

Band II

6	Relativitätstheorie	1121
6.1	Induktive Einführung in die Spezielle Relativitätstheorie	1121
6.1.1	Historische Hinweise zur Relativitätstheorie	1121
6.1.2	Widersprüche zwischen der Newtonschen Mechanik und der Maxwell'schen Elektromagnetik-Optik	1121
6.2	Experimente im Vorfeld der Relativitätstheorie	1124
6.2.1	Michelson-Versuch und Prinzip der Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit	1124
6.2.2	Astronomische Aberration	1129
6.2.3	Doppler-Effekt	1130
6.2.4	Trouton-Noble-Versuch	1131
6.2.5	Wienscher Versuch	1131
6.2.6	Fizeauscher Mitführungsversuch	1132
6.2.7	Sagnac-Versuch	1133
6.2.8	Michelson-Gale-Versuch	1133
6.3	Spezielles Relativitätsprinzip und Lorentz-Transformationen	1134
6.3.1	Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie	1134
6.3.2	Spezielles Relativitätsprinzip	1136
6.3.3	Lorentz-Transformationen	1137
6.4	Minkowski-Raum	1151
6.4.1	Vierdimensionalität der Raum-Zeit und Vierertensoren	1151
6.4.2	Lichtkegel im Vakuum	1155
6.5	Einige kinematische Folgerungen aus der eigentlichen Lorentz-Transformation	1157
6.5.1	Längenkontraktion	1157
6.5.2	Zeitdilatation	1159
6.5.3	Relativierung der Gleichzeitigkeit	1160
6.5.4	Kausalität der Zeitfolge	1161
6.5.5	Einsteinsches Additionstheorem der Geschwindigkeiten	1162
6.5.6	Zwillingsparadoxon	1164
6.6	Speziell-relativistische Elektromagnetik	1165
6.6.1	Vierschreibweise der Maxwell-Theorie	1165
6.6.2	Transformationsgesetze elektromagnetischer Größen	1174

6.6.3	Elektromagnetisches Feld einer geradlinig-gleichförmig bewegten elektrischen Punktladung	1176
6.6.4	Liénard-Wiechert-Potentiale	1177
6.6.5	Wellengleichung im Vakuum	1183
6.7	Speziell-relativistische Punktmechanik	1184
6.7.1	Bewegungsgleichung	1184
6.7.2	Veränderlichkeit der Masse, Masse-Energie-Relation	1187
6.7.3	Elektromagnetische Viererkraft	1190
6.7.4	Kanonischer Apparat	1191
6.7.5	Dirac-Lorentzsche Bewegungsgleichung	1199
6.7.6	Elektromagnetische Wechselwirkung zweier Punktladungen	1199
6.8	Speziell-relativistische Kontinuumsmechanik	1201
6.8.1	Bewegungsgleichung	1201
6.8.2	Struktur des symmetrischen Energie-Impuls-Tensors	1204
6.8.3	Minkowski-Tensor	1205
6.9	Grenzen der Speziellen Relativitätstheorie	1208
6.10	Ausblick auf die Allgemeine Relativitätstheorie	1208
6.10.1	Leitgedanken zur Entdeckung der Allgemeinen Relativitätstheorie	1208
6.10.2	Allgemeines Relativitätsprinzip	1212
6.10.3	Einsteinsche Feldgleichungen der Gravitation und Bewegungsgleichungen	1215
6.10.4	Wichtige strenge Lösungen der Einstein-Gleichungen	1217
6.10.5	Wichtige Anwendungen der Einsteinschen Gravitationstheorie	1222
7	Nichtrelativistische Quantenmechanik	1235
7.1	Induktive Einführung	1235
7.1.1	Historische Hinweise (Quantenmechanik, Quantenfeldtheorie)	1235
7.1.2	Notwendigkeit der Quantentheorie	1236
7.1.3	Bohrsche halbklassische Quantenmechanik	1239
7.1.4	Teilchenaspekt und Wellenaspekt von Quantenteilchen	1245
7.2	Physikalischer Hilbert-Raum	1249
7.2.1	Ket-Vektoren und Bra-Vektoren im Hilbert-Raum	1249
7.2.2	Operatoren im Hilbert-Raum	1257
7.2.3	Eigenwertproblem	1265
7.3	Transformationen im Hilbert-Raum	1276
7.3.1	Äquivalenztransformation	1276
7.3.2	Unitäre Transformation	1277
7.3.3	Infinitesimale unitäre Transformation	1281
7.4	Wahrscheinlichkeitsdeutung und Messung in der Quantenmechanik	1282
7.4.1	Observablen, Eigenwerte und Meßwerte	1282
7.4.2	Wahrscheinlichkeitsdeutung und Meßprozeß	1282
7.4.3	Erwartungswert	1286
7.4.4	Übergangswahrscheinlichkeit	1287
7.4.5	Physikalische Deutung des Satzes vom gemeinsamen Orthonormalsystem kommutierender Observablen	1289

7.5	Grundgesetze und Grundbeziehungen der nichtrelativistischen Quantenmechanik	1289
7.5.1	Heisenberg-Bild	1290
7.5.2	Beliebiges Bild	1305
7.5.3	Schrödinger-Bild	1307
7.5.4	Dirac-Bild (Wechselwirkungsbild)	1311
7.5.5	Heisenbergsche Unschärferelationen	1313
7.5.6	Weitere Interpretationsfragen der Quantenmechanik	1317
7.5.7	Spektrum spezieller Observablen	1320
7.5.8	Ehrenfestscher Satz	1329
7.5.9	Symmetrie und Erhaltung	1331
7.5.10	Quantenmechanik in Nichtinertialsystemen	1352
7.5.11	Quantenmechanik und Kovarianz	1353
7.5.12	Anwendungsbeispiele zum Diracschen Bra-Ket-Formalismus	1355
7.5.13	Darstellungen der Quantenmechanik	1366
7.6	Matrizenmechanik	1371
7.6.1	Heisenbergs Zugang zur Matrizenmechanik	1371
7.6.2	Matrizenmechanik für einheitliche Darsteller	1372
7.6.3	Heisenbergsche Form der Matrizenmechanik	1375
7.7	Schrödingersche Wellenmechanik	1385
7.7.1	Grundlagen	1385
7.7.2	Schrödinger-Gleichung für ein System von Quantenteilchen	1400
7.7.3	Anwendungsbeispiele zur Wellenmechanik	1420
7.7.4	Nichtrelativistische Wellenmechanik bei Berücksichtigung des Spins der Quantenteilchen	1481
7.7.5	Schrödingersche Störungsrechnung	1508
7.7.6	Diracsche Störungsrechnung	1518
7.7.7	Halbklassische Strahlungstheorie und Auswahlregeln	1525
7.7.8	Einige wellenmechanische Methoden	1535
7.7.9	Periodisches System der Elemente	1543
7.7.10	Vektorgerüst der Drehimpulse in der Atomhülle	1548
7.7.11	Anomaler Zeeman-Effekt	1560
7.7.12	Paschen-Back-Effekt	1562
7.7.13	Chemische Bindung	1562
8	Einführung in die relativistische Quantenmechanik	1573
8.1	Klein-Gordon-Theorie	1573
8.1.1	Aufstellung der Klein-Gordon-Gleichung	1573
8.1.2	Zerlegung der Klein-Gordon-Gleichung	1575
8.1.3	Eich-Phasen-Invarianz der Klein-Gordon-Gleichung	1576
8.1.4	Kontinuitätsgleichung	1576
8.1.5	Zeitfreie Klein-Gordon-Gleichung	1577
8.1.6	Kepler-Problem für ein Klein-Gordon-Teilchen	1579
8.2	Grundlagen der Dirac-Theorie der Bewegung des Spin-Elektrons	1584
8.2.1	Einführende Bemerkungen	1584

8.2.2	Clifford-Algebra	1586
8.2.3	Dirac-Matrizen	1587
8.2.4	Sätze zu den Cliffordschen Basiselementen (Dirac-Matrizen)	1590
8.2.5	Dirac-Gleichung	1593
8.2.6	Transformationstheorie der Dirac-Gleichung	1601
8.3	Dirac-Theorie als Quantenmechanik des Elektrons	1607
8.3.1	Quantenmechanische Grundlagen	1607
8.3.2	Zerlegung der Dirac-Gleichung	1623
8.4	Anwendungen zur Diracschen Quantenmechanik des Elektrons	1628
8.4.1	Ebene Elektronwelle	1628
8.4.2	Elektron im kugelsymmetrischen Potential	1643
8.4.3	Kepler-Problem für das Elektron	1651
8.4.4	Problem negativer Energien	1655
8.5	Zweikomponenten-Näherung der Diracschen Quantenmechanik des Elektrons nach der Eliminationsmethode	1656
8.5.1	Aufbereitung des gekoppelten Zweikomponenten-Gleichungssystems	1657
8.5.2	Näherungsprozedur	1658
8.5.3	Zweikomponenten-Theorie bis zur 2. Ordnung	1660
8.5.4	Elektrische Stromdichte und elektrische Ladungsdichte bis zur 2. Ordnung	1665
9	Einführung in die Feldtheorie	1667
9.1	Historische Anmerkungen	1667
9.2	Lagrange-Hamilton-Apparat für klassische Felder	1668
9.2.1	Einführende Gesichtspunkte	1668
9.2.2	Hamilton-Prinzip	1669
9.2.3	Lagrange-Gleichungen	1670
9.2.4	Hamilton-Gleichungen	1673
9.2.5	Poissonklammer-Formulierung des Hamilton-Apparates	1676
9.3	Noether-Theorie für klassische Felder	1680
9.3.1	Einführende Gesichtspunkte zu den infinitesimalen Transformationen	1680
9.3.2	Substantielle und lokale Variation	1683
9.3.3	Funktionsvariation	1685
9.3.4	Totale Variation	1686
9.3.5	Totale Variation der Lagrange-Dichte	1686
9.3.6	Symmetrietransformationen	1689
9.3.7	Lokale Erhaltungssätze	1690
9.3.8	Symmetrischer Energie-Impuls-Tensor	1692
9.3.9	Integrale Erhaltungssätze	1693
9.4	Anwendung der Theorie auf die Newtonsche Mechanik	1698
9.5	Anwendung der Theorie auf das Schrödinger-Feld	1703
9.6	Anwendung der Theorie auf das Feldsystem: Klein-Gordon-Feld und Maxwell-Feld	1706

9.7	Anwendung der Theorie auf das Feldsystem: Dirac-Feld und Maxwell-Feld	1712
9.8	Feldquantisierung	1717
9.8.1	Kanonische Quantisierung	1717
9.8.2	Gesichtspunkte zur relativistischen Quantisierung	1720
9.9	Quantisierung des Schrödinger-Feldes	1725
9.9.1	Vertauschungsregeln	1725
9.9.2	Fourier-Entwicklung	1725
9.9.3	Minus-Quantisierung (Bosonfeld)	1729
9.9.4	Plus-Quantisierung (Fermionfeld)	1731
9.9.5	Feldquantisierung und Mehrteilchen-Quantenmechanik	1732
9.10	Quantisierung freier relativistischer Felder	1737
9.10.1	Klein-Gordon-Feld	1737
9.10.2	Dirac-Feld	1740
9.10.3	Maxwell-Feld	1743
9.10.4	Ausblick auf die Quantenelektrodynamik	1747
9.11	Diskrete Symmetrien	1749
9.11.1	Einführende Gesichtspunkte	1749
9.11.2	Punktmechanik	1751
9.11.3	Maxwell-Feld, Klein-Gordon-Feld, Dirac-Feld als klassische Felder	1753
9.11.4	Quantenfelder	1754
9.11.5	CPT -Theorem (Pauli-Lüders-Theorem)	1755
9.12	Einführung in die Darstellungstheorie der Lorentz-Gruppe	1756
9.12.1	Tensorielle und spinorielle Darstellungen	1756
9.12.2	Bestimmung der endlich-dimensionalen Darstellungen	1761
9.12.3	Clebsch-Gordan-Theorem	1764
9.13	Elementarteilchen	1767
9.13.1	Einführende Hinweise	1767
9.13.2	Übersicht über die verschiedenen Arten von Quantenzahlen	1769
9.13.3	Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen	1769
9.13.4	Empirisch begründete Systematisierung der Elementarteilchen	1772
9.13.5	Quarks und Gluonen	1776
9.13.6	Standardmodell	1778
9.14	Überblick über einige wichtige Gruppen in der Feldtheorie	1779
9.14.1	Zusammenfassung früherer Ergebnisse	1779
9.14.2	Bedeutung spezieller Gruppen für die Feldtheorie	1784

10 Statistische Physik

1787

10.1	Einführung	1787
10.1.1	Historische Hinweise	1787
10.1.2	Anliegen der Statistischen Physik	1787
10.1.3	Gesichtspunkte für die Einteilung der Statistischen Physik	1789
10.1.4	Gibbssche statistische Gesamtheit	1790
10.2	Grundlagen der Statistischen Physik klassisch-mechanischer Systeme	1791
10.2.1	Wichtige Grundbegriffe	1791
10.2.2	Liouville-Gleichung und Liouvillescher Satz	1794

10.2.3	Ergodenhypothese	1798
10.2.4	Liouville-Operator und Evolutionsoperator	1800
10.2.5	Kinetische Gleichungen	1803
10.3	Gibbssche Gleichgewichts-Statistik	1807
10.3.1	Thermodynamische Wahrscheinlichkeit und Entropie, Boltzmann-Gleichung	1807
10.3.2	Kanonische Gesamtheit und kanonische Verteilung	1809
10.3.3	Makrokanonische Gesamtheit	1819
10.3.4	Mikrokanonische Gesamtheit	1820
10.3.5	Äquipartitionsgesetz als Anwendungsbeispiel	1821
10.4	Boltzmann-Maxwellsche Gleichgewichts-Statistik	1824
10.4.1	Mikrozustand und Makrozustand	1825
10.4.2	Thermodynamische Wahrscheinlichkeit	1827
10.4.3	Gleichgewichtsverteilung als wahrscheinlichste Verteilung	1830
10.4.4	Zustandssumme und thermodynamische Zustandsgrößen	1832
10.4.5	Grenzwerte der Gleichgewichtsverteilung für $T \rightarrow 0$ und $T \rightarrow \infty$	1836
10.4.6	Fluktuationen der Verteilung	1836
10.4.7	Teilchengemisch	1838
10.5	Anwendungen zur Boltzmann-Maxwell-Statistik	1843
10.5.1	Barometrische Höhenformel, Sedimentationsgleichgewicht	1843
10.5.2	Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung in einem idealen Gas	1844
10.5.3	Zustandsgleichung für das ideale Gas und das ideale Gasgemisch	1846
10.6	Grundlagen der Statistischen Physik quantenmechanischer Systeme	1850
10.6.1	Reiner Zustand und gemischter Zustand	1850
10.6.2	Dichteoperator (statistischer Operator)	1852
10.6.3	Von-Neumann-Gleichung (Liouville-Gleichung) für den Dichteoperator	1855
10.6.4	Beschreibung physikalischer Größen vermöge des Dichteoperators	1857
10.6.5	Dichteoperator und Meßprozeß	1860
10.6.6	Reine Gesamtheit	1861
10.6.7	Dichteoperator in der Thermodynamik	1862
10.6.8	Ideales Gasgemisch	1869
10.6.9	Additivität extensiver thermodynamisch-statistischer Größen	1873
10.6.10	Spezielle quantenstatistische Verteilungen	1877
10.7	Quantenstatistiken auf der Basis der Abzählmethodik	1881
10.7.1	Mikrozustand und Makrozustand, thermodynamische Wahrscheinlichkeit	1882
10.7.2	Gleichgewichtsverteilung als wahrscheinlichste Verteilung	1887
10.8	Bose-Einstein-Statistik	1891
10.8.1	Verteilungsformel und thermodynamische Größen	1891
10.8.2	Ideales Bose-Gas	1892
10.8.3	Gasentartung und Bose-Einstein-Kondensation	1894
10.8.4	Supraleitung und Suprafluidität	1896
10.8.5	Boltzmann-Maxwell-Statistik als Grenzfall der Bose-Einstein-Statistik	1897

10.9	Fermi-Dirac-Statistik	1898
10.9.1	Verteilungsformel und thermodynamische Größen	1898
10.9.2	Ideales Fermi-Gas	1899
10.10	Stochastik und Dissipations-Fluktuations-Theorie	1910
10.10.1	Stochastik	1910
10.10.2	Relaxationsvorgänge	1911
10.10.3	Theorie der zeitlichen Korrelationen von Schwankungen	1913
10.10.4	Fluktuations-Dissipations-Theorem	1921
10.10.5	Brownsche Bewegung	1927
10.10.6	Thermisches Stromrauschen	1931
10.10.7	Langevin-Kraft	1933
10.11	Phänomen der Irreversibilität	1937
10.12	Shannon-Entropie	1939
11	Theorie der Strahlung von Körpern	1941
11.1	Einführung	1941
11.1.1	Historische Hinweise	1941
11.1.2	Problemstellung	1941
11.1.3	Wichtige strahlungstheoretische Begriffe	1942
11.1.4	Strahlungsdruck	1946
11.2	Kirchhoffscher Satz	1947
11.3	Thermodynamische Begründung des Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetzes	1949
11.4	Plancksches Strahlungsgesetz	1950
11.4.1	Hohlraumstrahlung als Photonengas	1950
11.4.2	Einsteins Überlegungen zum Planckschen Strahlungsgesetz	1953
11.5	Konsequenzen des Planckschen Strahlungsgesetzes	1956
11.5.1	Wiensches Verschiebungsgesetz	1956
11.5.2	Stefan-Boltzmannsches Strahlungsgesetz	1957
11.5.3	Wiensches Strahlungsgesetz und Rayleigh-Jeanssches Strahlungsgesetz als Näherungen	1959
12	Theorie von Materialeigenschaften	1961
12.1	Gase	1961
12.1.1	Kinetische Gastheorie	1961
12.1.2	Transportphänomene	1968
12.1.3	Plasmen	1974
12.2	Flüssigkeiten	1977
12.2.1	Allgemeine Gesichtspunkte	1977
12.2.2	Idee der Clusterentwicklung	1978
12.2.3	Radiale Verteilungsfunktion	1981
12.2.4	Zwischenmolekulare Wechselwirkungskräfte	1984
12.2.5	Langevinsche Theorie der Orientierungspolarisation	1987
12.2.6	Transportphänomene	1991
12.2.7	Einführung in die Theorie der starken Elektrolyte	2003

12.3	Festkörper	2007
12.3.1	Molekulare Polarisierbarkeit	2008
12.3.2	Elektrische Leitfähigkeit	2013
12.3.3	Wärmeleitfähigkeit	2015
12.3.4	Debye-Theorie der spezifischen Wärme	2018
12.3.5	Dispersion und Absorption	2023
12.3.6	Kristalliner Festkörper	2038
13	Einführung in einige Spezialgebiete	2055
13.1	Beschleuniger	2055
13.1.1	Aufstellung der Bewegungsgleichungen	2055
13.1.2	Ebene Bewegung bei konstantem Magnetfeld	2057
13.1.3	Zyklotron und Synchrozyklotron	2059
13.1.4	Betatron	2061
13.1.5	Synchrotron	2066
13.2	Magnetohydrodynamik	2068
13.2.1	Grundgleichungen	2069
13.2.2	Eingefrorene Magnetfelder	2073
13.2.3	Magnetohydrodynamische Wellen	2074
13.3	Phänomenologische Theorie der Supraleiter	2076
13.3.1	London-Theorie	2077
13.3.2	Ginzburg-Landau-Theorie	2080
13.4	Nichtlineare Optik und Laser	2085
13.4.1	Nichtlineare optische Vorgänge	2085
13.4.2	Laser	2086
13.5	Streutheorie	2096
13.5.1	Klassisch-mechanische Streutheorie (Rutherford-Streuung)	2096
13.5.2	Quantenmechanische Streutheorie (Bornsche Näherung)	2099
13.5.3	Streuoperator	2103
13.5.4	Inverses Streuproblem und Bäcklund-Transformation	2110
13.6	Chaotische Bewegung	2115
13.6.1	Allgemeine Gesichtspunkte	2115
13.6.2	Störung eines integrablen Systems	2117
13.7	Zerstörungsfreie Quantenmessung (quantum non-demolition measurement)	2118
13.7.1	Motivation	2118
13.7.2	QND-Observablen und QND-Messung	2119
13.7.3	Zwei Beispiele	2120
13.7.4	Glauber-Zustände (kohärente Zustände)	2125

Literaturverzeichnis **2133**

Namen- und Sachverzeichnis **2137**

Studienanleitung, Symbole und Einheitensysteme	1
A Studieneinführung	3
B Konventionen	4
C Liste der wichtigsten Symbole und Bezeichnungen	5
D Dezimalen-Vorsätze	17
E Physikalische Einheitensysteme	17
F Zahlenwerte von Naturkonstanten und anderen Grundkonstanten	22
Einleitung	25
1 Grundriß der Mathematik für Physiker	29
1.1 Mengen, Arithmetik und Algebra, Clifford-Algebra	29
1.2 Gruppen	34
1.3 Determinanten	39
1.4 Matrizen	41
1.5 Algebraische Gleichungen	52
1.6 Vektoralgebra	57
1.7 Reelle und komplexe Analysis	66
1.8 Transformationen	110
1.9 Vektoranalysis	128
1.10 Differentialgleichungen	154
1.11 Lineare Integralgleichungen	191
1.12 Tensoren	196
1.13 Variationsrechnung	212
1.14 Analytische Geometrie, Trigonometrie und Differentialgeometrie	220
1.15 Kombinatorik und Wahrscheinlichkeitsrechnung	236
2 Newtonsche Mechanik:	
System von Massenpunkten, starrer Körper und Kontinuum	245
2.1 Induktive Einführung	245
2.2 Massenpunkt und System von Massenpunkten	254
2.3 Anwendungen zur Punktmechanik und Gravitation	289
2.4 Starrer Körper und Kreiseltheorie	345
2.5 Kanonische Mechanik	385
2.6 Mechanik der Kontinua	457
3 Maxwell'sche Theorie des elektromagnetischen Feldes	579
3.1 Induktive Einführung	579
3.2 Allgemeine Grundlagen der Maxwell-Theorie	586
3.3 Statisches elektrisches Feld	653
3.4 Statisches Magnetfeld	687
3.5 Stationäres Magnetfeld	695
3.6 Quasistationäres elektromagnetisches Feld	711

4	Elektromagnetische Wellen (Optik)	729
4.1	Einführung	729
4.2	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in homogenen isotropen Isolatoren	731
4.3	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in homogenen isotropen Leitern (Metalloptik)	788
4.4	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in homogenen anisotropen Isolatoren (Kristalloptik)	807
4.5	Theorie der Interferenz	828
4.6	Theorie der Beugung (Diffraktion)	848
4.7	Elemente der geometrischen Optik	870
4.8	Elemente der Abbildungstheorie	879
5	Phänomenologische Thermodynamik	893
5.1	Einführung	893
5.2	Thermodynamische Grundbegriffe	895
5.3	Hauptsätze der Thermodynamik	911
5.4	Thermodynamische Potentiale	922
5.5	Anwendungen der Hauptsätze auf einphasige Einkomponentensysteme . .	934
5.6	Anwendungen der Hauptsätze auf mehrphasige Einkomponentensysteme .	962
5.7	Anwendungen der Hauptsätze auf einphasige Mehrkomponentensysteme (Mischphasen)	973
5.8	Anwendung der Hauptsätze auf mehrphasige Mehrkomponentensysteme (Gemenge)	993
5.9	Nernstsches Wärmetheorem	1003
5.10	Einfluß des elektromagnetischen Feldes auf thermodynamische Systeme .	1009
5.11	Thermodynamik irreversibler Prozesse	1012
	Namen- und Sachverzeichnis	1057