

ANTON ZEILINGER
Einsteins Schleier

Buch

Die Quantenphysik gilt gemeinhin als dunkel, paradox, irgendwie rätselhaft. Kollidiert sie doch mit vielem, was in unserem Alltagsverständnis der Realität ganz unzweifelhaft festzustehen scheint. Genau dies macht sie aber auch für viele so überaus faszinierend, fesselt Physiker ebenso wie Philosophen, Fachleute wie Laien. Zweifellos hat die Quantenphysik unser Weltbild radikal revolutioniert, bilden ihre Aussagen und Erkenntnisse inzwischen eine zentrale Grundlage unseres Verständnisses der Natur und vieler technischer Anwendungen. Doch zu den größten Herausforderungen zählt nach wie vor, dass sie uns zwingt, von vertrauten Gewissheiten Abschied zu nehmen. Wieso spielt der Beobachter in der Quantenwelt eine so zentrale Rolle? Weshalb versagen hier die uns so geläufigen Kategorien wie Raum, Zeit und Kausalität, gewinnt stattdessen der Begriff des Zufalls, noch mehr aber der der Information, entscheidende Bedeutung? Warum ist diese Welt überhaupt so – so seltsam?

Und was bedeutet das alles für unser Bild von der Welt?

Autor

Anton Zeilinger, Professor am Institut für Experimentalphysik der Universität Wien, zählt – mit einer selbst für Österreicher großen Anzahl von Ehrentiteln – zu den international bedeutendsten Quantenphysikern der Gegenwart. Seine »Teleportationsexperimente« – das Versenden von Lichtteilchen (vulgo »beamen«) – hat ihn auch einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht und das allgemeine Interesse an der Quantenphysik enorm gesteigert. Zeilinger lehrte und forschte u.a. an den Universitäten Innsbruck und München, am MIT (USA) sowie am Collège de France und ist Gastforscher weiterer bedeutender Forschungseinrichtungen wie z.B. am Los Alamos National Laboratory oder am Merton College in Oxford. Für seine überragenden Leistungen wurde er vielfach ausgezeichnet, darunter mit dem »Alexander-von-Humboldt-Forschungspreis« und dem »Orden pour le mérite«, der begehrtesten deutschen Auszeichnung für Wissenschaft und Künste. Der vollbärtige Nobelpreis-Anwärter hat drei Kinder, spielt Cello und Bass und lebt in Wien.

Anton Zeilinger

Einsteins Schleier

Die neue Welt
der Quantenphysik

GOLDMANN



Mix

Produktgruppe aus vorbildlich
bewirtschafteten Wäldern und
anderen kontrollierten Herkünften

Zert.-Nr. SGS-COC-1940
www.fsc.org

© 1996 Forest Stewardship Council

Verlagsgruppe Random House FSC-DEU-0100
Das FSC-zertifizierte Papier *München Super* für Taschenbücher
aus dem Goldmann Verlag liefert Mochenwangen Papier.

3. Auflage

Vollständige Taschenbuchausgabe März 2005

Wilhelm Goldmann Verlag, München,

in der Verlagsgruppe Random House GmbH

© der Originalausgabe 2003

by Verlag C.H. Beck oHG, München

Umschlaggestaltung: Design Team München

Umschlagabbildung: Photonica/Johnner (3003-005497)

Druck und Bindung: GGP Media GmbH, Pößneck

KF · Herstellung: Str.

Printed in Germany

ISBN-10: 3-442-15302-6

ISBN-13: 978-3-442-15302-2

www.goldmann-verlag.de

Inhalt

Vorwort	7
I. Wie alles begann	9
1. Das ideale Licht	9
2. Abschied vom Gewohnten	18
3. Ein Besuch im Laboratorium oder «Wo ist der Fußball?»	25
4. Welle	29
5. ... oder Teilchen? Die Entdeckung des Zufalls	37
II. Neue Experimente, neue Unsicherheiten, neue Fragen .	47
1. Von Teilchen und Zwillingen	47
2. Verschränkung und Wahrscheinlichkeit	65
3. Die Entdeckung des John Bell	73
4. Der Tyrann und das Orakel	82
5. Die Grenzen der Quantenwelt und der französische Prinz	95
6. Warum es uns gibt	106
III. Vom Nutzen des Zwecklosen	111
1. Romeos geheime Nachricht an Julia	112
2. Alice und Bob	122
3. Die ganz neue Generation	128
IV. Einsteins Schleier	135
1. Symbol und Wirklichkeit	135
2. Deutungsmodelle der Quantenphysik	145
3. Die Kopenhagener Interpretation	160
4. Die falsche und die tiefe Wahrheit	170
5. Einsteins Irrtum	173
6. Wahrscheinlichkeitswellen	181

7. Die Entschärfung der Superbombe	196
8. Licht aus der Vergangenheit	199
V. Die Welt als Information	207
1. Muss es so kompliziert sein?	208
2. Das Spiel der zwanzig Fragen	211
3. Information und Wirklichkeit	213
4. Hinter dem Schleier – die Welt ist Möglichkeit	225
Register	233

Vorwort

*«Einstein sagte, die Welt kann nicht so verrückt sein.
Heute wissen wir, die Welt ist so verrückt.»*

Daniel M. Greenberger

Als ich 1963 an der Universität Wien mein Physikstudium begann, gab es nur einen minimalen Lehrplan. Dies bedeutete, dass es fast keine vorgeschriebenen Lehrveranstaltungen gab. In der Folge habe ich in meinem ganzen Studium keine einzige Stunde eine Vorlesung zur Quantenphysik besucht. Um dieses Defizit auszugleichen, habe ich freiwillig als eines meiner Hauptprüfungsgebiete bei Herbert Pietschmann die Quantenmechanik gewählt. Mein Wissen musste ich daher aus Büchern gewinnen, und ich war vom ersten Moment an von der Quantenphysik begeistert. Es war dann im wesentlichen das Motto meines gesamten beruflichen Lebens als Physiker, die erstaunlichen Vorhersagen der Quantenphysik für das Verhalten einfacher Teilchen, einzelner Systeme, möglichst direkt und unmittelbar im Experiment zu beobachten. Allfällige Anwendungen sind dabei nur – natürlich sehr willkommene – Nebenprodukte.

Der Zweck dieses Buchs ist es, meine Faszination an der Quantenphysik mit möglichst vielen Menschen zu teilen. Es ist meine Überzeugung, dass es jedermann möglich ist, zu erkennen, warum wir Physiker von der Quantenphysik so fasziniert sind. Ganz wesentlich dabei sind die Grenzen einer realistischen Weltanschauung, die uns durch die Quantenphysik aufgezeigt werden. Kurz gesagt, viele der Dinge, die wir als vernünftig annehmen, oder wie sich die Welt eben vernünftigerweise verhalten sollte, werden durch die Quantenphysik außer Kraft gesetzt. Es sind gerade die damit zusammenhängenden Punkte, die wohl zu den weitreichendsten und interessantesten Konsequenzen der Quantenphysik führen werden. Es ist für mich ganz offenkundig, dass dies eine Änderung unseres uns liebgewordenen Weltbildes bedeutet.

Dieses Buch kommt auch einem sehr oft geäußerten Wunsch nach. Es haben mich viele Menschen gebeten, ein Buch zu schreiben, in dem ich auf allgemein verständliche Weise einige der wichtigsten Grundtatsachen der Quantenphysik und ihre Konsequenzen darstelle. Ich hoffe sehr, dass mir dies, wenigstens im Ansatz, gelungen ist. Auch bitte ich um Verständnis dafür, dass es im Rahmen dieses Buches nicht möglich ist, alle angeschnittenen Themen erschöpfend zu behandeln.

Dieses Buch wäre nicht zustande gekommen ohne die ständige Ermutigung durch viele Menschen, insbesondere durch meine Frau Elisabeth und meine Familie. Besonders danken möchte ich auch Dr. Stephan Meyer vom Beck Verlag, der mich letztlich so weit motivierte, durch unermüdliches, aber geduldiges Drängen, dass ich dieses Buch überhaupt begann und auch fertigstellte.

Mehrere Male im Zuge des Schreibens des Manuskripts hatte ich den Eindruck, eine nicht enden wollende Aufgabe vor mir zu haben. Ich danke hier deshalb auch Mag. Andrea Aglibut, die, durch das Schreiben des Manuskripts mit seinen einzelnen Bausteinen sehr vertraut, mir immer wieder vor Augen führte, dass ich schon weiter war, als ich dachte.

Für die Ausführung der Abbildungen danke ich Aimée Blaskovic, für die Layout-Mithilfe auch Mag. Julia Petschinka.

Die in diesem Buch diskutierten Experimente und die damit zusammenhängenden fundamentalen Überlegungen wären nicht möglich gewesen ohne die ständige Zusammenarbeit mit vielen, vor allem jungen Kolleginnen und Kollegen in Wien, in Innsbruck und an anderen Orten.

Die Grundlagen der Quantenphysik haben immer schon zu intensivsten Diskussionen und Auseinandersetzungen geführt. Es werden daher sicher nicht alle die in diesem Buch präsentierten Ideen und Konzepte akzeptieren können. Ich hoffe aber, dass sie zumindest als interessant und diskussionswürdig angesehen werden. In diesem Sinne sei der Leserin und dem Leser ein interessantes Lesevergnügen gewünscht.

Wien, Jänner 2003

Anton Zeilinger

Wie alles begann ...

*«Heute habe ich eine Entdeckung gemacht,
die ebenso wichtig ist wie die Entdeckung Newtons.»*

Max Planck

1. Das ideale Licht

In der letzten Zeit liest man immer wieder von neuen, bahnbrechenden Experimenten in der Quantenphysik. Es fallen da Schlagworte wie Quantenteleportation, Quantencomputer oder auch Quantenphilosophie. Man erinnert sich an frühere Schlagworte, die man zum Teil in der Schule gelernt hatte. Da waren doch die Heisenbergsche Unschärfebeziehung und, nicht zu vergessen, der Quantensprung, der gerade von Politikern und Wirtschaftsgurus immer wieder gerne in den Mund genommen wird. Aber was bedeutet das Ganze überhaupt? Was steckt hinter dem Wort «Quanten»? Seit wann und warum müssen wir uns überhaupt damit herumschlagen?

Anfangs wirft man sehr schnell die Flinte ins Korn, wenn man versucht, diese Dinge näher verstehen zu wollen. Man sagt sich, das sei doch zwecklos, dazu müsse man jahrelang Physik studieren, sich mit kompliziertester Mathematik herumschlagen. Ein gewöhnlicher Mensch habe ja doch keine Chance, überhaupt nur eine Ahnung davon zu bekommen, was da vor sich gehe.

Oder hat man vielleicht doch eine Chance? Irgendwas ganz Spannendes muss ja doch dahinterstecken! Warum gibt es ernsthafte Leute und berühmte Physiker, wie zum Beispiel Albert Einstein, die die Frage diskutierten, ob der Mond überhaupt da sei, wenn niemand hinsieht? Wie kann man nur so verrückt sein, dies überhaupt in Frage zu stellen! Ist es dem Mond nicht völlig gleichgültig, ob wir hinsehen oder nicht? Und doch, da gibt es Leute, die

behaupten, dass es Dinge gäbe, deren Eigenschaften und deren Existenz davon abhängt, ob wir hinsehen und wie wir hinsehen. Zugegeben, diese Dinge sind sehr, sehr klein, aber immerhin ...

Was sind Quanten überhaupt, und seit wann müssen wir uns mit diesem Begriff auseinandersetzen? Dazu ein kleiner Blick in die Geschichte:

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts tobte in den Industriestaaten ein Kampf zwischen zwei Technologien, die beide grundsätzlich geeignet waren, für die Beleuchtung der Städte zu sorgen. Wäre es besser, dafür Gas zu nehmen oder die damals dem Gas gegenüber jüngere Elektrizität? Abgesehen von allen anderen Fragen, wie etwa Sicherheit oder Störungsanfälligkeit, war zu klären, welche Beleuchtungsform bei gleichem Aufwand mehr Licht liefert. Wenn man daher das Gaslicht und das elektrische Licht miteinander vergleichen wollte, müsste man sehr genaue physikalische Messungen durchführen. Denn es reicht eben nicht, sich auf den eigenen subjektiven Eindruck zu verlassen. Dieser subjektive Eindruck kann ja für verschiedene Menschen sehr unterschiedlich ausfallen, und außerdem kann sich dieser eigene, persönliche Eindruck auch situationsbedingt ändern. Solche physikalischen Messungen müssen natürlich in Laboratorien durchgeführt werden, doch in Deutschland gab es zum Ende des 19. Jahrhunderts kein dafür geeignetes Labor. Ähnliche Probleme gab es in der Notwendigkeit, elektrische Größen in einer einheitlichen Weise zu messen. Dies rief den Industriellen Werner von Siemens auf den Plan, ein entsprechendes Institut zu gründen. Dieses Institut sollte unter der Hoheit des Staates stehen, um unabhängige Messungen, die nicht von den Interessen der Industrie beeinflusst sind, zu ermöglichen. Es wurde daher im Jahre 1887 in Berlin die Physikalisch-Technische Reichsanstalt gegründet, deren Aufgabe genau dies war: präzise technische Vergleiche durchzuführen, unter anderem zwischen den verschiedenen Möglichkeiten der Lichterzeugung.

Nun, wie geht man vor, wenn man wissen möchte, welche Lichtquelle besser ist? Es gibt hier zuerst einmal die einfache Möglichkeit, die beiden direkt miteinander zu vergleichen. Hierbei gerät man jedoch bald in sehr große Schwierigkeiten, da das ausgesandte Licht von sehr vielen Umständen abhängt. Beim elektrischen Licht sind dies zum Beispiel die Beschaffenheit des Glühfadens und seine

Form, die Strommenge, die durchgesandt wird, das Gas, mit dem der Glaskolben gefüllt ist, und so weiter. Ähnlich ist es beim Gasglühlicht. Es ist also besser, statt die beiden Lichtquellen direkt miteinander zu vergleichen, den Vergleich mit einer idealen Lichtquelle zu suchen, deren Eigenschaften nicht von solchen Parametern abhängen, die also ein «ideales Licht» erzeugt. Interessanterweise hatten Physiker damals gerade eine solche Lichtquelle entdeckt. Es handelt sich um einen Hohlraum. Durch sehr tief sinnige Überlegungen erkannte man nämlich, dass das Licht innerhalb eines Hohlraums nur von der Temperatur seiner Wände abhängt und nicht von seiner materiellen Beschaffenheit. Wir wissen alle, dass ein glühender Körper Licht aussendet. Wenn wir etwa einen Eisenhaken in ein Kaminfeuer halten, so wird er am Anfang schwarz sein, dann später ganz dunkelrot glühen, und je heißer er wird, umso heller. Dabei ändert sich nicht nur die Intensität des ausgesandten Lichts, sondern auch seine Farbe. Es geht von einem sehr dunklen Dunkelrot über Gelb, im Extremfall bis zu weißem Licht.

Wovon hängen nun sowohl die Lichtintensität als auch die Farbe ab? Es ist klar, dass hier die Temperatur eine Rolle spielt, jedoch auch die Beschaffenheit der Oberfläche des Körpers. Stellen wir uns nun in diesem Eisenhaken einen kleinen Hohlraum vor, beispielsweise eine Blase, die beim Schmieden des Hakens zufällig entstanden ist. Auch in diesem Hohlraum wird Licht auftreten, da ja auch seine Wände glühen. Es stellt sich nun heraus, dass sowohl die Intensität als auch die Farbe des Lichts in einem geschlossenen Hohlraum ausschließlich von der Temperatur seiner Wände abhängen und nicht davon, woraus sie bestehen (sei es Eisen, Stein oder anderes Material), solange alle Wände dieselbe Temperatur haben.

Dieses etwas überraschende Resultat lässt sich im Prinzip sehr einfach verstehen. Wenn die Wände des Hohlraums glühen, so senden sie Licht aus. Andererseits können die Wände auch Licht absorbieren, also aufnehmen. Genau wie jede Oberfläche – etwa auch die Seiten des Buchs vor uns – einen Teil des Lichts, das auf sie fällt, aufnimmt und auch einen Teil des Lichts zurückwirft – sodass wir das Objekt sehen können –, genauso verhalten sich auch die Wände des Hohlraums. Also wird die Menge an Licht, die sich im Hohlraum befindet, durch das Licht zunehmen, das von den Wänden ausgesandt wird, und durch die Menge Licht abnehmen, die von

den Wänden absorbiert wird. Dadurch wird sich automatisch ein Gleichgewicht einstellen. Es kann sich ja die Menge des Lichts im Hohlraum nicht zu beliebig hohen Intensitäten aufschaukeln. Dieses Gleichgewicht ist dann erreicht, wenn genauso viel Licht von den Wänden ausgesandt wird, wie von ihnen absorbiert wird. Die Menge des Lichts, die sich im Gleichgewicht im Hohlraum befindet, wird selbstverständlich von der Temperatur abhängen. Je heißer die umgebenden Wände sind, desto mehr Licht wird darin sein. Die Lichtmenge wird jedoch unabhängig von der Beschaffenheit der Wände sein, da das Verhältnis der bei einer bestimmten Temperatur von einer Oberfläche ausgesandten Lichtmenge zur absorbierten Lichtmenge für alle Körper gleich ist, wenn sich jener erwähnte Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Es handelt sich also beim Hohlraum um eine ideale Lichtquelle, da das ausgesandte Licht nicht von Eigenschaften der Lichtquelle abhängt. Das ist dann das gesuchte, ideale Licht, mit dem wir alle anderen Lichtquellen vergleichen können.

Wie kann man dies aber in der Praxis nützen? Ein Hohlraum ist ja in sich geschlossen. Die Lösung ist nun eine ganz einfache. Man nimmt einen sehr großen Hohlraum und macht in diesen Hohlraum ein ganz kleines Loch. Durch dieses Loch wird bei jeder Temperatur Licht austreten. Man macht jedoch das Loch so klein, dass die Menge des Lichts, die austritt, verschwindend gering ist im Vergleich zu dem Licht im Hohlraum. Dies wird auf die Natur des Lichts im Hohlraum praktisch keinen Einfluss haben. Diese austretende Strahlung nennt man *Hohlraumstrahlung*. Es handelt sich hierbei eben um das besagte «ideale Licht», das schließlich als Vergleichsquelle für Gaslicht oder elektrisches Licht dienen kann.

Der Streit zwischen Gaslicht und elektrischem Licht ist heute eindeutig entschieden. Es waren letztendlich die Kräfte des Marktes, die diese Entscheidung herbeiführten. Jedoch hatten die Experimente an diesem idealen Licht, die an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin durchgeführt wurden, schließlich eine Konsequenz, die von niemandem erwartet worden war. Während es von grundsätzlichen Überlegungen her klar war, dass die Farbe des Lichts eines Hohlraums nur von der Temperatur abhängt, war es den Physikern lange Zeit nicht möglich, das Licht auch theoretisch zu erklären. Ein sehr unbefriedigender Zustand, wenn man be-

denkt, dass es das Ziel der Physik ist, alle Naturphänomene so einfach wie möglich zu erklären. Es geht ihr hierbei nicht nur um das Veranschaulichen, sondern darum, quantitativ exakt zu berechnen. Wenn wir also vom idealen Licht sprechen, so möchten wir eine genaue mathematische Aussage darüber haben, wieviel Licht von welcher Farbe von dem Hohlraum ausgesandt wird. Was bedeutet Farbe aber physikalisch?

Licht ist zuerst einmal ein Wellenphänomen. Anders gesagt: Es breitet sich als eine Welle aus, als eine Welle von elektrischen und magnetischen Feldern. Ein zugegebenermaßen sehr abstraktes Konzept, jedoch alles, worauf es uns jetzt ankommt, ist die Tatsache, dass es, wie bei jeder Welle, auch hier eine Wellenlänge und eine Frequenz gibt. Wenn wir uns kurz Wasserwellen vorstellen, so sehen wir große und kleine Wellen. Die Wellenlänge ist einfach der Abstand zwischen zwei Wellenbergen, den wir auf einem Schnappschuss leicht sehen könnten. Die Frequenz gibt dagegen einfach an, wie oft eine bestimmte Stelle an der Wasseroberfläche in der Sekunde auf und ab schwingt. In genau der gleichen Weise hat auch Licht eine Wellenlänge und eine Frequenz, nur sind diese sehr weit weg von unserer Alltagserfahrung. Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts ist sehr klein. Sie beträgt zwischen 0,4 und 0,7 eines Tausendstels eines Millimeters, ist also etwa hundertmal kleiner als die Dicke eines menschlichen Haares. Seine Frequenz ist sehr, sehr hoch. Es schwingt in einer Sekunde etwa 500 Billionen Mal hin und her, das ist eine 5 mit 14 Nullen – 500 000 000 000 000. Die Farbe des Lichts ist nun durch seine Wellenlänge gegeben. Die größte Wellenlänge des sichtbaren Lichts ist rot; wenn die Wellenlänge kürzer wird, ändert sich die Farbe über gelb und grün zu blau. Die kürzesten Wellenlängen, die man sehen kann, sind violett. Wenn Licht aus mehreren Wellenlängen besteht, dann sehen wir nach wie vor nur eine Farbe. Dies ist dann eben eine Mischfarbe, die unser Gehirn aus den Sinneseindrücken konstruiert. So kann zum Beispiel die Farbe Grün entweder Licht nur einer einzigen Wellenlänge sein oder zusammengesetzt aus Gelb und Blau.

Eine glühende Lichtquelle sendet eben nicht nur eine einzige Farbe aus, also nicht nur Licht einer einzigen Wellenlänge, sondern eine ganze Menge verschiedener Wellenlängen. Dies nennt man das Spektrum. Das Spektrum von Licht, das aus einem Hohlraum

kommt, ist dann ausschließlich eine Frage der Temperatur. Der deutsche Physiker Gustav Kirchhoff hatte schon 1859 erkannt, wie interessant die Tatsache ist, dass dieses Spektrum nur von einem einzigen Parameter, also nur von der Temperatur, abhängt. Er vermutete, dass ein ganz interessantes Gesetz dahinterstecken muss. Und Friedrich Paschen meinte, dieses Gesetz sei so wichtig, dass es sich auszahlt, dafür eine Berufung als Professor an eine deutsche Universität auszuschlagen. Eine Berufung auf eine Professur war damals wie heute zwar ein schöner Karrieresprung, ist jedoch oft mit einem sehr hohen Preis verbunden, denn mit der Stelle eines Professors gehen Verwaltungs- und Organisationsaufgaben einher, die oft dazu führen, dass der neue Professor praktisch nicht mehr dazu kommt, selbst Physik zu machen. Es war also Paschen klar gewesen, wieviel Arbeit man hineinstecken müsste, um das Rätsel der Hohlraumstrahlung zu lösen. Seine Vermutung hierzu war jedoch nicht richtig. Die Lösung des Rätsels kam später durch einen deutschen Professor.

Es war also aus grundsätzlichen Überlegungen offenbar schon längere Zeit klar, dass das Spektrum der Hohlraumstrahlung ausschließlich von der Temperatur abhängt und daher im Prinzip nur eine sehr einfache Form haben kann. Wie diese Form aussieht, war jedoch unbekannt und musste durch Experimente bestimmt werden. Es waren gerade dies die Experimente, die an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt durchgeführt wurden. Anfangs sahen die Resultate sehr unübersichtlich aus, wie so oft in der Experimentalphysik. Erst wenn man das Experiment immer wieder verbessert, genauer und genauer macht, kommt man der Natur wirklich auf die Schliche und kann messen, was tatsächlich vorliegt. Diese Serie von Experimenten wurde vor allem von den Physikern Heinrich Rubens und Ferdinand Kurlbaum durchgeführt. Als es aber gelungen war, die genaue Form des Spektrums zu bestimmen, stand man vor einem Rätsel, das sich niemand mittels der damaligen Physik erklären konnte.

Des Rätsels Lösung erfolgte im Jahre 1900 durch den damals für einen theoretischen Physiker mit 42 Jahren schon relativ alten Max Planck, damals Professor an der Humboldt-Universität zu Berlin. Er war übrigens bei seiner Berufung als Professor die zweite Wahl dieser Universität gewesen! Damals wie heute wird bei der Beru-

fung eines neuen Professors von der Universität eine Liste mit meistens drei Namen aufgestellt. Berlin setzte auf den ersten Platz der Liste Heinrich Hertz, der kurz vorher durch seine Entdeckung der elektromagnetischen Wellen Aufsehen erregt hatte und dadurch einer der führenden Experimentalphysiker weltweit geworden war. Heinrich Hertz nahm jedoch einen Ruf nach Bonn an, und dadurch kam Max Planck in Berlin zum Zug.

Als Planck noch nicht recht wusste, ob er Physik studieren sollte oder nicht, wandte er sich an den Münchner Physikprofessor Philipp von Jolly. Dieser teilte ihm mit, dass in der Physik alles Wesentliche bereits erforscht sei und es nur noch darum ginge, einige wenige Details zu klären. Max Planck sei viel zu begabt, um Physik zu studieren. Heute kann man über eine solche Aussage nur lächeln. Man sollte sie jedoch durchaus auch als Warnungstafel sehen. Es gibt ja auch heute wieder Physiker, die behaupten, wir stünden kurz davor, im wesentlichen alles erklären zu können. Damals wie heute wird durch eine solche Haltung nichts anderes dokumentiert als die Tatsache, wie eng und kurzfristig die menschliche Phantasie oft sein kann.

Die Berufung Max Plancks nach Berlin sollte sich als ein außerordentlicher Glücksfall herausstellen. Bereits 1894 hatte Planck zum Problem der Erklärung der Hohlraumstrahlung bemerkt: «Diese ... stellt also etwas Absolutes dar, und da die Suche nach dem Absoluten mir stets als die schönste Forschungsaufgabe erschien, so machte ich mich mit Eifer an ihre Bearbeitung.» Die Berufung nach Berlin war insofern ein Glücksfall, da er dort ständigen persönlichen Kontakt mit den Experimentalphysikern, insbesondere mit Rubens, hatte. Er war also ganz genau, bis ins Detail, vertraut mit den exakten Messergebnissen der Hohlraumstrahlung und konnte seine verschiedenen Versuche, diese theoretisch zu erklären, immer wieder direkt mit dem Experiment vergleichen.

Hier gab es auch oft intensive Diskussionen bei Einladungen im Familienkreis, oft sehr zum Leidwesen der anderen Familienmitglieder. Das mathematisch richtige Gesetz erhielt Max Planck durch Ausprobieren, etwa Mitte Oktober 1900, und teilte dies am 19. Oktober der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin mit. Max Planck selbst schreibt: «Am Morgen des nächsten Tages suchte mich der Kollege Rubens auf und erzählte, dass er nach dem Schluss der Sit-

zung noch in der nämlichen Nacht meine Formel mit seinen Messungsdaten genau verglichen und überall eine befriedigende Übereinstimmung gefunden habe.» Diese unmittelbar sofortige Überprüfung eines neuen theoretischen Ansatzes und ihre Bestätigung noch in derselben Nacht ist etwas in der Physik außerordentlich Ungewöhnliches. Dadurch ermutigt, versuchte Max Planck, seinen bis dahin nur mathematischen Ansatz auch theoretisch und physikalisch zu erklären, was ihm auch gelang. Die diesbezüglichen Gedanken trug er am 14. Dezember 1900 in der wohl historischsten Sitzung der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin vor. Dies gilt allgemein als die Geburtsstunde der Quantenphysik.

Zur Erklärung der Hohlraumstrahlung hatte Max Planck lange mit der gängigen Theorie herumgespielt, nach der Licht aus Wellen besteht, und konnte so dem Problem der Erklärung der Hohlraumstrahlung in keiner Weise näherkommen. Auf die Lösung kam er erst, nachdem er sich, wie er selbst sagte, zu einem «Akt der Verzweiflung» zwang. Er musste in seiner Quantenhypothese einfach annehmen, dass das Licht nicht als Welle von den Wänden des Hohlraums ausgesandt wird, sondern in einzelnen, nicht teilbaren Stücken, den sogenannten *Quanten*. Diese Quanten des Lichts, auch *Photonen* genannt, besitzen eine fixe Energie, die ausschließlich durch die Frequenz des Lichts, also die Farbe des Lichts, und durch eine völlig neue physikalische Größe festgelegt ist – das *Plancksche Wirkungsquantum*. Hier gilt die berühmte Beziehung $E = hf$. Dies ist der mathematische Ausdruck dafür, dass die Energie E eines Lichtquants gleich ist dem Produkt aus dem Planckschen Wirkungsquantum h und der Frequenz f des Lichts.

Heute wissen wir, dass das Plancksche Wirkungsquantum h eine universelle Naturkonstante ist. Das heißt, es hat einen festen Wert, der unabhängig ist von den äußeren Umständen. Es hat die gleiche Größe sowohl bei uns wie in fernen Galaxien und ändert sich auch nicht mit der Zeit. Es war also vor vier Milliarden Jahren genauso groß wie heute. Solche universellen Naturkonstanten sind von großer Bedeutung in unserer physikalischen Beschreibung der Welt. Eine andere solche Naturkonstante ist die Lichtgeschwindigkeit c . Die Tatsache, dass sich die Naturkonstanten nicht mit der Zeit ändern und dass sie sehr weit weg von uns genauso groß sind wie bei uns auf der Erde, wissen wir aus genauen experimentellen Beobach-

tungen, vor allem aus genauen Messungen des Spektrums des Lichts, das von fernen Sternen und Galaxien zu uns kommt.

Es erhebt sich nun die Frage, warum diese Tatsache, dass Licht aus diesen unteilbaren Quanten besteht, nicht schon früher bemerkt wurde. Der Grund ist der, dass dieses Plancksche Wirkungsquantum extrem klein ist. Wie klein das Plancksche Wirkungsquantum tatsächlich ist, kann man etwa daran sehen, dass eine durchschnittliche Glühlampe pro Sekunde etwa $3 \times 10^{20} = 300\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$ Photonen (Lichtquanten) aussendet.

Plancks Vorschlag wurde von seinen Zeitgenossen im wesentlichen ignoriert und von einigen wenigen bekämpft. Auch er selbst suchte für lange Zeit nach einer Erklärung der Hohlraumstrahlung, die ohne das Wirkungsquantum auskommt. Diesem Versuch war natürlich kein Erfolg vergönnt. Der Einzige, der die Quanten wirklich ernst nahm, war im Jahre 1905 Albert Einstein. Damals ging es um ein interessantes physikalisches Phänomen. Es war seit einiger Zeit bekannt, vor allem durch Experimente von Hermann von Helmholtz, dass Licht aus Metallplatten Elektronen, kleine, geladene Teilchen, herauslösen kann. Man versuchte nun zu verstehen, wie dies zustande kommt. Nach der damals gängigen Wellentheorie des Lichtes wäre es notwendig, dass eine einfallende Lichtwelle die Elektronen im Metall immer mehr aufschaukelt, bis sie sich schließlich von der Metalloberfläche wegreißen können. Das würde aber einige Zeit dauern, so wie es bei einer Kinderschaukel einige Zeit dauert, bis sie so stark schwingt, dass man sich nicht mehr auf ihr aufhalten kann. Albert Einstein konnte das Problem lösen, indem er, entsprechend der Idee von Max Planck, annahm, dass das Licht aus Quanten besteht und diese einzelnen Quanten einfach direkt die Elektronen aus dem Metall herausstoßen können. Damit konnte Einstein auf einen Schlag nicht nur erklären, dass Elektronen sofort aus einer Metallplatte herauskommen, wenn man sie mit Licht beleuchtet, und nicht erst nach einiger Zeit, wie es die Wellentheorie verlangen würde. Er konnte auch genau erklären, mit welcher Energie die Elektronen austreten, wenn man die Metallplatte mit Licht einer bestimmten Frequenz beleuchtet. Es ist interessant, dass Albert Einstein für diese Erklärung des photoelektrischen Effekts 1922 den Nobelpreis erhielt. Die Relativitätstheorie wurde vom Nobelkomitee nie gewürdigt.

2. Abschied vom Gewohnten

Überlegen wir nochmal, was wir bisher diskutiert haben. Die Quantenhypothese Max Plancks konnte bis zum Jahre 1905 also zwei bisher unverstandene Phänomene sehr gut erklären. Dies war auf der einen Seite die Hohlraumstrahlung, also die Farbe glühender Körper, und auf der anderen Seite der photoelektrische Effekt – beides erklärte sich auf einfache und sehr elegante Weise. Warum sollte man als Physiker damit nicht zufrieden sein? Wo liegen die Probleme? Warum wurde die Quantenhypothese nicht gleich von allen Physikern mit großer Begeisterung übernommen? Das grundlegende Problem ist offenbar nicht eines der mathematischen Naturbeschreibungen, die ja hier zweifelsohne schwierig ist. Im Gegenteil, die Quantenhypothese liefert Beschreibungen, die sehr exakt sind. Das Problem ist vielmehr ein Problem des Weltbildes, ein Problem des Verständnisses. Die Frage war und ist nun, was das Ganze in einem tieferen Sinne nun eigentlich bedeutet.

Wir haben ja bereits gelernt, dass Max Planck selbst nach einer anderen Erklärung suchte, die ohne die Quantenhypothese auskam – natürlich vergeblich. Und soweit wir wissen, war es wieder Albert Einstein, der zum ersten Mal in der Öffentlichkeit die Probleme aufwarf, die die neue Quantenphysik mit sich brachte. Dies geschah auf der 81. Jahresversammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte im Jahre 1909 in Salzburg. Auf dieser Tagung war Einstein Ehrengast und hielt zum ersten Mal einen Vortrag über die Spezielle Relativitätstheorie. Zuhörer waren unter anderen Heinrich Rubens, Max Planck und Lise Meitner. Offenbar hat Einstein bei dieser Gelegenheit auch seinem Unbehagen Ausdruck verliehen über die Rolle, die der Zufall in der neuen Quantenphysik spielt. In anderen Worten, für die Physik trat nun eine höchst eigenartige Situation ein. Auf der einen Seite war da die gängige Theorie, die klassische Physik, der zufolge alle Vorgänge kontinuierlich ablaufen und nach der das Prinzip der Kausalität uneingeschränkte Gültigkeit besitzt. Danach muss es also für jede Wirkung eine Ursache geben, und eine klar definierte Ursache führt nur zu einer einzigen Wirkung, nicht zu mehreren verschiedenen.

Das Kausalitätsdenken, das Denken in Ursache und Wirkung, ist ja auch in unserem Alltagsweltbild als fester Bestandteil eingebaut.

Geschieht etwa ein Flugzeugunglück, so suchen wir so lange nach einer Ursache, bis wir diese gefunden haben. Denn es kann ja nach unserem angeblich gesunden Menschenverstand nichts ohne Ursache geschehen.

Das Plancksche Wirkungsquantum stellte jedoch diesen Überlegungen ein großes Hindernis entgegen. Die Natur war plötzlich nicht mehr kontinuierlich, da das Wirkungsquantum nicht teilbar ist. Es ist ja eine universelle Naturkonstante. Überdies stellt das Wirkungsquantum eine unüberwindliche Grenze für unsere kausale Weltbeschreibung dar.

Nach Einsteins Erklärung des photoelektrischen Effekts sollte es aber noch weitere zwanzig Jahre – bis zum Jahr 1925 – dauern, bis es gelang, eine vollständige Formulierung der Theorie zu erreichen, welche die Quanten genau beschreibt. Diese neue Quantentheorie wurde in zwei verschiedenen Formulierungen geliefert, 1925 vom jungen Werner Heisenberg und 1926 von Erwin Schrödinger. Die Formulierung von Werner Heisenberg ist die *Matrizenmechanik*, so benannt, weil hier abstrakte mathematische Größen, eben sogenannte Matrizen, die zentrale Rolle spielen. Die Formulierung von Erwin Schrödinger heißt *Wellenmechanik*. Bei Erwin Schrödinger ist das zentrale Bild, dass alles mit Hilfe von Wellen beschrieben werden kann. Über die Natur dieser Wellen werden wir später noch Überlegungen anstellen. Dass man somit zwei verschiedene Formulierungen der neuen Quantentheorie vor sich hatte, verursachte am Anfang ziemliches Kopfzerbrechen, bis es Erwin Schrödinger gelang zu zeigen, dass beide – Matrizenmechanik und Wellenmechanik – zwar mathematisch verschieden sind, jedoch physikalisch genau dieselben Aussagen treffen. Die eine kann also in die andere überführt werden. Wenn wir also heute von Quantentheorie oder Quantenphysik sprechen, so legen wir damit nicht fest, welche von beiden Versionen, die Heisenbergs oder die Schrödingers, wir meinen, weil eben beide vollkommen gleichberechtigt sind.

Diese Quantentheorie hat zu einem umfassenden, neuen Verständnis sehr vieler verschiedener Phänomene in der Natur geführt, von denen wir hier nur einige beispielhaft erwähnen. Man kann aus der Quantentheorie nicht nur die Farbe des Hohlraumlichts berechnen, sondern auch, welches Licht von welcher Art Atome aus-

gesandt wird. Mit Hilfe der Quantentheorie kann man sogar erklären, warum Atome überhaupt in der Form existieren, wie wir sie vor uns haben.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse der Naturwissenschaften ist die Entdeckung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, dass alle materiellen Gegenstände aus Atomen aufgebaut sind. Diese Atome sind unvorstellbar klein. Ein einzelnes Atom hat einen Durchmesser von etwa 10^{-8} Zentimeter, das ist 0,00000001 Zentimeter oder ein Hundertstel eines Millionstels eines Zentimeters. Jeder Gegenstand des täglichen Lebens, also auch das Buch, das vor Ihnen liegt, besteht also aus einer unvorstellbaren Anzahl von Atomen – etwa $10^{25} = 10\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$ Atome. Es gibt eine Menge verschiedener Atome, jedes chemische Element ist als eine bestimmte Atomsorte qualifizierbar, jedoch ist allen Atomen eines gemeinsam: Sie bestehen aus einem Atomkern, der wiederum hunderttausend Mal kleiner ist als das Atom selbst, und dieser Atomkern ist von einer Wolke von Elektronen umgeben. Der Durchmesser dieser Wolke ist der Atomdurchmesser. Die Elektronen werden vom Atomkern dadurch festgehalten, dass sie eine negative elektrische Ladung besitzen, während der Atomkern seinerseits positiv geladen ist, die beiden sich also gegenseitig anziehen.

Die neue Quantentheorie konnte nun eine Menge verschiedener Fragen, die das Atom betreffen, mit einem Schlag beantworten. Dazu gehört zum Beispiel die Frage, warum die Elektronen nicht letztlich in den Atomkern hineinstürzen, da sie ja von ihm angezogen werden, also die Frage nach der Stabilität der Atome. Ebenso kann die Quantenphysik genau beschreiben, warum Atome aneinander haften, wie also die chemische Bindung zwischen Atomen erfolgt.

Eine weitere, ganz wichtige Konsequenz ist die quantenphysikalische Erklärung aller chemischen Vorgänge. Durch die Quantentheorie ist letztlich die Chemie auf eine physikalisch erklärbare Basis gestellt worden. Ferner hat die Quantenphysik zu einem Verständnis der Festkörper geführt, insbesondere der Halbleiter. Dies sind Materialien, die eine elektrische Leitfähigkeit besitzen, die zwischen der von Isolatoren, die elektrischen Strom praktisch nicht leiten, und der von Metallen liegt, die Strom sehr gut leiten. Halbleiter sind die zentralen Bestandteile aller modernen elektronischen

Schaltungen. Die Quantenphysik hat uns auch erlaubt, Vorgänge in Atomkernen zu verstehen und damit so Verschiedenes wie Kernspaltung und Kernfusion, die Erzeugung der Energie in Sternen sowie wichtige Phänomene bei der Entstehung des Universums zu begreifen.

Heute ist daher die Quantenphysik die Grundlage vieler Bereiche der modernen Hochtechnologie. So wäre etwa der Laser ohne Quantenphysik nicht denkbar, ohne Quantenphysik hätten wir keine Halbleiter, ohne Halbleiter eben keine modernen Computer und ohne Computer keine so einfachen Dinge wie Handys – ganz zu schweigen davon, dass heute in fast allen modernen Geräten bis hin zum Auto kleine Computer stecken. Die Quantenphysik wurde so zur Grundlage eines großen Teils der Wirtschaft moderner Industriestaaten.

Wenn also die Quantenphysik so außerordentlich erfolgreich ist in der Beschreibung verschiedenster Phänomene und Erscheinungen, warum sollte es dann ein Problem damit geben? Warum sind viele Physiker und Philosophen noch heute von der Quantenphysik so fasziniert? Das liegt daran, dass diese Quantenphysik ein Verhalten von Quantenteilchen vorhersagt, das unserem üblichen Alltagsverständnis vollkommen widerspricht. Der amerikanische Physiker Richard Feynman hat dies einmal folgendermaßen formuliert: «Ich glaube, mit Sicherheit behaupten zu können, dass heutzutage niemand die Quantenmechanik versteht.» Wir werden nun im folgenden einige tatsächlich durchgeführte Experimente im Labor kennenlernen, die uns dieses seltsame Verhalten von Quantenteilchen sehr schön demonstrieren. Ehe wir dies tun, möchten wir jedoch einige grundsätzliche Überlegungen anstellen.

Um zu sehen, wie anders sich Quanten verhalten, als wir das von Gegenständen des täglichen Lebens gewöhnt sind, machen wir jetzt einen Ausflug in die Welt des Allerkleinsten. Betrachten wir einen Gegenstand des täglichen Lebens, zum Beispiel dieses Buch, in dem gerade diese Zeilen geschrieben stehen. Woher wissen wir, dass da ein Buch vor uns liegt? Wir wissen es, weil wir es sehen, weil wir es betasten können. Vielleicht ist sogar der Geruch des Buches ein Hinweis darauf, dass wir hier Papier vor uns haben. Auf alle Fälle sind zwei Dinge nötig, um zu dem Schluss zu kommen, dass hier ein Buch vor uns liegt. Zum ersten benötigen wir eine Reihe von Sin-

neseindrücken. Am wichtigsten sind die optischen Eindrücke, das Bild des Buches mit seinen Seiten. Zum anderen müssen wir jedoch bereits in unserem Kopf eine Idee davon haben, was es bedeutet, dass ein Gegenstand als Buch bezeichnet werden kann. Diese Idee, dieses Konzept «Buch», bedeutet ein Zurückführen auf frühere Erfahrungen, im allgemeinen auf Bücher, die wir schon zu einem früheren Zeitpunkt gesehen haben, die wir schon früher berührt oder gelesen haben. Wenn wir also das, was vor uns liegt, als Buch bezeichnen, bedeutet dies, dass unsere Sinneseindrücke in uns wichtig erscheinende Merkmale mit dem übereinstimmen lassen, was wir unter Buch verstehen.

Wir benötigen also unsere Sinneseindrücke und die Konzepte in unserem Kopf, die wir mit diesen Sinneseindrücken vergleichen. Wir werden sehen, dass beides im Fall von sehr kleinen Objekten nicht mehr so klar ist. Eine sorgfältige Überlegung öffnet die Tür für ganz neue Sichtweisen. Diese Sichtweisen werden dann, wie wir später noch sehen werden, eben diejenigen der Quantenphysik sein.

Sinneseindrücke in irgendeiner Form wahrzunehmen, bedeutet letztlich eine Wechselwirkung mit dem betrachteten Objekt. Wenn wir das Buch ansehen und uns ein Bild von ihm machen, muss es natürlich beleuchtet sein, denn ohne das Licht, das etwa von der Sonne kommend durch das Fenster tritt und unser Buch beleuchtet, können unsere Augen nichts wahrnehmen. Würde das Buch in einem finsternen Raum liegen, müssten wir zum Beispiel eine Taschenlampe darauf richten, also ganz bewusst mit dem betrachteten Objekt in Wechselwirkung treten. Wir wissen, dass für Gegenstände unseres täglichen Lebens, wie etwa für dieses Buch, die bei der Betrachtung notwendige Wechselwirkung keine sehr große Bedeutung hat. Es wird für das Buch ziemlich unerheblich sein, ob ich es beleuchte oder nicht. Natürlich wird nach sehr starkem und langdauerndem Lichteinfall das Buch etwas vergilben, vielleicht sogar das Papier brüchig werden, jedoch sind im allgemeinen die Eigenschaften, die wir betrachten, etwa die Zahl der Seiten oder die Größe der Buchstaben, unabhängig davon, ob wir das Buch beleuchten, und unabhängig davon, ob wir dazu eine schwache Kerze nehmen oder einen starken Scheinwerfer. Natürlich gibt es Spezialfälle, die einer genaueren Überlegung bedürfen, wie etwa der Fall, wo wir



Anton Zeilinger

Einsteins Schleier

Die neue Welt der Quantenphysik

Taschenbuch, Broschur, 240 Seiten, 12,5 x 18,3 cm

ISBN: 978-3-442-15302-2

Goldmann

Erscheinungstermin: März 2005

Teleportation, Quantencomputer und allerhand weitere fantastische Dinge, deren Bedeutung sich gemeinhin nur dem Physiker erschließen: Obwohl die Quantenphysik mittlerweile über hundert Jahre alt ist, sind ihre Aussagen immer noch weithin unbekannt oder gelten als besondere Provokation des gesunden Menschenverstands. Was aber, wenn der interessierte Laie wissen will, was die Welt im Innersten zusammenhält? Für diesen Fall bietet der international renommierte Experimentalphysiker Anton Zeilinger eine fesselnde, allgemeinverständliche Einführung in die Quantenphysik.



[Der Titel im Katalog](#)