

Skurrile Quantenwelt

Silvia Arroyo Camejo

Skurrile Quantenwelt



Springer

Korrigierter Nachdruck 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> aufrufbar

ISBN-10 3-540-29720-0 Springer Berlin Heidelberg New York

ISBN-13 978-3-540-29720-8 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.com

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006

Printed in Germany

Herstellung: Jacqueline Lenz, Springer Heidelberg

Satz: F. Herweg, EDV-Beratung, Hirschberg

Einbandgestaltung: Künkel+Lopka, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

SPIN: 11748427

57/3141/jl

5 4 3 2 1

Zur Entstehung dieses Buchs

Oft wurde ich gefragt, welcher Teufel mich denn geritten hätte, im Alter von 17 Jahren eine physikalische Abhandlung über das Thema der Quantenphysik zu verfassen.

Nun, zur Beantwortung dieser Frage möchte ich als erstes erläutern, welche Gründe es nicht waren, die mich zum Schreiben dieses Quantenphysik-Buchs bewogen haben. So war es z. B. nie mein Anliegen ein Buch zu schreiben, welches mir durch hohe Verkaufszahlen auf dem Buchmarkt einen finanziellen Segen bringen sollte. Um Geld ging es mir bei der Konzeption dieses Buches nie. Wäre dies der Fall gewesen, hätte ich kein Buch geschrieben, dessen Thema den meisten Menschen nur als eines der wohl unbeliebtesten Schulfächer in schrecklicher, leicht verblasster Erinnerung bleibt. Immer wieder musste ich – anfangs mit Erstaunen – feststellen, dass ich mit meinem gigantischen Interesse und dem schier unstillbaren Wissensdrang bezüglich der erstaunlichen Vorgänge im Mikro- und Makrokosmos ziemlich allein war und an allen Enden stets auf Unverständnis und Kopfschütteln stieß.

So war es auch nicht der Drang nach Anerkennung, der mich dazu trieb dieses Buch zu konzipieren, denn von den Mitmenschen für völlig verrückt und durchgeknallt gehalten zu werden, ist nicht besonders motivierend.

Auch kann ich nicht behaupten, dass mein hier vorliegendes Geschriebenes das Resultat von Langeweile oder schulischer Unterforderung wäre. Genau genommen war ich zur Zeit der Anfertigung dieses Buches recht

intensiv mit schulischen Lernaktivitäten und Klausuren ausgelastet, da ich um einen guten Abiturdurchschnitt bemüht war. Dabei spielte für mich das Verfassen von quantenphysikalischen Kapiteln vielmehr die Rolle einer willkommenen, wenn auch anspruchsvollen Abwechslung.

Mein Vater meinte einmal, so ein Buch wie meines könne man wirklich nur schreiben, wenn man noch sehr jung sei. Nur in jungen Jahren habe man die Motivation und das Durchhaltevermögen etwas derartig zweck- und sinnlos ohne äußeren Zwang und völlig ohne finanziellen Verdienst zu schaffen. Nun, ich bin mir dessen nicht sicher, aber ich hoffe sehr, dass ich auch in späteren Jahren noch die Kraft und Zeit dazu finden werde, wieder einmal das Vergnügen erleben zu dürfen etwas derartig sinn- und zwecklos zu fabrizieren ;-).

Was war es also, das mich dazu bewog dieses Buch zu schreiben? Ganz einfach: Meine Liebe zur Physik und meine Begeisterung für die Vielfalt der faszinierenden, komplexen Vorgänge, für die – im Widerspruch zu unserer gewohnten Alltagserfahrung und unserem sog. gesunden Menschenverstand – weder das Kausalitätsprinzip noch der Begriff der Objektivität gilt. Eine Welt, in der der absolute, objektive Zufall genauso einen festen Bestandteil der physikalischen Gesetze darstellt, wie die Tatsache, dass sich ein Quantenobjekt an mehreren Orten gleichzeitig aufhalten kann. Eine Welt, die so voll von Widersprüchen und Paradoxa scheint, dass man zeitweise keinen Fuß mehr auf den Boden zu bringen vermag. Doch so komplex und wenig anschaulich die Phänomene und Gesetzmäßigkeiten des Mikrokosmos auch anmuten, so wundervoll und faszinierend sind doch die Erkenntnisse, die man durch die Studien an den physikalischen Verhaltensweisen von Quantenobjekten über die Natur des Mikrokosmos erhält.

Ich will die Struktur, nach der die Natur funktioniert, erkennen. Ich will wissen, wie diese wundervolle Welt, in der wir leben, funktioniert. Aus diesem Grund, angetrieben von einem unstillbaren Wissensdurst, gewann ich mit ca. 15 Jahren durch die Lektüre populärwissenschaftlicher Literatur erste Erkenntnisse über die Mechanismen der Quantenphysik. Immer weiter wuchs mein Interesse für dieses schrecklich interessante, mich völlig einnehmende Thema. Immer weitere Fragen drängten sich mir auf, die beantwortet werden wollten, doch gab es niemanden, der sie mir hätte beantworten können.

Nach einiger Zeit stieß ich an eine Grenze, die ich durch das Lesen weiterer populärwissenschaftlicher Quantenphysikbücher nicht zu überschreiten vermochte. Doch der Sprung zur Studienliteratur, die hauptsächlich für Physikstudenten nach dem Grundstudium verfasst wird, und in der die

Verwendung der höheren Mathematik zum guten Ton gehört, war durchaus gravierend und scheinbar nur sehr schwer bzw. (aus meiner Position der 10. Klasse am Gymnasium) gar nicht zu schaffen.

Dieser literarische Spagat zwischen der allgemeinverständlichen, populärwissenschaftlichen Literatur, welche stets jede mathematische Formel zu meiden pflegt, und der Studienliteratur, bei der auf nahezu jeder Seite mehrere Integrale und Differentialgleichungen zu finden sind, war zunächst ein Problem für mich. Schließlich gelang es mir über diverse Bibliotheken, Antiquariate und das Internet mit meinen quantenmechanischen Studien fortzufahren und mich langsam auch an den quantitativen Kontext der Quantenphysik heranzutasten. Dabei stellte ich fest, dass viele Aspekte und Eigenheiten der Quantenphysik unter Zuhilfenahme des mathematischen Formalismus sehr viel verständlicher und übersichtlicher wurden. Ich erkannte, dass eine wirklich verständliche, nicht nur oberflächliche Darstellung quantenmechanischer Effekte nur über die Diskussion anschaulicher, gut erläuterter Texte mit dem dazugehörigen mathematischen Formalismus möglich ist.

Nachdem mir dies klar geworden war und ich nach meinen nun schon über zweijährigen quantenphysikalischen Studien einen Drang verspürte, die bis zu diesem Zeitpunkt gesammelten Erkenntnisse zu ordnen, kam mir die Idee ein paar zentrale Themen bzw. einige der in der Quantenphysik auftretenden Effekte nach meinem eigenen Verständnis schriftlich festzuhalten. Daran hatte ich so viel Freude, dass ich begann mir Gedanken zu machen über einen konzeptionell ganz neuen, didaktisch wertvollen Aufbau quantenmechanischer Themen – und zwar in Form eines selbst geschriebenen Buchs, um damit die bestehende literarische Lücke zwischen den populärwissenschaftlichen Veröffentlichungen und der Studienliteratur endlich zu schließen.

Was daraus schließlich entstanden ist, halten Sie, sehr geehrter Leser, in diesem Augenblick in Ihren Händen. Dieses Buch ist, zusammenfassend gesagt, der pure Ausdruck meiner Freude daran, eine didaktisch möglichst wertvolle und verständliche, aber dennoch tiefeschürfende und umfassende Darstellung der so wundervollen und faszinierenden Themen zu geben, welche die Quantenphysik behandelt, und meines persönlichen Wunsches, das alles eines schönen Tages vielleicht selbst einmal begreifen zu können. Und dies einfach nur deshalb, weil es mir solchen Spaß macht.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Licht und Materie	7
Was ist eigentlich Licht?	8
Aber was schwingt da wie?	9
Was sind Frequenz und Wellenlänge des Lichts?	11
Was ist eigentlich Materie?	12
Woraus besteht ruhemassebehaftete Materie?	13
Sind Elementarteilchen wirklich Teilchen?	15
2 Die Herkunft des Planckschen Wirkungsquantums	17
Woher kommt die Quantenhypothese?	18
Wie konnte die Ultraviolett Katastrophe gelöst werden?	19
Wovon ist der Energiebetrag eines Lichtquants abhängig?	20
3 Der photoelektrische Effekt	23
Was ist der photoelektrische Effekt?	24
Was ist das Nichtklassische am Photoeffekt?	25
Wie löste Einstein diese Widersprüche?	28
Wie lässt sich hierdurch ein Wert für h bestimmen?	30

4	Das Doppelspaltexperiment	33
	Was ist das Doppelspaltexperiment?	34
	Was passiert beim Doppelspaltversuch mit Licht?	35
	Wie lässt sich das Streifenmuster erklären?	38
	Ist Licht also doch eine Welle?	41
5	Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen	43
	Kann das Doppelspaltexperiment auch mit Elektronen durchgeführt werden?	44
	Was passiert beim Doppelspaltexperiment mit Elektronen?	44
	Könnte man sich das Streifenmuster nicht auch anders erklären?	47
	Muss das Elektron nun doch als Welle angesehen werden?	48
	Welche Schlüsse muss man aus dem Ausgang des Experiments ziehen?	50
6	Der Compton-Effekt	51
	Was versteht man unter dem Compton-Effekt?	52
	Wie lässt sich die Wellenlängenänderung berechnen?	53
	Warum tritt der Compton-Effekt nicht bei sichtbarem Licht auf? ..	58
	Ist der Compton-Effekt nur mit einem Teilchenmodell beschreibbar?	59
7	Die Heisenbergsche Unschärferelation	61
	Was besagt die Heisenbergsche Unschärferelation?	62
	Wie kann man sich die Unschärferelation praktisch vorstellen? ..	64
	Ließe sich das Interferenzmuster ebenfalls durch die Unschärferelation erklären?	64
	Was lässt sich aus dem Ausgang der Experimente schließen?	67
	Ist das Doppelspaltexperiment auch mit anderen Teilchen durchführbar?	69
	Was ist das Elektron jetzt eigentlich wirklich: Welle oder Teilchen?	70
8	Der Kollaps der Wellenfunktion	73
	Wo liegt überhaupt der Widerspruch zwischen dem Wellen- und dem Teilchenmodell?	74
	Was genau bedeutet der Begriff Welle-Teilchen-Dualismus?	76
	Wie wird aus der Elektronen-Welle ein Teilchen auf dem Projektionsschirm?	77
	Was geschieht mit dem Rest der Elektronen-Welle?	78

Wie steht es um Gleichzeitigkeit und instantane Informationsübertragung?	79
Wodurch wird der Kollaps der Wellenfunktion ausgelöst?	82
9 Die Bohr-Einstein-Debatte	87
Wie kam es zur Bohr-Einstein-Debatte?	88
Was ist denn „Zufall“ physikalisch gesehen überhaupt?	90
Wie lautete Einsteins Kritik?	91
Welche Experimente diskutierten Bohr und Einstein?	94
Welche experimentellen Fakten lagen den Diskussionen zu Grunde?	97
Wie lautete Bohrs Entgegnung?	97
Welche Schlussfolgerungen kann man aus der Bohr-Einstein-Debatte ziehen?	100
10 Das Bohrsche Atommodell	103
Welche Atommodelle gab es?	104
Welche Makel besitzt das Planetenmodell Rutherford's?	106
Wie löst das Bohrsche Atommodell diese Diskrepanzen?	107
Was ist der Bohrsche Radius?	110
Welche Werte besitzen die Energieniveaus in der Atomhülle?	112
Wie geschieht die Absorption bzw. Emission von Photonen?	113
Ist das Bohrsche Atommodell als „richtig“ anzusehen?	115
11 Die Schrödinger-Gleichung	117
Was ist der Unterschied zwischen der Matrizen- und der Wellenmechanik?	118
Welche Bedeutung kommt der Wellenfunktion zu?	120
Wie leitet sich die Schrödinger-Gleichung her?	122
Was berechnet man mit der Schrödinger-Gleichung?	126
Welche Auswirkung hatte die Schrödinger-Gleichung auf das Atommodell?	128
12 Schrödingers Katze	131
Worum handelt es sich bei Schrödingers Katze?	132
Wie ist das Gedankenexperiment um Schrödingers Katze aufgebaut?	134
Wo liegt die Paradoxie beim Gedankenexperiment um Schrödingers Katze?	135

Wie stellt man den überlagerten Zustand eines Teilchens quantenmechanisch dar?	136
In welchem Zustand befindet sich die Katze?	139
13 Die Interpretation des quantenmechanischen Formalismus	141
Wie lautet die Lösung des Schrödingerschen Katzenparadoxons? ..	142
Was besagt die Kopenhagener Deutung?	143
Was besagt die Viele-Welten-Interpretation?	146
Was besagt die Theorie der Dekohärenz?	150
Welche Interpretation entspricht der „Realität“?	157
14 Das EPR-Paradoxon	159
Was ist das EPR-Paradoxon und woher kommt es?	160
Wie sieht der gedankliche Versuchsaufbau des EPR-Experiments aus?	162
Ist also doch kein Paradigmenwechsel durch die Quantenmechanik nötig?	165
Ist die Quantenmechanik tatsächlich unvollständig?	166
Quantenmechanik oder Theorien verborgener Variabler?	167
Schließt die Quantenmechanik verborgene Variable prinzipiell aus?	169
Wie gestaltet sich die Bohmsche Mechanik?	170
15 Die Bellsche Ungleichung	173
Ist eine experimentelle Entscheidung über verborgene Variablen möglich?	174
Was ist der Spin eines Teilchens?	175
Spinmessung nach Theorien verborgener Variabler oder Quantenmechanik?	177
Wie gestaltet sich der Aufbau des Bohmschen EPR-Experiments? ..	180
Wie lauten die Voraussagen der Theorien verborgener Variabler? ..	182
Wie geschieht die experimentelle Überprüfung der Voraussagen? ..	186
16 Die modernen Anwendungen der Quantenphysik	189
Wie wird die Quantenphysik praktisch angewendet?	190
Was ist Quanteninformation?	190
Was ist Quanten-Teleportation?	192
Was sind Quanten-Computer?	198
Was ist Quanten-Kryptographie?	201

17 Quantengravitation	209
Wozu brauchen wir eine Quantengravitation?	210
Gibt es eine Lösung für den Theorien-Konflikt?	212
Was besagt die Stringtheorie?	213
Was besagt die Loop-Quantengravitation?	215
Bestehen zwischen den Quantengravitationstheorien auch Gemeinsamkeiten?	216
Ist Quantengravitation noch Physik oder schon Philosophie?	219
Nachwort	221
Glossar	225
Weiterführende Literatur	231
Sach- und Namenverzeichnis	241

Einleitung

Was ist Quantenphysik?

Wahrscheinlich haben Sie, lieber Leser, sich auch schon einmal zumindest eine der folgenden Fragen gestellt:

Was sind Quanten?

Welchen Zusammenhang hat Quantenphysik mit der wirklichen Welt?

Wie ist die Materie aufgebaut?

Was ist die Heisenbergsche Unschärferelation?

Was hat es mit Schrödingers Katze auf sich?

Wird das Weltgeschehen durch verborgene Parameter determiniert?

Wo liegt die Grenze zwischen Mikro- und Makrokosmos?

...etc.

Dies sind Fragen, welche von ganz grundlegender, fundamentaler Bedeutung sind, und zwar nicht nur für die moderne Physik allein, sondern auch in erheblichem Maße für unser allgemeines Bild von der Welt und dem Wesen der Natur, für unser beständiges Vertrauen in den gesunden Menschenverstand und die Erkenntnisfähigkeit des Menschen an sich. Epistemologische Paradigma, also erkenntnistheoretische Grundansichten und Weltbilder, wurden in vergangenen Tagen maßgeblich durch rein philosophische Beweggründe und Denkansätze geprägt und bestimmt. Dass dies eine nur allzu verständliche und natürliche Herangehensweise an die grundlegendsten Fragen der Existenz und der Realität der Welt ist, scheint sehr einsichtig. Doch in demselben Maße wie in der Vergangenheit mehr und mehr die Wissenschaften mystische und religiöse Scheinerklärungen durch rationale Erklärungen zu verdrängen vermochten, so muss auch in der heutigen Zeit wieder ein epistemologischer Paradigmenwechsel stattfinden. Auch wenn es uns nicht allzeit bewusst ist, so ist uns – ungeachtet aller modernen und fundamentalen paradigmatischen Erkenntnisse durch die moderne Physik – immer noch ein Weltbild zu Eigen, das dem aus Newtonschen Zeiten um 1700 ähnelt. Wir hegen eine mechanistische, deterministische Weltensicht, bestimmt und bestätigt durch uns umgebende Geschehnisse des Alltags.

Ein Billardtisch beispielsweise vereinigt all unsere weltanschaulichen Vorurteile: In einem trivialen Zusammenspiel von Stoßkräften laufen unter der Einhaltung von Energie- und Impulserhaltungssätzen einfach berechenbare schräge Stöße ab, die eventuell noch von Rotationsbewegungen begleitet werden. Die klassische, mechanisch-deterministische Welt so wie

wir sie kennen. Doch ist dieses mechanistische Naturbild wirklich zutreffend? Verhalten sich alle Naturobjekte so simpel und vorhersagbar wie Billardkugeln?

Mit diesen Grundfragen im Hinterkopf, soll es im vorliegenden Buch darum gehen einen kleinen Einblick in die geheimnisvolle, wunderbare und faszinierende Welt der Quanten zu erhalten, und auf der ewig währenden Suche nach dem Innersten der Dinge dem letztendlichen Grundprinzip der Natur ein klein wenig näher zu kommen.

Was sind Quantenobjekte?

Doch um ganz vorne zu beginnen: Was ist nun eigentlich Quantenphysik? Nun, die *Quantenphysik* ist das Gebiet der Physik, welches sich mit den Verhaltensweisen von Quantenobjekten beschäftigt. Soweit so gut. Doch was ist denn ein Quantenobjekt überhaupt?

Unter dem Begriff *Quantenobjekt* versteht man für gewöhnlich atomare oder subatomare Objekte, also beispielsweise Elementarteilchen, wie die bekannten Atombausteine Elektron, Proton und Neutron. In einer allgemeineren Formulierung lässt sich festhalten, dass sowohl Materie als auch Licht im kleinen Maßstab als Quantenobjekte zu bezeichnen sind. Allerdings können sich auch wesentlich größere Ansammlungen von mehreren Dutzend Atomen noch wie Quantenobjekte verhalten. Genaueres werden wir sicherlich in den folgenden Kapiteln erfahren.

Wozu betreibt man Forschung im Bereich des Mikrokosmos?

Nachdem jetzt einigermaßen geklärt wäre, worum es sich bei der Quantenphysik handelt, sollte vielleicht interessant sein, aus welchem Grund man sich überhaupt mit den Verhaltensweisen von Mikroobjekten beschäftigt und im Bereich der kleinsten Teilchen Forschung betreibt. Es ist wohl kaum zu leugnen, dass ein Grundlagenforscher auf dem Gebiet der Quanten-, Teilchen- oder Hochenergiephysik nicht primär durch den Hintergedanken der praktischen Anwendbarkeit seiner Forschungsergebnisse vorangetrieben wird, als vielmehr durch die unerschöpfliche Neugierde und das innige Verlangen nach Erkenntnis und Verständnis der spannenden und ergreifenden Welt um ihn herum. So sieht sich ein die physikalischen Grundlagen erforschender Quantenphysiker auch permanent auf dem engen Grad zwischen zweckfreier und sinnfreier Forschung balancieren. Für den wahren,

leibhaftigen Naturwissenschaftler sollte dies jedoch kein Hindernis seiner Tätigkeit darstellen. Die begehrten Erkenntnisse nämlich, nach denen strebend geforscht wird, erschließen ihm letztlich nichts weniger als das bezaubernde Wesen der Natur selbst. Tatsachen wie jene, dass ein Quantenobjekt „auf zwei Hochzeiten gleichzeitig tanzen“ kann, oder dass Objektivität im Mikrokosmos nicht zu existieren scheint, sowie die Einsicht, dass die Existenz der von Einstein vehement abgestrittenen „spukhaften Fernwirkungen“ unabwendbar Teil der physikalischen Realität ist, machen die quantenphysikalischen Forschungen um einen unermesslichen Faktor spannender, als jeder noch so gute, jedoch komplett fiktive Krimi. Ist es doch gerade das Faszinierende an der Quantenphysik, dass es sich dabei nicht um utopische Science Fiction, sondern um die Wirklichkeit höchst persönlich handelt. In der Mikrowelt gehört schließlich so einiges zum „Quanten-Alltag“, was aus unserer Sicht der Dinge sogar für Star-Trek-Abenteuer zu obskur und albern wirkt. Oder um es mit den präzisen und markanten Worten des Quantenphysikers DANIEL GREENBERGER¹ auszudrücken:

„Einstein sagte, die Welt kann nicht so verrückt sein. Heute wissen wir, die Welt ist so verrückt.“

Ist die Physik ein abgeschlossenes Gedankengebäude?

In der Schule wird, wie Sie vielleicht schon selbst erfahren mussten, nur allzu oft der Eindruck vermittelt, die Physik sei ein vollendetes und abgeschlossenes Gedankengebäude, bestehend aus einer Unzahl von Gleichungen, welche irgendwelche idealisierten Experimente beschreiben mögen. Die Herausforderung an den Physiker, so scheint es, besteht nur darin, für den jeweils vorliegenden physikalischen Fall die passende Formel aus der Formelsammlung heraus zu kramen, um dann den Computer mit eben jener Formel und gewissen Versuchsdaten zu füttern, so dass letztendlich der Rechner die korrekt ermittelten Ergebnisse wieder ausspuckt. Dem ist jedoch – um es ausdrücklich zu betonen – wahrlich *nicht* so!

MAX PLANCK (1858–1947), den man wohl vollkommen zu Recht als den Vater der Quantentheorie bezeichnen kann, zweifelte einst als junger Mann daran, ob es denn überhaupt vielversprechend sei Physik zu studieren, obgleich er ein starkes Interesse für diese fundamentalste aller

¹ A. Zeilinger: *Einsteins Schleier* (C. H. Beck) 2003; S. 7

Naturwissenschaften empfand. Gutmütig riet ihm daraufhin ein bekannter Physikprofessor davon ab, indem er betonte, in der Physik wäre schon alles Wesentliche erforscht und entdeckt worden. Es ginge nun noch um ein paar unwesentliche Details, die noch geklärt werden müssten. PLANCK tat jedoch wahrhaftig gut daran diesen freundlich gemeinten Ratschlag zu ignorieren, denn seine späteren Arbeiten sollten eine grundlegend neue Ära im Kanon der Physik einläuten, ja eine physikalische Revolution auslösen. Im Jahre 1900 schließlich entdeckte PLANCK eine zuvor ungeahnte Facette der Natur: die Quantisierung im Mikrokosmos.

Was geschieht in der Welt des Mikrokosmos?

Es ist genau diese Frage, die Frage nach dem Innersten der Dinge, nach den grundlegenden Naturprinzipien, nach dem Wesen des physikalischen Aufbaus und Verhaltens des Kosmos an sich, um die das Hauptthema dieser Exkursion in die Welt des Mikrokosmos kreist und die sich wie ein roter Faden durch jedes einzelne Kapitel hindurch zieht.

Auf unserer sich nun unmittelbar anschließenden Reise durch die Quantenphysik, die faszinierende Welt des Mikrokosmos, werden wir mit Sicherheit – insofern möchte ich Sie schon an dieser frühen Stelle vorwarnen – an so manche Verständnis- und Erkenntnisgrenze stoßen. Doch liegt dies weder an Ihnen noch an der zur Betrachtung verwendeten physikalischen Theorie, als vielmehr an der Natur des Betrachtungsgegenstandes selbst. Die Welt des Mikrokosmos spielt ein subtiles und zumal verwirrendes Spiel. Quantenobjekte sind und bleiben auch nach den Jahrzehnten intensiver und erfolgreicher Forschung unabwendbar ein ewiges Rätsel, der Inbegriff des Widersprüchlichen, Undurchschaubaren und Geheimnisvollen. So voller ungeahnter Paradoxa und Überraschungen ist die Quantenphysik, dass man bisweilen die Zuversicht in die eigene Erkenntnisfähigkeit diskreditiert sehen muss.

Doch meiner Meinung nach macht gerade diese (scheinbare) epistemologische Unnahbarkeit und letztendliche Rätselhaftigkeit der Quantenwelt ihren fesselnden, alles in ihren Bann ziehenden Reiz aus.

1

Licht und Materie

Was ist eigentlich Licht?

Die interessante Frage nach der Natur des Lichts stellten sich schon einst die alten Griechen. Doch so simpel diese kurze Frage auf den ersten Blick auch anmuten mag, so unermesslich schwierig ist hingegen ihre eindeutige Beantwortung. Im Laufe der Jahrhunderte zeigte sich, dass die Antwort auf jene Frage während der historischen Entwicklung der Physik immer wieder einem stetigen Wechsel unterzogen war. Sie mögen sich nach dem Warum fragen. Dies liegt wohl daran, dass das Licht eine verflucht schizophrene Sache ist. Doch Näheres hierzu werden wir im weiteren Verlaufe des Buches erfahren. Wollen wir uns erst einmal der herkömmlichen, klassischen Definition des Lichts widmen.

Doch bevor wir damit beginnen, sollte noch schnell geklärt sein, was sich in der Physik hinter dem Adjektiv „klassisch“ überhaupt verbirgt. Sie werden sehen, dass wir im weiteren Verlauf des Öfteren physikalische Sachverhalte aus der *klassischen Sichtweise* betrachten werden, oder dass wir die Voraussagen der *klassischen Theorie* analysieren werden usw. Dabei drückt die Verwendung des Wörtchens „klassisch“ immer aus, dass es sich um die Sichtweise des im jeweiligen Fall vorliegenden Sachverhalts im Sinne der *klassischen Physik* handelt, wobei durch den Begriff der klassischen Physik alle Teilgebiete der Physik (d. h. die klassische Mechanik NEWTONS, die Elektrodynamik MAXWELLS etc. bis zur Relativitätstheorie EINSTEINS) ausschließlich der Quantenphysik gemeint werden. Exklusive der Quantenphysik deshalb, da letztere einen zur klassischen Physik gravierend differierenden Charakter trägt. Mehr dazu jedoch ebenfalls später. Dies sollte vorerst nur klären, dass alle nicht quantenmechanischen Theorien, die wir besprechen werden, durch das Adjektiv „klassisch“ gekennzeichnet werden, so dass wir die älteren, nicht quantenmechanischen (also klassischen) von den quantenmechanischen (also nicht klassischen) Theorien auch begrifflich unterscheiden können.

Beginnen wir nun mit der klassischen Theorie des Lichts. Würden wir hierzu ein Physiklexikon befragen, so fänden wir wahrscheinlich eine der folgenden Definition ähnliche Aussage:

Als Licht wird der Teil des elektromagnetischen Strahlungsspektrums bezeichnet, der eine Wellenlänge von $360 \cdot 10^{-9}$ m bis $780 \cdot 10^{-9}$ m aufweist.

Nun ja, was können wir damit anfangen? Ich werde versuchen es etwas anschaulicher darzustellen. Der Raum (und zwar jeglicher Raum, so-

wohl das Vakuum selbst als auch der mit Erdreich oder Luft angefüllte) ist durchzogen von dem *elektromagnetischen Feld*. Dieses Feld könnte man sich etwas verbildlicht so vorstellen wie eine unermessliche Anzahl von Seilen, die in alle Richtungen durch den Raum gespannt sind. Schlägt man nun an einem Raumpunkt die Seile an, so breitet sich die Störung in Form einer dreidimensionalen Kugelwelle an den Seilen durch den Raum aus. Die Seile sind somit das Trägermedium für die Welle, so wie die Luft das Trägermedium der Schallwellen ist.

Mit dem Licht verhält es sich ganz ähnlich: Durch eine periodische Schwingung eines geladenen Teilchens werden die es umgebenden elektrischen und magnetischen Felder ebenfalls in Schwingungen versetzt. Diese Schwingungen des elektromagnetischen Feldes nennen wir *elektromagnetische Wellen*. Dabei ist die elektromagnetische Welle an sich einfach als eine Schwingung des elektromagnetischen Feldes zu verstehen. Die Schwingungsenergie der Welle breitet sich als eine Störung des elektromagnetischen Feldes aus.

Die Existenz der elektromagnetischen Wellen wurde erstmalig durch die von JAMES MAXWELL (1831–1879) aufgestellten, für die klassische Elektrodynamik fundamentalen Gleichungen vorausgesagt, welche nach ihrem Entdecker auch als *Maxwellsche Gleichungen* bezeichnet werden. Sie beschreiben auf mathematischer, theoretischer Ebene die Dynamik elektrischer und magnetischer Felder. Experimentell nachgewiesen werden konnten die elektromagnetischen Wellen erst ca. 27 Jahre nach MAXWELLS theoretischer Entdeckung. HEINRICH HERTZ (1857–1894) war es, der sie 1887 in Versuchen eigenständig erzeugen und nachweisen konnte.

Aber was schwingt da wie?

Man könnte sich dennoch fragen, wie man sich diese schwingenden magnetischen und elektrischen Felder genau vorzustellen hat. Zu diesem Zweck wird in Abb. 1.1 eine anschauliche Darstellung der elektromagnetischen Welle angeführt. Hieran soll der schematische Aufbau einer solchen Welle verdeutlicht werden.

Wie sich gut erkennen lässt, hat die elektromagnetische Welle zwei Schwingungsrichtungen. Der elektrische und der magnetische Feldvektor der elektromagnetischen Strahlung stehen nämlich immer senkrecht aufeinander. Des Weiteren schwingen die beiden Felder in Phase, d. h. sie nehmen stets zu gleichen Zeiten die maximale *Elongation* (= Auslenkung von der Ruhelage) ein und durchqueren gleichzeitig die Ruhelage. So schwin-

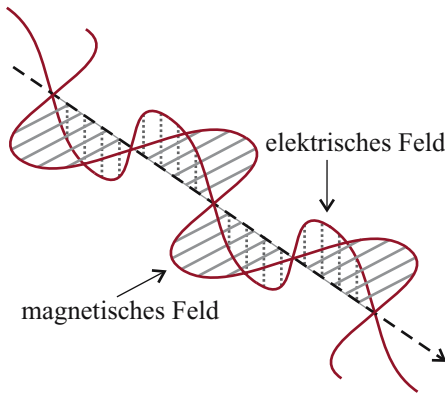


Abb. 1.1. Darstellung der senkrecht aufeinander stehenden Schwingungsebenen einer elektromagnetischen Welle

gen elektrisches und magnetisches Feld der Welle in einem Winkel von 90° und stehen dabei gleichfalls senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

Die elektromagnetischen Wellen gehören deshalb (ebenso wie Seilwellen oder Wasserwellen) zu den *Transversalwellen*, deren Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle steht, im Gegensatz zu den *Longitudinalwellen* (wie z. B. dem Schall), deren Schwingungsrichtung in Ausbreitungsrichtung liegt. Ein besonderes Charakteristikum der Transversalwellen ist, dass sie eine Eigenschaft besitzen, die sich *Polarisation* nennt. Schwingt der elektrische Feldvektor der elektromagnetischen Welle zudem in einer Ebene, so spricht man von einer *linear polarisierten* Welle. Das Licht der Sonne beispielsweise ist zwar nicht polarisiert, doch schickt man das Sonnenlicht durch einen Polarisationsfilter, so lässt sich daraus linear polarisiertes Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung erhalten.

Eine weitere grundlegende Eigenschaft der elektromagnetischen Welle sind ihre *Wellenlänge* λ und ihre *Frequenz* ν . Die Wellenlänge ist einfach der Abstand zweier identischer Punkte der Welle, also z. B. die Strecke, von einem Wellenberg zum nächsten (siehe Abb. 1.2). Ferner gibt die Frequenz der Strahlung die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde an. Die Wellenlänge und Frequenz einer Welle verhalten sich umgekehrt proportional zueinander. Interessanterweise ergibt sich, wenn man Frequenz ν und Wellenlänge λ einer Welle multipliziert, als Produkt die *Ausbreitungsgeschwindigkeit* c der Welle:

$$c = \nu \lambda . \quad (1.1)$$

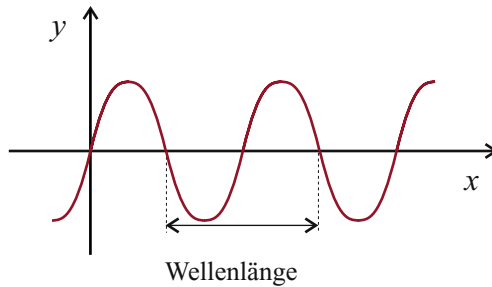


Abb. 1.2. Die Definition der Wellenlänge

Bei der elektromagnetischen Strahlung ist dies bekanntlich die Lichtgeschwindigkeit, für die sich gemeinhin das Symbol c eingebürgert hat. Wenn demzufolge im weiteren Verlauf des Buchs in Formeln der Buchstabe c auftauchen sollte, so handelt es sich dabei stets um die konstante *Vakuumlichtgeschwindigkeit*, deren Wert bei etwa $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ liegt. Sollte dies einmal nicht der Fall sein, so wird ausdrücklich darauf hingewiesen.

Was sind Frequenz und Wellenlänge des Lichts?

Theoretisch gesehen gibt es unendlich viele mögliche Frequenzen bzw. Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung. Das kontinuierliche *Spektrum der elektromagnetischen Strahlung* enthält alle Frequenzen bzw. Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung. Wie in der logarithmisch aufgetragenen Wellenlängen- und Frequenzskala aus Abb. 1.3 zu erkennen ist, reicht das *Strahlungsspektrum* von der kurzwelligen harten Gammastrahlung bis zum langwelligen Radiowellenbereich. Im Zwischenbereich dieser zwei Grenzwellenlängen befindet sich der Reihenfolge nach die harte und weiche Röntgenstrahlung, die ultraviolette Strahlung, worauf der winzige, für uns Menschen sichtbare Spektralbereich des Lichts folgt, dann die infrarote Strahlung, die Wärmestrahlung und schließlich die Mikrowellenstrahlung. Es ist recht erstaunlich, dass all jene Strahlungsarten gewissermaßen wesentlich dasselbe sind wie das für uns sichtbare Licht, denn sie unterscheiden sich ausschließlich in ihrer Wellenlänge bzw. Frequenz. Schließlich liegt es ja nur an der besonderen Beschaffenheit unserer Augen, nur für diesen bestimmten, sichtbaren Spektralbereich empfindlich zu sein, so dass wir ihn sehen können.

Jetzt könnte man die Frage stellen, wie es zu diesen unterschiedlichen Frequenzen der elektromagnetischen Wellen kommt. Nun, der wesentliche

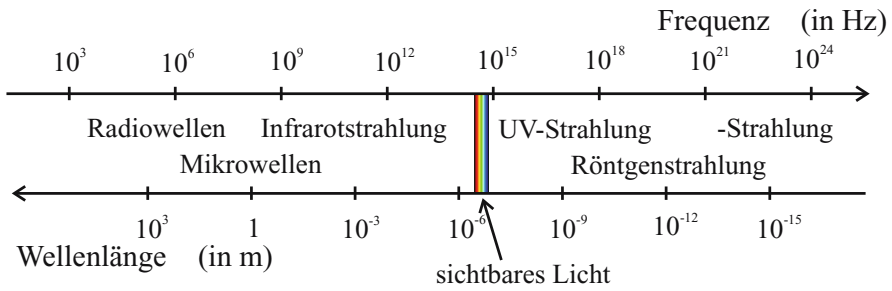


Abb. 1.3. Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, aufgetragen über der Frequenz ν und der Wellenlänge λ .

Unterschied liegt in der Art des Entstehungsprozesses der Strahlung. So ist die Quelle der harten Gammastrahlung ein angeregter, radioaktiver Atomkern, der durch die Emission von Gammaquanten einen energetisch günstigeren Zustand erlangen kann. Radiowellen hingegen entstehen durch einen schwingenden elektrischen Dipol, einen Leiter mit offenem Ende, in den eine elektrische Wechselspannung eingespeist wird. Alles in allem sind – abgesehen von der sich unterscheidenden Wellenlänge – jedoch alle in Abb. 1.3 abgebildeten Strahlungsarten physikalisch wesensgleich, d. h. sie folgen den identischen optischen Gesetzen, wie es auch unser sichtbares Licht tut.

Was ist eigentlich Materie?

Zunächst könnte man etwas dem Folgenden Ähnliches meinen: „*Ist doch klar, Materie ist halt materiell oder substanziell, etwas, das man anfassen kann. Im Gegensatz dazu stehen Mikrowellen und Wärmestrahlung, oder auch Licht. Ein Stein ist offensichtlich materiell: Er lässt sich hoch werfen und plumpst auf den Boden. Das geht mit Licht nicht . . .*“

Aber wie verhält es sich dann z. B. mit einem Elektron? Lässt sich das anfassen? Oder ein Alphastrahl, der aus Heliumkernen besteht. Ist der gleich immateriell, nur weil er sich nicht so gut betasten und direkt ansehen lässt? Wie wir sehen, ist diese Frage ein wenig verzwickter und um ehrlich zu sein, gibt es auch gar keine präzise physikalische Definition für den Begriff *Materie*. Natürlich könnte man auch sagen, Materie ist alles, was eine Masse besitzt, doch wissen wir seit EINSTEINS Entdeckung der *Energie-Masse-Äquivalenz*, dass

$$E = mc^2, \quad (1.2)$$

d. h. jeder Energie E eine Masse m äquivalent ist, wobei der Faktor Lichtgeschwindigkeit zum Quadrat nur einen etwas „speziellen Umrechnungsfaktor“ darstellt. Jeder Energie kann also eine Masse und jeder Masse eine Energie zugeordnet werden. Wie soll man da noch zwischen massebehaftet und nicht-massebehaftet unterscheiden?

Und dennoch gibt es trotz dieser enormen Definitionsschwierigkeiten eine Möglichkeit diesen Begriff festzulegen: Mit Materie lassen sich all die Elementarteilchen bezeichnen, welche Ruhemasse besitzen. Aber was ist Ruhemasse? Als *Ruhemasse* bezeichnet man die Masse eines Teilchens, wenn dieses sich nicht bewegt, da jedes bewegte Teilchen nach der *speziellen Relativitätstheorie* einen *Massenzuwachs* erfährt, so dass seine so genannte *dynamische Masse* über der Ruhemasse liegt. Licht oder, allgemeiner gesprochen, elektromagnetische Strahlung besitzt hingegen keine Ruhemasse, sondern nur eine dynamische Masse. Somit kann man beispielsweise zwischen ruhemassebehafteter Materie und nicht ruhemassebehafteter Strahlung unterscheiden.

Woraus besteht ruhemassebehaftete Materie?

Wie freilich heutzutage allgemein bekannt ist, besteht jegliche uns umgebende Materie aus winzigen Teilchen: den *Atomen*. Schon im alten Griechenland formulierten die Philosophen LEUKIPP und DEMOKRIT (beide ca. 500 v. Chr.) ihre Atomhypothese, nach der alles letzten Endes aus den unteilbaren Partikeln aufgebaut sein sollte.

Auch wenn diese frühen, philosophischen Vermutungen aus heutiger Sicht noch ziemlich unbegründet scheinen mögen, konnten jene Annahmen wesentlich später u. a. durch den britischen Chemiker JOHN DALTON (1766–1844) bestätigt werden.

Daraufhin schloss sich eine stetige Reihe verschiedener, verbesserter Atommodelle an: Das frühe, vom englischen JOSEPH THOMSON (1856–1940) entwickelte so genannte *Rosinenkuchenmodell* besagt, das Atom bestehe aus einem positiv geladenen *Materieteig*, in den die negativen (übrigens ebenfalls von ihm entdeckten) Elektronen eingebettet seien.

Doch wenig später fand der Neuseeländer ERNEST RUTHERFORD (1871–1937) bei seinen Streuexperimenten an Goldfolien heraus, dass das Atom zum größten Teil leer sein musste und es einen extrem kleinen und kompakten, positiv geladenen Kern besaß. Die negativ geladenen *Elektronen* sollten hingegen in der Atomhülle in unterschiedlichen Abständen um den Kern kreisen, ähnlich einem Miniatur-Sonnensystem, bei dem der Atomkern die

Sonne und die Elektronen die Planeten ersetzen. Es wurde demnach offenkundig, dass jenes fälschlicherweise „atomos“ benannte Partikelchen sehr wohl teilbar war. Das Atom konnte daher nicht mehr länger als elementar, da schließlich teilbar, angesehen werden.

So formiert sich gezwungenermaßen erneut die Frage, ob diese Atom-„Bruchstücke“ denn ihrerseits elementarer Natur seien. Doch, wie sich herausstellte, sind sie dies keineswegs, denn der Atomkern besteht aus zwei weiteren Sorten von Teilchen: den positiv geladenen *Protonen* und den ungeladenen, also neutralen *Neutronen*. Und auch diese Partikel sind noch nicht elementar, denn sie bestehen ihrerseits aus Teilchen namens *Quarks*, eine Bezeichnung die auf den amerikanischen Teilchenphysiker MURRAY GELL-MANN (geb. 1926) zurückgeht. Nach dem heutigen *Standardmodell der Elementarteilchenphysik* bestehen demgemäß Protonen p (uud) aus zwei up-Quarks und einem down-Quark und Neutronen n (udd) aus zwei down-Quarks und einem up-Quark. Genauer gesagt bilden die elementaren Quarks besagter Nukleonen zusammen mit den Austauschteilchen (Wechselwirkungsbosonen) der starken Kernkraft vielmehr ein kompliziertes, konfusees Gemenge aus Quarks, Antiquarks und verschiedenen Gluonen, ein so genanntes *Quark-Gluonen-Plasma*, doch dürfte dies nichts Wesentliches an der Kernaussage ändern.

Soweit wir bis jetzt Bescheid wissen, sind diese Quarks jedoch wahrhaftig elementar, in dem Sinne, dass sie nicht aus anderen Teilchen aufgebaut sind. Und es gibt auch gute Gründe, warum dies der Fall sein sollte. Aktuell sind daher als Atombausteine nur *up-* und *down-Quarks* und *Elektronen* als wirklich elementare Teilchen zu bezeichnen. Dennoch werden – scheinbar paradoxerweise – sowohl Protonen als auch Neutronen als Elementarteilchen bezeichnet, obwohl sie, wie wir erfahren haben, eigentlich nicht wirklich als elementar gelten können.

Jedoch muss man nachhaltig betonen, dass „aus anderen Teilchen aufgebaut sein“ nicht gleich „teilbar sein“ bedeutet. Wie soll man das verstehen? Nun, die Tatsache, dass z. B. ein Proton nicht weiter teilbar ist, obwohl es aus den sehr viel kleineren Quarks besteht, basiert auf einer Eigenschaft der Kraft, welche das Proton bzw. das Neutron zusammenhält. Jene Kraft, die *starke Wechselwirkung* (eine der vier *fundamentalen Wechselwirkungen* der Natur) genannt wird, sorgt dafür, dass sich die Quarks niemals isoliert aufhalten können. Demzufolge tauchen sie nur in Zweierverbänden, den *Mesonen*, oder in Dreierverbänden, den *Baryonen*, auf.

Das Phänomen, nach dem beispielsweise ein Zusammenschluss von drei Quarks zu einem Proton nicht trennbar ist, wird als *Quarkeinschluss* oder

quark confinement bezeichnet. Diese interessante und exotische Eigenschaft der starken Wechselwirkung stellt, nebenbei gesagt, noch immer ein aktuelles Rätsel in der Grundlagenforschung dar.

Neuere Experimente an den größten Teilchenbeschleunigern der Welt suchen seit zwei Jahren sogar intensiv nach einer weiteren Teilchenklasse, den Pentaquarks, die allerdings überaus instabil sein sollen. Dies sind Teilchen, die aus vier Quarks und einem Antiquark bestehen. Beispiele hierfür sind etwa das Θ^+ ($uudd\bar{s}$), das Θ_c^0 ($uudd\bar{c}$) oder das Ξ^{--} ($ddss\bar{u}$). Ihr stichhaltiger Nachweis gestaltet sich jedoch, wie die aktuellen Experimente zeigen, hinreichend schwierig. Bislang sprechen zehn Experimente für ihre Existenz, aber leider sprechen ebenso viele Versuche dagegen bzw. können nur Nullergebnisse vorweisen. Aus dieser prekären experimentellen Lage resultieren schließlich nachhaltige Zweifel, ob die bisherig angestellten Experimente überhaupt stichhaltig waren. Eine fundierte Bestätigung der fragwürdigen Existenz der Pentaquarks wird sich in zukünftigen Experimenten erst noch zeigen müssen.² Unstrittig ist hingegen, dass diese Erforschung der Pentaquarks neue, tiefere Erkenntnisse über die Natur der starken Wechselwirkung ermöglichen wird. Auch hinsichtlich des rätselhaften *quark confinement*s sind die Polyquarks natürlich von außerordentlichem Interesse.

Sind Elementarteilchen wirklich Teilchen?

Infolgedessen haben wir verstanden, dass Elementarteilchen nicht unbedingt elementar sein müssen, aber – um sich jetzt dem anderen Teil des Begriffes zu widmen – Teilchen sind sie doch mit Sicherheit, oder?

Nun ja, dies ist relativ! In der Elementarteilchenphysik versteht man unter dem Wort „Teilchen“ gewöhnlich etwas anderes, als wir es aus unserer natürlichen Alltagsumgebung der Größenordnung von 10^{-1} m gewohnt sind. Wenn wir uns ein „Teilchen“ vorstellen, haben wir dabei für gewöhnlich etwas Kleines, Kompaktes im Sinn, vergleichbar mit einem winzigen Metallkügelchen. Doch dieses Bild eines *klassischen Teilchens* verliert, während man auf der Größenskala abwärts wandert, an Verwendbarkeit. Stellen wir uns für einen Augenblick vor, wir wären Objekte des Mikrokosmos, die auf atomarer Skala der Größenordnung von 10^{-10} m zu Hause seien. Dann

² Eine schöne Darstellung der aktuellen schwankenden Nachweislage findet sich in K. Hicks: Experimental Search for Pentaquarks. Prog. Part. Nucl. Phys. 55 (2005); <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0504027> (2005).