
Vorwort

Die Quantenmechanik (QM) ist auch heute noch eine ziemlich mysteriöse Theorie. Im Gegensatz beispielsweise zur Relativitätstheorie ist sie nicht aus einer bestimmten Grundidee, einem physikalischen Prinzip heraus entstanden. Eher widerwillig mussten die Physiker ihre Gesetzmäßigkeiten akzeptieren, die jeglicher Intuition widersprechen. Viele Aspekte ihrer Interpretation sind bis heute umstritten.

Ich habe versucht, ein Lehrbuch zu schreiben, das ich selbst als Student gern gelesen hätte. Ein Buch, das viele Missverständnisse bzw. ungenaue Vorstellungen oder Fragezeichen, die sich mir im Zusammenhang mit der QM damals für einige Zeit im Kopf festgesetzt hatten, von vornherein ausgeräumt hätte. Oder das mir in einigen Fällen bestätigt hätte, dass meine Fragezeichen zu den noch heute heiß diskutierten Unklarheiten in der Interpretation der QM gehören. Das Buch, das dadurch entstanden ist, unterscheidet sich in einigen Punkten von den meisten anderen QM-Lehrbüchern:

Erstens hebt es die mysteriösen Eigenschaften der Theorie hervor und diskutiert sie ausführlich. Deswegen beginnt es gleich mit der Bell'schen Ungleichung als Vorgeschmack auf das, worauf wir uns einlassen. Andere QM-Bücher handeln die QM oft wie etwas mittlerweile Selbstverständliches, Altbekanntes ab, einfach als einen Teil des Physik-Kanons. Das entspricht nicht den Tatsachen. Die Grundlagen der Quantenmechanik sind nämlich durch alle Jahrzehnte von 1900 bis heute durchgehend Gegenstand der Forschung und hitziger Debatten gewesen (im Gegensatz zur speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie, deren Grundlagen seit 90 Jahren verstanden sind), wobei es immer wieder zu überraschenden neuen Erkenntnissen kam. Mittlerweile gibt es eine ganze Reihe von Interpretationen der Theorie, die sich in ihrer Weltsicht ganz fundamental unterscheiden. Diesen Interpretationen wird ein eigenes Kapitel gewidmet.

Zweitens entwickelt das Buch den Stoff vom Allgemeinen zum Speziellen. Zunächst werden die allgemeinen Postulate der QM dargestellt und ausführlich diskutiert. Die Wellenfunktion als Spezialfall eines Quantenzustands folgt erst später. Das hat den Vorteil, dass die wesentliche Hürde gleich am Anfang genommen und ein doppelter Anlauf vermieden wird. Viele Bücher entwickeln den Stoff nämlich zweimal: zuerst am Beispiel von Schrödingers Wellenmechanik und dann später

noch einmal unter dem Titel „abstrakte Formulierung“. Aus meiner Sicht ist es besser, gleich mit dem Abstrakten zu beginnen und dadurch auch das Missverständnis zu vermeiden, dass die QM ausschließlich eine Theorie der Wellenfunktionen ist.

Drittens werden die allgemeinen Postulate und Grundbegriffe der QM allesamt am einfachsten nichttrivialen Quantensystem erläutert: dem zweidimensionalen Zustandsraum des Elektronenspins, auch Qubit genannt.

Auch bei den Wellenfunktionen bleiben wir dem Prinzip des einfachsten Beispiels treu. Statt wie die meisten Bücher direkt vom eindimensionalen zum dreidimensionalen Ortsraum zu springen, machen wir Zwischenstation in zwei Dimensionen. Denn hier lassen sich Variablenseparation und vor allem Zentralpotential einfacher erläutern als in drei Dimensionen (insbesondere ohne Kugelflächenfunktionen).

Viertens wird großen Wert auf begriffliche Klarheit und Verständnis des mathematischen Hintergrunds gelegt. Durch diese Klarheit wird Missverständnissen von Anfang an vorgebeugt.

Ein großer Teil der QM spielt sich z. B. im unendlichdimensionalen Raum der Wellenfunktionen ab. Viele Sätze, die man aus der Linearen Algebra der endlichdimensionalen Vektorräume kennt, gelten hier nicht mehr. Auf diese Besonderheiten wird ausführlich eingegangen.

Auch den Tensorprodukten wird hinreichend Raum eingeräumt, da diesen in der QM eine überragende Rolle zukommt, z. B. beim Begriff der verschränkten Zustände oder bei der Kombination von Wellenfunktion und Spinzustand.

Fünftens sind die Aufgaben nicht am Ende eines Kapitels versammelt, sondern stehen mitten im Text. Dadurch soll der Leser direkt beim Lesen zum Mitdenken und Nachrechnen angeregt werden. Die Lösungen zu den Aufgaben finden Sie am Ende des Buches.

Der Fokus dieses Buches liegt auf den allgemeinen Postulaten der QM, ihrer Interpretation, ihren Grundbegriffen und ihrer mathematischen Formulierung. Der erste und umfangreichste Teil des Buches ist dieser Thematik gewidmet.

Im zweiten Teil wird ein wichtiger Spezialfall behandelt: die QM der Wellenfunktionen in ein, zwei und drei Raumdimensionen unter der Voraussetzung, dass der Hamilton-Operator nur aus dem kinetischen Term und einem zeitunabhängigen Potential besteht. Die wichtigsten Beispiele sind hierbei der Harmonische Oszillator und das Wasserstoffatom. Auch die Streutheorie wird in diesem Rahmen diskutiert.

Der dritte Teil umfasst weitere Themen, die zum kanonischen Stoff einer QM-Vorlesung gehören: Kombination von Spin und Drehimpuls, QM mit Elektromagnetismus, Störungsrechnung und Systeme mit mehreren Teilchen. Hier werden nur die Grundideen und -methoden dargestellt sowie einige einfache Beispiele. Für Anwendungen wie z. B. die Fein- und Hyperfeinstruktur des Wasserstoffs oder die Theorie der atomaren Übergänge wird auf geeignete Literatur verwiesen. Abgerundet wird das Ganze durch eine kurze Erklärung des Pfadintegral-Begriffs und durch die relativistische Theorie des Elektrons (Dirac-Gleichung).

Zielgruppe des Buches sind in erster Linie natürlich Physikstudenten, die die QM im Rahmen der theoretischen Physik hören. Durch den axiomatisch-deduktiven Ansatz und die detaillierte Diskussion des mathematischen Hintergrunds ist es auch

sehr gut für Mathematiker geeignet, die sich im Nebenfach oder in ihrer Freizeit mit der QM auseinandersetzen möchten. An manchen Stellen versuchen wir explizit, die „kulturelle Barriere“ zwischen Mathematikern und Physikern zu überwinden.

Einige Themen, die sehr spannend, aber zum unmittelbaren Verständnis (und zum Bestehen von Prüfungen) nicht zwingend erforderlich sind, wurden für neugierige Leser, die es genauer wissen wollen, in separate Textstellen, sog. „Streber-Ecken“, gestellt.

Danksagung

Das Buch ist nicht durch meine Arbeit allein entstanden. Den Menschen, die dieses Projekt ermöglicht, das Buch mitgeformt und mich dabei unterstützt haben, möchte ich an dieser Stelle danken:

- Vera Spillner vom Springer Verlag für die Gelegenheit, dieses Buch zu schreiben; für die anregenden Diskussionen; für die Versorgung mit Lektüre; und fürs Korrekturlesen, ein entscheidender Beitrag zur Qualität dieses Buches;
- Bianca Alton vom Springer Verlag für die organisatorische Betreuung des Projekts in der heißen Endphase; sie hat mir bei vielen Fragen und Formalitäten weitergeholfen;
- Kristin Riebe für die Erstellung zweier Abbildungen, in denen wieder einmal ihr grafisches Talent aufleuchtet;
- Bernhard Brosda für die nette Idee mit den Cartoons;
- Anja Stemme und Jörg Kügler für die Versorgung mit Materialien zur Bell'schen Ungleichung;
- Andreas Rüdinger für die Erwähnung des Gelfand'schen Raumtripels;
- Michael Doran für den Hinweis auf [Shankar (2008)];
- meiner Mutter für die moralische Unterstützung.

Dass ich heute überhaupt in der Lage bin, ein solches QM-Buch zu schreiben, verdanke ich den vielen Lehrern, Freunden und Inspirationsquellen auf meinem bisherigen Lebensweg. Ich möchte hier nur zwei explizit erwähnen. Ich danke also

- meinem Mathelehrer Hanspeter Eichhorn, der vor langer Zeit meinem Interesse an Mathematik Nahrung und gewissermaßen Beine zum Laufen gegeben hat.
- meinem Doktorvater Prof. Christof Wetterich für Inspiration und Unterstützung über viele Jahre hinweg.

Tutorium Quantenmechanik
von einem erfahrenen Tutor – für Physik- und
Mathematikstudenten

Schwindt, J.-M.

2016, XIII, 376 S. 25 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-49398-4