

# Vorwort

Die Quantenmechanik ist nicht nur die erfolgreichste, sondern auch die grundlegendste Teildisziplin der modernen Physik, sofern man diejenigen Versuche der vereinfachten Beschreibung der Realität betrachten will, die gewissermaßen bereits zur Serienreife entwickelt sind. Zum einen bewährt sie sich von Beginn an ausnahmslos; es gibt Schätzungen, wonach inzwischen circa eine Milliarde physikalische Phänomene bekannt sind, die von der Quantenmechanik korrekt beschrieben werden, Ausnahmen sind bis jetzt keine aufgetreten. Andererseits liegen fundamentalere Theorien zur Zeit nur in Form von Spekulationen und teilweise auch mathematisch längst noch nicht verstandenen Modellen vor. Und selbst wenn man solche mitberücksichtigt, gibt es starke Indizien dafür, daß auch sie in wenn auch weitgehend noch nicht voll verstandener Form in die Quantenmechanik eingegliedert werden müssen.

Entsprechend groß ist die Verbreitung der Quantenmechanik in der theoretischen wie in der angewandten Physik. Ihre Einflußsphäre reicht vom mikroskopischen Bereich der Elementarteilchen und Atome über mesoskopische Skalen insbesondere bei der Festkörperphysik bis zu makroskopischen und sogar kosmologischen Sachverhalten, wenn auch letztere ebenfalls noch von spekulativer Art sind. Dabei hat die Theorie schon vor Jahrzehnten ihren rein akademischen Charakter abgelegt. Spätestens die nach dem zweiten Weltkrieg aufkommende und sich seither geradezu exponentiell entwickelnde Halbleitertechnologie machte aus der Quantenmechanik eine physikalische Grundlagendisziplin mit absoluter Alltagsbedeutung. Ein weiterer Entwicklungsschub in Richtung angewandte Physik ist seit über drei Jahrzehnten in Gestalt der experimentellen und inzwischen auch technischen Anwendung verschränkter Systeme zu verzeichnen, wobei mittlerweile in einzelnen Bereichen sogar kommerzielle Fortschritte gemacht werden. Die Grundlagenphysik kommt dabei auch nicht zu kurz, da hier vormals reine Gedankenexperimente nach und nach real durchführbar wurden und werden, und wieder bestätigen sich die Aussagen der Quantenmechanik ausnahmslos. Die Lehre zog mit etwas Verspätung nach; in der physikalischen Hochschulausbildung ist die Quantenmechanik seit mehreren Jahrzehnten ein zentraler Bestandteil, und in der Schulphysik läßt sie sich zumindest in der gymnasialen Oberstufe nicht umgehen. Soll das Abitur in irgendeiner Weise ein allgemeinbildender Schulabschluß bleiben, dann gehört dazu sicher auch, daß Schülerinnen und Schüler ein wenig von den Grundlagen der modernen Physik mitbekommen haben, wenn sie diesen Abschluß in der Tasche haben.

Gerade die Quantenmechanik ist hier jedoch ein besonders sperriger Gegenstand, denn bereits ihre elementarsten Grundlagen machen von mathematischen Hilfsmitteln Gebrauch, die eigentlich in der Schule nicht zur Verfügung stehen. Diesem Problem kann man begegnen, indem man sich weitgehend auf qualitative Betrachtungen beschränkt; das ist beispielsweise der Weg, der gegenwärtig in Baden-Württemberg vom neuesten Bildungsplan beschritten wird, und zwar gleichermaßen für die Basis- wie für die Leistungskurse [4]. Das Ergebnis ist dabei jedoch eine Minimallösung, die sich wesentlich auf sprachlich-qualitative Beschreibungen beschränkt und der Bedeutung des Gegenstands in keiner Weise gerecht wird. Wir zeigen hier, daß es auch anders geht. Das vorliegende Buch entstand auf der Basis eines vielfach erprobten Unterrichtsgangs in der Kursstufe des Gymnasiums und enthält neben den hierfür erforderlichen Unterrichtsmaterialien jede Menge Zusatz- und Hintergrundinformationen, die Kolleginnen und Kollegen in die Lage versetzen sollen, auf einer fundierten fachwissenschaftlichen Grundlage im Unterricht wesentlich über das im Bildungsplan geforderte hinausgehen zu können – oder auch einfach die eigenen Kenntnisse aufzufrischen oder zu erweitern. Als Voraussetzung genügt dabei in weiten Teilen die Schulmathematik, und wo das nicht der Fall ist, kommen nur die komplexen Zahlen dazu. Lediglich bei einigen Zusatzinformationen sowie im Anhang wird von höherer Mathematik Gebrauch gemacht; diese Abschnitte für besonders Interessierte sind für das Verständnis des restlichen Buches jedoch nirgends erforderlich.

Die Zielsetzung ist dabei eine zweifache. Zum einen möchten wir dazu beitragen, der Quantenmechanik in der Kursstufe des Gymnasiums die Bedeutung zu verschaffen, die ihr zusteht, indem wir alles bereitstellen, was man dazu braucht, und zwar sowohl im Unterricht als auch darumherum. Zum zweiten möchten wir für interessierte Kolleginnen und Kollegen die Möglichkeit schaffen, sich auf leicht zugängliche und für die eigene Arbeit gewinnbringende Weise in einem Umfang über die Quantenmechanik und insbesondere ihre konzeptionellen Grundlagen zu informieren, die bei Bedarf deutlich über das hinausgeht, was von Lehramtsphysikern üblicherweise erwartet werden darf, ohne dabei aber überzogene mathematische Kenntnisse vorauszusetzen. Natürlich sind beide Zielsetzungen eigentlich untrennbar miteinander verbunden, und im Idealfall bewirkt das eine automatisch das andere und umgekehrt.

Email-Adresse des Autors: Vogt.Markus@t-online.de

# Einleitung

Dieses Buch versucht dem Anspruch gerecht zu werden, im Sinne einer Handreichung Kolleginnen und Kollegen in möglichst umfangreicher Form notwendige und darüberhinaus interessante und vertiefende Informationen zum Thema Quantenmechanik in der Kursstufe des Gymnasiums bereitzustellen. Es will dabei eine Lücke schließen, denn nach unserer Erfahrung werden die vom schwerpunktmäßig immer weiter in den pädagogisch-didaktischen Bereich abwandernden Studium des gymnasialen Lehramts und von einschlägigen Schulbüchern gelieferten Voraussetzungen und Hilfestellungen nicht selten als unzureichend wahrgenommen. Gleichzeitig versucht das Buch auszuloten, wie weit man beim Unterrichten quantenmechanischer Inhalte nur unter Verwendung von Schulmathematik, ergänzt durch die komplexen Zahlen an wenigen optionalen Stellen, kommen kann. Wir erzielen dabei das Ergebnis, daß das unerwartet sehr weit ist. Entsprechend sehen wir als Zielgruppe natürlich insbesondere, aber keineswegs ausschließlich die Fachkolleginnen und -kollegen an den Gymnasien. Wir wenden uns gleichfalls ganz generell an all jene, die sich für Quantenmechanik interessieren, aber keine Experten dieses Gegenstands sind und mehr darüber erfahren möchten, ohne sich dem mathematischen Aufwand zu unterwerfen, der dafür auf der akademischen Ebene erforderlich ist.

Das Buch beschreibt einen hypothetischen Lehrgang der Quantenmechanik, der genau die erwähnten Voraussetzungen und keine weiteren verwendet, aber so tut, als seien eigentlich außer Physik (und eventuell Mathematik) keine weiteren Fächer zu unterrichten – mit anderen Worten, das vorgestellte Material ist für den tatsächlichen Unterricht viel zu umfangreich. Entsprechend besteht der Lehrgang aus vier hierarchischen, aber dennoch miteinander verwobenen Ebenen. Es sind das im einzelnen

1. ein minimaler Unterrichtsgang, mit dem man dem Bildungsplan der 12. und 13. Klasse in Baden-Württemberg genau gerecht wird;
2. ein dem Ziel der gymnasialen Allgemeinbildung verpflichteter, stark ausgebauter Unterrichtsgang, der ausnutzt, daß man im Fach Physik im Basis- wie im Leistungskurs genügend Spielraum hat, an geeigneten Stellen zumindest aus physikalischer Sicht deutlich über den Bildungsplan hinauszugehen;
3. Zusatzmaterial, das in Gestalt der komplexen Zahlen auch mathematisch ein wenig den schulischen Bereich überschreitet und als Wahlthemen oder in Vertiefungskursen unterrichtet werden kann (sofern man sich diesen Luxus leisten kann) und

4. für besonders interessierte Kolleginnen und Kollegen vertiefende Informationen und Spezialthemen, die definitiv nichts im Unterricht verloren haben, aber die dort besprochenen Sachverhalte ergänzen oder einfach besonders spannend sind. Dabei kommen im Anhang auch die Freunde der höheren Mathematik auf ihre Kosten.

Dabei ist das Buch so aufgebaut, daß es für diese Unterrichtsgänge beziehungsweise Kurse unmittelbar als Grundlage eingesetzt werden kann. Die zentralen Herleitungen, Merksätze und Beispiele sind durchgehend durch grau unterlegte Kästen kenntlich gemacht und bilden so den Lehrtext oder Tafelanschrieb für den Unterricht, und jeder Abschnitt schließt mit Aufgaben unterschiedlichen Schwierigkeitsgrades, für die im Anhang vollständige und ausführliche Lösungen zu finden sind. Die erwähnten Kurse umfassen folgende Abschnitte:

1. Minimalkurs: Kapitel 1, 2.1 - 2.3, 4.2
2. Ausführlicher Kurs: Kapitel 1, 2.1 - 2.3, 2.6, 3.1 - 3.3.2, 4.2, 5
3. Vertiefungskurs: Kapitel 1 - 3, 4.2, 5, außerdem 6 - 8 Abschnitte nach Wahl

Der Unterrichtsgang, aus dem das vorliegende Buch entstand, orientiert sich seit seiner allerersten Durchführung vor 19 Jahren an zwei didaktischen Grundüberzeugungen, die ich nach wie vor für zentral halte und die daher auch hier konsequent durchgehalten werden:

1. Es werden nur in der Physik wohletablierte Begrifflichkeiten verwendet und jegliche „Eigenzüchtungen“ der Schulphysik konsequent vermieden.
2. Die Quantenmechanik wird axiomatisch aufgezeigt.

Während die erste selbstverständlich sein sollte, darf die zweite wohl etwas näher begründet werden. Im einzelnen gibt es drei gewichtige Argumente für eine solche Vorgehensweise.

- Es ist eine der wesentlichen Eigenschaften der Quantenmechanik, etwas grundlegend neues, nicht aus der klassischen Physik ableitbares darzustellen. Diesem Sachverhalt wird in der Schule genauso wie in der harten wissenschaftlichen Realität nur eine axiomatische Grundlegung und ein darauf basierender deduktiver Aufbau gerecht. Irgendwelche induktiven Zugänge, Plausibelmachen mit Hilfe klassischer Vorstellungen oder sonstige angebliche Herleitungen, wo es strenggenommen keine gibt, führen bei Schülern zwangsläufig zu Fehlvorstellungen, die ihnen schwer wieder abzugewöhnen sind. Hierzu gehören insbesondere solche Dinge wie die „Herleitung“ der Schrödingergleichung aus dem Energiesatz, der dreidimensionale Potentialtopf als Behelfsmethode zur Berechnung der Energieniveaus des Wasserstoffatoms, oder, am schlimmsten von allen, das Bohrsche Atommodell. Die Schrödingergleichung kann man nicht herleiten, sie muß postuliert werden, andernfalls hantiert man hier genau wie beim Potentialtopf-, „Modell“ der Schulbuchliteratur mit potentieller und kinetischer Energie von Systemen herum, die sich in Zuständen befinden, in denen sie so etwas überhaupt nicht besitzen. Und der Schaden, den die Elektronenbahnen des Bohrschen Atommodells anrichten, ist wissenschaftlich dokumentiert und kaum zu reparieren.

- Eine grundlegende Erfahrung, an der keiner vorbeikommt, der sich in diese Thematik einarbeitet, ist die Erkenntnis, daß man Quantenmechanik nicht verstehen, sondern *nur akzeptieren* kann – sofern man mit „Verstehen“ das sich Vorstellen eines Sachverhalts in klassischen Bildern meint. Die Notwendigkeit, sich an etwas völlig neues zu gewöhnen, kann nur durch *vom Himmel fallende physikalische Grundgesetze* deutlich genug hervortreten.
- Das *Postulieren von physikalischen Prinzipien* ist exemplarisch für die Vorgehensweise der theoretischen und mathematischen Physik. Weitere Beispiele neben der Quantenmechanik sind alle Eichtheorien, bei denen das Eichprinzip selbst sowie die jeweils verwendeten Lagrange-Dichten axiomatisch vorausgesetzt werden. Abgesehen davon, daß sich diese Verfahrensweise hervorragend bewährt, was für sich allein schon ein überzeugendes Argument zu ihrer Rechtfertigung wäre, liegt ein wesentlicher Grund dafür, axiomatisch vorzugehen, offensichtlich in der Natur selbst. Diese scheint uns bei der Konstruktion physikalischer, und damit in mathematischer Sprache abgefaßter Theorien zu zwingen, *ganz spezielle mathematische Strukturen zu verwenden* und keineswegs etwa irgendwelche völlig willkürlichen. Physikalische Theorien legen darüberhinaus sehr häufig ein ganz erstaunliches Eigenleben an den Tag in dem Sinn, daß Strukturen, die zunächst scheinbar aus rein mathematischen Gründen und teilweise sogar ungewollt oder unwillkommen in ihnen auftauchen, später in neuentdeckten physikalischen Objekten oder Phänomenen wiedergefunden werden. Prominente Beispiele hierfür sind der Maxwell'sche Verschiebungsstrom oder die kosmologische Konstante. Die Kunst scheint darin zu liegen, solche Strukturen und die ihnen vorgeordneten Axiome zu *erraten*.

Damit favorisieren wir für die Quantenmechanik einen völlig anderen Zugang als für alle sonstigen Bereiche der Physik, doch das läßt sich selbst wieder zu einer Grundregel der Physikdidaktik erheben. Generell sollte nämlich folgendes Prinzip eingehalten werden: In dem Maße, wie die Einführung klassisch-physikalischer Sachverhalte operational erfolgen sollte, ist bei der Einführung quantenmechanischer Sachverhalte axiomatisches Vorgehen angebracht.

Der Aufbau des Buches orientiert sich im wesentlichen, aber nicht vollständig, an der üblichen Reihenfolge in den einschlägigen Schulbüchern. Der hauptsächlichste Unterschied betrifft die zeitliche Abfolge der typischen einführenden Schulversuche in Abschnitt 1.2. Während üblicherweise zuerst der Photoeffekt und anschließend die Elektronenbeugungsröhre behandelt wird, wählen wir, einem Vorschlag von H. Fischler folgend, die umgekehrte Reihenfolge [436]. Das rechtfertigt sich dadurch, daß die Vorstellung von Photonen als quantisierte Konstituenten elektromagnetischer Felder für die meisten Schüler durch sehr verbreitete, wenn auch überwiegend fehlerhafte Präsenz in Unterricht und Medien vermeintlich nichts Neues darstellt; die Beobachtung wellenähnlichen Verhaltens bei etwas, das man sich bisher nur als Teilchen, mit anderen Worten als winzige Kügelchen vorgestellt hat, zieht einen viel größeren Überraschungseffekt nach sich und leitet genau das wesentliche Lernziel jeder Unterrichtseinheit über Quantenmechanik ein, nämlich festgefügte physikalische Weltbilder zum Einsturz zu bringen. Das bewährt sich seit Jahren bestens. Zusätzlich werden dabei die Photonen von einer Aufgabe befreit, die ihnen in der Schulphysik praktisch flächendeckend zugemutet wird, die sie aber nicht leisten können, nämlich diejenige, einen leicht faßlichen ersten Zugang zur Quantenme-

chanik zu liefern. Photonen sind Objekte der *Quantenfeldtheorie*, nicht der elementaren Quantenmechanik, was eigentlich die Frage aufwerfen sollte, ob sie überhaupt sinnvoll in der Schulphysik unterzubringen sind<sup>1</sup>. Kommt man hierbei zum Resultat, das sei der Fall – so wie wir auch –, ist dabei äußerste Vorsicht geboten, wie weiter unten ausführlich gezeigt wird.

Entgegen der immer wieder zu hörenden Forderung, der Welle-Teilchen-Dualismus müsse überwunden werden, was immer das auch heißen soll, setzen wir denselben hier in Kapitel 2 an den Anfang und bringen ihn damit in die Position eines nicht weiter hinterfragbaren Grundprinzips der Quantenmechanik. Denn seit den 90er Jahren weiß man, daß es sich dabei genau um ein solches handelt, und nicht etwa, wie man zuvor jahrzehntelang dachte, um eine Konsequenz der Unschärferelation. Die besonderen nichtklassischen Eigenschaften von Quantenobjekten lassen sich in keiner anderen Weise vergleichbar eindrucksvoll und gleichzeitig elementar vermitteln. Wir orientieren uns hier zunächst am Münchner Unterrichtskonzept der Quantenmechanik von Müller und Wiesner [868], [869], gehen aber im weiteren Verlauf bei der formalen Beschreibung des Welle-Teilchen-Dualismus wesentlich darüber hinaus. Hier bewährt sich die Einführung formaler Konzepte von Englert, Greenberger und anderen in die Schulphysik, die bis jetzt auch in der Lehrbuchliteratur der Universität noch keinen Eingang gefunden haben [405], [407], [517], [640].

In Kapitel 3 erfolgt eine stark elementarisierte Betrachtung der Axiome der Quantenmechanik in der von Neumannschen Hilbertraum-Formulierung, ohne dabei natürlich irgendwelche funktionalanalytischen Begriffe an irgendeiner Stelle zu verwenden. Gelegentlich findet man Versuche, Operatoren in den gymnasialen Physikunterricht einzuführen; ich halte das für völlig überzogen. Dennoch sollte man die Funktionalanalysis unausgesprochen im Blick behalten. Das hat den Vorteil, daß man mit einem stabilen, physikalisch hieb und stichfesten begrifflichen Fundament arbeitet. Alle anderen Axiomatiken der Quantenmechanik, insbesondere auch tiefergehende, bei welchen die Hilbertraumstruktur selbst mit abgeleitet werden soll, sind für die Schule unbrauchbar.

Kapitel 4 widmet sich den Unschärferelationen. Hier herrscht leider in der Schulbuchliteratur nicht selten eine gewisse Schlamperei, teilweise in Verbindung mit unklaren oder sogar unkorrekten Formulierungen. Dabei bleibt insbesondere häufig unklar, was unter dem Begriff „Unschärfe“ (oder „Unbestimmtheit“, wie gelegentlich dazu gesagt wird) überhaupt zu verstehen ist, wodurch unweigerlich Fehlinterpretationen provoziert werden. Insbesondere läßt der verwendete Plural schon vermuten, daß es mehr als eine Variante des zentralen Begriffs dieses Kapitels gibt. Deshalb kommt man um eine saubere Definition der quantenmechanischen Unschärfe einer physikalischen Größe nicht herum; nur dann ist eine präzise Formulierung der Unschärferelation möglich. Auf schulischer Ebene gelingt das allerdings nur mit einer der beiden einschlägigen und hier betrachteten Varianten, weswegen die andere nur andeutungsweise zur Sprache kommt.

Wie jede physikalische Theorie sollte sich auch die Quantenmechanik nicht zuletzt mit der Beschreibung physikalischer Systeme beschäftigen. Nachdem die früheren Bildungspläne in Baden-Württemberg hier wenigstens noch eine qualitative Betrachtung forderten [1] - [3],

<sup>1</sup>Zur Problematik von Photonen im elementaren Physikunterricht siehe beispielsweise auch [844], [1092] und [1093].

wurde das Thema im aktuellen ersatzlos gestrichen [4], sodaß man mehr denn je fragen muß, wozu der ganze bisherige (und im Bildungsplan auch geforderte) Aufwand eigentlich gut sein soll. Immerhin kann man so etwas in der Rubrik „Vertiefendes Themengebiet“ des Bildungsplans andeutungsweise als Wahlthema hineininterpretieren [4]. In Kapitel 5 nehmen wir uns zwei einfache Systeme vor, aber ohne behelfsmäßige Plausibilitätsbetrachtungen, sondern ganz konkret mit Hilfe der entsprechenden Schrödingergleichungen und deren Lösungen. Selbstverständlich muß man sich hier auf stationäre Probleme beschränken. Der lineare Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden bietet sich als ideales Beispiel an, um eine Eigenwertaufgabe komplett mit allen Schikanen zu lösen und dabei die Schüler die allgemeine Vorgehensweise exemplarisch und mit schulischen Mitteln kennenlernen zu lassen. Das in den früheren Bildungsplänen noch geforderte zeitgemäße Atommodell vermittelt man am besten, indem man die Schrödingergleichung des Wasserstoffatoms zwar nicht löst, was in der Oberstufe natürlich auch nicht zu leisten wäre, aber vorgegebene Wellenfunktionen auf ihre Eigenschaft, Lösungen der stationären Schrödingergleichung zu sein, überprüfen läßt. Dabei bekommt man die Rydbergformel gewissermaßen als Nebenprodukt geschenkt. In diesem Abschnitt braucht man an zwei Stellen partielle Integration, was im Fach Mathematik in Baden-Württemberg schon seit Jahren nicht mehr im Bildungsplan enthalten ist. Wer die (sehr einfache) Einführung im Physikunterricht vermeiden möchte, sollte die beiden Integrale direkt mitteilen. Die Übungsaufgaben liefern weitere einfache quantenmechanische Systeme, die der Schulmathematik in gewissen Bereichen zugänglich sind.

Die weiteren Kapitel überschreiten den üblichen Rahmen der Schulphysik. Kapitel 6 und 7 beschäftigen sich mit dem für die Quantenmechanik grundlegenden Superpositionsprinzip und enthalten unter anderem einen Vorschlag für einen in der gymnasialen Oberstufe gangbaren Weg zur Einführung verschränkter Systeme. In diesem Zusammenhang werden auch das EPR-Paradoxon, das Bellsche Theorem und die daraus folgende experimentelle Bestätigung der Quantenmechanik gegenüber beliebigen lokalen Theorien mit verborgenen Variablen sowie der quantenmechanische Meßprozeß und die Theorie der umgebungsinduzierten Dekohärenz berücksichtigt. Das Thema Verschränkung kommt im baden-württembergischen Lehrplan nicht vor, und man kann zweifellos darüber streiten, ob man es im Gymnasium überhaupt bringen sollte. Ich habe es hier dennoch aufgenommen und noch dazu sehr ausführlich, und zwar aus folgenden Gründen. Erstens haben verschränkte Zustände Einzug nicht nur in vielfältige populärwissenschaftliche Darstellungen, sondern auch in unterschiedlichste esoterische Diskussionen gehalten, was zu völlig abwegigen Behauptungen und Spekulationen führt. Es dürfte sinnvoll sein zu versuchen, hier der Orientierungslosigkeit und den verbreiteten Fehlinformationen etwas entgegenzuwirken. Zweitens und folglich können die Kapitel auch als Einstieg in diese Thematik gelesen werden. Ob man es dann auch unterrichtet, kann jede/jeder selbst entscheiden. Der Schwierigkeitsgrad ist dabei naturgemäß deutlich höher als in den vorherigen Kapiteln. Es ist in jedem Fall sinnvoll, solche Sachverhalte zumindest zu erwähnen, angesichts der Bedeutung, die ihnen in der Quantenmechanik zukommt. Das Problem des Meßprozesses stellt nach wie vor *den* zentralen Streitpunkt in den weiter anhaltenden Diskussionen über die Interpretation der Quantenmechanik dar. Dekohärenz löst zwar nicht auf einen Schlag alle Interpretationsprobleme, sie vermag aber zumindest zu erklären, warum die spektakulären

quantenmechanischen Phänomene, die man inzwischen nicht nur als Gedankenexperimente diskutieren, sondern ganz real im Labor herbeizaubern kann, in unserer meso- und makroskopischen Umgebung anscheinend nicht auftreten, obwohl sie doch eigentlich den Normalfall darstellen sollten, und warum wir überhaupt so etwas wie eine klassische Welt um uns herum wahrnehmen. Und erst im Zusammenhang mit dem quantenmechanischen Superpositionsprinzip und darauf aufbauend mit verschränkten Systemen und der EPR-Problematik wird so richtig klar, wie groß der Unterschied zwischen klassischer Physik und Quantenmechanik tatsächlich ist. Die erwähnten Interpretationsstreitigkeiten sind Gegenstand von Kapitel 8 und bilden eher Lesestoff. Sie können aber ebenfalls als Grundlage für Seminar- oder Vertiefungskurse benutzt werden. – Zwei Anhänge mit mathematisch aufwendigeren Inhalten komplettieren und ergänzen das Buch. Zum einen wird gezeigt, inwiefern das „Elektronium“-Modell verschmierter Ladungswolken kein brauchbares Atommodell ist, zum anderen wird anhand einer präzisen Darstellung der in Kapitel 3 vereinfacht beschriebenen axiomatischen Quantenmechanik ein Einblick in deren mathematisch rigorose Formulierung geliefert.

Entsprechend der fundamentalen Umwälzung, welche die Quantenmechanik innerhalb der Physik bedeutet, und der Zielsetzung, dies im Gymnasium mit Hilfe eines axiomatischen Zugangs und damit nicht auf traditionelle, eher an der historischen Entwicklung orientierte Weise zu unterrichten, stellt der hier beschriebene Unterrichtsgang notwendigerweise einen Neuanfang im Physikunterricht dar. Folglich beschränken sich die Vorkenntnisse, die mitgebracht werden sollen, auf einen sehr kleinen Umfang. Andererseits steht die Quantenmechanik in der Abschlußklasse des Gymnasiums auf dem Programm, so daß alles, was man sinnvollerweise überhaupt voraussetzen darf, schon vorhanden sein müßte. Zu nennen wäre hierbei in etwa folgendes.

- Bewegung von Massenpunkten im homogenen Gravitationsfeld,
- die drei mechanischen Energieformen,
- potentielle Energie im radialen elektrischen Feld,
- harmonische Schwingungen,
- Beugung und Interferenz am Doppelspalt und am Gitter,
- einfache Differential- und Integralrechnung, insbesondere mit trigonometrischen Funktionen und Exponentialfunktionen,
- elementare gewöhnliche Differentialgleichungen.

Differentialgleichungen wurden leider inzwischen aus dem Mathematik-Unterricht der Kursstufe gestrichen, da man sie in der Schulphysik aber schon bei harmonischen Schwingungen braucht, sollte deren Einsatz in der Quantenmechanik sicher ebenfalls keine Schwierigkeit darstellen. Ein grundsätzliches Problem für jedes Unterrichtskonzept der Quantenmechanik am Gymnasium ist dagegen die äußerst dürftige Auswahl geeigneter in der Schule durchführbarer Experimente. Genaubetrachtet sind es mit der Elektronenbeugungsröhre, dem Photoeffekt und dem Frank-Hertz-Experiment gerade drei Stück, und jedes einzelne davon ist aus unterschiedlichen Gründen problematisch, wie wir sehen werden. Wünschenswert wären insbesondere Interferenzexperimente mit einzelnen Quantenobjekten, was aber aus technischen und



finanziellen Gründen für Schulen derzeit illusorisch ist. Die Diskussion solcher Experimente ist gleichwohl für das Verständnis grundlegender Konzepte der Quantenmechanik unabdingbar, weswegen ich hier entgegen meiner generellen Haltung für den Einsatz von interaktiven Simulationsexperimenten im Unterricht plädiere.

Die in unserem Buch dargestellte Breite und Tiefe der quantenmechanischen Themen, die nur unter Verwendung von Schulmathematik oder ganz wenig mehr diskutiert werden können, sollte als Motivation dienen, im Physikunterricht der Kursstufe des Gymnasiums der Quantenmechanik einen größeren Stellenwert einzuräumen, als in den Bildungsplänen vorgesehen ist. Dabei geht es selbstverständlich nicht darum, möglichst viel davon in den Unterricht hineinzupacken. Aber bei der hier vorgestellten Auswahl sollte jeder etwas passendes finden.

# Kapitel 1

## Klassische Physik und Quantenmechanik

### 1.1 Rückblick: Klassische Physik

Die klassische Physik mit ihren hauptsächlichen Teilgebieten Mechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik und Statistik schien Ende des 19. Jahrhunderts zu einem Abschluß der Physik geführt zu haben. Diese Überzeugung geriet ins Wanken, als plötzlich unerwartete Probleme auftraten. Bis dahin stellte die klassische Physik jahrhundertlang die Grundlage der physikalischen Weltbeschreibung dar, hatte triumphale Höhenflüge beispielsweise in der Beschreibung der Bewegung von Himmelskörpern, in der Mechanik deformierbarer Medien, der Maxwell'schen Elektrodynamik, der Thermodynamik und statistischen Mechanik und insbesondere und abschließend in der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie. Dennoch sollte sie mit Ausnahme der Relativitätstheorien zu Beginn des 20. Jahrhunderts komplett zu Fall kommen, was mit der Entstehung und Entwicklung der Quantenmechanik das Aufkommen eines vollkommen neuen und im Vergleich zu früher extrem seltsam erscheinenden Weltbildes einleitete. Auslöser war das Auftreten der erwähnten unlösbaren Schwierigkeiten; die klassische Physik konnte grundlegende, damals neue Beobachtungen nicht erklären, z.B.

- den Zusammenhang von Energiedichte und Wellenlänge bei thermischer Strahlung,
- die Stabilität und die Spektren der Atome,
- die spezifische Wärme der Festkörper.

Damit zeichnete sich mehr und mehr die Notwendigkeit einer neuen Physik ab. Die Entdeckung und Ausarbeitung dieser neuen Physik stellt einen wesentlichen Teil des wissenschaftlichen Fortschritts in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts dar.

Im Rahmen der Schulphysik trifft man hier zunächst einmal auf das Problem, die erwähnten Unzulänglichkeiten der klassischen Physik nur sehr eingeschränkt thematisieren zu können; genauer gesagt eignet sich von den drei genannten Aspekten nur der zweite für eine vertiefte Diskussion auf Schulniveau, während der erste und der dritte bestenfalls qualitativ zur Sprache kommen können. Dennoch sollte man das tun, denn der Übergang von der klassischen Physik zur Quantenmechanik stellt nicht weniger als den Bruch mit so ziemlich allen Prinzipien