

# Inhaltsverzeichnis

Liste der wichtigsten verwendeten Symbole . . . . .	XIII
---	------

## 1. Einleitung

1.1 Klassische Physik und Quantenphysik . . . . .	1
1.2 Kurzer historischer Überblick . . . . .	1

## 2. Masse und Größe des Atoms

2.1 Was ist ein Atom? . . . . .	5
2.2 Bestimmung der Masse . . . . .	5
2.3 Methoden zur Bestimmung der Loschmidt-Zahl . . . . .	7
2.3.1 Elektrolyse . . . . .	7
2.3.2 Gas- und Boltzmann-Konstante . . . . .	7
2.3.3 Röntgenbeugung an Kristallen . . . . .	8
2.3.4 Messung mit Hilfe des radioaktiven Zerfalls . . . . .	9
2.4 Bestimmung der Größe des Atoms . . . . .	10
2.4.1 Anwendung der kinetischen Gastheorie . . . . .	10
2.4.2 Der Wirkungsquerschnitt . . . . .	11
2.4.3 Experimentelle Bestimmung von Wirkungsquerschnitten . . . . .	14
2.4.4 Bestimmung der Größe von Atomen aus dem Kovolumen . . . . .	15
2.4.5 Größe von Atomen aus Messungen der Röntgenbeugung an Kristallen . . . . .	16
2.4.6 Kann man einzelne Atome sehen? . . . . .	21

## 3. Die Isotopie

3.1 Das Periodische System der Elemente . . . . .	25
3.2 Massenspektroskopie . . . . .	27
3.2.1 Parabelmethode . . . . .	27
3.2.2 Verbesserte Massenspektrometer . . . . .	30
3.2.3 Ergebnisse der Massenspektroskopie . . . . .	32
3.2.4 Moderne Anwendungen der Massenspektrometer . . . . .	32
3.2.5 Isotopentrennung . . . . .	33

## 4. Kernstruktur des Atoms

4.1 Durchgang von Elektronen durch Materie . . . . .	35
4.2 Durchgang von $\alpha$ -Teilchen durch Materie (Rutherford-Streuung) . . . . .	37
4.2.1 Einige Eigenschaften von $\alpha$ -Teilchen . . . . .	37
4.2.2 Streuung von $\alpha$ -Teilchen in einer Folie . . . . .	38
4.2.3 Ableitung der Rutherfordschen Streuformel . . . . .	39
4.2.4 Experimentelle Ergebnisse . . . . .	44
4.2.5 Was heißt Kernradius? . . . . .	45

**5. Das Photon**

5.1 Licht als Welle . . . . .	47
5.2 Die Temperaturstrahlung . . . . .	49
5.2.1 Spektrale Verteilung der Hohlraumstrahlung . . . . .	49
5.2.2 Die Plancksche Strahlungsformel . . . . .	52
5.2.3 Ableitung der Planckschen Formel nach Einstein . . . . .	53
5.3 Der Photoeffekt (Lichtelektrischer Effekt) . . . . .	56
5.4 Der Comptoneffekt . . . . .	59
5.4.1 Experimente . . . . .	59
5.4.2 Ableitung der Comptonverschiebung . . . . .	60

**6. Das Elektron**

6.1 Erzeugung freier Elektronen . . . . .	65
6.2 Größe des Elektrons . . . . .	65
6.3 Die Ladung des Elektrons . . . . .	66
6.4 Die spezifische Ladung $e/m$ des Elektrons . . . . .	67
6.5 Das Elektron als Welle . . . . .	70

**7. Einige Grundeigenschaften der Materiewellen**

7.1 Wellenpakete . . . . .	75
7.2 Wahrscheinlichkeitsdeutung . . . . .	79
7.3 Die Heisenbergsche Unschärferelation . . . . .	82
7.4 Die Energie-Zeit-Unschärferelation . . . . .	84
7.5 Einige Konsequenzen aus der Unschärferelation für gebundene Zustände . . . . .	84

**8. Das Bohrsche Modell des Wasserstoff-Atoms**

8.1 Spektroskopische Vorbemerkungen . . . . .	89
8.2 Das optische Spektrum des Wasserstoff-Atoms . . . . .	91
8.3 Die Bohrschen Postulate . . . . .	95
8.4 Einige quantitative Folgerungen . . . . .	96
8.5 Mitbewegung des Kerns . . . . .	98
8.6 Wasserstoff-ähnliche Spektren . . . . .	100
8.7 Myonen-Atome . . . . .	102
8.8 Anregung von Quantensprüngen durch Stoß . . . . .	105
8.9 Sommerfelds Erweiterung des Bohrschen Modells und experimentelle Begründung einer zweiten Quantenzahl . . . . .	107
8.10 Aufhebung der Bahnentartung durch relativistische Massenveränderung . . . . .	109
8.11 Grenzen der Bohr-Sommerfeld-Theorie. Das Korrespondenzprinzip . . . . .	110

**9. Das mathematische Gerüst der Quantentheorie**

9.1 Das im Kasten eingesperrte Teilchen . . . . .	113
9.2 Die Schrödinger-Gleichung . . . . .	117
9.3 Das begriffliche Gerüst der Quantentheorie . . . . .	120
9.3.1 Messungen, Meßwerte und Operatoren . . . . .	120
9.3.2 Impulsmessung und Impulswahrscheinlichkeit . . . . .	120
9.3.3 Mittelwerte, Erwartungswerte . . . . .	121
9.3.4 Operatoren und Erwartungswerte . . . . .	125

9.3.5 Bestimmungsgleichungen für die Wellenfunktion . . . . .	126
9.3.6 Gleichzeitige Meßbarkeit und Vertauschungsrelationen . . . . .	127
9.4 Der quantenmechanische Oszillator . . . . .	130

## **10. Quantenmechanik des Wasserstoff-Atoms**

10.1 Die Bewegung im Zentralfeld . . . . .	139
10.2 Drehimpuls-Eigenfunktionen . . . . .	141
10.3 Der Radialteil der Wellenfunktion beim Zentralfeld* . . . . .	147
10.4 Der Radialteil der Wellenfunktion beim Wasserstoffproblem . . . . .	149

## **11. Aufhebung der $l$ -Entartung in den Spektren der Alkali-Atome**

11.1 Schalenstruktur . . . . .	157
11.2 Abschirmung . . . . .	159
11.3 Das Termschema . . . . .	160
11.4 Tiefere Schalen . . . . .	165

## **12. Bahn- und Spin-Magnetismus, Feinstruktur**

12.1 Einleitung und Übersicht . . . . .	167
12.2 Magnetisches Moment der Bahnbewegung . . . . .	168
12.3 Präzession und Orientierung im Magnetfeld . . . . .	170
12.4 Spin und magnetisches Moment des Elektrons . . . . .	172
12.5 Messung des gyromagnetischen Verhältnisses nach Einstein und de Haas . . . . .	174
12.6 Nachweis der Richtungsquantelung durch Stern und Gerlach . . . . .	175
12.7 Feinstruktur und Spin-Bahn-Kopplung, Übersicht . . . . .	177
12.8 Berechnung der Spin-Bahn-Aufspaltung im Bohrschen Atommodell . . . . .	178
12.9 Niveauschema der Alkali-Atome . . . . .	182
12.10 Feinstruktur beim Wasserstoff-Atom . . . . .	183
12.11 Die Lamb-Verschiebung . . . . .	184

## **13. Atome im Magnetfeld, Experimente und deren halbklassische Beschreibung**

13.1 Richtungsquantelung . . . . .	189
13.2 Die Elektronenspin-Resonanz . . . . .	189
13.3 Der Zeeman-Effekt . . . . .	192
13.3.1 Experimente . . . . .	192
13.3.2 Erklärung des Zeeman-Effekts vom Standpunkt der klassischen Elektronentheorie . . . . .	194
13.3.3 Beschreibung des normalen Zeeman-Effekts im Vektormodell . . . . .	196
13.3.4 Der anomale Zeeman-Effekt . . . . .	198
13.3.5 Magnetisches Moment bei Spin-Bahn-Kopplung . . . . .	199
13.3.6 Der Paschen-Back-Effekt . . . . .	201
13.3.7 Doppelresonanz und optisches Pumpen . . . . .	202

## **14. Atome im Magnetfeld, quantenmechanische Behandlung**

14.1 Quantentheorie des normalen Zeeman-Effekts . . . . .	205
14.2 Die quantentheoretische Behandlung des Elektronen- und Protonenspins . . . . .	207
14.2.1 Der Spin als Drehimpuls . . . . .	207
14.2.2 Spinoperatoren, Spinmatrizen und Spinwellenfunktion . . . . .	208

14.2.3	Die Schrödinger-Gleichung des Spins im Magnetfeld . . . . .	211
14.2.4	Beschreibung der Spinpräzession mittels Erwartungswerten . . . . .	212
14.3	Die quantenmechanische Behandlung des anomalen Zeeman-Effekts mit der Spin-Bahn-Kopplung* . . . . .	215
14.4	Quantentheorie des Spins in einem konstanten und einem dazu transversalen zeitabhängigen Magnetfeld . . . . .	219
14.5	Die Blochschen Gleichungen . . . . .	223
 <b>15. Atome im elektrischen Feld</b>		
15.1	Beobachtung des Stark-Effekts . . . . .	227
15.2	Quantentheorie des linearen und quadratischen Stark-Effekts . . . . .	229
15.2.1	Der Hamiltonoperator . . . . .	229
15.2.2	Der quadratische Stark-Effekt. Störungstheorie ohne Entartung* . . . . .	230
15.2.3	Der lineare Stark-Effekt. Störungstheorie mit Entartung* . . . . .	233
15.3	Die Wechselwirkung eines Zwei-Niveau-Atoms mit einem kohärenten resonanten Lichtfeld . . . . .	236
15.4	Spin- und Photonenecho . . . . .	240
 <b>16. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten optischer Übergänge</b>		
16.1	Symmetrien und Auswahlregeln . . . . .	245
16.1.1	Optische Matrixelemente . . . . .	245
16.1.2	Beispiele für das Symmetrieverhalten von Wellenfunktionen . . . . .	245
16.1.3	Auswahlregeln . . . . .	250
16.1.4	Auswahlregeln und Multipolstrahlung* . . . . .	253
16.2	Linienbreite und Linienform . . . . .	257
 <b>17. Mehrelektronenatome</b>		
17.1	Das Spektrum des Helium-Atoms . . . . .	263
17.2	Elektronenabstoßung und Pauli-Prinzip . . . . .	265
17.3	Zusammensetzung der Drehimpulse . . . . .	266
17.3.1	Kopplungsmechanismus . . . . .	266
17.3.2	Die <i>LS</i> -Kopplung (Russel-Saunders-Kopplung) . . . . .	266
17.3.3	Die <i>jj</i> -Kopplung . . . . .	270
17.4	Magnetisches Moment von Mehrelektronenatomen . . . . .	272
17.5	Mehrfach-Anregungen . . . . .	273
 <b>18. Röntgenspektren</b>		
18.1	Vorbemerkungen . . . . .	275
18.2	Röntgenstrahlung aus äußeren Schalen . . . . .	276
18.3	Röntgen-Bremsspektrum . . . . .	276
18.4	Linienspektrum in Emission: charakteristische Strahlung . . . . .	278
18.5	Feinstruktur der Röntgenspektren . . . . .	281
18.6	Absorptionsspektren . . . . .	282
18.7	Der Auger-Effekt (Innerer Photoeffekt) . . . . .	284
18.8	Photoelektronen-Spektroskopie . . . . .	286

**19. Aufbau des Periodensystems, Grundzustände der Elemente**

19.1 Periodensystem und Schalenstruktur . . . . .	287
19.2 Grundzustände der Atome . . . . .	294
19.3 Anregungszustände und vollständiges Termschema . . . . .	296
19.4 Das Mehrelektronenproblem. Hartree-Fock-Verfahren* . . . . .	298
19.4.1 Das Zwei-Elektronenproblem . . . . .	298
19.4.2 Viele Elektronen ohne gegenseitige Wechselwirkung . . . . .	300
19.4.3 Coulombsche Wechselwirkung der Elektronen. Das Hartree- und das Hartree-Fock-Verfahren . . . . .	302

**20. Hyperfeinstruktur**

20.1 Einflüsse des Atomkerns auf die Spektren der Atome . . . . .	305
20.2 Spin und magnetisches Moment von Atomkernen . . . . .	306
20.3 Die Hyperfein-Wechselwirkung . . . . .	308
20.4 Hyperfeinstruktur im Grundzustand des Wasserstoff-Atoms und des Natrium- Atoms . . . . .	312
20.5 Hyperfeinstruktur im äußeren Magnetfeld . . . . .	314
20.6 Direkte Messung von Spin und magnetischem Moment von Kernen . . . . .	318
20.7 Das elektrische Kern-Quadrupolmoment . . . . .	321

**21. Der Laser**

21.1 Einige Grundbegriffe des Lasers . . . . .	325
21.2 Bilanzgleichungen und Laserbedingung . . . . .	328
21.3 Amplitude und Phase des Laserlichts . . . . .	332

**22. Moderne Methoden der optischen Spektroskopie**

22.1 Klassische Methoden . . . . .	337
22.2 Quanten-Schwebungen: Quantum beats . . . . .	338
22.3 Doppler-freie Sättigungsspektroskopie . . . . .	340
22.4 Doppler-freie Zwei-Photonen-Absorption . . . . .	342

<b>Mathematischer Anhang</b> . . . . .	345
--	-----

<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	351
---------------------------------------	-----

<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	355
----------------------------------	-----

**Fundamental-Konstanten der Atomphysik** (Vordere Einbandinnenseite)

**Energie-Umrechnungstabelle** (Hintere Einbandinnenseite)