

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Einleitung	7
1 Klassische Physik und Quantenmechanik	14
1.1 Rückblick: Klassische Physik	14
1.2 Hinweise auf eine unvermeidliche Neuformulierung	15
1.2.1 Teilchen, die sich wie Wellen verhalten	16
1.2.2 Wellen, die sich wie Teilchen verhalten	19
1.3 Aufgaben	28
2 Welle-Teilchen-Dualismus	30
2.1 Interferenz bei einzelnen Quantenobjekten	31
2.2 Experimente mit Zwei-Wege-Interferometern	34
2.2.1 Einzelne Elektronen am Doppelspalt	34
2.2.2 Einzelne Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer	37
2.3 Qualitative Formulierung	41
2.3.1 Die Entweder-Oder-Version	41
2.3.2 Qualitative Verallgemeinerung des Prinzips	46
2.4 Quantitative Formulierung des Welle-Teilchen-Dualismus	47
2.5 Weitere Beispiele	49
2.5.1 Wechselwirkungsfreie Messungen	49
2.5.2 Experimente mit verzögerter Auswahl	51
2.6 Vorüberlegungen zum Zustandsbegriff	53
2.7 Aufgaben	54
3 Elementare Axiomatik der Quantenmechanik	58
3.1 Formulierung der Axiome	59
3.2 Interpretation und Bemerkungen	60
3.3 Beispiele	76
3.3.1 Interferenzexperimente und Wellenfunktionen	76
3.3.2 Bornsche Regel auf dem Prüfstand	80
3.3.3 Orts- und Impulseigenzustände	82

3.4	Photonen	86
3.4.1	Photonen-Wellenfunktionen	87
3.4.2	Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer	93
3.4.3	Polarisierte Photonen	95
3.5	Aufgaben	99
4	Unschärferelationen	100
4.1	Meßunschärfen, Meßfehler-Störungs-Relationen	101
4.1.1	Heisenbergs ursprüngliche Version	101
4.1.2	Die moderne Fassung	103
4.2	Präparierunschärfen, Standardabweichungs-Relationen	106
4.2.1	Streuungen von Meßwerten	107
4.2.2	Unschärferelation für Ort und Impuls	109
4.2.3	Unschärferelationen und Welle-Teilchen-Dualismus	112
4.2.4	Das Komplementaritätsprinzip	113
4.3	Aufgaben	115
5	Einfache quantenmechanische Systeme	116
5.1	Beschreibung quantenmechanischer Systeme	116
5.2	Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden	117
5.3	Das Wasserstoffatom	123
5.4	Weitere Anwendungen – Ein Ausblick	137
5.5	Aufgaben	138
6	Superpositionen und verschränkte Zustände	143
6.1	Das Superpositionsprinzip der Quantenmechanik	143
6.2	Superpositionszustände und ihre Interpretation	145
6.3	Verschränkte Zustände	150
6.3.1	Die Dirac-Schreibweise	151
6.3.2	Produktzustände und verschränkte Zustände	152
6.3.3	Relativität der Verschränkung	160
6.3.4	Technische Anwendungen	163
6.4	Welle-Teilchen-Dualismus und Verschränkung	165
6.4.1	Einzelne Quantenobjekte im Zwei-Wege-Interferometer	165
6.4.2	Überlappende Wellenfunktionen	171
6.4.3	Herleitung der Dualitätsrelation	173
6.4.4	Zwei- und Viel-Teilchen-Interferenz	178
6.5	Der quantenmechanische Meßprozeß	186
6.5.1	Der Kollaps der Wellenfunktion	187
6.5.2	Der Schrödingersche Luftballon	189
6.5.3	Das Meßproblem in der Quantenmechanik	190
6.5.4	Das Problem der bevorzugten Basis	195
6.6	Umgebungsinduzierte Dekohärenz	197

6.6.1	Wechselwirkung mit der Umgebung	198
6.6.2	Operatoren, Eigenwerte und Erwartungswerte	201
6.6.3	Scheinbarer Kollaps durch Dekohärenz	205
6.6.4	Umgebungsinduzierte Superauswahlregeln	210
6.6.5	Was Dekohärenz kann und was sie nicht kann	213
6.7	Aufgaben	214
7	Quantenmechanische No-go-Theoreme	215
7.1	Nichtlokalität und Bellsche Ungleichungen	215
7.1.1	Das Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon	215
7.1.2	Bellsche Ungleichungen	223
7.1.3	Das Bellsche Theorem	226
7.1.4	Verletzungen der Bellschen Ungleichungen in der Quantenmechanik	230
7.1.5	Die Tsirelsonsche Ungleichung	235
7.1.6	Konsequenzen für das physikalische Weltbild	238
7.2	Greenberger-Horne-Zeilinger-Zustände	243
7.3	Das Kochen-Specker-Theorem	247
7.4	Universalität der Quantenmechanik und Leggett-Garg-Ungleichungen	252
7.4.1	Makroskopischer Realismus und quantenmechanischer Universalismus	252
7.4.2	Leggett-Garg-Ungleichungen	254
7.5	No Signaling in Time	261
7.6	Die Bedeutung der Wellenfunktion	263
7.6.1	Epistemische und ontische Deutung	263
7.6.2	Ontische Zustände	265
7.6.3	Das Theorem von Pusey, Barrett und Rudolph	266
7.7	Aufgaben	271
8	Philosophische Quantenmechanik	274
8.1	Die wichtigsten Interpretationen – ein Überblick	274
8.2	Diskussion und Kritik	278
8.2.1	Der große Nebel aus dem Norden	278
8.2.2	Das menschliche Bewußtsein als Reduktionsmittel	283
8.2.3	Wie überlagert man Möglichkeiten?	286
8.2.4	Die Aufgabe der physikalischen Realität	288
8.2.5	Alles nur Statistik?	293
8.2.6	Myriaden von Universen	298
8.2.7	Pilotwellen und Trajektorien	305
8.3	Zusammenfassung und Ausblick	315
	Lösungen der Aufgaben	318

Anhang	342
A Keine verschmierte Ladungswolken	342
B Axiomatische Formulierung der Quantenmechanik	347
B.1 Die Axiome der Quantenmechanik	347
B.2 Zustände und Zustandsvektoren	349
B.3 Physikalische Größen und Operatoren	350
B.4 Meßwerte und Spektren	351
B.5 Quantenmechanische Wahrscheinlichkeiten	353
B.6 Das Projektionspostulat	357
B.7 Unitäre Zeitentwicklung	372
Literaturverzeichnis	376