

Experimentelle Physik IIIa

**Physik für Zahnmediziner
WS 2019/20**

Dieter Suter

7. Oktober 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	15
1.1	Organisatorisches	15
1.1.1	Inhaltsübersicht	15
1.1.2	Übungen	15
1.1.3	Prüfung	15
1.1.4	Literaturangaben	15
1.2	Was ist Physik ?	16
1.2.1	Physikalische Fragestellungen	16
1.2.2	Erkenntnisprozess	16
1.2.3	Experimente	17
1.2.4	Messgeräte	18
1.2.5	Abschätzungen	18
1.2.6	Bedeutung für den Alltag	18
1.2.7	Bedeutung für die Zahnmedizin	19
1.3	Physik in Dortmund	19
1.3.1	Struktur der Fakultät	19
1.3.2	Festkörperphysik	19
1.3.3	Teilchenphysik	21
1.3.4	Beschleunigerphysik / DELTA	21
1.3.5	Medizinphysik	21
1.4	Mathematische Grundlagen	21
1.4.1	Komplexe Zahlen	22
1.4.2	Euler Formel	22
1.4.3	Vektoren	23
1.4.4	Koordinatensysteme	24
1.4.5	Differentialrechnung	24
1.4.6	Ableitung von Funktionen	25
1.4.7	Differentialoperatoren für Vektorfelder	25
1.4.8	Integralrechnung	26
1.4.9	Einfaches Beispiel: $f(x) = x$	26
1.4.10	Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung	27
1.4.11	Satz von Stokes	27
1.4.12	Satz von Gauß	27
1.4.13	Differentialgleichungen	28
1.5	Physikalische Größen, Maßeinheiten	28
1.5.1	Grundlagen und Definitionen	28
1.5.2	Grundgrößen im SI-System	29
1.5.3	Zehnerpotenzen: Vorsilben und Abkürzungen	30
1.5.4	Abgeleitete Größen	31

1.5.5 Naturkonstanten	31
1.6 Messfehler	32
1.6.1 Systematische Fehler	32
1.6.2 Statistische Fehler	32
1.6.3 Verteilungsfunktion	34
1.6.4 Fehlerfortpflanzung	35
1.6.5 Differenzmessungen	36
1.6.6 Fitten	36
2 Mechanik	38
2.1 Kinematik	38
2.1.1 Grundbegriffe	38
2.1.2 Eindimensionale Kinematik	38
2.1.3 Konstante Beschleunigung	40
2.1.4 Senkrechter Wurf nach oben	40
2.1.5 Kinematik in zwei und drei Dimensionen	41
2.1.6 Wurfparabel	42
2.1.7 Unabhängigkeitsprinzip	43
2.2 Dynamik von Massenpunkten	45
2.2.1 Definitionen	45
2.2.2 Newton'sche Axiome	46
2.2.3 Kraft und Beschleunigung	47
2.2.4 Zusammenfassung und Gültigkeit	47
2.2.5 Masse	48
2.2.6 Schwere und träge Masse	48
2.3 Kräfte in der Dynamik	50
2.3.1 Kräfte und Felder	50
2.3.2 Elementare und phänomenologische Kräfte	51
2.3.3 Reibungskräfte	51
2.3.4 Dynamik mit Reibung	52
2.3.5 Kräfte als Vektoren	53
2.3.6 Raketen	54
2.3.7 Beispiele	55
2.4 Arbeit, Leistung und Energie	55
2.4.1 Motivation und Definition	55
2.4.2 Arbeit	56
2.4.3 Beispiele mit konstanter Kraft	57
2.4.4 Variable Kraft	58
2.4.5 Energie	58
2.4.6 Leistung	59
2.4.7 Potenzielle Energie	60
2.4.8 Konservative Kräfte	61
2.4.9 Gleichgewicht	62
2.4.10 Austausch von Energie	62
2.4.11 Energieerhaltung	63
2.4.12 Anwendungen	64

2.5	Stoßprozesse	65
2.5.1	Definition und Motivation	65
2.5.2	Klassifikation von Stoßprozessen	66
2.5.3	Kraftstoß	67
2.5.4	Elastischer 2-Körperstoß	67
2.5.5	Fallende Gummibälle	68
2.5.6	Stoß an Kugelreihe	69
2.5.7	Unelastischer 2-Körperstoß	69
2.5.8	Elastischer Stoß in zwei Dimensionen	70
2.6	Drehbewegungen	70
2.6.1	Kreisbewegung	70
2.6.2	Drehimpuls eines Massenpunkts	72
2.6.3	Trägheitsmoment	72
2.6.4	Kinetische Energie	73
2.6.5	Energieerhaltung	74
2.6.6	Drehmoment	75
2.6.7	Rotationsachse	76
2.6.8	Kräftegleichgewicht	76
2.6.9	Pirouette	77
2.6.10	Kreisel	79
2.7	Astronomische Anwendungen	80
2.7.1	Drehimpuls und Planetenbahnen	80
2.7.2	Die Kepler'schen Gesetze	81
2.7.3	2. Kepler'sches Gesetz	82
2.7.4	3. Kepler'sches Gesetz	82
2.7.5	Theorie der Gravitation	83
2.8	Mechanik in bewegten Bezugssystemen	85
2.8.1	Galilei'sche Relativität	85
2.8.2	Relativgeschwindigkeit	85
2.8.3	Gleichförmig beschleunigte Bezugssysteme	86
2.8.4	Schwerelosigkeit	86
2.8.5	Kreisbewegung	87
2.8.6	Bewegungsgleichung im rotierenden Bezugssystem	88
2.8.7	Scheinkräfte im rotierenden Koordinatensystem	88
2.8.8	Zentrifugalkraft	89
2.8.9	Beispiele	90
2.8.10	Corioliskraft	91
2.8.11	Die Einstein'sche Relativitätstheorie	93
2.9	Hydrostatik	95
2.9.1	Aggregatzustände	95
2.9.2	Spannung	95
2.9.3	Flüssigkeitsoberfläche	95
2.9.4	Hydrostatischer Druck	96
2.9.5	Schweredruck	97
2.9.6	Hydrostatischer Druck in Gasen	98
2.9.7	Das Prinzip von Archimedes	99
2.9.8	Auftriebsmessungen	100

2.9.9 Auftrieb in Luft	101
2.9.10 Kompressibilität	102
2.10 Grenzflächeneffekte	103
2.10.1 Oberflächenspannung	103
2.10.2 Minimalflächen	104
2.10.3 Seifenblasen	105
2.10.4 Benetzung	106
2.10.5 Kapillarkräfte	106
2.11 Hydrodynamik und Aerodynamik	107
2.11.1 Stromlinien und Geschwindigkeitsfelder	107
2.11.2 Kontinuitätsgleichung	109
2.11.3 Druck und kinetische Energie	110
2.11.4 Druckänderung in einer Strömung	111
2.11.5 Demonstrationen zur Bernoulli-Gleichung	112
2.11.6 Viskosität	113
2.11.7 Reibungswiderstand in Flüssigkeiten	114
2.11.8 Turbulente Reibung und Luftwiderstand	115
2.11.9 Rohrdurchfluss	115
2.11.10 Das Gesetz von Hagen-Poiseuille	116
2.11.11 Ähnlichkeit von Strömungen	117
2.11.12 Strömende Gase (Aerodynamik)	118
2.11.13 Der Magnus-Effekt	118
3 Wärmelehre und Thermodynamik	120
3.1 Temperatur und Wärme	120
3.1.1 Historische Entwicklung	120
3.1.2 Wärme als Energieform	120
3.1.3 Temperatur und thermisches Gleichgewicht	121
3.1.4 Temperaturskalen	121
3.1.5 Temperaturmessung	122
3.1.6 Wärmeausdehnung	123
3.2 Gastheorie	123
3.2.1 Gase	123
3.2.2 Das ideale Gas	124
3.2.3 Druck	124
3.2.4 Zustandsgleichung	126
3.3 Wärme	126
3.3.1 Wärmemenge, Wärmeäquivalent	126
3.3.2 Wärmekapazität	127
3.3.3 Anwendungsbeispiele	128
3.3.4 Wärmetransport	128
3.3.5 Wärmeleitung	129
3.3.6 Wärmeleitfähigkeit	130
3.3.7 Wärmewiderstand	131
3.3.8 Wärmeleitungsgleichung	132
3.3.9 Wärmeleitung in 1D	133

3.4 Thermodynamik	133
3.4.1 Der 1. Hauptsatz	133
3.4.2 Arbeit und Weg	134
3.4.3 Der Stirling Motor	135
3.4.4 Carnot'scher Kreisprozess	136
3.4.5 Der 2. Hauptsatz	137
3.4.6 Entropie	138
3.4.7 Der 3. Hauptsatz der Thermodynamik	138
4 Elektrizität und Magnetismus	140
4.1 Ladung und Feld	140
4.1.1 Übersicht	140
4.1.2 Ladungsquantisierung	141
4.1.3 Elektrostatische Wechselwirkung	141
4.1.4 Abstandsabhängigkeit	142
4.1.5 Elektrisches Feld	143
4.1.6 Feldlinien	144
4.1.7 Elektrostatisches Potenzial	145
4.1.8 Äquipotenzialflächen	146
4.1.9 Verschiebungsdichte	147
4.1.10 Feldgleichung	148
4.1.11 Feld eines geladenen Drahtes	149
4.1.12 Homogene Kugelladung	150
4.1.13 Elektrische Dipole	150
4.2 Materie im elektrischen Feld	151
4.2.1 Leiter und Isolatoren	152
4.2.2 Felder und elektrische Leiter	152
4.2.3 Oberflächenladungen und Spiegelladungen	153
4.2.4 Feldfreie Räume	153
4.2.5 Influenzladung	154
4.2.6 Bandgenerator	155
4.2.7 Bewegung geladener Teilchen im elektrischen Feld	155
4.2.8 Dipole in einem äußeren Feld	156
4.2.9 Dipol im inhomogenen Feld	157
4.3 Kondensatoren	158
4.3.1 Der Plattenkondensator	158
4.3.2 Felder im Plattenkondensator	158
4.3.3 Beispiele	159
4.3.4 Kugelkondensator	159
4.3.5 Ladungstrennung im Kondensator	160
4.3.6 Energie des elektrischen Feldes	161
4.3.7 Kräfte auf Kondensatorplatten	161
4.4 Dielektrika	162
4.4.1 Polarisierung in Dielektrika	162
4.4.2 Mikroskopisches Modell	163
4.4.3 Depolarisationsfeld	164
4.4.4 Kräfte auf Dielektrika in Feldrichtung	165

4.4.5	Kräfte auf Dielektrika senkrecht zur Feldrichtung	165
4.5	Stationäre Ströme	166
4.5.1	Ladungstransport	166
4.5.2	Phänomenologie	167
4.5.3	Definitionen	168
4.5.4	Widerstand	168
4.5.5	Spezifischer Widerstand in Ohm'schen Leitern	169
4.5.6	Modelle für die Leitfähigkeit	170
4.5.7	Driftgeschwindigkeit	171
4.5.8	Supraleiter	172
4.5.9	Halbleiter	173
4.5.10	Ladungstransport in Gasen und Flüssigkeiten	173
4.6	Schaltungen	174
4.6.1	Kirchhoff'sche Gesetze	174
4.6.2	Einfache Schaltungen	175
4.6.3	Wheatstone'sche Brückenschaltung	176
4.6.4	Elektrische Schaltelemente	176
4.7	Magnetfelder	177
4.7.1	Grundlagen	177
4.7.2	Dipole im Magnetfeld	178
4.7.3	Feldlinien und Magnetpole	178
4.7.4	Erdmagnetfeld und Kompass	179
4.7.5	Magnetfeld elektrischer Ströme	180
4.7.6	Das Durchflutungsgesetz	180
4.7.7	Spulen	181
4.7.8	Das Biot-Savart Gesetz	182
4.7.9	Magnetfeld ringförmiger Spulen	182
4.7.10	Flussdichte und magnetische Feldenergie	183
4.8	Bewegte Ladungen im Magnetfeld	184
4.8.1	Lorentzkraft	184
4.8.2	Geladene Teilchen im Magnetfeld	184
4.8.3	Anwendungen	185
4.8.4	Bahnen im Magnetfeld	186
4.8.5	Geladene Teilchen im Erdmagnetfeld	186
4.8.6	Gekreuzte E- und B-Felder	188
4.8.7	Zyklotron	188
4.8.8	Hall Effekt	189
4.8.9	Messung der Ladungsträgerdichte	190
4.8.10	Stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	191
4.8.11	Parallele stromdurchflossene Leiter	191
4.8.12	Drehmoment auf Leiterschleife	193
4.8.13	Elektromotoren	193
4.8.14	Elektromagnetische Bezugssysteme	194
4.8.15	Lorentz-Transformation	195
4.9	Materie im Magnetfeld	195
4.9.1	Elementare magnetische Dipole	196
4.9.2	Magnetisierung	196

4.9.3	Klassifikation magnetischen Verhaltens	197
4.9.4	Mikroskopisches Modell	198
4.9.5	Ferromagnetismus	199
4.9.6	Magnetische Domänen	200
4.9.7	Magnetische Hysterese	202
4.9.8	Weitere magnetische Ordnungseffekte	203
4.9.9	Ferrofluide	203
4.9.10	Magnetische Eigenschaften von Supraleitern	204
4.9.11	Anwendungen	204
4.10	Zeitabhängige Felder und Ströme	205
4.10.1	Induktion: Phänomenologie	205
4.10.2	Magnetischer Fluss	206
4.10.3	Induktionsgesetz	206
4.10.4	Wechselstromgenerator	207
4.10.5	Induzierte Ströme und Lenz'sche Regel	208
4.10.6	Wirbelströme	209
4.10.7	Selbstinduktion	209
4.10.8	Magnetische Feldenergie	210
4.10.9	Periodische Ströme und Felder	211
4.10.10	Komplexe Schreibweise, Impedanz	212
4.10.11	Rechnen mit Impedanzen	214
4.10.12	Transformatoren	215
4.10.13	Anwendungen	215
4.10.14	Aperiodische Ströme	216
4.11	Die Maxwell Gleichungen	217
4.11.1	Felder	218
4.11.2	Die Grundgleichungen von Elektrizitätslehre und Magnetismus	218
4.11.3	Der Verschiebungsstrom	219
4.11.4	Die Maxwell-Gleichungen	220
4.11.5	Grenzflächen	221
5	Schwingungen	222
5.1	Allgemeines	222
5.1.1	Beispiele und Definition	222
5.1.2	Phänomenologie	222
5.1.3	Atomare und molekulare Schwingungen	223
5.1.4	Klassifikation und Übersicht	224
5.2	Der Harmonische Oszillator	224
5.2.1	Harmonische Schwingungen	224
5.2.2	Bewegungsgleichung	226
5.2.3	Freie Schwingung	226
5.2.4	Energie	227
5.2.5	Der h.O. als Modellsystem	228
5.2.6	Anharmonizität	229
5.2.7	Komplexe Amplitude	229
5.3	Schwingende Systeme	230
5.3.1	Das mathematische Pendel	230

5.3.2	Torsionsschwinger	231
5.3.3	Das physikalische Pendel	232
5.3.4	Flüssigkeitspendel im U-Rohr	233
5.3.5	Elektromagnetische Schwingkreise	233
5.3.6	Zusammenfassung	234
5.4	Gedämpfte Schwingung	235
5.4.1	Dämpfung und Reibung	235
5.4.2	Geschwindigkeitsproportionale Reibung	235
5.4.3	Schwache Dämpfung, $\omega_0 > \beta$	236
5.4.4	Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen	237
5.4.5	Überkritische Dämpfung (Kriechfall)	237
5.4.6	Der aperiodische Grenzfall: $\omega_0 = \beta$	238
5.5	Erzwungene Schwingung	238
5.5.1	Bewegungsgleichung	238
5.5.2	Energiebilanz	239
5.5.3	Lösungsweg	239
5.5.4	Stationäre Lösung	240
5.5.5	Resonante Anregung	241
5.5.6	Absolutbetrag und Phase	242
5.5.7	Einschwingvorgang	243
5.6	Schwingungen mit mehreren Freiheitsgraden	243
5.6.1	Das Doppelpendel	243
5.6.2	Eigenschwingungen	244
5.6.3	Schwebungen	245
5.6.4	Gekoppelte elektronische Schwingkreise	246
5.6.5	Transversalschwingungen	247
5.6.6	Schwingungen von mehrdimensionalen Systemen	248
5.6.7	Akustische Schwingungen, Musikinstrument	248
6	Wellen	250
6.1	Grundlagen	250
6.1.1	Beispiele und Definition	250
6.1.2	Ausbreitung von Wellen	250
6.1.3	Harmonische Wellen	251
6.1.4	Longitudinale und transversale Wellen	252
6.1.5	Mathematische Beschreibung harmonischer Wellen	253
6.1.6	Lineare Kette	254
6.1.7	Harmonische Longitudinalwelle	255
6.1.8	Phasengeschwindigkeit	255
6.1.9	Überlagerung von Wellen; Gruppengeschwindigkeit	256
6.2	Akustische Wellen	257
6.2.1	Wellengleichung für Druck	257
6.2.2	Schallwellen	258
6.2.3	Schallimpedanz und Schallschnelle	259
6.2.4	Intensität und Lautstärke	260
6.2.5	Physiologische Lautstärken-Skala	261
6.2.6	Empfindlichkeitsgrenze	261

6.3	Mechanische Wellen	262
6.3.1	Druckwellen in Flüssigkeiten und Festkörpern	262
6.3.2	Seismische Wellen	263
6.3.3	Transversalwellen in einer Massenkette	264
6.3.4	Energie einer Transversalwelle	265
6.3.5	Seilwellen	265
6.3.6	Wellen in 2D und 3D	266
6.3.7	Übersicht Phasengeschwindigkeiten	267
6.4	Ausbreitung	268
6.4.1	Reflexion und Transmission	268
6.4.2	Stehwellen	269
6.4.3	Abstandsabhängigkeit	269
6.4.4	Der Dopplereffekt	270
6.4.5	Überschallgeschwindigkeit	271
6.5	Elektromagnetische Wellen	272
6.5.1	Das elektromagnetische Spektrum	272
6.5.2	Elektromagnetische Wellengleichung	273
6.5.3	Ebene Wellen	274
6.5.4	Magnetfeld	274
6.5.5	Transversalwellen: Polarisierung	275
6.5.6	Hertz'scher Dipol	276
6.5.7	Eigenschaften des Hertz'schen Dipols	277
6.5.8	Übertragung von Energie und Impuls	278
6.5.9	Dopplereffekt	279
7	Optik	280
7.1	Grundlagen	280
7.1.1	Historisches	280
7.1.2	Beschreibung	281
7.1.3	Erzeugung von Licht	282
7.1.4	Nachweis von Licht	283
7.1.5	Halbleiterdetektoren	284
7.2	Lichtausbreitung	286
7.2.1	Lichtgeschwindigkeit	286
7.2.2	Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Fizeau-Michelson	286
7.2.3	Brechungsindex	287
7.2.4	Absorption und Dispersion	288
7.2.5	Geometrische Optik	289
7.2.6	Das Prinzip von Fermat	290
7.2.7	Gekrümmte Lichtstrahlen	292
7.2.8	Huygens'sches Prinzip	292
7.3	Reflexion und Brechung	294
7.3.1	Reflexion: Grundlagen	294
7.3.2	Herleitung des Reflexionsgesetzes	295
7.3.3	Brechung des Lichts an einer ebenen Grenzfläche	295
7.3.4	Reflexionsgesetz aus dem Huygens'schen Prinzip	296
7.3.5	Reflexions- und Transmissionskoeffizienten	297

7.3.6 Fresnel-Formeln	298
7.3.7 Totalreflexion	299
7.3.8 Brechung am Prisma	300
7.4 Abbildende Optik	301
7.4.1 Bildentstehung	301
7.4.2 Parabolspiegel	302
7.4.3 Bildweite und Maßstab	302
7.4.4 Brechung an einer sphärischen Oberfläche	303
7.4.5 Entstehung des Regenbogens	305
7.4.6 Linsen	305
7.4.7 Linsentypen	306
7.4.8 Abbildung und Vergrößerung	307
7.4.9 Linsenfehler	308
7.4.10 Maximale Auflösung	309
7.5 Optische Instrumente	310
7.5.1 Das Auge	310
7.5.2 Vergrößerung und Mikroskop	311
7.5.3 Fernrohr	312
7.5.4 Photometrie	313
7.6 Polarisierung und Doppelbrechung	314
7.6.1 Polarisierung	314
7.6.2 Erzeugung und Umwandlung	315
7.6.3 Doppelbrechung	316
7.6.4 Anwendungen	317
7.6.5 Optische Aktivität	318
7.7 Interferenz	318
7.7.1 Linearität für Felder, nicht für Intensitäten	318
7.7.2 Der Interferenzterm	319
7.7.3 Interferenz von 2 ebenen Wellen	319
7.7.4 Zweistrahlinterferenz an dünnen Schichten	320
7.7.5 Farben dünner Filme	321
7.7.6 Entspiegelung	321
7.7.7 Newton'sche Ringe	322
7.7.8 Interferometer als Messinstrumente	323
7.7.9 Vielstrahlinterferenz	324
7.7.10 Kohärenz	325
7.7.11 Anwendungen	326
7.8 Beugung	327
7.8.1 Grenzen der geometrischen Optik	327
7.8.2 Beugung am Spalt	328
7.8.3 Beugung am Doppelspalt	330
7.8.4 Komplementäre Objekte	331
7.8.5 Das optische Gitter	332
7.8.6 Beugung an zweidimensionalen Objekten	334
7.8.7 Fresnel'sche Zonenplatte	335
7.8.8 Beugung an dreidimensionalen Objekten	335
7.8.9 Holographie	337

7.9	Laser	337
7.9.1	Grundlagen	338
7.9.2	Funktionsprinzip	338
7.9.3	Lasertypen	339
7.9.4	Anwendungen	340
7.9.5	Pulslaser	340
8	Grundlagen der Quantenmechanik	342
8.1	Experimentelle Hinweise	342
8.1.1	Schwarze Strahler	342
8.1.2	Strahlungsgesetze ¹	343
8.1.3	Grenzfälle	344
8.1.4	Planck's Quantisierung	345
8.1.5	Kosmische Hintergrundstrahlung	346
8.1.6	Photonen	346
8.1.7	Einstein's Theorie von Absorption und Emission	346
8.1.8	Photoeffekt	347
8.1.9	Wellenlängenabhängigkeit	348
8.1.10	Austrittsarbeit	349
8.1.11	Spektrallinien von Atomen	349
8.1.12	Das Franck-Hertz Experiment	350
8.1.13	Der Comptoneffekt	350
8.2	Wellencharakter der Materie	351
8.2.1	Wellen und Teilchen	351
8.2.2	Ausbreitung und Dispersion	352
8.2.3	Beispiel: Elektronenwellen	353
8.2.4	Interferenz und Beugung	354
8.2.5	Neutronen	355
8.2.6	Schwerere und zusammengesetzte Teilchen	355
8.3	Der quantenmechanische Formalismus	356
8.3.1	Historische Vorbemerkungen	356
8.3.2	Grundlagen	357
8.3.3	Quantenmechanische Messungen; Erwartungswerte	357
8.3.4	Die wichtigsten Operatoren	358
8.3.5	Schrödingergleichung	358
8.3.6	Heisenberg's Unschärferelation	359
8.4	Eindimensionale Probleme	360
8.4.1	Der harmonische Oszillator	360
8.4.2	Teilchen im Potenzialtopf	361
8.4.3	Anwendung: Halbleiter-Quantenstrukturen	362
9	Atome, Moleküle und Festkörper	363
9.1	Atome als Grundbestandteile der Materie	363
9.1.1	Historisches	363
9.1.2	Die moderne Atomtheorie	364

¹Mehr dazu findet man unter [\[1\]](#)

9.1.3	Experimentelle Hinweise für die Existenz von Atomen	364
9.1.4	Feld-Ionen Mikroskopie	365
9.1.5	Mikroskopie	366
9.1.6	Größe eines Atoms	367
9.2	Aufbau der Atome	367
9.2.1	Historische Grundlagen	367
9.2.2	Rutherford's Experiment	368
9.2.3	Das klassische Atommodell	369
9.2.4	Das Wasserstoff-Spektrum	369
9.2.5	Das Bohr'sche Atommodell	370
9.3	Die Quantenmechanik des Wasserstoffatoms	372
9.3.1	Grundlagen, Hamiltonoperator	372
9.3.2	Wasserstofforbitale	372
9.3.3	Drehimpuls	373
9.3.4	Das Wasserstoffspektrum	373
9.3.5	Elektronenspin	374
9.3.6	Schwerere Atome	375
9.3.7	Das Periodensystem	376
9.4	Bindungen und Moleküle	377
9.4.1	Wechselwirkung und Bindungsenergie	377
9.4.2	Bindungstypen	378
9.4.3	Das Wasserstoffmolekül	379
9.4.4	Zustandsenergie	379
9.4.5	Molekülorbitale	380
9.4.6	Kovalente Bindung	381
9.4.7	Polare Bindungen	381
9.4.8	Van der Waals Bindung	382
9.4.9	Wechselwirkung	383
9.4.10	Eigenmoden	383
9.4.11	Das Lennard-Jones Potenzial	384
9.4.12	Metallische und ionische Bindung	385
9.4.13	Wasserstoffbrücken	386
9.4.14	Bedeutung von H-Brücken	386
9.5	Kristalline Festkörper	387
9.5.1	Symmetrie	387
9.5.2	Van der Waals	388
9.5.3	Gleichgewichtsabstand	388
9.5.4	Ionische Bindung	389
9.5.5	Berechnung der Madelung-Konstanten	390
9.6	Elektronen im Festkörper	391
9.6.1	Das klassische Drude-Modell	391
9.6.2	Das Sommerfeld-Modell	393
9.6.3	Das Teilchen im Potenzialtopf	394
9.6.4	Drei Raumdimensionen	394
9.6.5	Fermi-Energie	395
9.6.6	Die Fermi-Dirac Verteilung	396
9.6.7	Leitfähigkeit	396

9.7 Bänder	398
9.7.1 Probleme des Modells freier Elektronen	398
9.7.2 Das periodische Potenzial	399
9.7.3 Eigenfunktionen im periodischen Potenzial	399
9.7.4 Zonenrand	400
9.7.5 Bandstruktur	401
9.8 Halbleiter	403
9.8.1 Grundlagen	403
9.8.2 Ladungsträger-Statistik	404
9.8.3 Dotierung	405
9.8.4 Absorption von Licht	405
9.8.5 Lichtemission	406
9.9 Supraleitung	407
9.9.1 Entdeckung	407
9.9.2 Leitfähigkeit	408
9.9.3 Diamagnetismus	408
9.9.4 Kritische Temperatur und kritisches Feld	409
9.9.5 Typ II Supraleiter	410
10 Kerne und Teilchen	412
10.1 Atomkerne	412
10.1.1 Hierarchie der Größenskalen	412
10.1.2 Nukleonen	412
10.1.3 Bindungsenergie und Massendefekt	413
10.1.4 Das Tröpfchenmodell	414
10.1.5 Das Schalenmodell des Kerns	415
10.1.6 Das Standardmodell der Teilchenphysik	415
10.2 Radioaktivität	416
10.2.1 Historisches, Grundlagen	416
10.2.2 Alpha-Zerfall	417
10.2.3 Beta-Zerfall	418
10.2.4 Gamma-Zerfall	419
10.3 Kernenergie	420
10.3.1 Kernspaltung	420
10.3.2 Kernreaktoren	421
10.3.3 Probleme der Kernspaltung	422
10.3.4 Kernfusion	422
10.3.5 Kernfusion in Sternen	423
Literaturverzeichnis	425