

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeine und historische Bemerkungen	1
1.2	Bedeutung für Wissenschaft und Technik	3
1.3	Philosophische Implikationen	6
	Literaturverzeichnis	9
2	Einige grundlegende Experimente	11
2.1	Photoelektrischer Effekt	11
2.2	Compton-Effekt	14
2.3	Beugung von Materieteilchen	17
2.4	Teilcheninterferenz am „Doppelspalt“	22
2.4.1	Doppelspaltexperimente mit Elektronen	22
2.4.2	Teilcheninterferenz und „Welcher Weg“-Information ...	26
	Literaturverzeichnis	29
3	Teilchen-Welle-Dualismus	31
3.1	Die Wellenfunktion und ihre Interpretation	31
3.2	Wellenpaket und Teilchengeschwindigkeit	35
3.3	Die Unschärfe-Relation	39
3.4	Ein Ausflug in die klassische Mechanik	41
3.5	Observable, Operatoren und Schrödinger-Gleichung	45
3.6	Einfache Lösungen der Schrödinger-Gleichung	50
3.6.1	„Eingespernte“ Elektronen: Gebundene Zustände	51
3.6.2	Elektronen strömen	58
3.6.3	Elektronen laufen gegen eine Potentialstufe	60
3.6.4	Elektronen tunneln durch eine Barriere	63
3.6.5	Resonantes Tunneln	68
3.7	Einzelektronen-Tunneln	76
	Literaturverzeichnis	83
4	Quantenmechanische Zustände im Hilbert-Raum	85
4.1	Eigenlösungen und Messung von Observablen	85
4.2	Vertauschbarkeit von Operatoren: Kommutatoren	91
4.3	Darstellungen quantenmechanischer Zustände und Observabler	93

4.3.1	Vektoren von Wahrscheinlichkeitsamplituden und Matrizen als Operatoren	93
4.3.2	Drehungen des Hilbertraums	98
4.3.3	Quantenzustände in Dirac-Notation	101
4.3.4	Quantenzustände mit kontinuierlichem Eigenwertspektrum	104
4.3.5	Die Zeitentwicklung in der Quantenmechanik	109
4.4	Wir spielen mit Operatoren: Der Oszillator	112
4.4.1	Der klassische harmonische Oszillator	113
4.4.2	Trepp auf – Trepp ab: Stufenoperatoren und Eigenwerte	114
4.4.3	Der anharmonische Oszillator	120
	Literaturverzeichnis	124
5	Drehimpuls, Spin und Teilchenarten	125
5.1	Die klassische Kreisbewegung	125
5.2	Der quantenmechanische Drehimpuls	127
5.3	Rotationssymmetrie und Drehimpuls; Eigenzustände	134
5.4	Kreisende Elektronen im elektromagnetischen Feld	140
5.4.1	Die Lorentz-Kraft	140
5.4.2	Der Hamilton-Operator mit Magnetfeld	141
5.4.3	Drehimpuls und magnetisches Moment	143
5.4.4	Eichinvarianz und Aharanov-Bohm-Effekt	146
5.5	Der Spin	153
5.5.1	Stern-Gerlach-Experiment	153
5.5.2	Der Spin und sein 2D-Hilbert-Raum	157
5.5.3	Spin-Präzession	161
5.6	Teilchenarten: Fermionen und Bosonen	164
5.6.1	Zwei und mehr Teilchen	164
5.6.2	Spin und Teilchenarten: Pauli-Prinzip	167
5.6.3	Zwei Welten: Fermi- und Bosestatistik	173
5.6.4	Der Elementarteilchenzoo	180
5.7	Drehimpulse in Nanostrukturen und bei Atomen	192
5.7.1	Künstliche Quantenpunkt-Atome	192
5.7.2	Atome und Periodensystem	199
5.7.3	Quantenringe	204
	Literaturverzeichnis	208
6	Näherungslösungen für wichtige Modellsysteme	209
6.1	Teilchen in einem schwach veränderlichen Potential: Die WKB-Methode	210
6.1.1	Anwendung: Tunneln durch eine Schottky-Barriere ...	212
6.2	Geschicktes Erraten einer Näherung: Die Variationsmethode .	215
6.2.1	Beispiel des harmonischen Oszillators	218

6.2.2 Der Grundzustand des Wasserstoffatoms 221

6.2.3 Moleküle und gekoppelte Quantenpunkte 224

6.3 Kleine stationäre Potentialstörungen:
 Zeitunabhängige Störungsrechnung 232

6.3.1 Störung entarteter Zustände 236

6.3.2 Anwendungsbeispiel: Der Stark-Effekt
 im Halbleiter-Quantentopf 239

6.4 Übergänge zwischen Quantenzuständen:
 Zeitabhängige Störungsrechnung 242

6.4.1 Periodische Störung: Fermis Goldene Regel 244

6.4.2 Elektron-Licht-Wechselwirkung: Optische Übergänge .. 247

6.4.3 Optische Absorption und Emission
 in einem Quantentopf 250

6.4.4 Dipolauswahlregeln für Drehimpulszustände 254

6.5 Übergänge in 2-Niveau-Systemen:
 Die Rotationswellen-Näherung 261

6.5.1 2-Niveau-Systeme in Resonanz
 mit elektromagnetischer Strahlung 261

6.5.2 Umklappen von Spins 266

6.5.3 Kernspin-Resonanz in Chemie, Biologie und Medizin .. 271

6.6 Streuung von Teilchen 278

6.6.1 Streuwellen und differentieller Streuquerschnitt 280

6.6.2 Streuamplitude und Bornsche Näherung 282

6.6.3 Coulomb-Streuung 287

6.6.4 Streuung an Kristallen, an Oberflächen
 und an Nanostrukturen 292

6.6.5 Inelastische Streuung an einem Molekül 299

Literaturverzeichnis 302

**7 Superposition, Verschränkung
 und andere Absonderlichkeiten 305**

7.1 Superposition von Zuständen 306

7.1.1 Streuung zweier gleicher Teilchen aneinander:
 ein spezieller Superpositionszustand 309

7.2 Verschränkung 312

7.2.1 Die Bellschen Ungleichungen und ihre experimentelle
 Überprüfung 317

7.2.2 „Welcher-Weg-Information“ und Verschränkung:
 ein Gedankenexperiment 324

7.3 Reine und gemischte Zustände: Die Dichtematrix 328

7.3.1 Quantenmechanische und klassische
 Wahrscheinlichkeit 328

7.3.2 Dichtematrix 332

7.4 Quantenumwelt, Messprozess und Verschränkung 336

7.4.1 Subsystem und Umwelt 337

7.4.2	Offene Quantensysteme, Dekohärenz und Messprozess	340
7.4.3	Schrödingers Katze	344
7.5	Superpositionszustände für Quantenbits und Quantenrechnen	345
7.5.1	Gekoppelte Quantenpunkte als Quantenbits	346
7.5.2	Experimentelle Realisierung eines Quantenbits mit Quantenpunkten	351
	Literaturverzeichnis	356
8	Felder und Quanten	357
8.1	Ingredienzien einer Quantenfeldtheorie	358
8.2	Die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes	360
8.2.1	Was sind Photonen?	366
8.2.2	2-Niveau-Atom im Lichtfeld: Spontane Emission	371
8.2.3	Lichtwellen beugen Atome	376
8.2.4	Noch einmal: „Welcher Weg“-Information und Verschränkung	383
8.2.5	Der Casimir-Effekt	389
8.3	Das quantisierte Schrödinger-Feld massiver Teilchen	392
8.3.1	Das quantisierte fermionische Schrödinger-Feld	398
8.3.2	Feldoperatoren und zurück zur Einteilchen- Schrödinger-Gleichung	402
8.3.3	Elektronen in Kristallen: Zurück zur Einteilchennäherung	408
8.3.4	Das Bändermodell: Metalle und Halbleiter	412
8.4	Quantisierte Gitterwellen: Phononen	421
8.4.1	Phonon-Phonon-Wechselwirkung	429
8.4.2	Elektron-Phonon-Wechselwirkung	435
8.4.3	Absorption und Emission von Phononen	438
8.4.4	Feldquanten vermitteln Kräfte zwischen Teilchen	441
	Literaturverzeichnis	446
A	Grenzflächen und Heterostrukturen	449
B	Präparation von Halbleiter-Nanostrukturen	457
	Übungen	467
	Sachverzeichnis	477