

Springer-Lehrbuch

Grundkurs Theoretische Physik 5/2

Quantenmechanik - Methoden und Anwendungen

von
Wolfgang Nolting

8. Auflage

Springer Spektrum Heidelberg 2015

Verlag C.H. Beck im Internet:
www.beck.de
ISBN 978 3 662 44229 6

Allgemeines Vorwort

Die sieben Bände der Reihe „*Grundkurs Theoretische Physik*“ sind als direkte Begleiter zum Hochschulstudium Physik gedacht. Sie sollen in kompakter Form das wichtigste theoretisch-physikalische Rüstzeug vermitteln, auf dem aufgebaut werden kann, um anspruchsvollere Themen und Probleme im fortgeschrittenen Studium und in der physikalischen Forschung bewältigen zu können.

Die Konzeption ist so angelegt, dass der erste Teil des Kurses,

- *Klassische Mechanik* (Band 1)
- *Analytische Mechanik* (Band 2)
- *Elektrodynamik* (Band 3)
- *Spezielle Relativitätstheorie, Thermodynamik* (Band 4),

als Theorieteil eines „*Integrierten Kurses*“ aus Experimentalphysik und Theoretischer Physik, wie er inzwischen an zahlreichen deutschen Universitäten vom ersten Semester an angeboten wird, zu verstehen ist. Die Darstellung ist deshalb bewusst ausführlich, manchmal sicher auf Kosten einer gewissen Eleganz, und in sich abgeschlossen gehalten, sodass der Kurs auch zum Selbststudium ohne Sekundärliteratur geeignet ist. Es wird nichts vorausgesetzt, was nicht an früherer Stelle der Reihe behandelt worden ist. Dies gilt insbesondere auch für die benötigte Mathematik, die vollständig so weit entwickelt wird, dass mit ihr theoretisch-physikalische Probleme bereits vom Studienbeginn an gelöst werden können. Dabei werden die mathematischen Einschübe immer dann eingefügt, wenn sie für das weitere Vorgehen im Programm der Theoretischen Physik unverzichtbar werden. Es versteht sich von selbst, dass in einem solchen Konzept nicht alle mathematischen Theorien mit absoluter Strenge bewiesen und abgeleitet werden können. Da muss bisweilen ein Verweis auf entsprechende mathematische Vorlesungen und vertiefende Lehrbuchliteratur erlaubt sein. Ich habe mich aber trotzdem um eine halbwegs abgerundete Darstellung bemüht, sodass die mathematischen Techniken nicht nur angewendet werden können, sondern dem Leser zumindest auch plausibel erscheinen.

Die mathematischen Einschübe werden natürlich vor allem in den ersten Bänden der Reihe notwendig, die den Stoff bis zum Physik-Vordiplom beinhalten. Im zweiten Teil des Kurses, der sich mit den modernen Disziplinen der Theoretischen Physik befasst,

- *Quantenmechanik: Grundlagen* (Band 5/1)
- *Quantenmechanik: Methoden und Anwendungen* (Band 5/2)
- *Statistische Physik* (Band 6)
- *Viel-Teilchen-Theorie* (Band 7),

sind sie weitgehend überflüssig geworden, insbesondere auch deswegen, weil im Physik-Studium inzwischen die Mathematik-Ausbildung Anschluss gefunden hat. Der frühe Beginn der Theorie-Ausbildung bereits im ersten Semester gestattet es, die *Grundlagen der Quantenmechanik* schon vor dem Vordiplom zu behandeln. Der Stoff der letzten drei Bände kann natürlich nicht mehr Bestandteil eines „*Integrierten Kurses*“ sein, sondern wird wohl überall in reinen Theorie-Vorlesungen vermittelt. Das gilt insbesondere für die „*Viel-Teilchen-Theorie*“, die bisweilen auch unter anderen Bezeichnungen wie „*Höhere Quantenmechanik*“ etwa im achten Fachsemester angeboten wird. Hier werden neue, über den Stoff des Grundstudiums hinausgehende Methoden und Konzepte diskutiert, die insbesondere für korrelierte Systeme aus vielen Teilchen entwickelt wurden und für den erfolgreichen Übergang zu wissenschaftlichem Arbeiten (Diplom, Promotion) und für das Lesen von Forschungsliteratur inzwischen unentbehrlich geworden sind.

In allen Bänden der Reihe „*Grundkurs Theoretische Physik*“ sollen zahlreiche Übungsaufgaben dazu dienen, den erlernten Stoff durch konkrete Anwendungen zu vertiefen und richtig einzusetzen. Eigenständige Versuche, abstrakte Konzepte der Theoretischen Physik zur Lösung realer Probleme aufzubereiten, sind absolut unverzichtbar für den Lernenden. Ausführliche Lösungsanleitungen helfen bei größeren Schwierigkeiten und testen eigene Versuche, sollten aber nicht dazu verleiten, „*aus Bequemlichkeit*“ eigene Anstrengungen zu unterlassen. Nach jedem größeren Kapitel sind Kontrollfragen angefügt, die dem Selbsttest dienen und für Prüfungsvorbereitungen nützlich sein können.

Ich möchte nicht vergessen, an dieser Stelle allen denen zu danken, die in irgendeiner Weise zum Gelingen dieser Buchreihe beigetragen haben. Die einzelnen Bände sind letztlich auf der Grundlage von Vorlesungen entstanden, die ich an den Universitäten in Münster, Würzburg, Osnabrück, Valladolid (Spanien), Warangal (Indien) sowie in Berlin gehalten habe. Das Interesse und die konstruktive Kritik der Studenten bedeuteten für mich entscheidende Motivation, die Mühe der Erstellung eines doch recht umfangreichen Manuskripts als sinnvoll anzusehen. In der Folgezeit habe ich von zahlreichen Kollegen wertvolle Verbesserungsvorschläge erhalten, die dazu geführt haben, das Konzept und die Ausführung der Reihe weiter auszubauen und aufzuwerten.

Die ersten Auflagen dieser Buchreihe sind im Verlag Zimmermann-Neufang entstanden. Ich kann mich an eine sehr faire und stets erfreuliche Zusammenarbeit erinnern. Danach erschien die Reihe bei Vieweg. Die Übernahme der Reihe durch den Springer-Verlag im Januar 2001 hat dann zu weiteren professionellen Verbesserungen im Erscheinungsbild des

„Grundkurs Theoretische Physik“ geführt. Den Herren Dr. Kölsch und Dr. Schneider und ihren Teams bin ich für viele Vorschläge und Anregungen sehr dankbar. Meine Manuskripte scheinen in guten Händen zu liegen.

Berlin, im April 2001

Wolfgang Nolting

Vorwort zu Band 5/2

Zur Zielsetzung des *Grundkurs Theoretische Physik*, hier für das Teilgebiet der *Quantenmechanik*, habe ich bereits im Vorwort zum Teil 1 Stellung bezogen. An dieser hat sich natürlich auch für den nun vorliegenden zweiten Teil nichts geändert. Die Fülle des Stoffes hat es notwendig gemacht, die Darstellung der Quantenmechanik auf zwei Bände zu verteilen, wobei die beiden Teile allerdings als Einheit zu sehen sind. Äußeres Zeichen dafür ist die fortlaufende Kapitelnumerierung.

Der erste Teil befasste sich mit elementaren Grundlagen und einigen ersten Anwendungen auf relativ einfache (eindimensionale) Potentialprobleme. Den vorliegenden zweiten Teil beginnen wir mit der Untersuchung der wichtigen quantenmechanischen Observablen *Drehimpuls*. Wir werden jeden Vektoroperator, dessen hermitesche Komponenten einen bestimmten Satz von fundamentalen Kommutatorrelationen erfüllen, als Drehimpuls bezeichnen (Abschn. 5.1). Dazu zählt neben dem aus der *Klassischen Mechanik* bekannten *Bahndrehimpuls*, den wir mit Hilfe des *Korrespondenzprinzips* in die *Quantenmechanik* einführen können, auch der klassisch nicht verständliche *Spin*, für den sich keine solche Analogiebetrachtung anbietet. Man kann sich damit begnügen, ihn gewissermaßen als empirische Notwendigkeit zu postulieren und die sich daraus ergebenden Eigenschaften und Konsequenzen zu analysieren (Abschn. 5.2). Da sich *Spin*, *magnetisches Spinmoment* und die *Spin-Bahn-Wechselwirkung* als nur relativistisch begründbare Eigenschaften herausstellen, benötigt ihre strenge Herleitung die relativistische *Dirac-Theorie* (Abschn. 5.3). Die *Spin-Bahn-Wechselwirkung* wird uns ferner die Motivation dafür liefern, auch über die Gesetzmäßigkeiten bei der *Addition von Drehimpulsen* nachzudenken (Abschn. 5.4).

Mit der Einführung des *Drehimpulses* sind die wesentlichen Stützen des abstrakten Gerüsts der *Quantentheorie* eingeführt, sodass wir uns in den nächsten Kapiteln den mehr anwendungsorientierten Problemen zuwenden können. Das beginnt in Kap. 6 mit den wichtigen *Zentralpotentialen*. Für die historische Entwicklung der *Quantenmechanik* hat insbesondere die Theorie des Wasserstoffatoms eine entscheidende Rolle gespielt. Das Hüllenelektron bewegt sich im Coulomb-Feld des positiv geladenen Wasserstoffkerns (Proton), unterliegt damit dem Einfluss eines speziellen Zentralpotentials, dem insbesondere auch wegen seiner historischen Bedeutung in diesem Band ein relativ breiter Raum gewidmet wird.

Nur wenige (realistische) Probleme der *Theoretischen Physik* lassen sich mathematisch streng lösen. Das sinnvolle Approximieren einer nicht erreichbaren exakten Lösung bereitet erfahrungsgemäß dem Lernenden nicht unerhebliche Schwierigkeiten. Wir besprechen in Kap. 7 deshalb eine Reihe von etablierten, vom Konzept her recht unterschiedlichen Methoden, das *Variationsverfahren* (Abschn. 7.1), die verschiedenen Formen der *Störungstheorie* (Abschn. 7.2, 7.3) und die semiklassische *WKB-Methode* (Abschn. 7.4). In der aktuellen wissenschaftlichen Forschung steht man häufig vor der Aufgabe, eigene problem-spezifische Approximationsverfahren entwickeln zu müssen. Auch dabei hilft das subtile Verstehen der Standardverfahren und die genaue Kenntnis ihrer Gültigkeitsbereiche.

Die bis zu diesem Punkt entwickelte Quantentheorie ist genau genommen eine Ein-Teilchen-Theorie, wohingegen die uns umgebende Welt aus wechselwirkenden *Viel-Teilchen-Systemen* aufgebaut ist. Wir werden deshalb zu untersuchen haben (Kap. 8), was bei der Behandlung von Mehr-Teilchen-Systemen zusätzlich zu beachten ist. Die Abgrenzung von *unterscheidbaren* gegenüber *identischen Teilchen* wird sich als entscheidend wichtig herausstellen und auf das im Konzept der *Klassischen Physik* nicht erklärable *Prinzip der Ununterscheidbarkeit identischer Teilchen* führen. Dessen gravierendste Konsequenz ist das *Pauli-Prinzip*, durch das unter anderem der gesamte Aufbau der Materie reguliert wird. Für die Beschreibung von *Viel-Teilchen-Systemen* erweist sich der *Formalismus der zweiten Quantisierung* als elegant und vorteilhaft. Moderne Forschungsliteratur ist ohne Kenntnis desselben kaum noch lesbar. Er wird insbesondere im siebten Band des Grundkurses fast ausschließlich benutzt werden. Es erschien mir deshalb sinnvoll, diese Methode sehr detailliert zu besprechen.

Das abschließende Kap. 9 befasst sich mit der *Streutheorie*, die ein wichtiges Anwendungsgebiet der *Quantenmechanik* darstellt. Über mikroskopische Streu-(Stoß-)prozesse lassen sich weitgehende Aufschlüsse über elementare Wechselwirkungspotentiale gewinnen, wenn es der Theorie gelingt, Verbindungen zwischen diesen und den experimentell zugänglichen Wirkungsquerschnitten herzustellen.

Es ist mir bei der Darstellung der Quantenmechanik, ebenso wenig wie bei den in den vorangegangenen Bänden besprochenen Disziplinen, nicht so sehr auf Vollständigkeit angekommen, als vielmehr auf eine möglichst leicht verständliche Einführung in die Grundprinzipien und auf das Erlernen von typischen Lösungstechniken. Ich erwähne deshalb auch an dieser Stelle noch einmal, dass ich das selbständige Lösen von Übungsaufgaben zum wirklichen Verstehen der Theorie für unverzichtbar halte. Ich möchte mich bei allen denjenigen (Studenten, Übungsleiter, Dozenten) bedanken, die mir durch konstruktive Kritik bei der Vorbereitung und bei diversen kleineren Verbesserungen dieses Buches geholfen haben. Dem Springer-Verlag bin ich für die fruchtbare und verständnisvolle Zusammenarbeit sehr dankbar.

Vorwort zur 8. Auflage von Band 5/2

Am eigentlichen Konzept des „*Grundkurs Theoretische Physik*“ und damit auch an dem des zweiten Teils des fünften Bandes der Reihe („*Quantenmechanik-Methoden und Anwendungen*“) hat sich natürlich mit der vorliegenden neuen Auflage nichts geändert. Der Grundkurs ist nach wie vor auf ein Physik-Studienprogramm zugeschnitten, das bereits im ersten oder zweiten Semester mit der Theoretischen Physik beginnt, so wie es die meisten neuen Bachelor/Master-Studienordnungen an deutschen Hochschulen vorsehen. Die „*Quantenmechanik*“ wird damit in der Regel im vierten und fünften Semester angeboten.

Techniken und Konzepte werden auch in diesem Band des Grundkurses weiterhin so detailliert vermittelt, dass im Prinzip ein Selbststudium ohne aufwendige Zusatzliteratur möglich sein sollte. In diesem Zusammenhang spielen die zahlreichen Übungsaufgaben, die nach jedem wichtigen Teilabschnitt angeboten werden, eine für den Lerneffekt unverzichtbare Rolle. Dabei sollten die ausführlichen Musterlösungen nicht von der selbstständigen Bearbeitung der Aufgaben abhalten, sondern eher als Kontrolle der eigenen Bemühungen dienen.

Für die jetzt vorliegende 8. Auflage des zweiten Teils von Band 5 wurden drei Zusatzkapitel zur Streutheorie aufgenommen. Zudem wurde das Angebot der Übungsaufgaben gründlich überarbeitet und durch eine Reihe von neuen Aufgaben stark erweitert. Außerdem habe ich an einigen Stellen im Text kleinere Korrekturen und Ergänzungen eingefügt, wenn es mir angebracht erschien, die Darstellung etwas durchsichtiger zu gestalten. Leider musste auch diesmal wieder ein Satz von ärgerlichen Druckfehlern beseitigt werden.

Wie schon bei den früheren Auflagen habe ich sehr von Kommentaren und diversen Verbesserungsvorschlägen zahlreicher Kollegen und vor allem Studierender profitiert. Dafür möchte ich mich an dieser Stelle ganz herzlich bedanken. Besonders erwähnen sollte ich frühere Mitarbeiter meiner Arbeitsgruppe an der Humboldt-Universität zu Berlin, die mir durch konstruktive Kritik und Unterstützung bei der Lösung von redaktionellen und organisatorischen Problemen sehr geholfen haben. Die Zusammenarbeit mit dem Springer-Verlag, insbesondere mit Frau Dr. V. Spillner, verlief, wie auch früher schon, absolut reibungslos, produktiv und damit sehr erfreulich.

Berlin, im November 2014

Wolfgang Nolting



<http://www.springer.com/978-3-662-44229-6>

Grundkurs Theoretische Physik 5/2
Quantenmechanik – Methoden und Anwendungen
Nolting, W.
2015, XVII, 630 S. 53 Abb., Softcover
ISBN: 978-3-662-44229-6