellen kann wie eine Perlenkette, von »nichtklassischem Licht«.

Fast noch schwieriger als derartiges Licht zu erzeugen ist es, eine solche »Perlenkette« aus Photonen nachzuweisen, ohne sie zu zerstören. Denn praktisch alle Meßvorgänge beruhen darauf, daß einzelne Lichtquanten verschluckt und damit aus der Perlenkette herausgerissen werden. Ihre Regelmäßigkeit ist dann verschwunden.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma zeigt der sogenannte »Ein-Atom-Laser«, er kann sowohl nichtklassisches Licht erzeugen als auch nachweisen. Bei diesem Präzisionsinstrument schießt man beispielsweise Rubidium-Atome mit einer bestimmten Geschwindigkeit in einen Resonator, nachdem man sie mit einem Laserstrahl hoch angeregt hat. Die Länge des Resonators ist so genau auf die Eigenschaften des Atoms abgestimmt, daß dieses veranlaßt wird, seine Energie nach einer bestimmten Zeit als Photon abzugeben. Wenn der Resonator sehr genau abgestimmt und stark gekühlt ist, nimmt das Atom dann aber das Photon nach der gleichen Zeit wieder auf, gibt es anschließend wieder ab und so weiter.

Nachdem mehrere Atome den Resonator durchlaufen haben, halten sich dort eine Anzahl von Photonen auf, die man ermitteln kann, indem man die auslaufenden Atome abzählt

und ihren Energiezustand mißt. Auf diese Weise erhält man Informationen über das nichtklassische Strahlungsfeld im Inneren des Resonators, ohne es zu zerstören.

Der »Ein-Atom-Laser« stellt ein sehr interessantes Modellsystem für das Studium nichtklassischen Lichts dar, allerdings enthält er nur wenige Photonen und ist deshalb für viele praktische Anwendungen schlecht geeignet. An der Universität Konstanz wird deshalb zur Zeit daran gearbeitet, auf ganz anderem Wege »Perlenketten-Licht« mit weit höherer Intensität zu erzeugen. Man benutzt dafür die Frequenz Verdoppelung in gewissen optisch nichtlinearen Kristallen.

Daß all diese Theorien und Experimente, so exotisch sie heute noch erscheinen mögen, nicht nur l'art pour l'art sind, zeigen vielfältige Überlegungen, wie man mit Hilfe dieses Perlenketten-Lichts die optische Kommunikation revolutionieren könnte, denn damit wäre es möglich, mit kleinstem Aufwand ein Optimum an Informationen zu übertragen. Kein Wunder, daß weltweit auch in den großen Computerfirmen über das nichtklassische Licht nachgedacht wird.

Wie die Quantenphysik unseren Alltag verändert

Laser

Obwohl Albert Einstein aufgrund seiner theoretischen Überlegungen schon 1914 vorhergesagt hatte, daß es etwas wie einen Laserstrahl geben müsse, gelang es Forschern erst 1960, dieses Prinzip in ein Gerät umzusetzen. Es ist wohl die bedeutendste Entwicklung, die unmittelbar auf der Quantenphysik beruht.

Das Wort ist Programm: Laser - der Begriff hat sich inzwischen auch im Deutschen so eingebürgert, daß kaum jemand noch daran denkt, daß es sich dabei um eine Abkürzung handelt. »Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation« ist der volle Name, und das heißt auf deutsch: »Licht Verstärkung durch angeregte Strahlungsaus-sendung.«

Vom praktischen Standpunkt aus gesehen ist der Laser eine Lichtquelle, die einen enggebündelten Strahl aussendet. Dieser Lichtstrahl hat eine bestimmte Wellenlänge, und seine gleichförmigen Wellen laufen parallel und synchron. Physiker nennen diese beiden Eigenschaften »monochrom« und »kohärent«. »Normales« Licht hingegen besteht aus vielen verschiedenen Wellenlängen, und seine Wellenzüge schwingen nicht parallel und nicht im Takt.

Laser gibt es inzwischen in einer ungeheuren Vielfalt. Ihre Wellenlänge reicht vom infraroten bis zum ultravioletten Bereich, ihre Stärke variiert von Bruchteilen eines Milliwatt bis

zu den gewaltigen Megawatt-Lasern der Militärs. Es gibt sogenannte gepulste Laser, die ihre Energie in Bündeln abschießen; andere, die Dauerstrichlaser, senden einen kontinuierlichen Lichtstrahl aus.

Bei allen Lasern kommt der Strahl auf die gleiche Art zustande: Man benutzt ein Medium, das man mit Energie vollpumpt. Anschließend bringt man dieses Medium dazu, die gespeicherte Energie in Form von Licht wieder abzugeben. Dieses wird dann in einem sogenannten »Resonator« mittels Spiegeln zu einem Strahl gebündelt. Das Medium kann ein Gas, eine Flüssigkeit oder ein Feststoff sein, und meist ist der Lasertyp auch nach seinem Medium benannt. Beispiele sind der Rubinlaser, der Neodym-Glas-Laser, der CO₂-Laser oder der Farbstofflaser.

Ein Lichtquant oder Photon kommt bekanntlich im allgemeinen dadurch zustande, daß ein Atom oder Molekül von einem »angeregten« Zustand, in dem es viel Energie enthält, in einen energieärmeren Zustand »fällt«. Die Energiedifferenz zwischen den beiden Niveaus ist dann die Energie der Welle oder des Quants. Die verschiedenen Energiezustände des Atoms oder des Moleküls können unterschiedliche Ursachen haben: So können sich Elektronen der Atomhülle auf verschiedenen Schalen befinden, die höheren haben dabei mehr Energie als die niedrigeren. Fällt ein Elektron von einer höheren auf eine niedrigere Schale, entsteht ein Lichtquant.

Eine andere Möglichkeit: Ein Molekül schwingt. Die Atome, aus denen sich das Molekül zusammensetzt, können gegeneinander schwingen, und je mehr Atome vorhanden sind, desto mehr verschiedene Schwingungsmuster gibt es. Beim Übergang zwischen ihnen oder zurück in den Ruhezustand wird nach den Gesetzen der Quantenmechanik ebenfalls ein Photon ausgesandt.

Die dritte Art von Energieniveaus kommt durch Rotation zustande. Moleküle können sich in unterschiedliche Richtun-

gen drehen, und beim Übergang von einer Drehung in eine andere ödet in den Ruhezustand kann wiederum ein Photon freigesetzt werden.

Alles in der Natur ist bestrebt, den niedrigstmöglichen Energiezustand einzunehmen. Eine Kugel zum Beispiel, die auf einem Hügel liegt, rollt nach unten, so weit es geht. Entsprechend verhalten sich auch Atome und Moleküle. Wenn ein Atom in einen angeregten Zustand gerät, egal aus welchem Grund, ist es bestrebt, unter Aussendung eines Lichtquants wieder in den Grundzustand zurückzufallen. Das geschieht nach einer zufälligen Zeitspanne, deren Mittelwert man aus Messungen kennt - meist nach Bruchteilen einer Sekunde. Da der Vorgang des Zurückfallens zeitlich nicht vorhersagbar ist, spricht man von »spontaner Emission«.

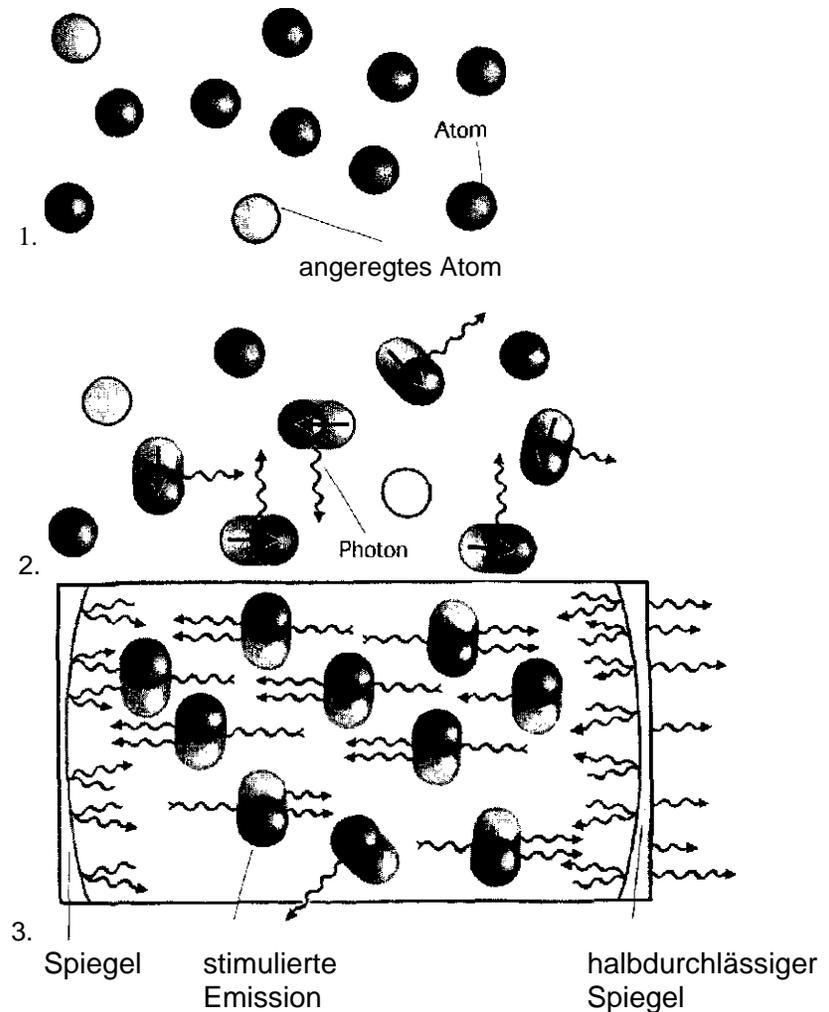
Würde man nun also ein Medium mit Energie vollpumpen, würden die einzelnen Atome oder Moleküle nach kurzer Zeit durch solche spontanen Emissionen in den Grundzustand zurückfallen, und die Energie wäre verloren., aber einen Laser hätte man damit nicht. Beim Laser kommt noch ein weiteres Phänomen hinzu: Es gibt nicht nur spontane Emission, sondern man kann das Zurückfallen in den niedrigeren Energie-zustand auch künstlich auslösen, indem man ein Lichtquant der gleichen Energie auf das Teilchen treffen läßt. Dieser Anstoß genügt, um das Atom oder Molekül zur Aussendung eines eigenen Photons anzuregen, zu »stimulieren«. Der Vorgang heißt aus diesem Grund »stimulierte Emission« — der Ausdruck, der in den Namen des Lasers eingegangen ist.

Das Prinzip des Lasers wird damit klar: Man pumpt ein Medium voll Energie und bringt es mittels stimulierter Emission dazu, diese Energie als Lichtquanten wieder abzugeben, und zwar nicht zufällig, sondern gesteuert. Es gibt allerdings noch ein Problem: Nur wenn ein Photon auf ein Atom oder Molekül im angeregten, hohen Energiezustand trifft, kann es, wie eben beschrieben, das Teilchen zur Aussendung eines

Das Prinzip eines Lasers

In einem normalen Gas befinden sich fast alle Atome oder Moleküle im Grundzustand, also im Zustand möglichst geringer Energie. Nur wenige Teilchen, die durch einen Stoß oder beispielsweise durch ein einfallendes Photon angeregt wurden, sind in einem höheren Energiezustand. Sie fallen aber nach einer gewissen Zeit wieder zurück in ihren Grundzustand. Pumppt man durch geeignete Maßnahmen - etwa durch das Einstrahlen von Licht oder durch eine elektrische Entladung - systematisch Energie in das Gas hinein, wobei die Photonen eine bestimmte, genau passende Größe haben müssen, nehmen die Teilchen des Gases die Energie auf und gehen in einen angeregten Zustand über. Man nennt dies eine *Inversion*. Nach einiger Zeit senden sie die Energie von selbst wieder aus und fallen in den Grundzustand zurück. Man kann sie aber auch dazu zwingen, die Energie wieder abzugeben, indem man sie erneut mit einem Photon gleicher Größe bestrahlt. Im Laser wird eine solche Inversion gezielt aufgebaut. Die parallelen Spiegel an den Enden reflektieren die freiwerdenden Photonen hin und her. Dabei treffen sie auf angeregte Teilchen und zwingen diese zur Abgabe ihrer Energie. So werden immer mehr Photonen frei, es entsteht ein Lawineneffekt. Der Laserstrahl aus parallelen Photonen wird durch einen der Spiegel, der halb durchlässig ist, nach außen gestrahlt.

1. Normalerweise befinden sich die meisten Atome eines Mediums im Grundzustand, nur wenige sind zufällig angeregt.
2. Pumppt man Energie in das Medium, werden dadurch Atome angeregt, sie geben kurz darauf die Energie in Form von Photonen wieder ab [spontane Emission].
3. Durch das Auftreffen eines Photons werden angeregte Atome gezwungen, ihre Energie abzugeben (stimulierte Emission). Zwei Spiegel am Ende bündeln das Licht.



Lichtquants bewegen. Normalerweise befinden sich aber viel mehr Atome oder Moleküle in einem niedrigen Energiezustand. Sie schlucken die auftreffenden Photonen und springen dadurch in ein höheres Energieniveau. Dies ist aber noch kein Laser.

Zur Konstruktion eines Lasers ist es deshalb notwendig, mehr angeregte Teilchen in einem Medium zu haben als Teilchen in niedrigen Energiezuständen. Nur so werden viele Teilchen lieber ein Photon aussenden, als eines zu schlucken. Man nennt eine solche Energieverteilung eine »Inversion«: im oberen Energieniveau viele Teilchen, im unteren weniger. Man kann sie durch Einsatz von viel Energie erreichen. Erst unter dieser Voraussetzung funktioniert das Laserprinzip.

Das Licht, das auf diese Weise entsteht, wäre zwar stark, aber es wäre noch nicht gebündelt, sondern würde in alle Richtungen abgestrahlt. Der eigentliche Laserstrahl wird erst durch den bereits erwähnten Resonator erzeugt. Er besteht in seiner einfachsten Form aus zwei parallelen Spiegeln, zwischen denen sich das Lasermedium befindet. Wenn nun im Medium durch Emission viele Lichtteilchen entstehen, werfen die Spiegel immer nur diejenigen Photonen ins Medium zurück, die senkrecht auftreffen. Die Lichtquanten, die nach der Seite hinausfliegen, sind verloren. Die zurückgeworfenen aber treffen beim nächsten Durchgang erneut auf angeregte Atome oder Moleküle und regen diese ihrerseits zur Aussendung eines Lichtquants an. Dieser Prozeß setzt sich immer weiter fort und führt schnell zu einer positiven Rückkopplung, das heißt, der Lichtstrahl, der senkrecht auf die Spiegel trifft, wird immer stärker. Meist benutzt man auf einer der beiden Seiten einen Spiegel, der halb durchlässig ist. Durch ihn hindurch entweicht dann nach außen der Laserstrahl, der aus den Photonen besteht, die mittels stimulierter Emission im Medium entstanden sind. Vor dem Medium hängt es ab, wie man die Energie in den Laser hineinpumpt, ihn sozusagen

auflädt. Der älteste und wohl auch bekannteste Lasertyp ist der Rubinlaser, der 1960 von Theodore Maiman der staunenden Weltöffentlichkeit als erster Laser vorgeführt wurde. Sein Medium ist ein Rubinstab, also ein Aluminiumoxidkristall, der geringe Spuren von Chromionen enthält. Gepumpt wird er mit Licht. In der Praxis sind dies Blitzlampen, die den Rubinstab umgeben und gleichzeitig gezündet werden. Das Licht des Rubinlasers ist rot. Heute wird jedoch weit häufiger der sogenannte Neodym-Glas-Laser benutzt. Auch er wird optisch, also mit Blitzlampen, aufgeladen. Der bisher größte Laser der Welt, der Nova-Laser in Livermore, Kalifornien, und sein geplanter Nachfolger NIF (National Ignition Facility), arbeiten nach diesem Prinzip.

Eine grundsätzlich andere Art von Lasern sind die Gaslaser. Wie ihr Name schon sagt, besteht ihr aktives Medium aus Gas, zum Beispiel aus CO₂, aus einem Helium-Neon-Gemisch oder aus Argon. Die Energie wird hier nicht mit Blitzlicht eingestrahlt, sondern auf elektrischem Wege zugeführt. Im allgemeinen legt man an das Rohr mit dem Lasergas eine elektrische Hochspannung an und erzeugt damit ähnlich wie in einer Neonlampe eine Gasentladung. Die Elektronen, die daran beteiligt sind, stoßen mit den Gasmolekülen oder -atomen zusammen und regen sie dabei an. Je nachdem, welches Gas man verwendet, kann man Laserlicht unterschiedlicher Farbe herstellen. Der Argonlaser strahlt grün bis blau, der Helium-Neon-Laser rot, der CO₂-Laser infrarot.

Die Energiezufuhr durch eine einfache Gasentladung hat aber ebenso wie die Entladung von Blitzlampen den Nachteil, daß sie meist nur kurze Zeit andauert. Ein solcher Laser kann deshalb nur Lichtstöße aussenden (Pulsbetrieb). Um auch einen permanenten Strahl (Dauerstrichlaser) zur Verfügung zu haben, verwendet man in neueren Entwicklungen zum Beispiel starke Radiowellen. Sie werden ins Medium eingestrahlt und erhalten dort eine ständige Gasentladung aufrecht.

Eine andere Weiterentwicklung bei den Gaslasern geht dahin, daß man einen Elektronen- oder Ionenstrahl von außen her durch das Medium schießt, der die Teilchen anstößt und ihnen so Energie zuführt. Wieder eine andere Methode verwenden die sogenannten chemischen Laser. Die Energie wird dem Medium hier durch eine chemische Reaktion zugeführt. So können zum Beispiel zwei Gase miteinander reagieren, wobei Reaktionsenergie frei wird. Die neu entstandene chemische Verbindung behält diese Energie in Form von Vibrationsenergie, das heißt, ihre Moleküle schwingen und sind deshalb in einem angeregten Zustand.

Aber es müssen nicht immer Feststoffe oder Gase sein, auch Flüssigkeiten können als Lasermedium dienen. Besonders berühmt sind in dieser Klasse die Farbstofflaser, bei denen das eigentliche Medium, nämlich fluoreszierende organische Farbstoffe, in einer Flüssigkeit gelöst sind. Solche Laser werden meist optisch gepumpt, das heißt, eingestrahktes Licht regt die Moleküle an. Dieses Licht kann entweder aus Blitzlampen stammen oder von einem zweiten Laser. Hier regt also ein schwacher Laser einen stärkeren an — ein Prinzip, das auch bei anderen Typen manchmal angewandt wird.

Gerade in jüngerer Zeit macht eine weitere Art von Lasern von sich reden, die sogenannten Halbleiterlaser. Bei ihnen werden Halbleiterschichten, die mit bestimmten Atomen geimpft (dotiert) sind, durch elektrische Spannung angeregt. Nach diesem Prinzip lassen sich extrem kleine Laser herstellen, sogenannte Diodenlaser, die beispielsweise in CD-Playern oder Laserdruckern Anwendung finden.

Die größeren Laser haben andere Aufgaben, und diese sind heute so vielfältig, daß es fast absurd erscheint, daß man den Laser in den frühen sechziger Jahren als »Erfindung auf der Suche nach einer Anwendung« verspottet hatte. Heute werden Laser zur Materialbearbeitung eingesetzt; dort schneiden, fräsen, bohren sie fast jedes Material, außerdem können

sie Oberflächen bearbeiten, härten und beschriften. In der Schweiß- und Löttechnik sind sie kaum mehr wegzudenken, vor allem in der Mikroelektronik, wo sie mit höchster Präzision die elektrischen Anschlüsse an Chips realisieren. Die hohe Energiedichte und außerordentliche Präzision von Laserstrahlen erlauben es, sie auch unter extremsten Bedingungen einzusetzen: Sie erlauben es, kleinste Teile beispielsweise in der Mikrosystemtechnik zu bearbeiten, andererseits können sie sogar das härteste Material der Welt, Diamanten, bearbeiten.

Auch in der Meßtechnik sind Laser inzwischen unentbehrlich: Sie messen Abstände und sind damit im Tunnelbau, in der Geodäsie und bei Baumaßnahmen hilfreich, ja sogar der Abstand des Mondes von der Erde wurde mit Hilfe eines Lasers gemessen, der an einem von Astronauten auf der Mondoberfläche aufgestellten Spiegel reflektiert wurde. Laserlicht wird an Luftverunreinigungen und besonderen Molekülen in der Atmosphäre gestreut — deshalb dienen Laser in der modernen Wissenschaft zur Umweltüberwachung und -diagnose. So wurde beispielsweise die Veränderung des Ozonlochs teilweise mit Lasern gemessen. In der Industrie werden Laser zur Prozeßüberwachung eingesetzt, da sie feinste Änderungen in Form oder Temperatur aufspüren können. Mit Hologrammen, dreidimensionalen Laserfotos, untersuchen Autobauer das Schwingungsverhalten ihrer Karossen, Computerforscher entwickeln auf dieser Basis neue, noch leistungsfähigere Datenspeicher.

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

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

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet moderner Laser ist die Medizin. Vor allem bei nichtinvasiven Operationen mit dem Endoskop ist der Laser unentbehrlich, um Blutungen zu stillen. Dies tut er natürlich auch bei herkömmlichen Operationen, wo man ihn häufig zum Verschweißen der Blutgefäße einsetzt. Laser sind inzwischen Standardinstrumente bei Augenoperationen, sie tragen Hornhautschichten ab, korrigieren die Linse oder schweißen Netzhäute wieder fest. Bei der Behandlung von Hauterkrankungen werden vor allem sanfte Laser eingesetzt, zum Entfernen von Muttermalen, Geschwüren, Narben, Tätowierungen oder Warzen benötigt man stärkere Kaliber.

Und last but not least benutzen Militärs große Laser. Vor allem während des Kalten Krieges bemühten sich die beiden Großmächte USA und UdSSR, immer größere Laser zu bauen, mit denen man hoffte, gegnerische Raketen abzuschießen. Unter dem Namen »Krieg der Sterne« oder »SDI« legten die Vereinigten Staaten ein eigenes Entwicklungsprogramm auf, das mit vielen Millionen Dollar Lasersysteme für den Weltraum und Röntgenlaser entwickeln sollte. Inzwischen wurden die Bemühungen etwas reduziert, aber längst nicht einge-

stellt. Angesichts dieser Flut von Anwendungen kann man ohne Scheu sagen, daß der Laser als im Grunde quantenmechanisches Gerät das Leben einer Vielzahl von Menschen verändert oder beeinflußt hat. Und sein Siegeszug ist noch nicht zu Ende. Man erhofft sich davon die Möglichkeit, eines Tages optische Computer zu realisieren, die nicht mehr mit Elektronen, sondern mit Photonen rechnen und die noch erheblich kleiner und schneller sind. Laser werden bald auch eine neue Generation von Datenspeichern hervorbringen, die eine weit größere Kapazität besitzen als die heutigen. Und schließlich dienen Laser auch Künstlern als zukunftsweisendes Medium, das mit seinen technischen Möglichkeiten neue Gestaltungsfreiheiten eröffnet.

Supraleiter

Der niederländische Physiker Heike Kamerlingh-Onnes entdeckte im Jahr 1911 ein seltsames Phänomen, das er nicht erklären konnte: Wenn er Quecksilber auf weniger als minus 269 Grad Celsius abkühlte, verlor es plötzlich seinen elektrischen Widerstand vollständig und leitete Strom ohne Verluste. Onnes erhielt 1913 den Nobelpreis, allerdings nicht für diese Entdeckung, die Supraleitung genannt wurde. Nach und nach stellte man fest, daß etwa ein Dutzend Elemente und weit über hundert Legierungen ein ähnliches Verhalten zeigten. Immer aber lag die sogenannte Sprungtemperatur, unterhalb derer sich Supraleitung einstellte, nur wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt, der bei minus 273 Grad Celsius liegt. Er wird mit Null Kelvin angegeben und bezeichnet den Punkt, an dem jede thermische Bewegung der Atome und Moleküle zum Erliegen gekommen ist. Der Einfachheit halber gibt man tiefe Temperaturen lieber in Kelvin an.

Quecksilber wird also bei vier Kelvin supraleitend. Die drei Forscher John Bardeen, Leon Cooper und Robert Schrieffer schlugen Ende der sechziger Jahre eine quantenmechanische Theorie vor, die das Entstehen des merkwürdigen Verhaltens erklären sollte und die nach den Anfangsbuchstaben der Physiker BCS-Theorie genannt und 1972 mit dem Nobelpreis belohnt wurde.

Da die Temperaturen für die Supraleitung so extrem tief lagen, mußte man flüssiges Helium benutzen, um die Materialien zu kühlen. Der große Aufwand rechtfertigte nur die wenigsten praktischen Anwendungen, etwa supraleitende Spulen für Beschleunigerexperimente oder Fusionsanlagen oder Kernspintomographen. Das Thema Supraleitung schien ausgereizt und geklärt.

Groß war deshalb die Aufregung, als im März 1987 auf einer Tagung der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft in New York der Schweizer K. Alexander Müller und der Deutsche J. Georg Bednarz die Entdeckung eines Materials bekanntgaben, das bereits bei der relativ hohen Temperatur von 35 Kelvin supraleitend wurde. Es handelte sich um die keramische Substanz Lanthan-Barium-Kupferoxid, die ein kompliziert aufgebautes Kristallgitter besitzt und zur Familie der sogenannten Cuprate gehört. Für diese Entdeckung erhielten die beiden im darauffolgenden Jahr den Nobelpreis. Sofort begann weltweit die Suche nach ähnlichen Substanzen mit noch höheren Sprungtemperaturen. In der Tat wurden bald darauf Verbindungen gefunden, die schon bei neunzig Kelvin supraleitend wurden, danach folgten weitere Erfolgsmeldungen, und den derzeitigen Rekord hält Quecksilber-Barium-Kalzi-um-Kupferoxid mit einer Sprungtemperatur von etwa 135 Kelvin. Dies liegt weit oberhalb der Temperatur von flüssigem Stickstoff (77 Kelvin) und ermöglicht es, Supraleitung bereits mit normaler Stickstoffkühlung zu erreichen; das teure flüssige Helium ist hierfür nicht mehr notwendig. Nach wie vor

halten sich auch Spekulationen, daß es eines Tages gelingen werde, Materialien zu finden, die sogar bei gewöhnlicher Umgebungstemperatur schon supraleitend werden.

Der physikalische Mechanismus, der hinter dem merkwürdigen Phänomen der Supraleitung steckt, konnte bis heute nicht restlos aufgeklärt werden. Bardeen, Cooper und Schrieffer hatten in ihrer BCS-Theorie postuliert, daß die Elektronen in einem Supraleiter sogenannte Cooper-Paare bilden, die im Gegensatz zu einzelnen Elektronen nicht mit ihresgleichen zusammenstoßen können und auch nicht an den Störstellen des leitenden Kristalls gestreut werden. Darum treffen sie bei ihrer Fortbewegung auf keinerlei Widerstand.

Daß sich Elektronen, die ja bekanntlich eine negative Ladung tragen, überhaupt zu Paaren zusammenschließen können, ohne sich abzustößen, beruht auf einem quantenmechanischen Effekt, der nur in Festkörpern, genauer gesagt in Kristallen, auftritt. In einem Metall besteht das Kristallgitter aus Atomrümpfen, also aus Ionen, die ihr äußerstes Hüllenelektron als Leitungselektron abgegeben haben. Vereinfacht erklärt, kann man sich vorstellen, daß ein Elektron, das an diesen Ionen vorbeiwandert, deren Lage durch die elektromagnetische Anziehung kurzfristig ein wenig verschiebt. Solche kurzzeitigen Verzerrungen des Gitters nennt man in der Festkörperphysik Phononen. Es handelt sich dabei um Gitterschwingungen, die aber aufgrund des quantenmechanischen Welle-Teilchen-Dualismus auch als Teilchen betrachtet werden können. Diese Phononen also schaffen sozusagen kleine Bezirke positiver Ladung, die weitere Elektronen anziehen und so die Paarbildung unterstützen. Diese BCS-Theorie, die hier freilich nur sehr vereinfacht dargestellt wurde, konnte die Supraleitung in Metallen gut erklären.

Sie versagte aber weitgehend bei der Deutung der neu entdeckten Hochtemperatur-Supraleitung in Cupraten. Deshalb

wurden seither die unterschiedlichsten Theorien dafür vorgeschlagen. Durchsetzen konnte sich bisher keine mit letzter Sicherheit. Am aussichtsreichsten erscheint zur Zeit das Spinwellen-Modell, das von Douglas J. Scalapino aus Kalifornien und David Pines in Illinois entwickelt wurde. Es besagt, daß beim Durchgang einer bewegten Ladung durch den Supraleiter die Spinorientierung der Atome des Kristallgitters entlang des Weges kippt. Bildlich gesprochen: Der Ladungsträger erzeugt in seinem Kielwasser eine magnetische Störung, eine Spinwelle, der Sog dieser Heckwelle zieht einen weiteren Ladungsträger an, und die beiden bilden ein Cooper-Paar. Die beiden IBM-Forscher John R. Kirtley und Chang C. Tsuei scheinen nun experimentelle Hinweise für die Richtigkeit dieser Spinwellen-Theorie gefunden zu haben.

Für die Praktiker ist eine exakte theoretische Erklärung jedoch nur zweitrangig. Sie arbeiten heute mit Hochdruck daran, die kompliziert aufgebauten Materialien in technischem Maßstab herzustellen und vor allem sie zu verarbeiten. Da die Kristalle des keramischen Werkstoffs sehr spröde sind, ist es kompliziert und bedarf einer Menge verfahrenstechnischer Anstrengungen, beispielsweise dünne und lange Drähte daraus herzustellen. Dies ist aber eine der Grundvoraussetzungen, um die Supraleitung industriell einzusetzen. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, daß Cuprate eine schichtartige Struktur besitzen und den Strom nur in dieser Schichtebene leiten können. Man umging das Problem, das den Stromtransport bei multikristallem Aufbau stark behinderte, dadurch, daß man dünne, gleichmäßig ausgerichtete Schichten auf einem Substrat aufwachsen ließ. Dadurch konnte man die supraleitenden Molekülebenen präziser ausrichten. Auch wenn die geringe Dicke dieser Filme, die in der Größenordnung von tausendstel Millimetern liegt, nur relativ geringe Stromstärken zuläßt, ermöglicht sie doch eine Reihe von Produkten, vor allem Filter, Oszillatoren und Subsysteme für

die Telekommunikation. Kein Markt wächst zur Zeit schneller als letzterer. Supraleitende Komponenten könnten die technischen Kapazitäten gewaltig steigern, denn die Bauelemente lassen sich miniaturisieren, das Rauschen wird enorm reduziert und die Übertragungsqualität um Größenordnungen besser. So haben beispielsweise Abschätzungen ergeben, daß sich beim Mobilfunk durch den Einsatz von Supraleitung in intelligenten Basisstationen die Kanalkapazität vervielfachen läßt. Die höhere Empfindlichkeit der Empfangsstationen erlaubt es außerdem, die erforderliche Sendeleistung bei den Mobiltelefonen zu verringern. Dies führt zu einem niedrigeren Energieverbrauch - die Geräte sind länger vom Netz unabhängig — und zu einer Reduzierung der Strahlenbelastung für den Benutzer.

Für den Einsatz der supraleitenden Komponenten in Kommunikationssatelliten bedeutet die Miniaturisierung trotz der nötigen Kühlaggregate eine Gewichts- und Volumensparnis und ermöglicht dadurch geringere Nutzlasten. Ein komplettes Übertragungssystem soll erstmals auf der internationalen Raumstation Alpha getestet werden. Dort kann in der Praxis gezeigt werden, welches die Vorteile in Bezug auf Systemgewicht und Performance sind.

Anwendungsbereiche im Elektrizitäts- und Energiebereich gibt es mehrere: vor allem natürlich die verlustfreie Stromleitung über weite Strecken. In Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte könnten unterirdisch verlegte supraleitende Kabel den steigenden Strombedarf decken. Die erhöhten Kosten für die nötige Kühlung der Leitungen sollte durch die Verminderung der Verluste leicht wettgemacht werden; schließlich gehen nach Schätzungen von Fachleuten heute rund 15 Prozent der übertragenen Leistung durch den Leitungswiderstand verloren, das heißt, sie wandeln sich in Wärme um. Supraleitende Elektromotoren könnten wesentlich effizienter arbeiten als konventionelle Anlagen. Aber auch zur

direkten Stromspeicherung, für die es heute überhaupt noch keine Möglichkeit gibt, wäre die Supraleitung geeignet. In einer supraleitenden Spule kann Strom vollkommen verlustfrei umlaufen. Man stellt sich deshalb vor, eines Tages große elektrische Spulen zu bauen, sie mit Strom »vollzupumpen«, der ewig in ihnen umläuft, und sie nur bei Bedarf anzuzapfen. Eine faszinierende Möglichkeit, die durch die neuen Werkstoffe in greifbare Nähe gerückt ist.

Eine weitere Möglichkeit, die Supraleitung bei der Energiespeicherung einzusetzen, sind große Schwungräder, die auf supraleitenden, reibungsfreien Lagern laufen. Sie werden beispielsweise mit billigem Nachtstrom in Schwung versetzt und rotieren mit hoher Drehzahl. Bei Bedarf wird ein Generator angekoppelt, der die Bewegungsenergie in elektrische Spannung umwandelt. Das gleiche Prinzip der reibungsfreien Bewegung wird in der Magnetschwebbahn angewandt. Supraleiter könnten hier die Betriebskosten voraussichtlich senken. In der Weltraumtechnik lassen sich Supraleiter wohl ebenfalls in vielen Anwendungen einsetzen, wegen der Kälte des Weltalls ist es sogar denkbar, daß man auf aufwendige Kühlsysteme verzichten kann. Bereits heute weit verbreitet ist der Einsatz der Supraleitung in der Medizintechnik. Sogenannte Squids, extrem empfindliche Magnetsensoren, lassen es zu, die winzigen magnetischen Signale aus dem Inneren des menschlichen Körpers zu messen. So kann man ähnlich wie beim EEG mit Hilfe von Squids die Magnetströme nachweisen, die von Herz und Gehirn ausgehen, und ihre Veränderung ermitteln. Auf diese Weise erhofft man sich, Einblicke in die Vorgänge zu erhalten, die beispielsweise bei bestimmten Epilepsiearten im Gehirn ablaufen, und dadurch auf neue Möglichkeiten zur Behandlung zu stoßen.

Quantenphysik in der Medizintechnik

Während die Squids noch reichlich exotische Meßgeräte sind, die hauptsächlich in der Forschung, sonst aber nur im Ausnahmefall zum Einsatz kommen, ist die Kernspintomographie heute bereits eine Standardmethode der medizinischen Diagnostik. Sie beruht in mindestens zweifacher Hinsicht auf der Quantenmechanik: einerseits durch die supraleitenden Spulen, die zur Erzeugung der extrem starken Magnetfelder benötigt werden, und zweitens durch die physiologischen Prozesse im Patienten, die durch das Verfahren abgebildet werden.

Bei der Kernspintomographie wird der Patient sozusagen magnetisch durchleuchtet, dabei wird die Tatsache ausgenutzt, daß einige Atome magnetische Eigenschaften besitzen. Auch Wasserstoff-Atome benehmen sich im Inneren des menschlichen Körpers wie winzige Magnete.

Man legt den Patienten in ein starkes Magnetfeld, das durch supraleitende Spulen erzeugt wird. Die Wasserstoff-Atome im Körper des Probanden richten sich nach diesem Feld aus. Das allein genügt aber noch nicht, um ein Bild zu erhalten - dazu müssen erst die Atome, die im Magnetfeld ausgerichtet sind, einen »Schubs« bekommen. Dies besorgt ein Radiowellenimpuls, der die Wasserstoff-Atomkerne auf ein angeregtes Energieniveau hebt. Nun befinden sich die Atome gegenüber dem Magnetfeld nicht mehr in Ruhelage, sondern sie kreiseln um die Feldlinien, bis sie die zusätzliche Energie durch Abstrahlung eines Energiequants - in diesem Fall ein Radiowellenquant - wieder abgegeben haben. Dies geschieht nach den Gesetzen der Quantenmechanik zu keinem genau vorhersagbaren Zeitpunkt, durchschnittlich jedoch ungefähr innerhalb der darauffolgenden Sekunde. Hochempfindliche Meßgeräte registrieren die abgestrahlten Energiequanten

und gehen sie an einen Computer weiter, aus Zigtausenden von Werten konstruiere nun der Rechner ein Bild. Dabei spielen drei Phänomene eine wichtige Rolle: Erstens ist das Magnetfeld nicht überall gleich stark, sondern es steigt von einer Seite zur anderen allmählich an. Aus Zonen höherer Intensität kommen kürzere Wellen, aus den anderen Bereichen längere. So kann man orten, woher jede Welle kam und wo das dazugehörige Atom sitzt. Zweitens setzt sich jedes Schichtbild aus vielen »Belichtungen« zusammen, jede aus einer anderen Richtung aufgenommen. Und drittens; Aus der Stärke der abgestrahlten Wellen kann der Computer berechnen, wie viele Wasserstoffatome in dem betreffenden Körperbereich enthalten sind.

Aber das Verfahren kann noch mehr: Wie schnell nämlich die angeregten Atome ihre aufgenommene Energie wieder abstrahlen, hänge von ihrer Umgebung ab. Ein Wasserstoff-Atom, das ganz fest im Gewebe gebunden ist, braucht zum Beispiel länger als eines, das relativ locker gebunden ist. Die Dauer dieser sogenannten Abklingzeit gibt also einen Hinweis darauf, welche Art von Gewebe betrachtet wird.

Durch komplizierte Rechenverfahren ermittelt der Computer aus den aufgenommenen Signalen Schichtbilder, sogenannte Tomogramme. Sie zeigen nicht nur die Organe, sondern auch krankhafte Veränderungen im Gewebe. Ein Tumor hebt sich beispielsweise gut sichtbar vom umgebenden Hirngewebe ab. Neuerdings ist man sogar in der Lage, noch millimeterfeine Tumoren in der weiblichen Brust zu orten, die auf Brustkrebs hindeuten, damit könnte die Diagnose dieser Krankheit weit früher erfolgen als heute üblich. Auch die Lokalisierung von Sauerstoff, der an Hämoglobin gebunden ist, ist aufgrund des magnetischen Verhaltens der Eisen-Atome im Hämoglobin inzwischen möglich. So läßt sich ermitteln, wo im Körper besonders viel Sauerstoff verbraucht wird — beispielsweise in welcher Region des Gehirns — und

man erfährt, welche Regionen des Gehirns bei bestimmten Wahrnehmungsleistungen aktiviert werden.

Ein anderes Durchleuchtungsverfahren benutzt die Eigenschaft bestimmter Elemente, radioaktive Strahlen oder andere Teilchen auszusenden. Die Strahlen durchdringen zum großen Teil das Gewebe und lassen sich von außen angebrachten Detektoren registrieren. Diese Art der Diagnose ist zum Beispiel bei Schilddrüsenerkrankungen seit langem üblich. Andere Teilchen, etwa Positronen, die im Inneren des Körpers ausgesandt werden, zerstrahlen zusammen mit den überall vorhandenen Elektronen zu winzigen Energieblitzen, die ebenfalls von Meßgeräten von außen registriert werden. Das Verfahren heißt Positronen-Emissions-Tomographie, PET, und es hilft nicht nur bei der Erforschung des Gehirns, sondern auch bei der Lokalisierung von Krankheitsherden.

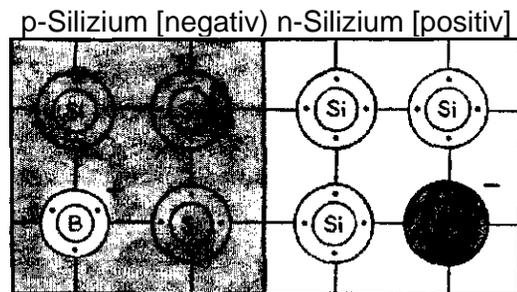
Mikroelektronik und Datenspeicherung

Computer sind heutzutage so in unser Alltagsleben eingebunden, daß niemand auf die Idee käme, sie mit der skurrilen Welt der Quantenmechanik in Zusammenhang zu bringen, aber in Wirklichkeit beruht ihre Wirkungsweise ganz fundamental darauf. Der Grund hierfür liegt in der Anordnung der äußeren Elektronen der verschiedenen Elemente.

Wie bereits früher gezeigt, ist es für ein Atom ein energetisch besonders günstiger Zustand, acht Außenelektronen zu besitzen. In der Chemie können deshalb die Stoffe besonders leicht miteinander zur Reaktion gebracht werden, deren äußerste Schalen sich auf acht Elektronen ergänzen. Diese Grundregel gilt aber nicht nur für chemische Verbindungen, sondern auch für die Bildung von Kristallen. In ihnen ordnen sich die Atome in einer regelmäßigen Struktur an, und zwar

Die Kristallstruktur im Halbleiter und die Dotierung mit Fremdatomen

Alle Atome in einem Kristall streben den für sie günstigsten Energiezustand an, der dann erreicht ist, wenn sie in ihrer äußersten Schale acht Elektronen haben. Jedes Silizium-Atom besitzt aber nur vier Außenelektronen. Deshalb benutzt es mit vier benachbarten Atomen jeweils ein Elektron gemeinsam. Auf diese Weise entsteht ein regelmäßiges Kristallgitter. Da alle Elektronen ziemlich fest gebunden sind, kann der Halbleiter Silizium bei Zimmertemperatur keinen elektrischen Strom leiten. Ein Bor-Atom hat nur drei Außenelektronen. Werden in einen Siliziumkristall an einigen Stellen Bor-Atome eingebracht, entsteht ein Unterangebot an Elektronen, da die benachbarten Silizium-Atome nun keine acht Außenelektronen mehr erreichen. Die Elektronenlücken nennt man in der Halbleitertechnik *Löcher*, sie bewegen sich durch das Kristall wie positive Ladungsträger. Ein mit Bor dotierter Halbleiter kann also einen, wenn auch geringen, Strom leiten. Genau umgekehrt ist die Ausgangslage bei einer Dotierung mit Phosphor-Atomen. Phosphor hat fünf Außenelektronen. Wenn es zwischen den Silizium-Atomen sitzt, kann es vier davon mit den Nachbarn teilen, das fünfte ist kaum gebunden und kann im Kristall umherwandern. So kann auch ein mit Phosphor dotierter Halbleiter elektrischen Strom leiten.



vorzugsweise ebenfalls so, daß jedes Atom acht Außenelektronen besitzt.

Kohlenstoff, Silizium oder Germanium, die im Periodensystem untereinander stehen, haben jeweils vier Außenelektronen. Sie verbinden sich im Kristallgitter mit ihren Nachbarn so, daß jedes Atom je ein Elektron mit jedem Nachbarn teilt. So kommt die besonders stabile Diamantstruktur zustande, bei der jedes Atom von acht Elektronen umgeben ist.

Normalerweise dürfte keines dieser drei Elemente elektrischen Strom leiten, aber in der Realität werden sie als Halbleiter bezeichnet. Hin und wieder erhält nämlich eines der Außenelektronen einen kleinen Schubs und springt aus der

Gitterstruktur heraus. Ein solcher Schubs kann beispielsweise durch eine Gitterschwingung, aber auch durch ein einfallendes Photon erfolgen, wie dies beim lichtelektrischen Effekt geschieht. Ein solches energiereiches Elektron hat nun die Möglichkeit, sich parallel zum Kristallgitter frei zu bewegen, es wirkt als Ladungsträger und sorgt dafür, daß Strom fließen kann. Durch dieses Phänomen haben Halbleiter ihren Namen erhalten: Sie wirken nicht als Isolatoren, aber auch nicht ganz als Leiter, eben als Mittelding.

Computerchips bestehen im Prinzip aus derartigen Halbleitern. Man benutzt meist Silizium, in Sonderfällen Germanium. Nun ist es aber mit einem einzigen chemischen Elc-

ment noch nicht möglich, logische Schaltungen anzufertigen. Deshalb hat man Möglichkeiten erfunden, den Halbleiter so zu verändern, daß seine Leitfähigkeit besser oder schlechter wird. Erst aus der Kombination zwischen unterschiedlich gut leitenden Substanzen lassen sich Rechen- oder Speicherelemente konstruieren.

Die Veränderung des Siliziums geschieht dadurch, daß man einzelne Atome durch andere ersetzt, indem man sie in das Kristallgitter einbaut — der Fachmann nennt diesen Vorgang »Dotieren«. Man benutzt dazu einerseits Phosphor, das fünf Außenelektronen besitzt, und andererseits Bor, das über drei Außenelektronen verfügt. Befinden sich Phosphor-Atome zwischen den Silizium-Nachbarn, ist die Leitfähigkeit des Materials erhöht, da zusätzliche Außenelektronen für den Stromtransport zur Verfügung stehen. Impft man die Kristallstruktur mit Bor, so hat die Kristallstruktur an diesen Stellen sozusagen »Löcher«, da dort Elektronen im Gitter fehlen. Diese Löcher kann man betrachten wie positiv geladene Ladungsträger, weil jeweils ein negativ geladenes Elektron fehlt. Auch sie können wandern und deshalb für einen Stromtransport durch das Material sorgen.

In elektronischen Bauelementen wie Transistoren oder Gattern werden nun die drei unterschiedlichen Materialien in hauchdünnen Schichten und Leiterbahnen so miteinander kombiniert, daß sie als logische Schakelemente für die Elektronen bzw. Löcher wirken. Aus dem Zusammenspiel unzähliger derartiger Schaltelemente entstehen schließlich die Chips, die unsere Computer zum Rechnen bringen.

Aber nicht nur in Computern spielen die Halbleiter eine entscheidende Rolle. Sie werden in einigen Jahrzehnten die Energieversorgung der Welt übernehmen, und zwar in Form von Solarzellen. In diesen flachen Scheiben, die bereits heute vielfach in Kleingeräten, auf Hausdächern oder in Prototyp-Kraftwerken zu sehen sind, entsteht durch den üchtelektri-

schen Effekt eine elektrische Spannung, denn einfallende Photonen schlagen aus dem Kristallgitter der Halbleiter Elektronen heraus. Auf diese Weise kann man mittels Sonnenlicht direkt Strom erzeugen, eine Möglichkeit, die Energieversorgung der Erde zu revolutionieren. Das Prinzip ist einfach und wird seit langem beispielsweise in den Solarpaddeln zur Energieversorgung von Satelliten angewandt. Auf der Erde, wo Solarenergie mit den bereits eingeführten konventionellen Energieträgern finanziell konkurrieren muß, ist sie noch zu teuer. Hinzu kommt, daß die Sonne nur tagsüber scheint, Strom aber auch nachts gebraucht wird, daß also ein Energie-Speicher zum Ausgleich des Angebots nötig ist. So ergeben sich heute noch eine Reihe technisch-wirtschaftlicher Probleme, die aber zweifellos bald gelöst sein werden. Spätestens dann, wenn die fossilen Energieträger zur Neige gehen werden - Fachleute schätzen, daß dies in hundert bis zweihundert Jahren sein wird -, wird die Energieversorgung auf Solarenergie umgestellt werden.

Quantencomputer

Die Fortschritte in der Computertechnologie in den letzten Jahrzehnten waren so groß, daß heutige Rechner etwa eine Million Mal so leistungsfähig sind wie ihre Urnahmen aus den sechziger Jahren. Bill Gates, Chef der Softwarefirma Microsoft, wird mit dem Ausspruch zitiert: »Wenn General Motors eine ebenso schnelle Technologieentwicklung hinter sich hätte wie die Computerindustrie, dann würden wir heute in 25-Dollar-Autos fahren, die auf hundert Kilometer nur einen Fünftel Liter Benzin verbrauchen.«

Die Strukturen in den Mikroprozessoren heutiger Computer sind nur noch ein Hundertstel so breit wie ein menschliches

Haar, und die Entwicklung geht weiter zu noch kleineren Abmessungen und noch höherer Integrationsdichte. Dies wird bald dazu führen, daß die Größenordnung von Atomen erreicht wird und die Gesetze der Quantenmechanik zum Tragen kommen. Forscher denken deshalb weltweit darüber nach, ob es nicht prinzipiell möglich wäre, einen Computer zu konstruieren, der die Regeln der Quantenmechanik direkt ausnutzt, einen sogenannten Quantencomputer.

Im Prinzip sollte das möglich sein. Jeder elektronische Rechner beruht darauf, daß die Information in winzige Pakete zerlegt wird, die nach und nach verarbeitet werden. Man spricht von sogenannten Bits. Ein Bit ist die kleinste Informationseinheit, quantenmechanisch gesprochen, ein Informationsquant. Heutige Computer arbeiten nach dem binären System, das heißt, sie kennen nur zwei Zahlen: 0 und 1, oder: ja und nein. Alle Rechenoperationen, und seien sie noch so kompliziert, werden durch die Manipulation dieser beiden Zahlen durchgeführt. Vergegenwärtigt man sich den Aufbau eines Atoms, so findet man dort eine ähnliche Struktur: Ein Elektron der äußersten Hülle kann im Grundzustand sein -dies entspräche der Zahl 0 —, oder es kann angeregt sein und sich auf der nächsthöheren Bahn befinden, was der Zahl 1 entspräche. Diese Tatsache könnte es ermöglichen, einen Quantencomputer zu entwickeln.

In einem Rechenwerk müssen die Zahlen 0 und 1 einstellbar sein, sie müssen manipulierbar sein, das heißt, man muß sie ineinander überführen können, und sie müssen auslesbar sein, damit man das Ergebnis ermitteln kann. Konventionelle Elektronenrechner erledigen die Operationen zwischen den beiden Zahlen mit Hilfe dreier sogenannter logischer Verknüpfungen: »Und«, »Oder« und »Nicht«. Daraus setzen sich alle Rechenschritte zusammen.

Die Eingabe einer 1 in einen Quantencomputer kann man sich beispielsweise so vorstellen, daß man mit Hilfe eines ge-

nau abgestimmten Lasers das äußerste Elektron des Atoms auf eine höhere Bahn hebt — man regt das Atom also an. Will man eine 1 in eine 0 überführen und umgekehrt, bestrahlt man das Atom mit der Energie, die für den Übergang zwischen niedrigerem und angeregtem Zustand nötig ist. Ist das Atom vorher schon angeregt, wird es dadurch zur Abgabe seiner Energie angeregt (wie beim Laser) und fällt zurück in den Grundzustand; 1 wird also zu 0, und ein Photon wird ausgesandt, das man registrieren kann. Ist das Atom vorher im Grundzustand, wird es durch den Laserpuls angehoben, aus 0 wird 1. Eine solche Vorrichtung nennt man in der Computertechnik ein »Flip-flop«. Im Grunde lassen sich für alle logischen Operationen geeignete Möglichkeiten finden, die man im Quantencomputer kombinieren kann. Ähnlich funktioniert auch das Auslesen der Information mit Hilfe geeigneter eingestrahelter Laserimpulse.

Nun gibt es aber bei einem Quantencomputer eine Besonderheit: Aufgrund der Regeln der Quantenmechanik können sich Zustände überlagern, das heißt, es gibt Elektronen, die sowohl im Grundzustand als auch im angeregten Zustand sind. Nun gibt es keine eindeutigen Nullen oder Einsen mehr, sondern nur noch Wahrscheinlichkeiten, ob das Atom 0 oder 1 repräsentiert. Ein Quantenbit ist dann sozusagen halb umgeklappt, wenn man sich das Bild der Rechenmaschine vorstellt. Dort bedeutet ein solches Vorkommnis einen Fehler, im Quantencomputer hingegen kann es neue Möglichkeiten des Rechnens eröffnen. Mehrere Wissenschaftler haben inzwischen bewiesen, daß ein Quantencomputer, der Bits umklappen kann, prinzipiell als Universalrechner zu gebrauchen ist.

So schön dies alles klingt: Es gibt eine ganze Reihe großer Schwierigkeiten, die bisher den Bau eines realen Quantencomputers verhindert. Erstens ist die »Verdrahtung« der Bauteile miteinander kompliziert. Das heißt, Atome müßten Informationen über ihren Zustand miteinander austauschen

können, man müßte Quantenbits von einem Atom zum nächsten übertragen können. Dies stößt heute - trotz einiger genialer Ansätze, die sich unter anderem das EPR-Paradoxon zunutze machen — noch auf zu große Schwierigkeiten.

Ein zweites grundlegendes Problem ist die Zuverlässigkeit eines solchen Computers. Da der Zustand eines Atoms mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb einer gewissen Zeit wechselt, muß man sicherstellen, daß während der Rechnung keine unvorhergesehenen Wechsel auftreten. Auch in konventionellen Rechnern passieren hin und wieder zufällige Fehler, dort löst man das Problem dadurch, daß in den Rechenprogrammen ständige Kontrollen eingebaut sind. Bei diesen Kontrollen wird zum Beispiel die Quersumme über alle Bits einer Zahl gebildet und überprüft, ob sie konstant bleibt. Eine solche Lösung ist im Quantencomputer nicht realisierbar. Die Heisenbergsche Unschärferelation und die Kopenhagener Deutung sagen aus, daß ein Quantenzustand in dem Augenblick verändert wird, in dem er gemessen wird. Eine Überprüfung zur Kontrolle, ob alles richtig läuft, wäre eine solche Messung, und sie würde den Zustand des Computers zum Kollabieren bringen. Allerdings wurde auch hierfür kürzlich ein Lösungsweg vorgeschlagen. Populär gesprochen beruht er darauf, daß man zwar den Zustand mißt, aber nicht genau hinschaut, ähnlich einem »Quantenwachhund«, der bei Gefahr zwar knurrt, aber nicht zubeißt. So gibt es jetzt in der Quantenphysik also nicht nur Katzen und Mäuse, sondern neuerdings auch Hunde.

Wenn es möglich wäre, einen Quantencomputer zu realisieren, wäre dies nicht nur reine Spielerei. Schon heute geben Experten Rechenprobleme vor, die ein Quantencomputer mit Leichtigkeit lösen könnte, während ein konventioneller Rechner Jahre daran zu tun hat oder ganz daran scheitert. Ein solches Problem, das heute große praktische Bedeutung besitzt, ist das »Faktorisieren« großer Zahlen: Wie Seth Lloyd vom

Massachusetts Institute of Technology in Cambridge darstellt, kann man sich die Überlagerung mehrerer Bits in einem Quantencomputer analog vorstellen zu der Überlagerung von Schallwellen. Eine 0 oder eine 1 klingt dann wie ein einzelner Ton, eine Überlagerung wie ein Akkord. Er zitiert den IBM-Forscher Peter W. Shor, der glaubt, daß dieser symphonische Aspekt des Quantencomputers ihn dazu befähigt, große natürliche Zahlen schnell in ihre Faktoren zu zerlegen. Er glaubt, daß die Faktoren einer großen Zahl so deutlich hervortreten wie eine Melodie, die von Geigen, Bratschen und Celli in Oktavparallelen gespielt wird, gegenüber den anderen Instrumenten. Das Faktorisieren von hundert- und mehrstelligen Zahlen hat große Bedeutung in der Datensicherheit, denn bei den modernen Methoden der Verschlüsselungstechnik werden solche Rechenverfahren benötigt. Und letztendlich könnte ein Quantencomputer die Prinzipien, die ihn zum Laufen bringen, selbst simulieren; Seth Lloyd glaubt, daß Quantencomputer vor allem dazu dienen könnten, quantenmechanische Systeme zu simulieren. Ein solcher Rechner würde dabei mit vierzig Bits in etwa hundert Schritten dasselbe leisten wie ein klassischer Computer mit Billionen von Bits in mehreren Jahren.

Glossar

Absorption

Aufnahme eines Teilchens oder eines Energiequants beispielsweise durch ein Atom.

Anregung

Der Übergang eines Teilchens oder eines Atoms in einen höheren Energiezustand. Die Anregung wird meist ausgelöst durch die Absorption eines Energiequants.

Antimaterie

Gegenstück zur »normalen« Materie, das heißt, sie kann Materie vernichten. Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen. Stößt es mit dem entsprechenden Teilchen zusammen, dann zerstrahlen die beiden *zu* einem Energieblitz. Antimaterie gibt es in der Höhenstrahlung und in der Strahlung bestimmter radioaktiver Elemente, außerdem wird sie heute routinemäßig in großen Beschleunigerlabors hergestellt.

Atom

Wie schon Demokrit 420 vor Christus richtig vermutet hatte, besteht alle Materie aus Atomen. Heute weiß man, daß das Atom aus einem Kern und einer Hülle besteht. Der Kern ist ein Gemisch aus positiv geladenen Protonen und elektrisch ungeladenen Neutronen. Um den Kern kreisen ebenso viele negativ geladene Elektronen, wie im Kern Protonen enthalten sind.

Aufenthaltswahrscheinlichkeit

Die statistische Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen zu einem bestimmten Zeitpunkt an einer bestimmten Stelle zu finden.

Bosonen

Elementarteilchen mit ganzzahligem Spin, die nicht dem Pauli-Prinzip unterliegen.

Brechung

Da jede Welle in unterschiedlichen Medien unterschiedliche Fortpflanzungsgeschwindigkeiten hat, erleidet sie an den Grenzflächen zwischen zwei Medien eine Änderung ihrer Geschwindigkeit und Richtung.

Drehimpuls

Ein Maß für das Bestreben eines rotierenden Körpers, seine Bewegung um die Drehachse weiter fortzusetzen. Bei Elementarteilchen wird der Drehimpuls auch Spin genannt.

Elektron

Es ist das Elementarteilchen, aus dem sich die Atomhülle jeden chemischen Elements zusammensetzt. Es trägt eine elektrische Einheitsladung, die in der Größe genau, der des Protons entspricht, aber mit umgekehrtem Vorzeichen. Man spricht deshalb oft davon, daß das Elektron die Ladung -1 besitzt. Es ist sehr klein; bis heute weiß man nicht, ob es überhaupt eine räumliche Ausdehnung hat. Sein Antiteilchen ist das Positron,

Emission

Aussendung von Strahlung oder Teilchen, beispielsweise aus einem Atom.

Fermionen

Elementarteilchen mit halbzahligem Spin, die dem Pauli-Prinzip unterliegen.

Frequenz

Die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit. Meist wird sie in Hertz gemessen, also in Schwingungen pro Sekunde. Je höher die Frequenz einer Welle, desto höher die Energie des dazugehörigen Teilchens.

Halbleiter

Stoffe, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen der der Metalle und der der Isolatoren liegt. In der Mikroelektronik wird die Leitfähigkeit mancher Halbleiter durch den Einbau von Störstellen erhöht.

Halbwertszeit

Beim radioaktiven Zerfall verwandeln sich Atome durch Aussendung bestimmter Teilchen in andere Atome. So zerfällt beispielsweise Uran 238 in mehreren Schritten zu Blei 206. Jeder einzelne Zerfall ist nicht vorhersagbar, er erfolgt zufällig. Wenn man aber viele Atome gleichzeitig betrachtet, kann man statistisch angeben, nach welcher Zeitdauer die Hälfte der Atome zerfallen ist. Bei Uran 238 beträgt diese Zeit rund 4,5 Milliarden Jahre. Andere Elemente haben kürzere Halbwertszeiten: Tritium: 12,3 Jahre, Kohlenstoff 14: 5730 Jahre, Krypton: 10,76 Jahre, Jod 131: 8,02 Tage und Cäsium 137: 30,2 Jahre.

Interferenz

Überlagerung von zwei oder mehreren Wellen, bei der eine lokale Verstärkung oder Auslöschung eintreten kann.

Ion

Ein Atom, das durch Abgabe oder Aufnahme eines oder mehrerer Hüllenelektronen positiv oder negativ elektrisch geladen wurde.

Ionenfalle

Experimentelle Vorrichtung, bei der ein Ion mit Hilfe magnetischer und elektrischer Felder in ein winziges Volumen eingeschlossen wird.

Laser

Gerät zur Herstellung eines extrem parallelen und gleichförmigen Lichtstrahls.

Lichtquant

Siehe Photon.

Neutron

Elektrisch neutrales Elementarteilchen, das etwa die gleiche Masse wie ein Proton besitzt. Zusammen mit den Protonen bildet es den Atomkern.

Pauli-Prinzip

Physikalisches Gesetz, nach dem zwei Fermionen nie im selben System in allen Quantenzahlen übereinstimmen dürfen.

Periodensystem

Dieses Schema ordnet die chemischen Elemente nach ihrem Atomgewicht und ihren chemischen Eigenschaften. Es wurde unabhängig voneinander von Dimitrij Mendelejew und Lothar Meyer entwickelt.

Photoeffekt

Auch licht- oder photoelektrischer Effekt genannt. Er besteht darin, daß Lichtquanten aus manchen Festkörperoberflächen Elektronen herausschlagen können. Für die Erklärung des Photoeffekts erhielt Einstein den Nobelpreis.

Photon

Auch Lichtquant genannt, ist das Energiequant der elektromagnetischen Strahlung. Es verhält sich mitunter wie ein Teilchen, mitunter wie eine Welle.

Polarisation

Ausrichtung eines Teilchens oder einer Welle im Raum, beispielsweise durch seine Spinrichtung, die sich nach einem äußeren elektrischen oder magnetischen Feld richtet.

Proton

Positiv geladenes Elementarteilchen, das etwa die gleiche Masse wie das Neutron besitzt. Zusammen mit den Neutronen bildet es den Atomkern.

Quant

Um die Jahrhundertwende stellte Max Planck die Theorie auf, daß Energie nicht kontinuierlich, sondern in Form winzig kleiner »Pakete«, sogenannter Quanten, auftritt. Einstein gelang es später, mit seiner Deutung des photoelektrischen Effekts diese Theorie zu untermauern.

Quantenzahlen

Zahlen, die zur Charakterisierung bestimmter Zustände von Atomen eingeführt wurden, Sie dienen dazu, Ordnung in die Atommodelle zu bringen.

Spin

Drehimpuls von Elementarteilchen. Er ist gequantelt und kann nur halbzahlige Werte annehmen.

Supraleitung

Das Phänomen, daß manche Substanzen, vor allem Metalle und kompliziert aufgebaute keramische Verbindungen, bei extrem tiefen Temperaturen schlagartig jeglichen elektrischen Widerstand verlieren.

Wellen

Räumliche und zeitliche periodische Änderungen physikalischer Größen. Bei den longitudinalen Wellen liegt die Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung (Beispiel Schall), bei transversalen Wellen senkrecht dazu (Beispiel Wasserwellen).

Urknall

Angenommener Beginn des Universums, der vor zirka 15 Milliardenjahren stattgefunden haben soll. Die gesamte Masse und Energie des Universums war damals in einem Punkt konzentriert,

Wirkungsquantum

Eine der universellen Konstanten der Physik, die große Bedeutung für die Quantenmechanik hat. Sie gibt den Proportionalitätsfaktor für die Energie eines Teilchens zur Frequenz der zugehörigen Welle an. Sie wird mit h bezeichnet.

Weitere Literatur

Wer sich mit dem Thema Quantenphysik näher befassen will, dem seien die folgenden Bücher empfohlen, die ich zum Teil als Quelle benutzt habe:

Der absolute Klassiker unter allen Physikbüchern und das Nonplusultra für jeden, der sich die Mühe machen möchte, etwas tiefer in die Materie einzusteigen, sind die berühmten >Vorlesungen über Physik< von Feynman/Leighton/Sands. Sie erschienen auf Deutsch beim Oldenbourg Verlag, München im Jahr 1988. Der dritte Band befaßt sich mit der Quantenmechanik.

Richard P. Feynman hielt später noch einmal eine Serie von vier Vorlesungen zum Thema Quantenelektrodynamik. Sie sind 1985 erschienen unter dem Titel =QED, Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie< im Piper Verlag, München. Auch dieses Buch verblüfft durch einfache Darstellung und verständliche Erklärungen.

Es gibt nur wenige populäre Bücher zur Quantentheorie. Eines der besten stammt von John Gribbin und hat den Titel >Auf der Suche nach Schrödingers Katze<, erschienen 1984 im Piper Verlag, München,

Zumindest teilweise beschäftigen sich aber auch die folgenden Bücher in leicht verständlicher Weise mit der Quantenphysik; Edgar Lüscher, >Pipers Buch der modernen Physik<, Piper Verlag, München 1980

Ders. u.a. (Hg.), >Physik<, Heinz Moos Verlag, München 1971 Murray Gell-Man, >Das Quark und der Jaguar<, Piper Verlag, 1994

Die philosophischen Aspekte der Quantentheorie stehen bei den folgenden Werken im Vordergrund:

Martin Basfeld, >Erkenntnis des Geistes an der Materie-, Edition Hardenberg, Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart 1992 Jos Verhulst, >Der Glanz von Kopenhagens Verlag Freies Geistesleben," Stuttgart 1994

Ilya Prigogine und Isabelle Stengers, >Dialog mit der Natur<, Piper Verlag, München 1990.

Die Geschichte der Quantenphysik behandeln: K. Simonyi, >Kulturgeschichte der Physik<, Verlag Harri Deutsch, Thun Frankfurt, 1990

David C. Cassidy, >Werner Heisenberg, Leben und Werks Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1992

Werner Heisenberg, »Schritte über Grenzen-, Piper Verlag, München 1984

>Die 100 des Jahrhunderts, Naturwissenschaftlers rororo, Rembek 1994.

Allen, die sich ernsthaft mit der Mathematik auseinandersetzen wollen, die hinter der Quantenmechanik steckt, seien vier Bücher empfohlen, die nur für den Physiker verständlich sind: Gerald Grawert, >Quantenmechanik<, AULA-Verlag, Wiesbaden 1985

Marcelo Alonso/Edward J. Finn, >Quantenphysik<, Addison-Wesley Publishing Company, Bonn 1988

A.S- Dawydow, >Quantenmechanik<, VEB Verlag der Wissenschaften, Berlin 1963

Siegfried Flügge, -Rcchenmethoden der Quantentheorie-, Springer-Verlag, Berlin 1965.

Die hier geschilderten neucsten Erkenntnisse zur Quantenphysik stammen vor allem aus der grundsätzlich sehr empfehlenswerten Zeitschrift >Spektrum der Wissenschaft<.

Register

- Absorption 25
Absorptionslinien 25
Alphastrahlen 62
Aspect, Alain 67 f..
Äther IG ff.
Atomhülle 28
Atommodell, Bohrsches 12,23, 26,48
Atommodelle 23 ff.
Atomuhr 59,95
Auslöschung 44
Balmer, Johann Jakob 25
Bardeen, John 97 ff.
BGS-Theorie 98 f.
Becquerel, Henri 28
Bednarz, J. Georg 98
Bell, John S. 67,72
Binnig, Gerd 63
Bohm, David 72
Bohr, Niels 12 f., 50, 54, 65
Bohrsches Atommodell 12,23, 26 f., 48
Born, Max 47, 50, 52
Böse, Satyendra Math 31
Bose-Einstein-Kondensat 81
Bosonen 31, 81
Brechung des Lichts 15 f.
Brechungsgesetz 15
Broglie, Louis de 46 f., 52
Chaotischer Prozeß 77
Chiao, Raymond Y. 73
Computer, optische 97
Computerchip 107 f.
Computerindustrie 14
Cooper, Leon 97 ff.
Cooper-Paare 99
Datensicherheit 113
Datenspeicherung 105-113
Dauerstrichlaser 93
Descartes, René 15 f.
Detektoren 40 ff.
Diodenlaser 94
Dirac, Paul 46 f.
Doppelbrechung 18
Doppelspalt-Experiment 40 ff., **55**
Dopplereffekt 83
Dotierung 106 ff.
Drehimpulsquantenzahl 31
Eddington, Arthur 49
Ein-Atom-Laser 85 f.
Einstein, Albert 21 ff., 46, 52, 65 ff.
Elektrodynamik 59
Element, radioaktiv 9
Emission, spontane 89
Emission, stimulierte 89
Emissionslinien 28
Emissionstheorie 46
Endoskop 96
Energieniveau 24
Energiepakete/Quanten 20
EPR-Experiment 66, 76
Esaki, Leo 64
Everett, Hugh 74 ff.
Farbstoff Laser 94
Feinstrukturkonstante 65
Fermi, Enrico 31
Fermionen 31
Fernwirkung 65-73
Feynman, Richard 45, 73
Flip-flop 111
Fluidum 16
Fluktuation 77
Galaxie 78
Gaslaser 93
Gates, Bill 109
Gäver, Ivar 64
Gravitationstheorie 59
Gribbin, John 47,67,76
Grimaldi, Francesco 16
Grundschiwingung 40

Halbleiter 107
Halbleiterlaser 94
Harouche, Serge 12
Hauptquantenzahl 30
Heisenberg, Werner 46 f., 52-55, 72
Heisenbergsche Unschärferelation 52-55,62,65,79,82, 112
Hochtemperatur-Supraleitung 99 f.
Hochvakuumtechnik 79
Huygens, Christian 16 f.
Hyperfeinzustand 13,33,80
Infeld, Leopold 21
Informationsübertragung 71
Interferenz 43
Inversion 90
Ionenfalle 13,79,85
Josephson, Brian 64
Josephson-Effekt 64

Kamerlingh-Onnes, Heike 97
Kausalität 53
Kernkräfte 60
Kernspintomographie 59,103 ff.
Kirtley, John R. 100
Komplementarität 50
Kopenhagener Deutung 12,54, 74 f., 112
Korpuskulartheorie des Lichts 17-23
Korrelation 73
Kosmologie 74-78
Kwiat, Paul G. 73
Ladungswolke 49
Laser 59, 80, 85, 87-97
Laser, chemische 94
Laue, Max von 24
Lenard, Philip 21 f.
Licht 15-23
Lichtgeschwindigkeit 10, 21, 71
Linde, Andrei 77 f.
Lloyd, Seth 112 f.
Magische Zahlen 60
Magnetschwebbahn 102
Maiman, Theodore 92
Materiewellen 48
Matrizenmethode 47
Maxwell, Clerk 19
Maxwellsche Gleichungen 19
Medizintechnik 103 ff.
Mendelejew, Dimitrij 33
Meßgenauigkeit 53
Meyer, Lothar 33
Mikroelektronik 105-113
Mikroprozessor 109
Millikan, Robert A. 23
Miniaturisierung 14
Mini-Kosmos 77
Monroe, Chris 13
Müller, K. Alexander 98
Multiwelten 74-78
Neutronenstrahlung 63
Newton Isaac 11.161,59
Nullpunkt, absoluter 82,97
Oberschiwingung 50
Ordnungszahl 33
Pauli, Wolfgang 31
Pauli-Prinzip 31
Paulische Ausschlußregel 31

Periodensystem der Elemente 33 ff.
Phasenraum 48 f.
Phononen 99
Photoelektrischer Effekt 21 ff.
Photonen 21 ff.
Physik, klassische 13
Pines, David 100
Planck, Max 20-23.52
Planck-Konstante 20, 22, 79
Podolky, Boris 66 f.
Polarisation 18, 68 ff.
Polarisationsfilter 67
Positron 66
Positronen-Emissions-Tomographie(PET) 105
Potentialtopf 60 ff.
Quanten 20
Quantenalgebra 47
Quantenbit 111
Quanten Computer 109-113
Quantenrnanus 12 ff.
Quantenmechanik 10-14,46,82
Quantensprung 56
Quantenwachhund 112
Quantenzahl, magnetische 31
Quantenzahlen 30-38
Radioaktivität 28 f.
Raimond, Jean-Michel 12
Raster-Tunnel-Mikroskop 63
Reflexion 15
Relativitätstheorie 66
Resonator 88
Rohrer, Heinrich 63
Röntgenstrahlung 19
Rosen, Nathan 66 f.
Rückkopplung 91
Rutherford, Ernest 23 f.
Scalapino, Douglas J. 100
Schrieffer, Robert 97 ff.
Schrödinger, Erwin 9-14,48, 50,52
Schrödingers Katze 9-14,39, 56 f., 74
Schrotrauschen 84
Segre, Emilio 46
Shor, Peter W. 113
Snellius, Willebrard 15

Solarzellen 108 f.
Spektograph 28
Spektrallinien 25 S
pektrum 17
Spin 31
Spinquantenzahl 31
Squids 102
Statistik 29,57
Steinberg, Aephraim M. 73
Strahlungsformel 21
Stromspeicherung 102
Supraleitung 59,97-102
Thomson, George 48
Thomson, J.J. 48
Tomogramme 104 f.
Tsuei, ChangC. 100
Tunneleffekt 60-65
Tunnelstrom 64
Überlagerung 12
Überlichtgeschwindigkeit 71, 73
Unbestimmtheit 53
Undulationstheorie 46
Universum 74-78
Unschärferelation 52-55, 62, 65.79,82, 112

Urknall 73
Vakuum 11
Verschlüsselungstechnik 113
Verstärkung 44
Wahrscheinlichkeit 9,42,51, 65,112
Wahrscheinlichkeitsverteilung 55, 57, 60
Wasserstoffatom 25
Wasserstoffbrücke 37
Wasserstofflinien 25
Welle, kohärente 87 f.
Welle, longitudinale 18
Welle, monochrome 87 f.
Welle, synchrone 87 f.
Welle, transversale 18 f.
Wellenfunktion 46, 74
Weilentheorie des Lichts 15-23
Wheeler, John 75 Wineland, David 13
Wirkungsquantum 20,22
Young, Thomas 18
Zerfall, radioaktiver 9,28
Zwillingsverhalten 72
Zyklotron-Schwingung 81, 124