

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
2	Strukturelle Eigenschaften der Atome.....	5
2.1	Bestimmung der Größe.....	5
2.1.1	Bestimmung aus der Messung von Wirkungsquerschnitten.....	5
2.1.2	Bestimmung mittels der Zustandsgleichung für reale Gase.....	6
2.1.3	Bestimmung aus Beugungsexperimenten mit Röntgenstrahlung.....	6
2.1.4	Bestimmung mit Hilfe mikroskopischer Methoden.....	8
2.1.4.1	Elektronenmikroskopie.....	8
2.1.4.2	Rastertunnelmikroskopie.....	9
2.1.4.3	Kraftmikroskopie.....	9
2.2	Bestimmung der Masse.....	9
2.2.1	Methoden zur Bestimmung der Avogadro-Zahl.....	10
2.2.1.1	Bestimmung mit Hilfe der Elektrolyse.....	10
2.3	Einführung der Schalenstruktur der Atome und des Periodischen Systems.....	10
2.4	Massenspektroskopie und Isotopie.....	11
2.4.1	Thomsonscher Parabelspektrograph.....	11
2.4.2	Spektrograph mit Geschwindigkeits- und Richtungsfokussierung.....	13
2.4.3	Doppelfokussierender Massenspektrograph.....	15
2.4.4	Quadrupolmassenspektrometer.....	15
2.4.5	Flugzeitmassenspektrometer.....	16
2.5	Der Atomkern.....	17
2.5.1	Rutherford'sches Atommodell.....	17
2.5.2	Struktur der Atomkerne.....	20
	Zusammenfassung.....	21
	Übungsaufgaben.....	22
3	Grenzen klassischer Physik – an der Schwelle zur Quantenphysik.....	23
3.1	Einführung.....	23
3.2	Die Teilchennatur elektromagnetischer Strahlung.....	23
3.2.1	Das Plancksche Strahlungsgesetz.....	23
3.2.2	Der Photoeffekt.....	30
3.2.3	Der Comptoneffekt.....	31
3.3	Die Wellennatur von Teilchen.....	33
3.3.1	Interferenzexperimente mit Elektronen und anderen Teilchen.....	34
3.3.2	Wellenpakete.....	36

3.3.3	Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion.....	38
3.3.4	Das eindimensionale Gaußsche Wellenpaket.....	39
3.4	Das Bohrsche Atommodell des Wasserstoffatoms.....	44
3.4.1	Optische Spektren der Atomhülle.....	44
3.4.2	Die Bohrschen Postulate.....	45
3.4.3	Wasserstoffähnliche Spektren.....	48
3.4.4	Sommerfelds Erweiterung des Bohrschen Atommodells.....	49
3.4.5	Rydberg-Atome.....	49
3.4.6	Ungewöhnliche Atome.....	50
3.4.7	Mängel der Theorie.....	50
3.5	Nachweis der Quantennatur gebundener Elektronen durch Stöße.....	51
	Zusammenfassung.....	52
	Übungsaufgaben.....	53
4	Quantenmechanische Grundlagen.....	55
4.1	Die Schrödingergleichung.....	55
4.2	Die Potentialbarriere, Tunneleffekt.....	58
4.3	Der eindimensionale Potentialkasten.....	60
4.4	Der Hilbertraum.....	64
4.5	Basissysteme.....	66
4.6	Vollständigkeitsrelation.....	67
4.7	Verallgemeinerung auf eine kontinuierliche Basis.....	67
4.8	Zustandsraum und Dirac-Schreibweise.....	69
4.9	Operatoren.....	71
4.10	Adjungierte Operatoren.....	73
4.11	Basissysteme im Zustandsraum.....	76
4.12	Eigenwertgleichungen hermitescher Operatoren.....	78
4.13	Gemeinsame Eigenvektoren kommutierender Operatoren.....	80
4.14	Die Postulate der Quantentheorie.....	82
4.15	Orts- und Impulsdarstellung der Schrödingergleichung.....	85
4.16	Erwartungswerte von Observablen.....	87
4.17	Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation.....	88
4.17.1	Grundgedanke.....	88
4.17.2	Exakte Herleitung der verallgemeinerten Unbestimmtheitsrelation.....	89
4.18	Ehrenfestsche Sätze.....	91
4.19	Schrödinger- und Heisenbergbild.....	92
4.20	Energie-Zeit-Unbestimmtheitsrelation.....	96
	Zusammenfassung.....	97
	Übungsaufgaben.....	99

5	Der harmonische Oszillator.....	103
5.1	Ermittlung der Eigenwerte in der Dirac-Notation.....	103
5.2	Die Eigenfunktionen in der Ortsdarstellung.....	109
5.3	Eigenwerte des harmonischen Oszillators in der Ortsdarstellung, Polynommethode...111	
5.4	Der dreidimensionale isotrope harmonische Oszillator.....	114
	Zusammenfassung.....	116
	Übungsaufgaben.....	116
6	Der Drehimpuls.....	119
6.1	Darstellungen und Vertauschungsrelationen.....	119
6.2	Eigenwertgleichungen.....	122
	Zusammenfassung.....	124
	Übungsaufgaben.....	125
7	Ein-Elektronenatome.....	127
7.1	Vorbemerkung.....	127
7.2	Eigenwerte.....	128
7.3	Radiale Eigenfunktionen.....	132
	Zusammenfassung.....	133
	Übungsaufgaben.....	134
8	Näherungsmethoden für stationäre Zustände.....	135
8.1	Das Variationsverfahren.....	135
8.2	Störungstheorie.....	136
	8.2.1 Störungstheorie ohne Entartung.....	137
	8.2.2 Der eindimensionale anharmonische Oszillator als Beispiel.....	139
	8.2.3 Störungstheorie mit Entartung der Eigenwerte.....	141
8.3	Aufhebung der l-Entartung.....	142
	8.3.1 Einführung.....	142
	8.3.2 Die Elektronenenergie der Alkaliatome.....	143
	Zusammenfassung.....	145
	Übungsaufgaben.....	147

9	Feinstruktur und Hyperfeinstruktur.....	149
9.1	Einführung.....	149
9.2	Das magnetische Moment von Atomen.....	149
9.3	Magnetisches Bahnmoment.....	149
9.4	Spin und magnetisches Moment, Stern-Gerlach-Experiment.....	152
9.5	Spin-Bahn-Wechselwirkung und Feinstruktur.....	153
9.5.1	Halbklassische Herleitung.....	153
9.5.2	Spin $\frac{1}{2}$	156
9.5.3	Elektronenspin im Zentralfeld, Addition von Bahndrehimpuls und Spin $\frac{1}{2}$	159
9.5.4	Spin-Bahn-Kopplungsenergie.....	162
9.6	Hyperfeinstruktur.....	166
	Zusammenfassung.....	170
	Übungsaufgaben.....	171
10	Atome mit mehreren Elektronen.....	173
10.1	Identische Teilchen – Pauliprinzip.....	173
10.2	Addition von Drehimpulsen.....	178
10.3	Das Helium-Atom.....	183
10.3.1	Vorbemerkung.....	183
10.3.2	Berechnung des Termschemas.....	184
	Zusammenfassung.....	189
	Übungsaufgaben.....	190
11	Energetische Struktur innerer Schalen, Röntgenspektren.....	191
11.1	Einführung.....	191
11.2	Bremsstrahlung.....	192
11.3	Röntgenemissionsspektren.....	193
11.4	Röntgenabsorptionsspektren.....	194
11.5	Feinstruktur der Spektren.....	196
11.6	Auger-Effekt.....	197
11.7	Photoelektronen-Spektroskopie.....	197
	Zusammenfassung.....	198
	Übungsaufgaben.....	199

12	Zeitabhängige Phänomene.....	201
12.1	Zeitabhängige Störungstheorie.....	201
12.2	Quantisierung des Strahlungsfeldes.....	203
12.3	Wechselwirkung zwischen gebundenen Elektronen und Strahlungsfeld.....	206
12.4	Übergangswahrscheinlichkeiten für strahlende Übergänge.....	206
12.4.1	Absorption und spontane Emission.....	206
12.4.2	Induzierte elektrische Dipolübergänge.....	210
12.5	Symmetrie und Auswahlregeln.....	211
12.6	Linienform, mittlere Lebensdauer und Linienbreite.....	214
12.6.1	Einführung.....	214
12.6.2	Stoßverbreiterung.....	215
12.6.3	Dopplerverbreiterung.....	216
	Zusammenfassung.....	217
	Übungsaufgaben.....	219
13	Atome in äußeren Feldern.....	221
13.1	Atome in Magnetfeldern.....	221
13.1.1	Übersicht.....	221
13.1.2	Klassische Lorenztheorie.....	221
13.1.3	Quantenmechanische Formulierung.....	222
13.1.4	Schwaches Feld.....	224
13.1.4.1	Normaler Zeemaneffekt.....	226
13.1.4.2	Anomaler Zeemaneffekt.....	227
13.1.5	Starkes Feld.....	227
13.2	Atome in elektrischen Feldern.....	228
13.2.1	Symmetrieüberlegungen.....	228
13.2.2	Stark-Effekt beim Wasserstoffatom.....	229
	Zusammenfassung.....	232
	Übungsaufgaben.....	233

14	Molekülphysik.....	235
14.1	Bindungsarten.....	235
14.2	Born-Oppenheimer-Näherung.....	238
14.3	Energiezustände des Kerngerüsts des zweiatomigen Moleküls.....	241
14.3.1	Übersicht.....	241
14.3.2	Rotationszustände.....	243
14.3.2.1	Das Modell des starren Rotators.....	243
14.3.2.2	Energiekorrektur durch Zentrifugalaufweitung.....	244
14.3.3	Der harmonische Oszillator.....	247
14.3.4	Der anharmonische Oszillator, Morsepotential.....	247
14.3.5	Rotations-Schwingungszustände zweiatomiger Moleküle.....	251
14.4	Optische Spektren zweiatomiger Moleküle.....	257
14.5	Zustände des Kerngerüsts drei- und mehratomiger Moleküle.....	258
14.5.1	Rotationszustände.....	258
14.5.2	Schwingungszustände.....	260
14.6	Elektronische Zustände von Molekülen.....	262
14.6.1	Das Wasserstoffmolekülion.....	263
14.6.2	Das Wasserstoffmolekül.....	266
14.6.2.1	Molekülorbital-Näherung.....	266
14.6.2.2	Heitler-London-Näherung.....	267
14.7	Gesamtzustände zweiatomiger Moleküle.....	272
14.7.1	Symmetrie und Termsymbolik.....	272
14.7.2	Die Rotationsstruktur.....	274
14.7.3	Die Schwingungsstruktur und das Franck-Condon-Prinzip.....	276
14.7.4	Die Gesamtzustände mehratomiger Moleküle.....	278
14.8	Dissoziation und Prädissoziation, Kontinuierliche Spektren.....	280
14.9	Ramanspektroskopie an Molekülen.....	281
14.10	Kernspineffekte.....	286
	Zusammenfassung.....	289
	Übungsaufgaben.....	292
15	Grundlagen und Anwendungen des Lasers.....	293
15.1	Verstärkung von Licht durch induzierte Emission.....	293
15.2	Erzeugung eines Inversionszustandes – Das 3-Niveau-System.....	295
15.3	Das 4-Niveau-System.....	296
15.4	Laser-Oszillatoren.....	296

15.5	Beispiele einiger Lasertypen.....	300
15.5.1	Gaslaser.....	300
15.5.2	Flüssigkeitslaser (Farbstofflaser).....	302
15.5.3	Festkörperlaser.....	304
15.5.3.1	Rubinlaser.....	304
15.5.3.2	Nd ³⁺ :YAG-Laser.....	306
15.5.3.3	Halbleiter-Laser.....	307
15.5.4	Laser auf der Grundlage der optischen Frequenzmischung.....	308
15.5.5	Freie-Elektronen-Laser.....	308
15.6	Einige Anwendungen des Lasers.....	309
15.6.1	Sättigungs- und 2-Photonen-Spektroskopie.....	309
15.6.2	Erzeugung kurzer und ultrakurzer Laserpulse.....	311
15.6.2.1	Güteschaltung.....	312
15.6.2.2	Modenkopplung.....	313
15.6.2.3	Optische Pulskompression.....	315
15.6.2.4	Cavity-Dumping.....	317
15.6.3	Laserkühlung, Magnetooptische Falle und Optische Pinzette.....	318
15.6.3.1	Einführung.....	318
15.6.3.2	Dopplerkühlung.....	320
15.6.3.3	Optisches Pumpen.....	323
15.6.3.4	Subdopplerkühlung.....	323
15.6.3.5	Magnetooptische Falle.....	327
15.6.3.6	Bose-Einstein-Kondensation.....	327
15.6.3.7	Optische Pinzette.....	328
	Zusammenfassung.....	329
	Übungsaufgaben.....	330
16	Verschränkte Systeme.....	331
16.1	Einführung.....	331
16.2	Einstein-Podolsky-Rosen-Gedankenexperiment.....	332
16.3	Bellsche Ungleichung.....	335
16.4	Quanten-Kryptographie.....	337
	Zusammenfassung.....	341
17	Lösungen der Übungsaufgaben.....	343
18	Literaturverzeichnis.....	381
19	Namens- und Sachwortverzeichnis.....	385
	Anhang – Periodisches System der Elemente.....	391