

Vorwort

An der Universität Hamburg wird seit dem Jahr 2002 eine eigenständige zweisemestrige Vorlesung *Theoretische Physik für Studierende des Lehramts* angeboten mit dem Ziel, zukünftigen Physiklehrern/innen die Grundlagen der theoretischen Physik zu vermitteln und dabei besonders die Gebiete zu betonen, die für den Unterricht in der Oberstufe des Gymnasiums und in den Physikleistungskursen von besonderem Wert sind. Das vorliegende zweibändige Lehrbuch ist aus den Vorlesungen und Übungen hervorgegangen, die ich – in enger Absprache mit anderen Professoren des Departments Physik, dem Institut für Lehrerbildung in Hamburg, dem Lehrerprüfungsamt, Physiklehrern und Studierenden – speziell für die Lehramtsstudierenden konzipiert und mehrfach gehalten habe. Da die *moderne Physik* im Curriculum der Oberstufe eine herausragende Rolle spielt, bestand Einigkeit darin, dass die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie einen zentralen Platz einnehmen sollten. Dazu kommt die Elektrodynamik, die die theoretische Grundlage elektrischer Maschinen sowie der Radiotechnik und Optik ist. Die Vorlesungen bauen auf dem Physik-Kurs des Grundstudiums auf. In Hamburg werden in der Physik I und II die Mechanik, Wärmelehre, Elektrizität, Magnetismus und Optik behandelt. Die Physik III ist eine Einführung in die Quanten- und Atomphysik.

Die zwei Bände des Lehrbuchs sind folgendermaßen aufgebaut: in den Hauptkapiteln wird der für das Examen relevante Stoff in möglichst einfacher und klarer Form dargestellt. Die didaktischen Anmerkungen am Ende der Kapitel haben das Ziel, den zukünftigen Lehrern/innen Verständnishilfen zu geben und auch Hinweise, wie sie die physikalischen Konzepte in der Schule vermitteln könnten. Zu diesem Zweck gibt es auch eine Vielzahl von Abbildungen. Mathematische Ergänzungen und kompliziertere theoretische Herleitungen sind in den Anhängen zu finden. Diese Anhänge sollen interessierten Studierenden helfen, die Theorie besser zu verstehen und Rechnungen selbst durchführen zu können. Das dort präsentierte Material gehört aber in Hamburg nicht zum Examenstoff.

Die Quantentheorie ist schon mehr als 80 Jahre alt, sie bereitet aber immer wieder große Verständnisschwierigkeiten, weil viele ihrer Aussagen unserer Erfahrung und Intuition widersprechen.

Wenn man jedoch heute diese Theorie lehren oder lernen will, befindet man sich in einer viel besseren Lage als die Professoren und Studenten vor 80 oder auch 40 Jahren. Viele der von Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Einstein und anderen vorgeschlagenen „Gedankenexperimente“, die damals heftig und kontrovers diskutiert wurden, sind durch enorme Fortschritte in der Experimentiertechnik inzwischen Wirklichkeit geworden. Messungen können dazu dienen, eine Entscheidung zwischen verschiedenartigen theoretischen Ideen und Interpretationen zu treffen, was um 1925–1935 kaum möglich war. Die fremdartigen, der Anschauung zuwiderlaufenden Aussagen der Theorie lassen sich Stück für Stück durch ausgeklügelte Experimente bestätigen: Teilchen-Welle-Komplementarität, Verschränkung, Nichtlokalität der Quantenmechanik. Auf mich üben die modernen Experimente zur Quantenmechanik eine große Faszination aus, und mir liegt viel daran, diese Faszination auch den Lesern des Buches zu vermitteln. Aus diesem Grund nimmt die Darstellung moderner Experimente einen breiten Raum ein. Hinzu kommt, dass die Quantentheorie die Grundlage fast aller neuen Technologien ist und somit außer ihrem erkenntnistheoretischen Wert auch eine enorme praktische Bedeutung hat.

In der Einleitung wird die Teilchen-Welle-Komplementarität anhand des Doppelspaltexperiments und seiner modernen Varianten sehr eingehend dargestellt, und zwar ohne großen mathematischen Formalismus. Natürlich werden auch die Spektrallinien der Atome und der photoelektrische Effekt angesprochen, deren Erklärung wichtige Meilensteine auf dem Weg zur Quantenmechanik waren. Die theoretische Beschreibung der Hohlraumstrahlung durch Max Planck war der Beginn des Quantenzeitalters, sie ist aber für den Anfänger nicht so leicht zu verstehen, deshalb wird die Planck'sche Strahlungsformel erst später (in Kap. 8) hergeleitet.

Das Hauptziel der Kapitel 2 bis 8 ist eine systematische Darstellung der Quantenmechanik auf der Basis der Schrödinger-Gleichung. Abstraktere Formulierungen (z. B. Hilbertraum) werden weitgehend vermieden, um Lehramtsstudierenden, die nicht Mathematik als zweites Fach studieren, den Zugang zur Theorie zu erleichtern. Die Form der Schrödinger-Gleichung wird in Kap. 2 plausibel gemacht. Die Operatoren für Ort, Impuls und Energie werden eingeführt sowie die Wellenfunktion als Wahrscheinlichkeitsamplitude. In Kap. 3 werden die typischen eindimensionalen Beispiele vorgerechnet: Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden, Potentialtopf endlicher Tiefe, harmonischer Oszillator, freie Teilchen und Wellenpakete, Potentialschwelle, Tunneleffekt. Die theoretischen Konzepte und der Formalismus der Quantenmechanik sind Inhalt von Kap. 4: formale Definition der Operatoren, Eigenfunktionen und Eigenwerte, Erwartungswerte, vertauschbare Operatoren und gleichzeitige Messbarkeit, nicht vertauschbare Operatoren und Unschärferelation, die Rolle des Messprozesses. Bahndrehimpuls und Spin werden in Kap. 5 behandelt. Das Wasserstoffatom wird in Kap. 6 vorgerechnet, wobei die Radialgleichung nur für den Grundzustand gelöst wird, während die Wellenfunktionen der Anregungszustände im Anhang konstruiert werden. Die bildliche Darstellung der Elektronenwolke ist ein wichtiger Bestandteil von Kap. 6. In den historischen und didaktischen Anmerkungen werden die früheren Atommodelle, ihre Leistungen und ihre Begrenzungen besprochen. In Kap. 7 werden identische Teilchen, Pauli-Prinzip, Heliumatom, Periodisches System der Elemente und Hybridwellenfunktionen besprochen.

In den didaktischen Anmerkungen wird diskutiert, wie eine Welt ohne Pauli-Prinzip aussehen könnte. Die Absorption und stimulierte Emission von Strahlung wird in Kap. 8 in stark vereinfachter Form behandelt, und es werden die Planck'sche Strahlungsformel und die Einstein-Koeffizienten hergeleitet. Das erste Vertiefungskapitel (Kap. 9) widmet sich hochaktuellen Themen der Quantenmechanik: Verschränkung, Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon, Bell'sche Ungleichung, Nichtlokalität, Schrödinger-Katze, Dekohärenz, Übergang von der Quanten- zur klassischen Physik. Relevante Experimente werden ausführlich diskutiert. Im zweiten Vertiefungskapitel (Kap. 10) sowie im Anhang E wird die zeitunabhängige Störungsrechnung zur Berechnung der Feinstruktur des H-Atoms angewandt. Die zeitabhängige Störungsrechnung wird benutzt, um Strahlungsübergänge zu berechnen und damit die mehr qualitativen Betrachtungen in Kap. 8 auf eine solide Grundlage zu stellen. Aus Platzgründen werden Streuprozesse in diesem Buch nicht behandelt.

Das vorliegende Buch ist erfahrungsgemäß zu umfangreich für eine einsemestrigere Veranstaltung mit 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übung (dies trifft wohl auf alle Lehrbücher zu). Man wird daher eine Auswahl treffen und Schwerpunkte setzen müssen.

Die Ausarbeitung des Lehrbuchs erfolgte im Rahmen einer Seniorprofessur der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung für die Weiterentwicklung der Lehrerbildung im Fach Physik. Ich danke der WE Heraeus-Stiftung sehr herzlich für die großzügige Förderung. Prof. Klaus Fredenhagen, Prof. Siegfried Großmann und Prof. Erich Lohrmann haben frühere Versionen des Manuskripts sorgfältig gelesen und viele hilfreiche Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge gemacht. Ihnen gebührt besonderer Dank. Eine vorläufige Version der *Quantenmechanik* ist von den Profs. Jan Louis und Joachim Bartels in ihren Vorlesungen für Lehramtskandidaten verwendet worden. Für viele Gespräche und nützliche Hinweise möchte ich mich bei ihnen bedanken. Eine ganz besondere Anerkennung gebührt Dr. Paul-Dieter Gall, der sehr engagiert an der Erstellung der Übungsaufgaben und der Lösungen mitgearbeitet hat und mit großer Sorgfalt die verschiedenen Versionen des Manuskripts gelesen und auf Fehler geprüft hat. Schließlich bedanke ich mich bei Iris Kerkhoff und Dr. Bernd Steffen für ihre Hilfe bei der Erstellung von Abbildungen.

Hamburg, Oktober 2011

Peter Schmüser

Theoretische Physik für Studierende des Lehramts 1

Quantenmechanik

Schmüser, P.

2012, XIII, 255 S. 108 Abb., 74 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-642-25396-6