



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	13
Einleitung	17
Kapitel 1 Anbruch eines neuen Zeitalters	21
1.1 Beunruhigende Fragen	22
1.2 Ein flüchtiger Blick auf die neue Welt	24
Kapitel 2 Spezielle Relativitätstheorie	27
2.1 Grundlagen	28
2.2 Konsequenzen der Einstein'schen Postulate	32
2.2.1 Konsequenz I: Relative Gleichzeitigkeit	32
2.2.2 Konsequenz II: Zeitdilatation	34
2.2.3 Konsequenz III: Längenkontraktion	36
2.2.4 Hinweise auf relativistische Effekte	38
2.3 Die Gleichungen der Lorentz-Transformation	39
2.3.1 Klassische Galilei'sche Relativitätstheorie	39
2.3.2 Spezielle Relativitätstheorie	40
2.3.3 Die Konsequenzen frisch beleuchtet	43
2.3.4 Wie alles zusammenpasst	45
2.4 Das Zwillingsparadoxon ☹	54
2.4.1 Anna, Bastian und Claus	55
2.4.2 Die Lösung durch Lichtsignale	58
2.5 Der Doppler-Effekt	59
2.6 Geschwindigkeitstransformation	62
2.7 Impuls und Energie	64
2.7.1 Masse und Energie	69
2.7.2 Anwendung von Impuls und Energie	70
2.7.3 Der Teilchenbeschleuniger	74
2.7.4 Masselose Teilchen	75
2.8 Allgemeine Relativitätstheorie und ein erster Blick in die Kosmologie ...	75
2.8.1 Das Äquivalenzprinzip	78
2.8.2 Gravitationsrotverschiebung und Zeitdilatation	78
2.8.3 Lichtablenkung durch die Sonne	83
2.8.4 Periheldrehung der Merkurbahn	85
2.8.5 Kosmologie	86
2.9 Die Lichtbarriere ☹	88
2.10 Die vierte Dimension ☹	91
2.10.1 Vierervektoren	92
2.10.2 Impuls-Energie-Vierervektor	93

Kapitel 3	Wellen und Teilchen I	119
3.1	Schwarzkörperstrahlung: Eine neue Elementarkonstante	120
3.2	Der fotoelektrische Effekt	122
3.3	Die Erzeugung von Röntgenstrahlen	127
3.4	Der Compton-Effekt	129
3.4.1	Der Stoß zweier Teilchen	129
3.4.2	Der inelastische Stoß	133
3.5	Paarerzeugung	134
3.6	Ist es Welle oder Teilchen?	137
3.6.1	Wellenlänge und Experiment	138
3.6.2	Das Doppelspaltexperiment	139
Kapitel 4	Wellen und Teilchen II	155
4.1	Ein Doppelspalt-Experiment	157
4.1.1	Nachweise der Interferenz von Materiewellen	159
4.1.2	Das Bragg'sche Gesetz	160
4.2	Eigenschaften von Materiewellen	162
4.2.1	Wellenlänge	162
4.2.2	Frequenz	168
4.2.3	Geschwindigkeit	169
4.3	Die Schrödinger-Gleichung für freie Teilchen	169
4.3.1	Wellen auf einem Seil	169
4.3.2	Elektromagnetische Wellen	170
4.3.3	Materiewellen	170
4.3.4	Wahrscheinlichkeitsdichte	171
4.3.5	Die ebene Welle	172
4.4	Das Unbestimmtheitsprinzip	174
4.4.1	Das klassische Limit	178
4.4.2	Eine praktische Anwendung	179
4.4.3	Das Unbestimmtheitsprinzip in drei Dimensionen	182
4.4.4	Das Unbestimmtheitsprinzip für Energie und Zeit	183
4.5	Der keineswegs unsichtbare Beobachter	183
4.6	Das Bohr'sche Atommodell 	185
4.7	Die mathematische Grundlage des Unbestimmtheitsprinzips – die Fourier-Transformation 	188
4.7.1	Gauß'sche Wellenpakete	191
4.7.2	Umgekehrt proportionale Beziehung	193
Kapitel 5	Gebundene Zustände: Einfache Fälle	217
5.1	Die Schrödinger-Gleichung	218
5.2	Stationäre Zustände	219
5.2.1	Der zeitliche Anteil $\phi(t)$	220
5.2.2	Der räumliche Anteil $\psi(x)$	221

5.3	Physikalische Bedingungen: Gutartige Funktionen.....	222
5.3.1	Normierung	222
5.3.2	Stetigkeit	222
5.4	Überblick über klassische gebundene Zustände	223
5.5	Erster Fall: Das Teilchen in der Box – Der unendlich tiefe Potenzialtopf .	226
5.6	Zweiter Fall: Der endlich tiefe Topf	237
5.7	Dritter Fall: Der einfache harmonische Oszillator	246
5.8	Erwartungswerte, Unbestimmtheiten und Operatoren	252
5.9	Nichtstationäre Zustände ⓪	260
5.10	Der Computeransatz ⓪	262
5.11	Wohldefinierte Observable: Eigenwerte F	264

Kapitel 6 Ungebundene Zustände: Barrieren, Tunneleffekt und die Ausbreitung von Welle und Teilchen **291**

6.1	Die Potenzialstufe	292
6.2	Potenzialbarriere und Tunneleffekt	299
6.2.1	Der Tunneleffekt bei breiten Barrieren	304
6.3	Alphazerfall und andere Anwendungen	306
6.3.1	Die Tunneldiode	309
6.3.2	SQUIDs	310
6.3.3	Feldemission	310
6.3.4	Das Rastertunnelmikroskop	312
6.4	Ausbreitung von Teilchenwellen	314
6.4.1	Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten	314
6.4.2	Ein elektromagnetischer Puls und eine Überraschung	319



Kapitel 7 Quantenmechanik in drei Dimensionen und das Wasserstoffatom **341**

7.1	Die dreidimensionale Schrödinger-Gleichung.....	342
7.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte und Normierung	343
7.1.2	Die zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung	343
7.1.3	Quantenzahlen	344
7.2	Der unendlich tiefe dreidimensionale Topf	344
7.2.1	Entartung	346
7.2.2	Aufspaltung der Energiezustände	350
7.3	Energiequantisierung und Spektrallinien beim Wasserstoff	350
7.3.1	Das Geheimnis der Spektren.....	351
7.3.2	Energie und Wellenlängen	353
7.4	Die Schrödinger-Gleichung einer Zentralkraft	358
7.5	Winkelabhängigkeiten bei einer Zentralkraft	362
7.5.1	Die Azimutalgleichung	362
7.5.2	Die Polargleichung	364

7.5.3	Die Quantisierung von L	366
7.5.4	Richtungsabhängige Wahrscheinlichkeiten	368
7.6	Das Wasserstoffatom	370
7.6.1	Entartung	372
7.6.2	Normierung	373
7.6.3	Die Aufenthaltsbereiche des Elektrons	374
7.7	Radiale Wahrscheinlichkeit	377
7.8	Wasserstoffähnliche Atome	381
7.9	Überprüfen einer Lösung F	384
7.10	Emission von Photonen: Regeln und Raten F	387
7.10.1	Erlaubte Übergänge	387
7.10.2	Übergangsrate	390


Kapitel 8 Spin und Atomphysik **417**

8.1	Hinweise auf die Quantisierung des Drehimpulses: Eine neue Eigenschaft	418
8.1.1	Drehimpuls und magnetisches Dipolmoment	418
8.1.2	Der Stern-Gerlach-Versuch	421
8.1.3	Spin	423
8.1.4	Spin und Entartung	429
8.1.5	Elektronenspin: Ein Zwei-Zustand-System	429
8.1.6	Der Spin eines Photons	430
8.2	Identische Teilchen	430
8.2.1	Ein nicht so kleines System	433
8.2.2	Berücksichtigen des Spins	438
8.3	Das Ausschussprinzip	438
8.3.1	Fermionen und das Ausschussprinzip	439
8.3.2	Bosonen	440
8.3.3	Zusammengesetzte Teilchen und Paarungen	440
8.4	Atome mit mehreren Elektronen und das Periodensystem	441
8.4.1	Die Abhängigkeit der Energie von ℓ	441
8.4.2	Chemische Eigenschaften: Das Periodensystem der Elemente ...	443
8.5	Charakteristische Röntgenstrahlung	449
8.6	Die Spin-Bahn-Wechselwirkung F	452
8.7	Die Addition von Drehimpulsen F	454
8.7.1	Gute Quantenzahlen	456
8.7.2	Relativitätstheorie und die Energiezustände im Wasserstoffatom	457
8.8	Äußere Magnetfelder und die z-Achse F	459
8.8.1	Schwaches Feld: Der Zeeman-Effekt	460
8.8.2	Starke Felder: Der Paschen-Back-Effekt	464
8.9	Anregungsspektren F	465
8.9.1	Der Gesamtspin	465
8.9.2	LS-Kopplung	466

Kapitel 9	Statistische Mechanik	491
9.1	Ein einfaches thermodynamisches System	493
9.1.1	Mikro- und Makrozustände	495
9.1.2	Gleichgewicht	496
9.2	Entropie und Temperatur 	497
9.2.1	Temperatur	498
9.3	Die Boltzmann-Verteilung	502
9.3.1	Von der Summe zum Integral	510
9.4	Klassische Mittelwerte	512
9.4.1	Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung	514
9.5	Quantenverteilungen	516
9.5.1	Die Fermi-Energie	520
9.6	Das Quantengas	521
9.6.1	Energieniveaus bei Leitungselektronen	527
9.6.2	Das Bose-Gas und die Bose-Einstein Kondensation	530
9.7	Masselose Bosonen: Das Photonengas	531
9.7.1	Thermodynamik und Licht: Schwarzkörperstrahlung	534
9.8	Der Laser	535
9.9	Spezifische Wärmen 	542
9.9.1	Gase	543
9.9.2	Festkörper	545
9.9.3	Das Debye-Modell	547
Kapitel 10	Bindungen in Molekülen und Festkörpern	579
10.1	Die Bindung von Atomen	580
10.2	Moleküle	582
10.2.1	Bindende und antibindende Zustände	583
10.2.2	Bindungstypen und Hybridzustände	585
10.3	Rotation und Schwingung	590
10.3.1	Zweiatomige Moleküle	590
10.3.2	Spektren	594
10.4	Kristalline Festkörper	597
10.5	Energiebänder und elektrische Leitung	601
10.5.1	Wenn N groß wird	604
10.5.2	Elektrische Leitung	607
10.6	Leiter, Isolatoren und Halbleiter	610
10.6.1	Bandbesetzung und Leitfähigkeit	611
10.6.2	Die Leitfähigkeitslücke	613
10.7	Halbleitertheorie	616
10.7.1	Löcher	616
10.7.2	Dotierung	618

10.8	Halbleiterbauteile	621
10.8.1	Diode	621
10.8.2	Der Transistor	625
10.9	Supraleitung	627
10.9.1	Typ-I- und Typ-II-Supraleiter	630
10.9.2	BCS-Theorie	632
10.9.3	Hochtemperatur-Supraleiter	634
10.9.4	Anwendungen	635
10.10	Fullerene	636

Kapitel 11 Kernphysik **663**

11.1	Die grundlegende Kernstruktur	664
11.1.1	Größe	666
11.2	Bindungen	667
11.2.1	Ein theoretisches Modell der Stabilität	668
11.2.2	Beliebige Nukleonenzahl	670
11.2.3	Stabilität: Die experimentellen Tatsachen	672
11.3	Kernmodelle	677
11.3.1	Das Tröpfchenmodell	677
11.3.2	Das Schalenmodell	680
11.4	Kernspinresonanz und MRT. 	682
11.5	Radioaktivität	684
11.5.1	Der Alphazerfall	684
11.5.2	Der Betazerfall	685
11.5.3	Gammazerfall	689
11.5.4	Spontaner Kernzerfall	690
11.5.5	Radioaktive Identifizierung	690
11.6	Das radioaktive Zerfallsgesetz	691
11.6.1	Radioaktive Altersbestimmung	694
11.7	Kernreaktionen	696
11.7.1	Fission (Kernspaltung)	696
11.7.2	Der Spaltreaktor	699
11.7.3	Kernfusion	701
11.7.4	Der Fusionsreaktor	704
11.7.5	Fission und Fusion im Vergleich	709

Kapitel 12 Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen **725**

12.1	Die Wirkungsweise von Kräften	726
12.2	Antiteilchen	728
12.3	Wie viele Kräfte und Teilchen gibt es?	731
12.3.1	Die Starke Kraft	733
12.3.2	Hadronen-Kategorien	735
12.3.3	Innere Eigenschaften	737
12.3.4	Die Kernkraft	737

12.3.5	Die Elektroschwache Kraft.....	738
12.3.6	Die Gravitationskraft	740
12.4	Teilchenerzeugung und -nachweis	740
12.4.1	Eine kurze Chronologie.....	740
12.4.2	Beschleuniger und Detektoren.....	741
12.5	Zerfallsmoden und Erhaltungssätze im Standardmodell	744
12.5.1	Neue Erhaltungssätze.....	744
12.5.2	Feynman-Diagramme	746
12.6	Parität, Ladungskonjugation und Zeitumkehr	751
12.7	Vereinheitlichte Theorien und Kosmologie	754
12.7.1	Zurück zur Kosmologie.....	756
12.7.2	Frühe Zeiten.....	759
12.7.3	Schlussfolgerung	761
Anhang A	Das Michelson-Morley-Experiment	775
Anhang B	Die Lorentz-Transformation: Darstellung von Ereignissen	779
Anhang C	Das Planck'sche Strahlungsgesetz – Die Schwarzkörperstrahlung	783
C.1	$\overline{E(f)}$: Mittlere Energie einer Welle der Frequenz f	784
C.2	$dN(f)$: Die Anzahl der Wellen im Frequenzbereich von f bis $f + df$	785
C.3	$dU(f)$: Die spektrale Energiedichte	788
Anhang D	Berechnen der Fourier-Transformation	789
Anhang E	Der Impulsoperator	791
Anhang F	Zeitliche Entwicklung eines Gauß'schen Wellenpakets	795
Anhang G	Der Operator für L^2	799
Anhang H	Energieverteilungen	803
H.1	Die Boltzmann-Verteilung.....	806
H.2	$B = 1$ für das Photonengas	807
Anhang I	Eigenschaften der Isotope	809
Anhang J	Wahrscheinlichkeit, Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl der Kombinationen	819
J.1	Mittelwert.....	820
J.2	Standardabweichung.....	821
J.3	Ein anderer Zugang	823
J.4	Kontinuierliche Größen	823
J.5	Fakultäten – die Anzahl der Kombinationen	827

Anhang K	Wichtige Mathematik	829
K.1	Komplexe Zahlen	829
K.2	Differenzialgleichungen	831
K.2.1	Lineare Differenzialgleichung 1. Ordnung	832
K.2.2	Lineare Differenzialgleichung 2. Ordnung	832
K.3	Nützliche Integrale	832
K.3.1	Gauß'sche Integrale	833
Anhang L	Lösungen einiger ausgewählter Aufgaben	835
Anhang M	Bildnachweise	845
M.1	Fotografische Abbildungen	845
M.2	Zeichnungen	846
Sachregister		847