

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>5</b>
<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>1 Der Untergang der klassischen Physik</b>	<b>10</b>
1.1 Einige Grundideen der klassischen Physik	11
1.1.1 Klassische Teilchen und klassische Felder	12
1.1.2 Ein wenig theoretische Mechanik	13
1.1.2.1 Das Hamiltonsche Prinzip	14
1.1.2.2 Lagrange-Formalismus	16
1.1.2.3 Die Hamiltonschen Gleichungen	19
1.1.2.4 Kanonische Transformationen	21
1.1.2.5 Hamilton-Jacobi-Theorie	24
1.1.2.6 Wirkungsvariable und Winkelvariable	28
1.2 Die Grenzen der klassischen Physik	29
1.2.1 Spektrale Verteilung von Hohlraumstrahlung	30
1.2.2 Spezifische Wärme von Festkörpern	31
1.2.3 Stabilität der Atome	33
1.2.3.1 Die Atomhypothese	34
1.2.3.2 Das Rutherfordsche Atommodell	35
1.2.3.3 Instabile Atome	40
1.2.4 Was ist mit dem Photoeffekt?	48
<b>2 Die ältere Quantenmechanik</b>	<b>52</b>
2.1 Die Plancksche Strahlungsformel	52
2.1.1 Die ursprüngliche Ableitung durch Planck	52
2.1.2 Anwendungen der Planckschen Strahlungsformel	60
2.1.3 Weitere Ableitungen der Planckschen Strahlungsformel	62
2.1.3.1 Quantenhypothese, aber richtig	63
2.1.3.2 Die erste Quantisierung des Strahlungsfeldes	65
2.1.3.3 Einsteins zweite Herleitung	68
2.2 Die Anfänge der Tieftemperaturphysik	71

2.3	Die Lichtquantenhypothese . . . . .	74
2.3.1	Vom Rechenrick zur physikalischen Realität . . . . .	75
2.3.2	Einsteins Fluktuationsformel . . . . .	78
2.3.3	Photoeffekt und Quantentheorie . . . . .	89
2.3.4	Der Compton-Effekt . . . . .	91
2.4	Die Atommodelle von Bohr und Sommerfeld . . . . .	94
2.4.1	Das Bohrsche Atommodell . . . . .	95
2.4.2	Das Sommerfeldsche Atommodell . . . . .	99
2.5	Die Anfänge der Quantenstatistik . . . . .	118
2.5.1	Die Bose-Einstein-Statistik . . . . .	118
2.5.2	Einsteins Theorie der idealen Gase . . . . .	124
2.5.3	Elektronenspin und Pauli-Prinzip . . . . .	132
2.5.4	Die Fermi-Dirac-Statistik . . . . .	140
2.5.5	Bosonen und Fermionen . . . . .	143
<b>3</b>	<b>Die neuere Quantenmechanik</b>	<b>147</b>
3.1	Materiewellen . . . . .	148
3.2	Die ersten Pfadintegrale . . . . .	151
3.3	Matrizenmechanik . . . . .	154
3.3.1	Die Matrizenformulierung der Quantenmechanik . . . . .	155
3.3.1.1	Orts-, Impuls- und Hamiltonmatrizen . . . . .	156
3.3.1.2	Energieniveaus und Übergangsfrequenzen . . . . .	160
3.3.2	Das Wasserstoffatom als Beispiel . . . . .	164
3.3.2.1	Runge-Lenz-Vektor . . . . .	165
3.3.2.2	Direkter Weg mit Matrizenmechanik . . . . .	168
3.4	Wellenmechanik . . . . .	171
3.4.1	Ein vorweggenommener Alternativvorschlag . . . . .	171
3.4.2	Der Weg zur Wellenmechanik . . . . .	174
3.4.3	Die zeitabhängige Version der Wellenmechanik . . . . .	182
3.4.4	Versuche anschaulicher Deutungen . . . . .	183
3.4.5	Zerfließende Wellenpakete . . . . .	186
3.5	Sind Matrizen- und Wellenmechanik äquivalent? . . . . .	193
3.6	Hilberträume und abstrakte Quantenmechanik . . . . .	201
3.7	Die Wahrscheinlichkeitsdeutung . . . . .	203
3.7.1	Eine Anmerkung mit Folgen . . . . .	204
3.7.2	Die Lehrbuchfassung der Wahrscheinlichkeitsdeutung . . . . .	207
3.7.3	Zwei Arten von Wahrscheinlichkeiten . . . . .	213
3.7.4	Vollständigkeit der Quantenmechanik . . . . .	219
3.8	Unschärferelationen . . . . .	223
3.8.1	Unschärferelation für Ort und Impuls . . . . .	223
3.8.1.1	Heisenbergs ursprüngliche Version . . . . .	223
3.8.1.2	Erste Herleitungen . . . . .	227

3.8.2	Die exakte Form der Unschärferelationen . . . . .	233
3.8.2.1	Unschärferelationen korrekt interpretiert . . . . .	233
3.8.2.2	Funktionalanalytische Herleitung . . . . .	236
3.8.3	Die Schrödingersche Unschärferelation . . . . .	239
3.8.4	Unschärferelationen für $n$ Observable . . . . .	243
3.8.5	Was ist mit Energie und Zeit? . . . . .	246
3.8.5.1	Ein Phantom geht um . . . . .	246
3.8.5.2	Die Zeit als kanonische Variable? . . . . .	248
3.9	Erste Interpretationen der Quantenmechanik . . . . .	255
3.9.1	Die Ensemble-Interpretation . . . . .	256
3.9.2	Der Kollaps der Wellenfunktion . . . . .	258
3.9.3	Die Kopenhagener Deutung . . . . .	260
3.9.3.1	Niels Bohr . . . . .	261
3.9.3.2	Werner Heisenberg . . . . .	269
3.9.3.3	Carl Friedrich von Weizsäcker . . . . .	283
3.9.4	Kritik der Interpretationen . . . . .	287
3.9.4.1	Alles nur Statistik? . . . . .	287
3.9.4.2	Klassische Meßgeräte und nichtklassische Meßobjekte? . . .	293
<b>4</b>	<b>Ausblick und philosophische Bewertung</b>	<b>302</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>307</b>