
Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende

Thomas Filk

Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende

 Springer Spektrum

Thomas Filk
Physikalisches Institut
Universität Freiburg
Freiburg, Deutschland

ISBN 978-3-662-59735-4 ISBN 978-3-662-59736-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59736-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Margit Maly

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Die Quantenmechanik bzw. allgemeiner die Quantentheorie ist nicht einfach nur ein spezieller Teil der Physik; sie scheint uns in besonderem Maße zu zwingen, ein vollkommen neues und ungewohntes Wirklichkeitsverständnis anzunehmen. Die Quantenmechanik stellt Vorstellungen infrage, die für uns so selbstverständlich sind, dass wir uns ihrer häufig nicht einmal bewusst werden, was ihre Vermittlung in der Schule oder an der Universität besonders schwierig macht.

Mehr als bei jedem anderen Teil der theoretischen Physik muss man in der Quantentheorie zwischen ihrer Anwendung und ihrem Verständnis unterscheiden. Für die experimentelle Praxis reicht es oft aus, einen gewissen Satz von Regeln und Vorschriften anzuwenden. In diesem Buch werde ich diese Vorschriften gelegentlich als ‚Kochrezept der Quantenmechanik‘ bezeichnen. Dieses Kochrezept ist für die Anwendungen, sowohl in der Forschung als auch in der Umsetzung quantentheoretischer Erkenntnisse zur Entwicklung neuer Techniken, fast immer ausreichend. Die meisten Physiker entwickeln mit der Zeit ein ‚Bauchgefühl‘ und eine gute Vorstellung, wie sich quantenmechanische Systeme verhalten, auch wenn sich bei hartnäckigem Hinterfragen diese Vorstellungen oft als inkonsistent oder widersprüchlich erweisen.

Interessierte Schüler und Schülerinnen, aber auch Studierende der Physik, Philosophie, Wissenschaftsgeschichte etc., die sich mit der Quantenmechanik auseinandersetzen möchten, werden jedoch unweigerlich danach fragen, ob bzw. inwieweit man dieses Kochrezept ‚verstehen‘ kann und welche Vorstellungen man damit verbinden soll. Diese Ebene der Metaphysik muss den festen wissenschaftlichen Boden notwendigerweise verlassen und ist daher für manche Naturwissenschaftler nicht nur zweitrangig, sondern auch unwissenschaftlich. Als Lehrender, gleichgültig ob in der Schule oder im Hörsaal, sollte man sich solchen Fragen jedoch stellen. Was bedeutet eigentlich ‚verstehen‘? Inwiefern beschreibt die Physik ‚die Natur‘? In welchem Maße sind alle physikalischen Theorien – insbesondere auch die Quantentheorie – nur Modelle?

Dieses Lehrbuch entstand aus einer Vorlesung an der Universität Freiburg, die ich dort regelmäßig anbiete und die speziell für Lehramtsstudierende konzipiert und, soweit möglich, auf die Bedürfnisse zukünftiger Lehrer und Lehrerinnen zugeschnitten ist. Daher habe ich auch weniger Wert auf die Vermittlung von mathematischen Techniken zur Lösung spezifischer Probleme in der Quantenmechanik gelegt; stattdessen wurde den konzeptuellen Grundlagen ein größeres

Gewicht zugeschrieben. Vor diesem Hintergrund habe ich beispielsweise auf eine Vermittlung von störungstheoretischen Verfahren sowie eine eingehendere Behandlung der Streutheorie verzichtet. Diese Aspekte sind zwar für den zukünftigen Forscher von Bedeutung, sie geben jedoch kaum wesentliche Zusatzkenntnisse über das ‚Wesen‘ der Quantenmechanik und lassen sich ohnehin im Unterricht nicht einsetzen. Trotzdem bleibt auch in der vorliegenden Darstellung der mathematische Formalismus der Quantenmechanik ein Schwerpunktthema, insbesondere da gerade hier die Frage nach einer anschaulichen Interpretation mancher mathematischer Strukturen und Ausdrücke immer noch offen und umstritten ist.

Trotzdem handelt es sich bei diesem Lehrbuch nicht um eine ‚abgespeckte‘ Version der Quantenmechanik. Manche Kapitel, insbesondere im dritten Teil des Buches, enthalten teilweise sehr ausführliche Berechnungen. Sie sind nicht notwendigerweise Teil des Lehr- und Lernstoffs, sollen aber den interessierten Lesern als vertiefende Zusatzinformation dienen.

Sehr viel Wert lege ich darauf immer wieder zu betonen, dass es eine allgemein akzeptierte Interpretation der Quantenmechanik nicht gibt. Schon die grundlegende Frage nach dem ontologischen (also von der subjektiven Erkenntnis des Beobachters unabhängigen) Status der Wellenfunktion wird von verschiedenen Physikern unterschiedlich beantwortet. Daher wird in diesem Lehrbuch einerseits versucht, die wissenschaftlichen Aussagen möglichst interpretationsneutral zu halten (was leider nicht immer gelungen sein dürfte), andererseits werde ich an geeigneten Stellen aber auch auf unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten eingehen, angefangen bei rein positivistischen Ansätzen über subjektive und informationstheoretische Interpretationen der Quantenmechanik bis hin zur Bohm’schen Mechanik.

Freiburg
Herbst 2019

Thomas Filk

Inhaltsverzeichnis

Teil I Drei Wege zur Quantentheorie

1	Photonenexperimente zur Polarisation	3
1.1	Was man wissen sollte	4
1.2	Experimente zu Polarisation von Lichtwellen	4
1.2.1	Licht als Welle und seine Intensität.	5
1.2.2	Polarisation und Polarisationsstrahlteiler	7
1.2.3	Hintereinandergeschaltete Polarisationsfilter	9
1.3	Einzelne Photonen	10
1.3.1	Die Eigenschaften $ h\rangle$ und $ v\rangle$	12
1.3.2	Die Eigenschaften $ \alpha\rangle$, $ p\rangle$ und $ m\rangle$	15
1.4	Mathematische Beschreibung in einem Vektorraum.	16
1.4.1	Polarisationszustände als Strahlen einer Ebene	17
1.4.2	Die Darstellung von Filtern durch Projektionsmatrizen	18
1.4.3	Superpositionen.	20
1.4.4	Quantenobjekte – Wellen oder Teilchen?	22
1.5	Der Begriff der ‚Messung‘ in der Quantentheorie	23
1.6	Zirkulare Polarisationen	26
1.7	Zusammenfassung.	29
2	Interferenzexperimente am Doppelspalt	31
2.1	Der Doppelspalt für Wellen	32
2.1.1	Interferenzmuster bei Photonen	35
2.2	Materiewellen	37
2.3	Durch welchen Spalt tritt ein Quantenobjekt?	39
2.4	Orts- und Wellenzahlbestimmungen.	40
2.5	Die Schrödinger-Gleichung	43
2.6	Zusammenfassung.	44
3	Die Anfänge der Quantentheorie in Experimenten	47
3.1	Das Planck’sche Strahlungsgesetz	48
3.1.1	Schwarze Körper.	48
3.1.2	Herleitung der Planck’schen Formel.	50
3.2	Der photoelektrische Effekt	53

3.3	Die molare Wärmekapazität in Festkörpern	55
3.4	Atomspektren	57
3.5	Zeeman- und Stark-Effekt.	58
3.6	Die Compton-Streuung	60
3.7	Das Stern-Gerlach Experiment.	62
3.8	Wie ging es weiter?.	63

Teil II Die Grundlagen der Quantentheorie

4	Das mathematische Rüstzeug	69
4.1	Vektorräume und physikalische Zustände.	70
4.1.1	Hilbert-Räume.	70
4.1.2	Der duale Vektorraum	74
4.1.3	Die Bra-Ket-Notation	75
4.2	Lineare Abbildungen – Operatoren.	76
4.2.1	Allgemeine Eigenschaften linearer Operatoren	77
4.2.2	Selbstadjungierte Operatoren	79
4.2.3	Projektionsoperatoren	82
4.2.4	Unitäre Operatoren	84
4.2.5	Veranschaulichung der Operatoren anhand der Polarisation	86
4.3	Die Bra-Ket-Notation für Operatoren	88
4.4	Operatoren im \mathcal{L}_2	90
4.4.1	Das Spektrum von x und $-i\frac{\partial}{\partial x}$	90
4.4.2	Die x - und k -Basis.	92
4.4.3	Der Kommutator von x und $-i\frac{\partial}{\partial x}$	93
5	Die Postulate der Quantentheorie und allgemeine Folgerungen	101
5.1	Die Postulate der klassischen Mechanik.	103
5.2	Die Postulate der Quantentheorie	105
5.2.1	Darstellung von Zuständen	107
5.2.2	Darstellung von Observablen	109
5.2.3	Messwerte und Erwartungswerte	114
5.2.4	Reduktion des Quantenzustands	117
5.2.5	Dynamik abgeschlossener Systeme	118
5.2.6	Mehrteilchensysteme	121
5.3	Unschärferelationen	121
5.3.1	Gleichzeitige Messbarkeit zweier Observabler.	121
5.3.2	Mathematische Herleitung einer Unschärferelation	124
5.3.3	Unschärferelation bei Fourier-Transformierten	125
5.4	Symmetrien.	127
5.5	Maximalsätze kompatibler Observablen.	129
5.6	Gemischte Zustände und Dichtematrizen	130
5.6.1	Gemischte Zustände in der klassischen Mechanik	131
5.6.2	Dichtematrizen	131

6	Kastenpotenzial und harmonischer Oszillator	137
6.1	Die Schrödinger-Gleichung für Potenzialsysteme	138
6.1.1	Zeitabhängige und zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung	139
6.1.2	Die Schrödinger-Gleichung in einer Basis	140
6.2	Das unendliche Kastenpotenzial	142
6.3	Das endliche Kastenpotenzial und der Tunneleffekt.	148
6.3.1	Allgemeine Eigenschaften der Lösungen	148
6.3.2	Der Tunneleffekt	151
6.4	Der harmonische Oszillator	153
6.4.1	Lösung durch ‚geschicktes Raten‘	153
6.4.2	Lösung durch Auf- und Absteigeoperatoren	154
6.4.3	Der Grenzwert großer Energien	157
6.4.4	Semiklassische Bestimmung der Grundzustandsenergie.	158
6.4.5	Der harmonische Oszillator in höheren Dimensionen	159
6.4.6	Die Wärmekapazität eines harmonischen Oszillators	160
7	Das Coulomb-Potenzial	167
7.1	Radialpotenziale und Kugelflächenfunktionen	168
7.2	Der Bahndrehimpuls	170
7.3	Das Wasserstoffatom	172
7.3.1	Die Lösung der Schrödinger-Gleichung	172
7.3.2	Die Wellenfunktionen des Wasserstoffatoms	175
7.3.3	Ein semiklassisches Argument für die Energieniveaus	176
7.4	Der Spin	177
7.5	Allgemeine Anmerkungen zur Quantisierung der Energie	180
8	Mehrteilchensysteme und Verschränkungen	185
8.1	Mathematische Beschreibung von Mehrteilchensystemen	186
8.1.1	Das Tensorprodukt von Vektorräumen	186
8.1.2	Separable Zustände und verschränkte Zustände	188
8.1.3	Die Teilreduktion von Zuständen	189
8.2	Identische Teilchen und Statistik	191
8.2.1	Bosonen, Fermionen und das Spin-Statistik-Theorem	192
8.2.2	Symmetrisierung und Antisymmetrisierung von Mehrteilchenzuständen	193
8.3	EPR und Quantenkorrelationen	196
8.4	Bell'sche Ungleichungen	200
8.4.1	Bell'sche Ungleichungen – die Version von Wigner und d'Espagnat	200
8.4.2	Bell'sche Ungleichungen – CHSH-Version	204

9	Zweizustand-Systeme	211
9.1	Pauli-Matrizen.	212
9.2	Der Zustandsraum – Die Bloch-Kugel	213
9.3	Physikalische Anwendungen	214
9.3.1	Spin- $\frac{1}{2}$ -Systeme	214
9.3.2	Polarisationszustände von Photonen.	216
9.3.3	Zweiniveau-Systeme.	217
9.4	Quanteninformation	220
9.4.1	Klassische Information	220
9.4.2	Qubits und Bell-Zustände	221
9.4.3	Das No-Cloning-Theorem.	223
9.4.4	Quantenteleportation.	224
9.4.5	Quantenkryptographie.	226

Teil III Ausgewählte und vertiefende Kapitel zur Quantentheorie

10	Anmerkungen zu unendlichdimensionalen Vektorräumen	235
10.1	Allgemeine Definitionen.	235
10.1.1	Separable Hilbert-Räume	235
10.1.2	Lineare Abbildungen in Hilbert-Räumen	237
10.2	Der Raum \mathcal{L}_2	239
10.2.1	Der \mathcal{L}_2 als Raum von Äquivalenzklassen	239
10.2.2	Distributionen – verallgemeinerte Funktionen	240
10.2.3	Rechenregeln für Distributionen	242
10.2.4	Unbeschränkte Operatoren im \mathcal{L}_2	243
10.2.5	Lokale Operatoren in der Ortsraumdarstellung	244
10.2.6	Kontinuierliches Spektrum	245
10.2.7	Das Gel'fand-Tripel	246
10.2.8	Spurklasseoperatoren	247
10.3	Die Fourier-Transformation	248
11	Zeitentwicklungsoperator und Funktionalintegral	251
11.1	Der Zeitentwicklungsoperator	251
11.1.1	Allgemeine Darstellung	251
11.1.2	Der Zeitentwicklungsoperator in der Ortsdarstellung	252
11.1.3	Der freie Zeitentwicklungsoperator	253
11.2	Zeitentwicklung und Funktionalintegral.	254
11.3	Summation über Wege bei Spaltexperimenten	257
11.3.1	Doppel- und Mehrfachspalt	257
11.3.2	Das ‚Zeigermodell‘ der Teilchenpropagation	259
12	Das Heisenberg-Bild der Quantenmechanik	261
12.1	Die Heisenberg'schen Bewegungsgleichungen	261
12.2	Allgemeine Struktur der Heisenberg-Gleichung.	263

12.3	Lineare Bewegungsgleichungen	264
12.3.1	Der Fall eines freien Teilchens	264
12.3.2	Harmonischer Oszillator	265
13	Darstellungen der Drehgruppe und die Addition von Drehimpulsen	267
13.1	Symmetrien, Gruppen und ihre Darstellungen	268
13.2	Die Drehgruppe $SO(3)$	270
13.3	Die Lie-Algebra zu $SO(3)$	270
13.4	Darstellungen der Lie-Algebra zu $SO(3)$ für $d = 1$ und $d = 2$	272
13.5	Die Gruppe $SU(2)$	272
13.6	Allgemeine Dimensionen	273
13.7	Drehimpuls und Spin in der Quantenmechanik	276
13.8	Addition von Drehimpulsen	278
13.8.1	Allgemeine Zerlegung des Tensorprodukts zweier Darstellungen	278
13.8.2	Zerlegung für die Darstellungen der Gruppe $SU(2)$	279
13.8.3	Beispiel: Der Gesamtdrehimpuls zu zwei Spin- $\frac{1}{2}$ -Systemen	280
14	Die lineare Kette und der Weg zur Quantenfeldtheorie	283
14.1	Die klassische Lagrange-Funktion und die Bewegungsgleichung	284
14.2	Lösung des klassischen Systems.	285
14.3	Die Quantisierung der linearen Kette	288
14.4	Auf- und Absteigeoperatoren in der Quantenfeldtheorie	292
15	Optische Experimente zur Quantentheorie	295
15.1	Experimentelle Bausteine	295
15.1.1	Laser	295
15.1.2	Doppelspalt und Gitter	296
15.1.3	Strahlteiler.	296
15.1.4	$\lambda/4$ - und $\lambda/2$ -Plättchen	297
15.1.5	Down-Conversion-Kristalle	298
15.2	Das Mach-Zehnder-Interferometer	298
15.3	Wechselwirkungsfreie Messung – das ‚Knallerexperiment‘.	300
15.4	Das Experiment von Hong, Ou und Mandel.	302
15.5	Experimente mit verzögerter Wahl	303
15.6	Der Quantenradierer	305
16	Von Wellenfunktionen zum Zweizustand-System	309
16.1	N -Zustand-Systeme.	309
16.1.1	Die Operatoren $e^{i\alpha Q}$ und $e^{i(\beta/\hbar)P}$	310
16.1.2	Endlichdimensionale Darstellungen	311
16.1.3	Diskrete Fourier-Transformation	312

16.2	Analoga: Polarisierung und Wellenfunktionen	313
16.2.1	Einmal mehr: Die Postulate der Quantentheorie.	313
16.2.2	Weitere Konzepte und Parallelen	317
17	Probleme der Quantentheorie und offene Fragen	321
17.1	Das Messproblem	322
17.1.1	Allgemeine Charakterisierung des Messproblems	322
17.1.2	Mathematische Formulierung des Messproblems.	324
17.2	Dekohärenz	326
17.3	Schrödingers Katze	328
17.4	Das Zeigerbasis-Problem	329
17.5	Quantenkorrelationen und Kontextualität	330
18	Interpretationen der Quantentheorie.	335
18.1	Die Kopenhagener Deutung	335
18.1.1	Komplementarität	336
18.1.2	Der Bezug auf eine klassische Welt	336
18.1.3	Die Born'sche Regel als Ausdruck einer ontologischen Wahrscheinlichkeit.	336
18.1.4	Die Heisenberg'schen Unschärferelationen	337
18.1.5	Das Korrespondenzprinzip	338
18.2	Weitere Interpretationen	338
18.2.1	Ensemble-Interpretation	339
18.2.2	Der Quantenzustand als ‚Katalog von Erwartungen‘	340
18.2.3	QBism – Quantum-Bayesianismus	341
18.2.4	Die Viele-Welten-Interpretation	342
18.3	Kollapsmodelle	344
18.3.1	Wigner und der Einfluss des Bewusstseins	344
18.3.2	Die Gravitation als Auslöser der Reduktion	345
18.3.3	GRW – stochastische Kollapszentren	346
19	Bohm'sche Mechanik.	347
19.1	Die allgemeine Idee	347
19.2	Das Quantenpotenzial	350
19.3	Klassische Theorie oder Quantentheorie	353
19.4	Vorteile der Bohm'schen Mechanik	354
19.5	Kritikpunkte an der Bohm'schen Mechanik	354
19.5.1	Mehrteilchensysteme	355
19.5.2	Die Statistik der Teilchen	356
19.5.3	Der Spin	356
19.5.4	Die Nichtlokalität	356
19.5.5	Die Asymmetrie zwischen Ort und Impuls.	357
19.5.6	Die Bahnkurven der Teilchen	357
19.5.7	Die nichtrelativistische Schrödinger-Gleichung	358
19.5.8	Quantenfeldtheorie	358

20	Propositionen und Quantenlogik	361
20.1	Einführung	361
20.2	Propositionen in der klassischen Mechanik	362
20.3	Propositionen in der Quantenmechanik	364
20.4	Kommensurable und inkommensurable Eigenschaften	366
20.5	Verbandstheorie.	368
20.5.1	Ordnungsrelationen.	368
20.5.2	Verbände	369
20.5.3	Die Verbandsstruktur im physikalischen Propositionenkalkül	371
20.5.4	Weitere Verbandseigenschaften.	371
21	Zitate zur Quantentheorie.	373
	Literatur	379
	Stichwortverzeichnis	383

Allgemeine Einführung

Seit ihrer Entstehung zu Beginn des 20. Jahrhunderts steht die Quantentheorie in dem Ruf, teilweise unverständlich, absurd und in gewisser Hinsicht sogar unlogisch zu sein. Sie scheint unseren durch die klassische Physik geprägten Grundvorstellungen über die Natur zu widersprechen, wodurch ihr manchmal ein esoterischer Charakter zugeschrieben wird. Unbezwifelbar ist jedoch, dass diese Theorie zu sehr präzisen und teilweise verblüffenden Vorhersagen geführt hat und immer noch führt, und soweit diese Vorhersagen experimentell überprüfbar sind, wurden sie uneingeschränkt bestätigt. Auch wenn wir mit dem mathematischen Formalismus der Quantenmechanik weitgehend sicher umgehen können, bleibt das Gefühl, diesen mathematischen Formalismus nicht wirklich mit einem physikalischen Verständnis untermauern zu können. Häufig fällt es sogar schwer, die Fragen präzise zu formulieren, *was* genau an der Quantenmechanik so seltsam oder unverständlich erscheint.

Oft gibt man sich mit der Erklärung zufrieden, eine solche Anschauung sei nicht möglich, da sie notwendigerweise immer auf den aus dem Alltag vertrauten Konzepten der klassischen Physik beruhen wird. Diese Konzepte müssen aber nicht zwingend auch für die mikroskopische Welt anwendbar sein. Darüber hinaus kann eine solche Anschauung, von welcher Art sie auch sei, im Rahmen des mathematischen Formalismus nicht abgeleitet oder gar ihre Richtigkeit bewiesen werden. Es setzt sich dann ein rein positivistischer Standpunkt durch, d. h., die Aufgabe der Physik wird einzig in der Bereitstellung eines Formalismus gesehen, mit dem sich Vorhersagen zu physikalischen Experimenten möglichst weitgehend aufstellen lassen. Der Versuch eines ‚Begreifens‘ im Sinne irgendeiner anschaulichen Vorstellung wird als metaphysisch oder philosophisch und nicht mehr zum Bereich der Naturwissenschaft gehörend abgelehnt.

Wirklich überzeugend erscheint diese Erklärung nicht, denn beispielsweise in der Mathematik können wir problemlos über höher dimensionale Vektorräume, Topologien oder algebraischen Strukturen vieldimensionaler Mannigfaltigkeiten sprechen und damit sogar eine gewisse Anschauung verbinden, obwohl diese weit von den Erfahrungen des Alltags entfernt sind. Das Seltsame an der Quantenmechanik ist weniger, dass sie mit ungewohnten mathematischen Strukturen formuliert wird, sondern dass gewisse Grundvorstellungen über die Natur und unser Verständnis von Realität nicht mehr zu gelten scheinen. Dazu gehören beispielsweise der intrinsische Indeterminismus der Quantenmechanik, die scheinbare

Nichtlokalität sogenannter Quantenkorrelationen, oder auch die unvermeidbare Einbeziehung des Messprozesses (bis hin zur Einbeziehung eines Beobachters) in ihre Beschreibung.

Gerade wegen dieser letztgenannten Kritikpunkte besteht noch nicht einmal unter den Physikern Einigkeit darüber, inwieweit es sich bei der Quantentheorie überhaupt um eine ‚Theorie‘ handelt bzw. was diese Theorie eigentlich umfasst. Das Spektrum möglicher Antworten ist riesig: Es reicht von der Meinung, die Quantentheorie sei *die* fundamentale Theorie unserer Natur, bis hin zu der Ansicht, dass es sich bei der Quantentheorie bestenfalls um eine Sammlung empirisch begründeter, aber im Wesentlichen unverstandener und insbesondere nicht wirklich widerspruchsfreier Vorschriften handle. Die Gründe für diese Meinungsvielfalt werden wir kennenlernen.

Natürlich fehlt es nicht an Erklärungs- oder Interpretationsansätzen. Die unterschiedlichen Interpretationen basieren meist auf dem anerkannten mathematischen Formalismus der Quantenmechanik und führen daher im Allgemeinen zu denselben experimentellen Vorhersagen. Eine Widerlegung der einen oder anderen Interpretation mit wissenschaftlichen Methoden ist nicht möglich – sie sind empirisch gleichwertig. Auch diese Immunisierung der Interpretationsansätze gegen eine Widerlegbarkeit durch das Experiment hat zu der verbreiteten Ansicht beigetragen, alle Versuche in dieser Richtung seien unwissenschaftlich und aus der wissenschaftlichen Debatte auszuschließen.

Doch gerade wenn man Quantenmechanik lehrt, ist es unvermeidbar, dass von Seiten der Lernenden (seien es Schüler und Schülerinnen oder Studierende) Fragen im Sinne des „Wie kann ich mir das vorstellen?“ gestellt werden. Auch von einem wissenschaftlichen Standpunkt aus ist es dann unbefriedigend, solche Fragen mit einem „Am besten gar nicht!“ beiseitezuschieben. Selbst diese Antwort erfordert eine Erläuterung.

Die oberste Entscheidungsinstanz der Naturwissenschaft ist immer das Experiment bzw. die Naturbeobachtung. Ein solches Experiment stellt gleichsam eine Frage an die Natur, hinter der letztendlich immer auch die Grundfrage steht, ob die Theorie oder das Modell, mit dem wir die Natur beschreiben, richtig ist. Eine solche Frage muss aber in einen experimentellen Aufbau und ein experimentelles Protokoll übersetzt werden, und die Antwort – das experimentelle Ergebnis – erfordert eine Interpretation. Ohne eine Theorie oder ein Modell sind diese Übertragungen (in beide Richtungen) unmöglich. Einstein hat in einem Gespräch gegenüber Werner Heisenberg einmal behauptet: „Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.“ [41] Und Max von Laue erwähnt in seinem Buch zur Geschichte der Physik [56] die Messung der Lichtgeschwindigkeit in bewegten Flüssigkeiten durch Fizeau, dessen Ergebnisse zunächst als Beweis für einen Äther, später aber im Rahmen der Relativitätstheorie als Beweis für die Richtigkeit der Einstein’schen Ideen gewertet wurde. Er schreibt dazu:

So ist die Geschichte des Fizeau-Versuchs ein lehrreiches Beispiel dafür, wie weit in die Deutung jedes Versuchs schon theoretische Elemente hineinspielen; man kann sie gar nicht ausschalten. Und wenn dann die Theorien wechseln,

so wird aus einem schlagenden Beweis für die eine leicht ein ebenso starkes Argument für eine ganz entgegengesetzte.

Dieser wissenschaftstheoretische Aspekt spielt in der Quantenmechanik eine noch wesentlichere Rolle als in der klassischen Physik, gerade weil dem Einfluss des Messprozesses und der Messapparatur im allgemeinsten Sinne in der Quantenmechanik eine weitaus größere Bedeutung zukommt als in der klassischen Physik.

Von Werner Heisenberg und Paul Dirac, der bekannt war sowohl für seine Wortkargheit als auch seine scharfe Logik, erzählt man sich die folgende Geschichte (siehe z. B. [9]): Die beiden gingen auf dem Land spazieren und Heisenberg bemerkte auf einem nahegelegenen Feld einige frisch geschorene Schafe. Da es kalt war, meinte er zu Dirac: „Schau, Dirac, diese armen Schafe wurden geschoren.“ Dirac schaute hin, überlegte eine Weile und meinte dann: „Ja, zumindest auf der uns zugewandten Seite.“

Unabhängig davon, ob diese Anekdote stimmt oder nicht, zeigt sie in deutlicher Weise, wie man mit der Quantenmechanik umgehen sollte. Man kann gar nicht vorsichtig genug sein und sollte zunächst einmal nur das akzeptieren, was wirklich beobachtet wird, sowie jede Schlussfolgerung auf ‚die uns abgewandte Seite‘ vermeiden. Das wird sich in aller Strenge praktisch nie umsetzen lassen, aber zumindest sollte man versuchen, sich gelegentlich bewusst zu machen, dass hinter den meisten Schlussfolgerungen nicht direkt beobachtete bzw. beobachtbare Annahmen stehen.

Dieses Lehrbuch besteht aus drei Teilen. Teil I enthält drei Kapitel mit möglichen Zugängen zur Quantentheorie. Diese bieten dem Leser oder der Leserin nicht nur gleich zu Beginn verschiedene Perspektiven, aus denen man die Quantentheorie betrachten und sich ihr nähern kann, sondern können mit den notwendigen didaktischen Änderungen und Elementarisierungen auch in der Schule verwendet werden.

Teil II umfasst den eigentlichen Lehrstoff zur Quantentheorie, den man als Lehrender verstanden haben sollte und der die wesentlichen Grundlagen enthält. Dazu zählen sowohl ein Einstieg in die mathematischen Methoden als auch die Formulierung des im Vorwort angesprochenen ‚Kochrezepts‘ sowie erste Anwendungen dieser Regeln. Dieser Teil enthält jeweils am Ende der jeweiligen Kapitel Übungsaufgaben, mit deren Hilfe der Leser sein Verständnis überprüfen und vertiefen kann. Die Lösungen zu diesen Übungen findet man auf der Webseite www.springer.com/9783662597354.

Teil III schließlich ist eine Sammlung von weiterführenden Kapiteln. Diese Kapitel sind untereinander nahezu unabhängig und setzen lediglich die Inhalte aus Teil I und Teil II voraus; sie können also einzeln und in beliebiger Reihenfolge gelesen werden. Sie bilden ein Zusatzmaterial, das hoffentlich zu einem vertieften Verständnis beitragen kann.