

# Inhalt

1 Atome .....	1
<i>Hans Kleinpoppen</i>	
1.1 Die Entwicklung der Atomphysik .....	1
1.2 Die ältere Atomtheorie .....	3
1.2.1 Das Rutherford-Bohrsche Atommodell .....	3
→ 1.2.2 Das Energieniveauschema und die Spektralserien des Wasserstoffatoms .....	10
1.3 Die Quantenmechanik in der Formulierung Schrödingers .....	14
1.3.1 Die zeitabhängige Schrödinger-Gleichung .....	15
1.3.2 Die stationäre Schrödinger-Gleichung .....	16
1.3.3 Potential-Null-Lösung der Schrödinger-Gleichung .....	18
1.3.4 Die Lösung der Schrödinger-Gleichung für das zentrale Coulomb-Feld im Wasserstoffatom .....	18
1.3.5 Die Grobstruktur der Energiezustände des Wasserstoffatoms .....	28
1.3.6 Die Feinstruktur- und Hyperfeinstruktur-Aufspaltung des Wasserstoffatoms .....	30
1.3.6.1 Die normale Feinstruktur: Spin-Bahn-Wechselwirkung und relativistische Korrekturen .....	32
1.3.6.2 Die Hyperfeinstruktur und Isotopie-Verschiebung .....	42
1.3.6.3 Lamb-Shift als anomale Feinstruktur (quantenelektrodynamischer Effekt) ..	51
1.4 Ansätze zur Verallgemeinerung und Entwicklung einer vollständigen abstrakten Theorie der Quantenmechanik .....	53
1.4.1 Operatoren, Eigenwerte, Eigenfunktionen und quantenmechanische Mittelwerte .....	54
1.4.2 Die Dirac-Schreibweise und Matrix-Formulierung der Quantenmechanik ..	57
1.4.2.1 Linearer Vektor-Raum (Hilbert-Raum) .....	57
1.4.2.2 Die Postulate der Quantenmechanik mit den Zustandsoperatoren und Zustandsvektoren .....	61
1.4.2.3 Weitere Resultate und Konsequenzen der quantenmechanischen Postulate ..	62
1.4.2.4 Der quantenmechanische Oszillator .....	65
1.4.2.5 Der quantenmechanische Potentialtopf .....	69
1.4.2.6 Auswahlregeln und Übergangsmatrixelemente .....	74
1.5 Struktur der Atome mit mehreren Elektronen .....	84
1.5.1 Die elektrostatische Korrelation .....	84
1.5.2 Russel-Saunders- und $jj$ -Kopplung .....	85
1.5.3 Pauli-Prinzip und Symmetrie der Wellenfunktionen .....	86
1.5.4 Die Struktur des Heliumatoms .....	89
1.5.5 Aufbauprinzip und Periodensystem der Atome .....	97
1.5.6 Die Spektren der Alkalimetallatome .....	104
1.5.7 Die Spektren der Erdalkalimetallatome und der Zwei-Elektronen-Systeme Zink, Cadmium und Quecksilber .....	111
1.5.8 Multiplett-Spektren der Mehr-Elektronen-Atome .....	114

1.5.8.1	Die Elemente der p-Gruppen .....	114
1.5.8.2	Die Elemente der d-Gruppen .....	120
1.5.9	Energiestruktur und Spektren positiver Ionen .....	120
1.5.10	Negative Ionen .....	121
1.5.11	Energiestruktur der inneren Schalen: Röntgenspektren, Auger-Effekt und Coster-Kronig-Übergänge .....	123
1.5.12	Röntgenbremsstrahlung .....	138
1.6	Atome in äußereren Feldern .....	144
1.6.1	Zeeman-Effekt – Atome in Magnetfeldern .....	144
1.6.1.1	Normaler Zeeman-Effekt: Lorenz-Triplets .....	145
1.6.1.2	Anomaler Zeeman-Effekt als allgemeiner Fall und der Landésche g-Faktor .....	148
1.6.1.3	Quadratischer Zeeman-Effekt, Diamagnetismus und Landau-Bereiche .....	157
1.6.2	Elektrische Aufspaltung der Atome – Stark-Effekt .....	167
1.7	Experimentelle Methoden und Anwendungen der Atomspektroskopie .....	177
1.7.1	Atomare Targets und Strahlen .....	178
1.7.1.1	Atomare Gaszellen und Atomstrahlen .....	178
1.7.1.2	Ionenstrahlen, Ionen- und Elektronenfallen .....	183
1.7.2	Die Breite und Linienform atomarer Spektrallinien .....	187
1.7.2.1	Die natürliche Linienbreite – Lorentz-Linienform .....	187
1.7.2.2	Die Stoßverbreiterung der Spektrallinien .....	189
1.7.2.3	Die Doppler-Verbreiterung .....	190
1.7.2.4	Das Voigt-Profil .....	192
1.7.2.5	Sättigungseffekt und Selbstumkehr der Spektrallinien .....	193
1.7.3	Hochfrequenz- und Mikrowellenspektroskopie .....	195
1.7.3.1	Elektrische und magnetische Dipolübergänge .....	195
1.7.3.2	Die magnetische Atomstrahl-Resonanzmethode nach Rabi .....	199
1.7.3.3	Der Wasserstoff-Maser und die Hyperfeinstruktur des Wasserstoffatoms .....	203
1.7.3.4	Der g-Faktor freier Elektronen und Positronen .....	206
1.7.4	Optische und Laser-Methoden .....	207
1.7.4.1	Doppler-freie Ein- und Zwei-Photonen-Laser-Spektroskopie .....	209
1.7.4.2	Hochfrequenz- und Mikrowellen-Spektroskopie angeregter Atome, Lamb-Shift-Experimente .....	213
1.7.4.3	Optische Doppelresonanztechnik .....	215
1.7.4.4	Hanle-Effekt-, Level-Crossing- und Anticrossing-Spektroskopie .....	223
1.7.4.5	Spektroskopie mit schnellen atomaren Teilchen und Anregung durch Folien (Beam-Foil- und Fast-Beam-Spektroskopie) .....	233
1.7.4.6	Spektroskopie mit der Synchrotronstrahlung .....	235
1.7.4.7	Metastabile Zustände .....	241
1.8	Exotische Atome .....	253
1.9	Rydberg-Atome .....	257
1.10	Atomare Stoßprozesse .....	259
1.10.1	Klassifizierung atomarer Stoßprozesse .....	259
1.10.2	Totaler und differentieller Wirkungsquerschnitt .....	261
1.10.3	Photoionisation der Atome .....	263
1.10.3.1	Experimentelle Methoden zur Messung von Photoionisationsquerschnitten .....	264
1.10.3.2	Resultate für totale Wirkungsquerschnitte .....	271
1.10.3.3	Spin-Bahn-Wechselwirkung und Fano-Effekt .....	276
1.10.3.4	Photoionisation mit polarisierten Atomen .....	279
1.10.4	Stoßprozesse zwischen Elektronen (Positronen) und Atomen .....	280

1.10.4.1	Partialwellenanalyse und Ramsauer-Townsend-Effekt . . . . .	281
1.10.4.2	Resonanzstrukturen . . . . .	289
1.10.4.3	Koinzidenzexperimente . . . . .	297
1.10.4.4	Spineffekte . . . . .	313
1.10.5	Ion-Atom- und Atom-Atom-Stoßprozesse . . . . .	324
1.10.5.1	Stoßparameterdarstellung in klassischer Näherung . . . . .	324
1.10.5.2	Quasi-Molekül-Bildung . . . . .	325
1.10.5.3	Potentialstreuung und quantenmechanische Struktureffekte . . . . .	331
1.10.5.4	Koinzidenz- und Spin-Experimente . . . . .	335
1.10.5.5	Antiproton-Atom-Stoßprozesse . . . . .	341
2	Atomkerne . . . . .	353
<i>Klaus-Peter Lieb</i>		
2.1	Einleitung . . . . .	353
2.1.1	Wovon handelt die Kernphysik? . . . . .	353
2.1.2	Kurzer Abriß der historischen Entwicklung . . . . .	356
2.2	Allgemeine Eigenschaften von Atomkernen . . . . .	360
2.2.1	Die Kernladung . . . . .	361
2.2.2	Kernmassen und Bindungsenergien . . . . .	365
2.2.2.1	Definitionen . . . . .	365
2.2.2.2	Massenspektrometer und Massenseparatoren . . . . .	367
2.2.2.3	Messung von Separationsenergien und $Q$ -Werten – Die Masse des Neutrons	371
2.2.2.4	Systematik der Bindungsenergien . . . . .	374
2.2.3	Kernradien, Verteilung der Nukleonen im Kern . . . . .	375
2.2.3.1	Die Nukleonenverteilung im Kern . . . . .	375
2.2.3.2	Die Ladungsverteilung im Kern . . . . .	379
2.2.3.3	Elektrische Quadrupolmomente . . . . .	391
2.2.4	Kernspin und magnetisches Moment . . . . .	393
2.2.4.1	Definitionen . . . . .	393
2.2.4.2	Meßmethoden . . . . .	395
2.3	Kernmodelle . . . . .	397
2.3.1	Das Tröpfchenmodell . . . . .	398
2.3.2	Das Kollektivmodell . . . . .	401
2.3.2.1	Das Vibrationsmodell . . . . .	401
2.3.2.2	Rotationsbanden in gg-Kernen . . . . .	406
2.3.3	Das Einteilchen-Schalenmodell . . . . .	409
2.3.3.1	Magische Zahlen . . . . .	409
2.3.3.2	Das Schalenmodell . . . . .	411
2.3.3.3	Konsequenzen des Schalenmodells – Restwechselwirkungen . . . . .	413
2.3.4	Das Fermigas-Modell . . . . .	420
2.3.5	Kopplung von kollektiver und Einteilchen-Bewegung . . . . .	424
2.3.5.1	Schwache Kopplung . . . . .	424
2.3.5.2	Das Nilsson-Modell . . . . .	425
2.3.5.3	Coriolis-Entkopplung . . . . .	428
2.4	Die Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung . . . . .	429
2.4.1	Das Deuteron . . . . .	430
2.4.2	Nukleon-Nukleon-Streuung . . . . .	432
2.4.2.1	Proton-Neutron-Streuung . . . . .	433
2.4.2.2	Proton-Proton-Streuung . . . . .	438

2.4.3	Der Isospin . . . . .	441
2.4.4	Phänomenologische Nukleon-Nukleon-Potentiale . . . . .	445
2.4.5	Mesonen und/oder Quarks in Kernen? . . . . .	449
2.4.5.1	Hadronenresonanzen . . . . .	449
2.4.5.2	Das naive Quarkmodell der Hadronen . . . . .	452
2.5	Kernzerfälle . . . . .	458
2.5.1	Nuklidkarte – Zerfallsgesetz – Erhaltungssätze . . . . .	458
2.5.2	Der Alphazerfall . . . . .	462
2.5.2.1	Einige wichtige Beobachtungen . . . . .	462
2.5.2.2	Der Gamow-Faktor . . . . .	464
2.5.2.3	Neuere Ergebnisse . . . . .	466
2.5.3	Die Kernspaltung . . . . .	469
2.5.3.1	Der Spaltprozeß . . . . .	469
2.5.3.2	Energiebilanz – Spaltbarriere . . . . .	470
2.5.3.3	Spaltreaktoren . . . . .	473
2.5.4	Elektromagnetische Strahlung des Kerns . . . . .	475
2.5.4.1	Auswahlregeln . . . . .	477
2.5.4.2	Einteilchenbreiten . . . . .	478
2.5.4.3	Messung nuklearer Lebensdauern . . . . .	480
2.5.4.4	Kernresonanzabsorption und Mößbauer-Effekt . . . . .	483
2.5.4.5	Elektronen-Konversion (EC) . . . . .	487
2.5.5	Betazerfälle . . . . .	489
2.5.5.1	Neutrinos . . . . .	489
2.5.5.2	Die Form des $\beta$ -Spektrums . . . . .	491
2.5.5.3	Die $\beta$ -Zerfallswahrscheinlichkeit . . . . .	493
2.5.5.4	Paritätsverletzung beim $\beta$ -Zerfall . . . . .	496
2.5.5.5	Die Helizität des Neutrinos . . . . .	498
2.5.6	Radiodatierung . . . . .	500
3	Elementarteilchen . . . . .	515
<i>Peter Schmüser, Hartwig Spitzer</i>		
3.1	Historische Entwicklung und grundlegende Konzepte der Elementarteilchenphysik . . . . .	515
3.1.1	Elementarteilchen in der Atom- und Kernphysik . . . . .	515
3.1.2	Erste Versuche zur Beschreibung der fundamentalen Wechselwirkungen . . . . .	516
3.1.3	Unser heutiges Bild der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen . . . . .	519
3.2	Beschleuniger und Teilchendetektoren . . . . .	525
3.2.1	Grundzüge der Beschleunigerphysik und -technik . . . . .	525
3.2.1.1	Strahloptik und starke Fokussierung . . . . .	525
3.2.1.2	Beschleunigung . . . . .	529
3.2.1.3	Synchrotronstrahlung . . . . .	531
3.2.1.4	Teilchenquellen und Vorbeschleuniger . . . . .	533
3.2.2	Synchrotrons, Speicherringe und Linearbeschleuniger . . . . .	534
3.2.3	Wechselwirkungen von Teilchen und $\gamma$ -Strahlung mit Materie . . . . .	537
3.2.3.1	Ionisation . . . . .	538
3.2.3.2	Bremsstrahlung . . . . .	540
3.2.3.3	Cerenkov- und Übergangsstrahlung . . . . .	540
3.2.3.4	Paarbildung und elektromagnetische Schauer . . . . .	542
3.2.3.5	Hadronische Schauer . . . . .	542

3.2.4	Teilchendetektoren . . . . .	543
3.2.4.1	Aufgaben der Detektorkomponenten . . . . .	543
3.2.4.2	Szintillationszähler . . . . .	543
3.2.4.3	Blasenkammer . . . . .	544
3.2.4.4	Proportional- und Driftkammern . . . . .	544
3.2.4.5	Cerenkov-Zähler . . . . .	545
3.2.4.6	Schauerzähler und Kalorimeter . . . . .	547
3.2.4.7	Ein moderner Speicherringdetektor . . . . .	548
3.3	Elementarteilchen und ihre Eigenschaften . . . . .	550
3.3.1	Kurzlebige Teilchen . . . . .	550
3.3.2	Antiteilchen . . . . .	555
3.3.3	Masse und mittlere Lebensdauer . . . . .	558
3.3.4	Spin und magnetisches Moment . . . . .	561
3.3.5	Ladungsartige Quantenzahlen . . . . .	564
3.3.6	Parität . . . . .	565
3.3.7	Ladungskonjugationen . . . . .	569
3.4	Quarkmodell . . . . .	569
3.4.1	Einordnung der Hadronen in Teilchenmultipletts . . . . .	569
3.4.2	Experimentelle Hinweise für die Existenz von Quarks in Hadronen . . . . .	578
3.4.2.1	Unelastische Elektron-Nukleon-Streuung . . . . .	578
3.4.2.2	Hadronen-Jets in der Elektron-Positron-Vernichtung . . . . .	580
3.4.2.3	Charmonium und Bottomium . . . . .	581
3.4.3	Farbladungen und Gluonen . . . . .	584
3.4.4	Experimentelle Hinweise auf die Existenz der Gluonen . . . . .	586
3.5	Elementarprozesse und Teilchenreaktionen . . . . .	588
3.5.1	Elementarprozesse und Feynman-Graphen in der elektromagnetischen Wechselwirkung . . . . .	588
3.5.1.1	Einleitung . . . . .	588
3.5.1.2	Beispiele für elektromagnetische Reaktionen . . . . .	590
3.5.2	Schwache Wechselwirkung . . . . .	593
3.5.3	Starke Wechselwirkung . . . . .	600
3.6	Vereinheitlichung der Wechselwirkungen . . . . .	601
3.6.1	Experimentelle Grundlagen der vereinheitlichten elektroschwachen Wechselwirkung . . . . .	603
3.6.2	Die elektromagnetische Wechselwirkung als Eichtheorie . . . . .	606
3.6.3	Qualitative Beschreibung der elektro-schwachen Wechselwirkung . . . . .	608
3.6.4	Die Quantenchromodynamik als Eichtheorie . . . . .	610
3.6.5	Neuere Entwicklungen und offene Fragen . . . . .	611
Anhang: Relativistische Kinematik und Einheiten . . . . .		612
Einführende Bemerkungen zu den Kapiteln 4 und 5: Moleküle . . . . .		619
4 Moleküle – Bindungen und Reaktionen . . . . .		621
Nikolaus Risch		
4.1	Chemische Bindungen . . . . .	621
4.1.1	Chemische Formeln . . . . .	621
4.1.2	Die Periodizität chemischer Eigenschaften . . . . .	622

## XIV Inhalt

4.1.3	Metalle . . . . .	624
4.1.4	Ionenbindung . . . . .	626
4.1.5	Kovalente Bindung . . . . .	627
4.2	Reaktionsdynamik . . . . .	632
4.2.1	Chemisches Gleichgewicht . . . . .	632
4.2.2	Kinetik, Katalyse . . . . .	634
4.2.3	Säure-Base-Reaktionen . . . . .	636
4.2.4	Redoxverhalten . . . . .	638
4.3	Synthese . . . . .	639
4.3.1	Reaktionsmöglichkeiten und Mechanismen . . . . .	639
4.3.2	Stereochemie . . . . .	643
4.3.3	Strukturaufklärung . . . . .	648
4.3.4	Beispiele interessanter Strukturen . . . . .	649
5	Moleküle – Spektroskopie und Struktur . . . . .	653
	<i>Manfred Fink, Jürgen Geiger</i>	
5.1	Einleitung . . . . .	653
5.2	Spektroskopie an Molekülen im elektronischen Grundzustand . . . . .	664
5.2.1	Kernparamagnetische Resonanz (NMR) . . . . .	665
5.2.1.1	Einleitung . . . . .	665
5.2.1.2	Absorption und Emission . . . . .	666
5.2.1.3	Die Blochschen Gleichungen . . . . .	670
5.2.1.4	Das NMR-Meßverfahren . . . . .	672
5.2.1.5	Molekulare Strukturen und NMR . . . . .	680
5.2.1.6	NMR-Spektroskopie in der Medizin . . . . .	699
5.2.2	Elektronenspinsresonanz-Spektroskopie (ESR) . . . . .	702
5.2.2.1	Definition und Meßverfahren . . . . .	702
5.2.2.2	Hyperfeinstruktur-Kopplungen . . . . .	702
5.2.2.3	ESR in Übergangsmetallverbindungen . . . . .	705
5.2.2.4	ENDOR . . . . .	707
5.2.3	Mikrowellenspektroskopie . . . . .	708
5.2.3.1	Einleitung und Definitionen . . . . .	708
5.2.3.2	Lineare Moleküle . . . . .	709
5.2.3.3	Nichtlineare Moleküle . . . . .	711
5.2.3.4	Die Mikrowellen-Meßmethode . . . . .	716
5.2.3.5	Anwendungen der Mikrowellenspektroskopie . . . . .	719
5.2.4	Infrarotspektroskopie . . . . .	723
5.2.4.1	Einleitung . . . . .	723
5.2.4.2	Symmetrien in polyatomaren Molekülen . . . . .	727
5.2.4.3	Infrarotspektrometer . . . . .	730
5.2.4.4	Auswertung der Infrarotspektren . . . . .	732
5.2.4.5	Der CO <sub>2</sub> -Laser . . . . .	737
5.2.4.6	Infrarote Laserspektroskopie . . . . .	739
5.2.5	Raman-Spektroskopie . . . . .	740
5.2.5.1	Einleitung . . . . .	740
5.2.5.2	Raman-Spektrometer . . . . .	747
5.2.5.3	Raman-Spektren . . . . .	749
5.2.5.4	Resonanz-Raman-Spektroskopie . . . . .	759

5.2.5.5	Kohärente Anti-Stokes-Raman-Spektroskopie (CARS) . . . . .	764
5.2.6	Multiphotonen-IR-Anregungen . . . . .	770
5.2.6.1	Einleitung . . . . .	770
5.2.6.2	Messungen im Quasikontinuum . . . . .	771
5.2.6.3	Modellrechnungen von Vielquantenanregungen . . . . .	772
5.3	Strukturen von Molekülen im elektronischen Grundzustand . . . . .	774
5.3.1	Hochenergetische Elektronenbeugung . . . . .	776
5.3.2	Niederenergetische Elektronenstreuung . . . . .	788
5.3.2.1	Einleitung . . . . .	788
5.3.2.2	Elastische Elektronenstreuung an orientierten Molekülen . . . . .	788
5.3.2.3	Elastische Elektronenstreuung an statistisch orientierten Molekülen . . . . .	796
5.3.2.4	Inelastische Elektronenstreuung innerhalb des Grundzustandes . . . . .	806
5.3.2.5	Theorie zur Elektron-Molekül-Streuung . . . . .	810
5.3.3	Röntgenstreuung von Molekülen in der Gasphase . . . . .	815
5.3.3.1	Einleitung . . . . .	815
5.3.3.2	Meßmethode und Ergebnisse . . . . .	817
5.3.4	Holographie an Molekülen . . . . .	820
5.4	Moleküle im angeregten elektronischen Zustand . . . . .	821
5.4.1	Das Born-Oppenheimer-Theorem . . . . .	821
5.4.2	Klassifikation und Termsymbole von elektronisch angeregten Molekülzuständen . . . . .	824
5.4.3	Orbitale für zweiatomige Moleküle . . . . .	833
5.4.3.1	Homonuklearer Fall . . . . .	833
5.4.3.2	Molekülorbitale zweiatomiger heteronuklearer Moleküle . . . . .	838
5.4.4	Auswahlregeln und Intensitäten . . . . .	840
5.4.4.1	Der elektronische Beitrag . . . . .	840
5.4.4.2	Schwingungsstruktur eines Elektronenbandensystems . . . . .	842
5.4.4.3	Rotationsstruktur eines Elektronenbandensystems . . . . .	848
5.4.5	Unelastische Elektronenstreuung . . . . .	850
5.4.5.1	Vergleich von optischer Anregung mit Elektronenstoßprozessen . . . . .	850
5.4.5.2	Oszillatorstärken, Bethe-Oberflächen und Summen-Regeln . . . . .	854
5.4.5.3	Experimentelle unelastische Wirkungsquerschnitte . . . . .	857
5.4.5.4	EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure) . . . . .	860
5.5	Beispiele für Moleküle von physikalischer Interesse . . . . .	862
5.5.1	Myonische Moleküle: $(dt\mu)_1 de_2$ . . . . .	862
5.5.1.1	Myonischer Wasserstoff . . . . .	862
5.5.1.2	Myonenkatalysierte Fusion . . . . .	865
5.5.2	Die metallische Mehrfachbindung von Übergangsmetallen . . . . .	869
5.5.2.1	Einleitung und Überblick . . . . .	869
5.5.2.2	Der ultrakurze Cr—Cr-Abstand . . . . .	873
5.5.2.3	Das Photoelektronenspektrum von Verbindungen mit Metallmehrfachbindungen . . . . .	874
5.5.3	Van-der-Waals-Moleküle . . . . .	880
5.5.3.1	Herstellung und Nachweis . . . . .	880
5.5.3.2	Eigenschaften von van-der-Waals-Molekülen . . . . .	883
5.5.3.3	Strukturen und Molekülorbitale . . . . .	888
5.5.3.4	Die Rolle der van-der-Waals-Moleküle in der Gasphase . . . . .	891
	Tabelle der Fundamentalkonstanten . . . . .	899
	Register . . . . .	903