

Experimentelle Physik IIIa

**Physik A/B 1
SS 2019**

Dieter Suter

10. Juli 2019

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	15
1.1 Organisatorisches	15
1.1.1 Inhaltsübersicht	15
1.1.2 Übungen	15
1.1.3 Klausur	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	19
1.2.7 Bedeutung für Ingenieure	19
1.3 Physik in Dortmund	19
1.3.1 Struktur der Fakultät	19
1.3.2 Festkörperphysik	20
1.3.3 Teilchenphysik	21
1.3.4 Beschleunigerphysik / DELTA	21
1.3.5 Medizinphysik	21
1.4 Physische Größen, Maßeinheiten	22
1.4.1 Grundlagen und Definitionen	22
1.4.2 Grundgrößen im SI-System	22
1.4.3 Zehnerpotenzen: Vorsilben und Abkürzungen	24
1.4.4 Abgeleitete Größen	24
1.4.5 Naturkonstanten	25
1.5 Messfehler	25
1.5.1 Systematische Fehler	25
1.5.2 Statistische Fehler	25
1.5.3 Verteilungsfunktion	27
1.5.4 Fehlerfortpflanzung	28
1.5.5 Differenzmessungen	29
1.5.6 Fitten	29
1.6 Differentialoperatoren	30
2 Mechanik	31
2.1 Kinematik	31
2.1.1 Grundbegriffe	31
2.1.2 Eindimensionale Kinematik	31

2.1.3 Konstante Beschleunigung	33
2.1.4 Senkrechter Wurf nach oben	33
2.1.5 Kinematik in zwei und drei Dimensionen	34
2.1.6 Wurfparabel	35
2.1.7 Unabhängigkeitsprinzip	36
2.2 Dynamik von Massenpunkten	38
2.2.1 Definitionen	38
2.2.2 Newton'sche Axiome	39
2.2.3 Kraft und Beschleunigung	40
2.2.4 Zusammenfassung und Gültigkeit	40
2.2.5 Masse	41
2.2.6 Schwere und träge Masse	41
2.3 Kräfte in der Dynamik	43
2.3.1 Kräfte und Felder	43
2.3.2 Elementare und phänomenologische Kräfte	44
2.3.3 Reibungskräfte	44
2.3.4 Dynamik mit Reibung	45
2.3.5 Kräfte als Vektoren	46
2.3.6 Raketen	47
2.3.7 Beispiele	48
2.4 Arbeit, Leistung und Energie	48
2.4.1 Motivation und Definition	48
2.4.2 Arbeit	49
2.4.3 Beispiele mit konstanter Kraft	50
2.4.4 Variable Kraft	51
2.4.5 Energie	51
2.4.6 Leistung	52
2.4.7 Potentielle Energie	53
2.4.8 Konservative Kräfte	54
2.4.9 Gleichgewicht	55
2.4.10 Austausch von Energie	55
2.4.11 Energieerhaltung	56
2.4.12 Anwendungen	57
2.5 Stoßprozesse	58
2.5.1 Definition und Motivation	58
2.5.2 Klassifikation von Stoßprozessen	59
2.5.3 Kraftstoß	60
2.5.4 Elastischer 2-Körperstoß	60
2.5.5 Fallende Gummibälle	61
2.5.6 Stoß an Kugelreihe	62
2.5.7 Unelastischer 2-Körperstoß	62
2.5.8 Elastischer Stoß in zwei Dimensionen	63
2.6 Drehbewegungen	63
2.6.1 Kreisbewegung	63
2.6.2 Drehimpuls eines Massenpunkts	65
2.6.3 Trägheitsmoment	65
2.6.4 Kinetische Energie	66

2.6.5 Energieerhaltung	67
2.6.6 Drehmoment	68
2.6.7 Rotationsachse	69
2.6.8 Kräftegleichgewicht	69
2.6.9 Pirouette	70
2.6.10 Kreisel	72
2.7 Astronomische Anwendungen	73
2.7.1 Drehimpuls und Planetenbahnen	73
2.7.2 Die Kepler'schen Gesetze	74
2.7.3 2. Kepler'sches Gesetz	75
2.7.4 3. Kepler'sches Gesetz	75
2.7.5 Theorie der Gravitation	76
2.8 Mechanik in bewegten Bezugssystemen	78
2.8.1 Galilei'sche Relativität	78
2.8.2 Relativgeschwindigkeit	78
2.8.3 Gleichförmig beschleunigte Bezugssysteme	79
2.8.4 Schwereosigkeit	79
2.8.5 Kreisbewegung	80
2.8.6 Bewegungsgleichung im rotierenden Bezugssystem	81
2.8.7 Scheinkräfte im rotierenden Koordinatensystem	81
2.8.8 Zentrifugalkraft	82
2.8.9 Beispiele	83
2.8.10 Corioliskraft	84
2.8.11 Die Einstein'sche Relativitätstheorie	86
2.9 Hydrostatik	88
2.9.1 Aggregatzustände	88
2.9.2 Spannung	88
2.9.3 Flüssigkeitsoberfläche	88
2.9.4 Hydrostatischer Druck	89
2.9.5 Schweredruck	90
2.9.6 Hydrostatischer Druck in Gasen	91
2.9.7 Das Prinzip von Archimedes	92
2.9.8 Auftriebsmessungen	93
2.9.9 Auftrieb in Luft	94
2.9.10 Kompressibilität	95
2.10 Grenzflächeneffekte	96
2.10.1 Oberflächenspannung	96
2.10.2 Minimalflächen	97
2.10.3 Seifenblasen	98
2.10.4 Benetzung	99
2.10.5 Kapillarkräfte	99
2.11 Hyrodynamik und Aerodynamik	100
2.11.1 Stromlinien und Geschwindigkeitsfelder	100
2.11.2 Kontinuitätsgleichung	102
2.11.3 Druck und kinetische Energie	103
2.11.4 Druckänderung in einer Strömung	104
2.11.5 Demonstrationen zur Bernoulli-Gleichung	105

2.11.6 Viskosität	106
2.11.7 Reibungswiderstand in Flüssigkeiten	107
2.11.8 Turbulente Reibung und Luftwiderstand	108
2.11.9 Rohrdurchfluss	108
2.11.10 Das Gesetz von Hagen-Poiseuille	109
2.11.11 Ähnlichkeit von Strömungen	110
2.11.12 Strömende Gase (Aerodynamik)	111
2.11.13 Der Magnus-Effekt	111
3 Wärmelehre und Thermodynamik	113
3.1 Temperatur und Wärme	113
3.1.1 Historische Entwicklung	113
3.1.2 Wärme als Energieform	113
3.1.3 Temperatur und thermisches Gleichgewicht	114
3.1.4 Temperaturskalen	114
3.1.5 Temperaturmessung	115
3.1.6 Wärmeausdehnung	116
3.2 Gastheorie	116
3.2.1 Gase	116
3.2.2 Das ideale Gas	117
3.2.3 Druck	117
3.2.4 Zustandsgleichung	119
3.3 Wärme	119
3.3.1 Wärmemenge, Wärmeäquivalent	119
3.3.2 Wärmekapazität	120
3.3.3 Anwendungsbeispiele	121
3.3.4 Wärmetransport	121
3.3.5 Wärmeleitung	122
3.3.6 Wärmeleitfähigkeit	123
3.3.7 Wärmewiderstand	124
3.3.8 Wärmeleitungsgleichung	125
3.3.9 Wärmeleitung in 1D	126
3.4 Thermodynamik	126
3.4.1 Der 1. Hauptsatz	126
3.4.2 Arbeit und Weg	127
3.4.3 Der Stirling Motor	128
3.4.4 Carnot'scher Kreisprozess	129
3.4.5 Der 2. Hauptsatz	130
3.4.6 Entropie	131
3.4.7 Der 3. Hauptsatz der Thermodynamik	131
4 Elektrizität und Magnetismus	133
4.1 Ladung und Feld	133
4.1.1 Übersicht	133
4.1.2 Ladungsquantisierung	134
4.1.3 Elektrostatische Wechselwirkung	134
4.1.4 Abstandsabhängigkeit	135

4.1.5 Elektrisches Feld	136
4.1.6 Feldlinien	137
4.1.7 Elektrostatisches Potenzial	138
4.1.8 Äquipotenzialflächen	139
4.1.9 Verschiebungsdichte	140
4.1.10 Feldgleichung	141
4.1.11 Feld eines geladenen Drahtes	142
4.1.12 Homogene Kugelladung	142
4.1.13 Elektrische Dipole	143
4.2 Materie im elektrischen Feld	144
4.2.1 Leiter und Isolatoren	144
4.2.2 Felder und elektrische Leiter	145
4.2.3 Oberflächenladungen und Spiegelladungen	145
4.2.4 Feldfreie Räume	146
4.2.5 Influenzladung	147
4.2.6 Bandgenerator	147
4.2.7 Bewegung geladener Teilchen im elektrischen Feld	148
4.2.8 Dipole in einem äußeren Feld	149
4.2.9 Dipol im inhomogenen Feld	150
4.3 Kondensatoren	150
4.3.1 Der Plattenkondensator	150
4.3.2 Felder im Plattenkondensator	151
4.3.3 Beispiele	151
4.3.4 Kugelkondensator	152
4.3.5 Ladungstrennung im Kondensator	153
4.3.6 Energie des elektrischen Feldes	153
4.3.7 Kräfte auf Kondensatorplatten	154
4.4 Dielektrika	155
4.4.1 Polarisation in Dielektrika	155
4.4.2 Mikroskopisches Modell	156
4.4.3 Depolarisationsfeld	157
4.4.4 Kräfte auf Dielektrika in Feldrichtung	157
4.4.5 Kräfte auf Dielektrika senkrecht zur Feldrichtung	158
4.5 Stationäre Ströme	159
4.5.1 Ladungstransport	159
4.5.2 Phänomenologie	160
4.5.3 Definitionen	161
4.5.4 Widerstand	161
4.5.5 Spezifischer Widerstand in Ohm'schen Leitern	162
4.5.6 Modelle für die Leitfähigkeit	163
4.5.7 Driftgeschwindigkeit	164
4.5.8 Supraleiter	165
4.5.9 Halbleiter	166
4.5.10 Ladungstransport in Gasen und Flüssigkeiten	166
4.6 Schaltungen	167
4.6.1 Kirchhoff'sche Gesetze	167
4.6.2 Einfache Schaltungen	168

4.6.3	Wheatstone'sche Brückenschaltung	169
4.6.4	Elektrische Schaltelemente	169
4.7	Magnetfelder	170
4.7.1	Grundlagen	170
4.7.2	Dipole im Magnetfeld	171
4.7.3	Feldlinien und Magnetpole	171
4.7.4	Erdmagnetfeld und Kompass	172
4.7.5	Magnetfeld elektrischer Ströme	173
4.7.6	Das Durchflutungsgesetz	173
4.7.7	Spulen	174
4.7.8	Das Biot-Savart Gesetz	175
4.7.9	Magnetfeld ringförmiger Spulen	175
4.7.10	Flussdichte und magnetische Feldenergie	176
4.8	Bewegte Ladungen im Magnetfeld	177
4.8.1	Lorentzkraft	177
4.8.2	Geladene Teilchen im Magnetfeld	177
4.8.3	Anwendungen	178
4.8.4	Bahnen im Magnetfeld	179
4.8.5	Geladene Teilchen im Erdmagnetfeld	179
4.8.6	Gekreuzte E- und B-Felder	181
4.8.7	Zyklotron	181
4.8.8	Hall Effekt	182
4.8.9	Messung der Ladungsträgerdichte	183
4.8.10	Stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	184
4.8.11	Parallele stromdurchflossene Leiter	184
4.8.12	Drehmoment auf Leiterschleife	186
4.8.13	Elektromotoren	186
4.8.14	Elektromagnetische Bezugsysteme	187
4.8.15	Lorentz-Transformation	188
4.9	Materie im Magnetfeld	188
4.9.1	Elementare magnetische Dipole	189
4.9.2	Magnetisierung	189
4.9.3	Klassifikation magnetischen Verhaltens	190
4.9.4	Mikroskopisches Modell	191
4.9.5	Ferromagnetismus	192
4.9.6	Magnetische Domänen	193
4.9.7	Magnetische Hysterese	195
4.9.8	Weitere magnetische Ordnungseffekte	196
4.9.9	Ferrofluide	196
4.9.10	Magnetische Eigenschaften von Supraleitern	197
4.9.11	Anwendungen	197
4.10	Zeitabhängige Felder und Ströme	198
4.10.1	Induktion: Phänomenologie	198
4.10.2	Magnetischer Fluss	199
4.10.3	Induktionsgesetz	199
4.10.4	Wechselstromgenerator	200
4.10.5	Induzierte Ströme und Lenz'sche Regel	201

4.10.6 Wirbelströme	202
4.10.7 Selbstinduktion	202
4.10.8 Magnetische Feldenergie	203
4.10.9 Periodische Ströme und Felder	204
4.10.10 Komplexe Schreibweise, Impedanz	205
4.10.11 Rechnen mit Impedanzen	207
4.10.12 Transformatoren	208
4.10.13 Anwendungen	208
4.10.14 Aperiodische Ströme	209
4.11 Die Maxwell Gleichungen	210
4.11.1 Felder	211
4.11.2 Die Grundgleichungen von Elektrizitätslehre und Magnetismus	211
4.11.3 Der Verschiebungsstrom	212
4.11.4 Die Maxwell-Gleichungen	213
4.11.5 Grenzflächen	214
5 Schwingungen	215
5.1 Allgemeines	215
5.1.1 Beispiele und Definition	215
5.1.2 Phänomenologie	215
5.1.3 Atomare und molekulare Schwingungen	216
5.1.4 Klassifikation und Übersicht	217
5.2 Der Harmonische Oszillator	217
5.2.1 Harmonische Schwingungen	217
5.2.2 Bewegungsgleichung	219
5.2.3 Freie Schwingung	219
5.2.4 Energie	220
5.2.5 Der h.O. als Modellsystem	221
5.2.6 Anharmonizität	222
5.2.7 Komplexe Amplitude	222
5.3 Schwingende Systeme	223
5.3.1 Das mathematische Pendel	223
5.3.2 Torsionsschwinger	224
5.3.3 Das physikalische Pendel	225
5.3.4 Flüssigkeitpendel im U-Rohr	226
5.3.5 Elektromagnetische Schwingkreise	226
5.3.6 Zusammenfassung	227
5.4 Gedämpfte Schwingung	228
5.4.1 Dämpfung und Reibung	228
5.4.2 Geschwindigkeitsproportionale Reibung	228
5.4.3 Schwache Dämpfung, $\omega_0 > \beta$	229
5.4.4 Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen	230
5.4.5 Überkritische Dämpfung (Kriechfall)	230
5.4.6 Der aperiodische Grenzfall: $\omega_0 = \beta$	231
5.5 Erzwungene Schwingung	231
5.5.1 Bewegungsgleichung	231
5.5.2 Energiebillanz	232

5.5.3 Lösungsweg	232
5.5.4 Stationäre Lösung	233
5.5.5 Resonante Anregung	234
5.5.6 Absolutbetrag und Phase	235
5.5.7 Einschwingvorgang	236
5.6 Schwingungen mit mehreren Freiheitsgraden	236
5.6.1 Das Doppelpendel	236
5.6.2 Eigenschwingungen	237
5.6.3 Schwebungen	238
5.6.4 Gekoppelte elektronische Schwingkreise	239
5.6.5 Transversalschwingungen	240
5.6.6 Schwingungen von mehrdimensionalen Systemen	241
5.6.7 Akustische Schwingungen, Musikinstrument	241
6 Wellen	243
6.1 Grundlagen	243
6.1.1 Beispiele und Definition	243
6.1.2 Ausbreitung von Wellen	243
6.1.3 Harmonische Wellen	244
6.1.4 Longitudinale und transversale Wellen	245
6.1.5 Mathematische Beschreibung harmonischer Wellen	246
6.1.6 Lineare Kette	247
6.1.7 Harmonische Longitudinalwelle	248
6.1.8 Phasengeschwindigkeit	248
6.1.9 Überlagerung von Wellen; Gruppengeschwindigkeit	249
6.2 Akustische Wellen	250
6.2.1 Wellengleichung für Druck	250
6.2.2 Schallwellen	251
6.2.3 Schallimpedanz und Schallschnelle	252
6.2.4 Intensität und Lautstärke	253
6.2.5 Physiologische Lautstärken-Skala	254
6.2.6 Empfindlichkeitsgrenze	254
6.3 Mechanische Wellen	255
6.3.1 Druckwellen in Flüssigkeiten und Festkörpern	255
6.3.2 Seismische Wellen	256
6.3.3 Transversalwellen in einer Massenkette	257
6.3.4 Energie einer Transversalwelle	258
6.3.5 Seilwellen	258
6.3.6 Wellen in 2D und 3D	259
6.3.7 Übersicht Phasengeschwindigkeiten	260
6.4 Ausbreitung	261
6.4.1 Reflexion und Transmission	261
6.4.2 Stehwellen	262
6.4.3 Abstandsabhängigkeit	262
6.4.4 Der Dopplereffekt	263
6.4.5 Überschallgeschwindigkeit	264

6.5 Elektromagnetische Wellen	265
6.5.1 Das elektromagnetische Spektrum	265
6.5.2 Elektromagnetische Wellengleichung	266
6.5.3 Ebene Wellen	267
6.5.4 Magnetfeld	267
6.5.5 Transversalwellen: Polarisation	268
6.5.6 Hertz'scher Dipol	269
6.5.7 Eigenschaften des Hertz'schen Dipols	270
6.5.8 Übertragung von Energie und Impuls	271
6.5.9 Dopplereffekt	272
7 Optik	273
7.1 Grundlagen	273
7.1.1 Historisches	273
7.1.2 Beschreibung	274
7.1.3 Erzeugung von Licht	275
7.1.4 Nachweis von Licht	276
7.1.5 Halbleiterdetektoren	277
7.2 Lichtausbreitung	279
7.2.1 Lichtgeschwindigkeit	279
7.2.2 Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Fizeau-Michelson	279
7.2.3 Brechungsindex	280
7.2.4 Absorption und Dispersion	281
7.2.5 Geometrische Optik	282
7.2.6 Das Prinzip von Fermat	283
7.2.7 Gekrümmte Lichtstrahlen	285
7.2.8 Huygens'sches Prinzip	285
7.3 Reflexion und Brechung	287
7.3.1 Reflexion: Grundlagen	287
7.3.2 Herleitung des Reflexionsgesetzes	288
7.3.3 Brechung des Lichts an einer ebenen Grenzfläche	288
7.3.4 Reflexionsgesetz aus dem Huygens'schen Prinzip	289
7.3.5 Reflexions- und Transmissionskoeffizienten	290
7.3.6 Fresnel-Formeln	291
7.3.7 Totalreflexion	292
7.3.8 Brechung am Prisma	293
7.4 Abbildende Optik	294
7.4.1 Bildentstehung	294
7.4.2 Parabolspiegel	295
7.4.3 Bildweite und Maßstab	295
7.4.4 Brechung an einer sphärischen Oberfläche	296
7.4.5 Entstehung des Regenbogens	298
7.4.6 Linsen	298
7.4.7 Linsentypen	299
7.4.8 Abbildung und Vergrößerung	300
7.4.9 Linsenfehler	301
7.4.10 Maximale Auflösung	302

7.5 Optische Instrumente	303
7.5.1 Das Auge	303
7.5.2 Vergrößerung und Mikroskop	304
7.5.3 Fernrohr	305
7.5.4 Photometrie	306
7.6 Polarisation und Doppelbrechung	307
7.6.1 Polarisation	307
7.6.2 Erzeugung und Umwandlung	308
7.6.3 Doppelbrechung	309
7.6.4 Anwendungen	310
7.6.5 Optische Aktivität	311
7.7 Interferenz	311
7.7.1 Linearität für Felder, nicht für Intensitäten	311
7.7.2 Der Interferenzterm	312
7.7.3 Interferenz von 2 ebenen Wellen	312
7.7.4 Zweistrahlerinterferenz an dünnen Schichten	313
7.7.5 Farben dünner Filme	314
7.7.6 Entspiegelung	314
7.7.7 Newton'sche Ringe	315
7.7.8 Interferometer als Messinstrumente	316
7.7.9 Vielstrahlerinterferenz	317
7.7.10 Kohärenz	318
7.7.11 Anwendungen	319
7.8 Beugung	320
7.8.1 Grenzen der geometrischen Optik	320
7.8.2 Beugung am Spalt	321
7.8.3 Beugung am Doppelspalt	323
7.8.4 Komplementäre Objekte	324
7.8.5 Das optische Gitter	325
7.8.6 Beugung an zweidimensionalen Objekten	326
7.8.7 Fresnel'sche Zonenplatte	328
7.8.8 Beugung an dreidimensionalen Objekten	328
7.8.9 Holographie	330
7.9 Laser	330
7.9.1 Grundlagen	331
7.9.2 Funktionsprinzip	331
7.9.3 Lasertypen	332
7.9.4 Anwendungen	333
7.9.5 Pulslaser	333
8 Grundlagen der Quantenmechanik	335
8.1 Experimentelle Hinweise	335
8.1.1 Schwarze Strahler	335
8.1.2 Strahlungsgesetze ¹	336
8.1.3 Grenzfälle	337

¹Mehr dazu findet man unter [1]

8.1.4 Planck's Quantisierung	338
8.1.5 Kosmische Hintergrundstrahlung	339
8.1.6 Photonen	339
8.1.7 Einstein's Theorie von Absorption und Emission	339
8.1.8 Photoeffekt	340
8.1.9 Wellenlängenabhängigkeit	341
8.1.10 Austrittsarbeit	342
8.1.11 Spektrallinien von Atomen	342
8.1.12 Das Franck-Hertz Experiment	343
8.1.13 Der Comptoneffekt	343
8.2 Wellencharakter der Materie	344
8.2.1 Wellen und Teilchen	344
8.2.2 Ausbreitung und Dispersion	345
8.2.3 Beispiel: Elektronenwellen	346
8.2.4 Interferenz und Beugung	347
8.2.5 Neutronen	348
8.2.6 Schwerere und zusammengesetzte Teilchen	348
8.3 Der quantenmechanische Formalismus	349
8.3.1 Historische Vorbemerkungen	349
8.3.2 Grundlagen	350
8.3.3 Quantenmechanische Messungen; Erwartungswerte	350
8.3.4 Die wichtigsten Operatoren	351
8.3.5 Schrödinger-Gleichung	351
8.3.6 Heisenberg's Unschärferelation	352
8.4 Eindimensionale Probleme	353
8.4.1 Der harmonische Oszillator	353
8.4.2 Teilchen im Potenzialtopf	353
8.4.3 Anwendung: Halbleiter-Quantenstrukturen	354
9 Atome, Moleküle und Festkörper	356
9.1 Atome als Grundbestandteile der Materie	356
9.1.1 Historisches	356
9.1.2 Die moderne Atomtheorie	357
9.1.3 Experimentelle Hinweise für die Existenz von Atomen	357
9.1.4 Feld-Ionen Mikroskopie	358
9.1.5 Mikroskopie	359
9.1.6 Größe eines Atoms	360
9.2 Aufbau der Atome	360
9.2.1 Historische Grundlagen	360
9.2.2 Rutherford's Experiment	361
9.2.3 Das klassische Atommodell	362
9.2.4 Das Wasserstoff-Spektrum	362
9.2.5 Das Bohr'sche Atommodell	363
9.3 Die Quantenmechanik des Wasserstoffatoms	365
9.3.1 Grundlagen, Hamiltonoperator	365
9.3.2 Wasserstofforbitale	365
9.3.3 Drehimpuls	366

9.3.4 Das Wasserstoffspektrum	366
9.3.5 Elektronenspin	367
9.3.6 Schwerere Atome	368
9.3.7 Das Periodensystem	369
9.4 Bindungen und Moleküle	370
9.4.1 Wechselwirkung und Bindungsenergie	370
9.4.2 Bindungstypen	371
9.4.3 Das Wasserstoffmolekül	372
9.4.4 Zustandsenergie	372
9.4.5 Molekülorbitale	373
9.4.6 Kovalente Bindung	374
9.4.7 Polare Bindungen	374
9.4.8 Van der Waals Bindung	375
9.4.9 Wechselwirkung	376
9.4.10 Eigenmoden	376
9.4.11 Das Lennard-Jones Potenzial	377
9.4.12 Metallische und ionische Bindung	378
9.4.13 Wasserstoffbrücken	379
9.4.14 Bedeutung von H-Brücken	379
9.5 Kristalline Festkörper	380
9.5.1 Symmetrie	380
9.5.2 Van der Waals	381
9.5.3 Gleichgewichtsabstand	381
9.5.4 Ionische Bindung	382
9.5.5 Berechnung der Madelung-Konstanten	383
9.6 Elektronen im Festkörper	384
9.6.1 Das klassische Drude-Modell	384
9.6.2 Das Sommerfeld-Modell	386
9.6.3 Das Teilchen im Potenzialtopf	387
9.6.4 Drei Raumdimensionen	387
9.6.5 Fermi-Energie	388
9.6.6 Die Fermi-Dirac Verteilung	389
9.6.7 Leitfähigkeit	389
9.7 Bänder	391
9.7.1 Probleme des Modells freier Elektronen	391
9.7.2 Das periodische Potenzial	392
9.7.3 Eigenfunktionen im periodischen Potenzial	392
9.7.4 Zonenrand	393
9.7.5 Bandstruktur	394
9.8 Halbleiter	396
9.8.1 Grundlagen	396
9.8.2 Ladungsträger-Statistik	397
9.8.3 Dotierung	398
9.8.4 Absorption von Licht	398
9.8.5 Lichtemission	399
9.9 Supraleitung	400
9.9.1 Entdeckung	400

9.9.2 Leitfähigkeit	401
9.9.3 Diamagnetismus	401
9.9.4 Kritische Temperatur und kritisches Feld	402
9.9.5 Typ II Supraleiter	403
10 Kerne und Teilchen	405
10.1 Atomkerne	405
10.1.1 Hierarchie der Größenskalen	405
10.1.2 Nukleonen	405
10.1.3 Bindungsenergie und Massendefekt	406
10.1.4 Das Tröpfchenmodell	407
10.1.5 Das Schalenmodell des Kerns	408
10.1.6 Das Standardmodell der Teilchenphysik	408
10.2 Radioaktivität	409
10.2.1 Historisches, Grundlagen	409
10.2.2 Alpha-Zerfall	410
10.2.3 Beta-Zerfall	411
10.2.4 Gamma-Zerfall	412
10.3 Kernenergie	413
10.3.1 Kernspaltung	413
10.3.2 Kernreaktoren	414
10.3.3 Probleme der Kernspaltung	415
10.3.4 Kernfusion	415
10.3.5 Kernfusion in Sternen	416
Literaturverzeichnis	418