

dtv

Naturwissenschaftliche Einführungen im dtv

Herausgegeben von Olaf Benzinger

Brigitte Röhlein, geboren 1949, ist Diplomphysikerin und wurde 1979 in Zeitungswissenschaft, Pädagogik und Geschichte der Naturwissenschaften promoviert. Seit 1973 arbeitet sie als Wissenschaftsautorin für diverse Zeitungen und Zeitschriften sowie für Fernsehen und Rundfunk. Ihr Hauptinteresse gilt der Grundlagenforschung. Von 1993 bis 1996 leitete sie neben ihrer freien publizistischen Tätigkeit das Geschichtsmagazin ›Damals‹.

Schrödingers Katze

Einführung in die Quantenphysik

Von
Brigitte Röthlein

Mit Schwarzweißabbildungen von
Nadine Schnyder

Deutscher Taschenbuch Verlag

**Ausführliche Informationen über
unsere Autoren und Bücher
finden Sie auf unserer Website
www.dtv.de**



Originalausgabe 1999

8. Auflage 2013

© Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG,
München

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Umschlagkonzept: Balk & Brumshagen

Umschlagfoto: Omikron/FOCUS, Hamburg

Redaktion und Satz: Lektyre Verlagsbüro

Olaf Benzinger, Germering

Druck und Bindung: Druckerei C. H. Beck, Nördlingen

Gedruckt auf säurefreiem, chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany · ISBN 978-3-423-33038-1

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 Multiwelten	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

Dieses Buch widme ich allen Katzen,
auch den Nicht-Schrödingerschen,
besonders aber einem Löwen.

B.R.

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 auf sehr 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 École 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.

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 René 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 ›*Traité de la Lumière*‹.

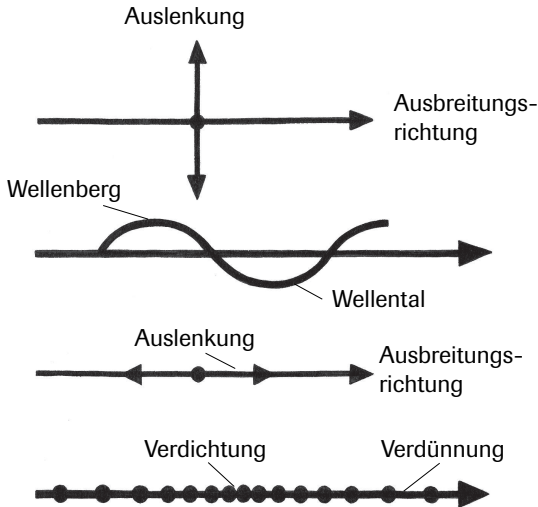
Um diese Theorie entbrannte zwischen ihm und dem englischen Gelehrten Isaac Newton eine der berühmtesten Kontroversen über die Natur des Lichts, denn Newton vertrat im Gegensatz zu Huygens wie Descartes die Ansicht, daß das Licht aus Teilchen bestehe.

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 Newtonschen 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« \hbar , 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 gequantelt, 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-