

Inhalt

Vorwort — V

Legende — VII

1 Die Physik, ihre Lehrbücher und ihre Geschichte — 1

- 1.1 Die Physik und ihre Lehrbücher — 1
- 1.2 Die Physik und ihre Geschichte — 2
- 1.3 *Nature of Science* und Wissenschaftsgeschichte — 6
- 1.3.1 Die Rolle der Wissenschaftsgeschichte für den Lernbereich NOS — 9
- 1.4 Die Quantenphysik als Revolution — 12
- 1.4.1 Mythos klassische Physik und klassisches Weltbild — 13
- 1.4.2 Warum sprechen wir von „klassischer Physik“? — 17
- 1.4.3 Gab es eine Quantenrevolution? — 18
- 1.5 Die Quasigeschichte der Quantentheorie — 20

2 Die frühe Quantentheorie — 23

- 2.1 Das Problem der Schwarzkörperstrahlung — 23
- 2.1.1 Die verschiedenen Gesetze der Schwarzkörperstrahlung und ihr mathematischer Zusammenhang — 24
- 2.1.2 Das Strahlungsgesetz von Wien — 26
- 2.1.3 Das Strahlungsgesetz von Rayleigh–Jeans — 28
- 2.1.4 Das Scheitern des Wien’schen Strahlungsgesetzes — 29
- 2.1.5 Das Strahlungsgesetz von Planck — 31
- 2.2 Einsteins Lichtquantenhypothese — 37
- 2.2.1 Rezeption der Lichtquantenhypothese — 40
- 2.3 Einsteins Theorie der spezifischen Wärme — 43
- 2.4 Das Spektrum von Röntgenstrahlung — 47
- 2.4.1 Der Nachweis der Beugung von Röntgenstrahlung durch Laue, Knipping und Friedrich — 48
- 2.4.2 Die Braggs — 51
- 2.4.3 Das Debye–Scherrer–Hull-Verfahren — 55
- 2.5 Atombegriff und Atommodelle vor Bohr — 56
- 2.5.1 Exkurs zur akustischen und elektromagnetischen Abstrahlung — 59
- 2.5.2 Das Spektrum des Wasserstoffs — 61
- 2.6 Das Bohr’sche Atommodell — 62
- 2.6.1 Das Bohr’sche Korrespondenzprinzip — 65
- 2.6.2 Didaktische Kritik am Bohr’schen Atommodell — 67
- 2.6.3 Das Atommodell von Bohr–Sommerfeld — 68
- 2.6.4 Henry Moseley und das Röntgenspektrum — 78
- 2.7 Der Franck–Hertz-Versuch — 82

2.7.1	Interpretation des Ergebnisses —	83
2.7.2	Die ursprüngliche Interpretation von Franck und Hertz —	85
2.8	Historischer Einschub: Der Erste Weltkrieg und seine Folgen —	86
2.9	Einsteins Strahlungstheorie —	91
2.9.1	Bedeutung der Einstein'schen Strahlungstheorie —	94
2.10	Der Doppler-Effekt in der Quantentheorie —	96
2.10.1	Einsteins Experiment zur Entscheidung des Welle-Teilchen-Dualismus —	97
2.10.2	Erklärung des Doppler-Effekt mit Lichtquanten —	99
2.11	Das Stern–Gerlach-Experiment —	101
2.11.1	Die aktuelle Erklärung des Stern–Gerlach-Experiments —	104
2.11.2	Adolf Schmidt, der vergessene Helfer —	105
2.12	Der Compton-Effekt —	106
2.12.1	Aktuelle Erklärung des Compton-Effekts —	108
2.13	Louis de Broglies Materiewellen —	109
2.13.1	Bedeutung der Materiewellen-Hypothese —	111
2.13.2	Experimenteller Nachweis der Materiewellen —	112
2.14	Die wegweisenden Experimente der Quantentheorie —	119
2.15	Die „alte“ Quantentheorie und ihre „Krise“ —	122

3 Der Formalismus der Quantenmechanik — 125

3.1	Postulate der Quantenmechanik —	126
3.2	Heisenbergs Matrizenmechanik —	127
3.3	Schrödingers Wellenmechanik —	132
3.3.1	Die Schrödingergleichung —	133
3.3.2	Die zeitabhängige Schrödingergleichung —	134
3.3.3	Zur physikalischen Bedeutung der Wellenfunktion —	137
3.4	Quantenmechanik als Hilbertraum-Theorie —	142
3.4.1	Erwartungswerte für Ort und Impuls —	142
3.4.2	Operatoren für physikalische Größen —	143
3.4.3	Das Skalarprodukt von Wellenfunktionen und der Hilbertraum —	144
3.4.4	Warum Eigenwerte in der Quantenmechanik eine besondere Rolle spielen —	148
3.4.5	Orthogonale Zustände —	148
3.4.6	Verallgemeinerung der Born'schen Regel —	149
3.4.7	Der „Kollaps der Wellenfunktion“ und die Ensemble-Deutung —	151
3.4.8	Operatoren mit kontinuierlichem Spektrum —	152
3.4.9	Der Zusammenhang zwischen Matrizen- und Wellenmechanik —	156
3.4.10	Der klassische Grenzwert der Quantenmechanik —	157
3.5	Die Dirac-Schreibweise —	159
3.5.1	Basiswechsel in Vektorräumen —	160
3.5.2	Die Bra-Ket-Notation —	161
3.6	Gemischte Zustände, Symmetrien und Erhaltungsgrößen —	165

3.6.1	Die Dichtematrix — 165
3.6.2	Symmetrien und Erhaltungsgrößen — 170
4	Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation — 175
4.1	Kennard- und Robertson-Beziehung — 175
4.1.1	Die Rolle der Messung in der HUR — 176
4.1.2	Geschichte der Unbestimmtheitsrelation — 177
4.2	Neuere Entwicklungen zu Unbestimmtheitsrelationen — 180
4.2.1	HUR beim Einzelspalt: qualitative Betrachtung — 181
4.2.2	HUR beim Einzelspalt: quantitative Betrachtung — 182
4.2.3	HUR und das Doppelspaltexperiment — 185
5	Anwendung und Vertiefung der Quantenmechanik — 189
5.1	Das freie Teilchen — 190
5.1.1	Das Normierungsproblem — 191
5.1.2	Das Gauß'sche Wellenpaket — 192
5.2	Der unendlich hohe Potenzialtopf — 193
5.2.1	Die HUR beim unendlichen Potenzialtopf — 198
5.2.2	Der Impuls beim unendlichen Potenzialtopf — 199
5.2.3	Das Elektronengasmodell — 203
5.2.4	Der unendliche Potenzialtopf und NOS — 205
5.3	Der endlich hohe Potenzialtopf — 206
5.3.1	Gebundene Lösungen ($E < 0$) — 206
5.3.2	Kontinuumslösungen ($E > 0$) — 210
5.4	Der Tunneleffekt — 213
5.5	Der quantenmechanische harmonische Oszillator — 214
5.5.1	Auf- und Absteigeoperatoren — 215
5.5.2	Besetzungszahloperator und Unbestimmtheitsrelation — 218
5.5.3	Historische Anmerkung zum quantenmechanischen HO — 219
5.6	Das Wasserstoffatom — 220
5.6.1	Der Drehimpuls — 220
5.6.2	Die Schrödingergleichung in Kugelkoordinaten — 223
5.6.3	Magnetfelder und der Elektronenspin — 230
5.6.4	Das Pauliprinzip und die quantenmechanische Ununterscheidbarkeit — 237
5.7	Atombau und das Periodensystem der Elemente — 239
5.7.1	Aufbauprinzip und Nebengruppen — 240
5.7.2	Kann die Chemie auf die Physik reduziert werden? — 242
5.8	Spin-Addition und Verschränkung — 242
5.8.1	Das Tensorprodukt und die Spin-Addition — 243
5.8.2	Verschränkung — 247
5.9	Die Wechselwirkung von Strahlung und Materie in der semiklassischen Näherung — 254

5.9.1 Photoeffekt ohne Photonen — **255**

5.9.2 Was sind Photonen? — **260**

6 Die Philosophie der Quantenmechanik — 268

6.1 Die Interpretation der Quantenmechanik — **268**

6.1.1 Die „Kopenhagener Deutung“ der Quantentheorie — **269**

6.1.2 Schrödingers Katze und das Messproblem — **271**

6.1.3 Maudlins Trilemma und eine Klassifikation der Interpretationen — **274**

6.1.4 Die De-Broglie-Bohm-Theorie — **275**

6.1.5 Viele-Welten-Interpretation — **277**

6.1.6 Spontane-Kollaps-Theorien — **278**

6.1.7 Epistemische Interpretationen — **278**

6.2 EPR und die Bell'schen Ungleichungen — **280**

6.2.1 Das EPR-Experiment — **280**

6.2.2 Die Bell'sche Ungleichung — **282**

6.2.3 Konsequenzen aus der Verletzung der Bell'schen Ungleichung — **288**

6.2.4 Der experimentelle Test der Bell'schen Ungleichung — **290**

6.2.5 Die Rezeptionsgeschichte des Bell-Theorems — **291**

A Appendix — 297

A.1 Die Berechnung der spektralen Modendichte — **297**

A.2 Details zu Plancks Herleitung des Strahlungsgesetzes — **298**

Literatur — 301

Stichwortverzeichnis — 315