

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Inhalt und Bedeutung der Atomphysik	2
1.2	Moleküle: Grundbausteine der Natur	3
1.3	Festkörperphysik und ihre technische Bedeutung	4
1.4	Überblick über das Konzept des Lehrbuches	4
	Literatur	6
2	Entwicklung der Atomvorstellung	9
2.1	Historische Entwicklung	10
2.2	Experimentelle und theoretische Hinweise auf die Existenz von Atomen	11
2.2.1	Daltons Gesetz der konstanten Proportionen	11
2.2.2	Gesetze von Gay-Lussac und der Begriff des Mols	12
2.2.3	Experimentelle Methoden zur Bestimmung der Avogadro-Konstanten	14
2.2.4	Die Bedeutung der kinetischen Gastheorie für die Atomvorstellung	18
2.3	Kann man Atome sehen?	18
2.3.1	Brown'sche Molekularbewegung	19
2.3.2	Nebelkammer	22
2.3.3	Mikroskope mit atomarer Auflösung	22
2.4	Bestimmung der Atomgröße	27
2.4.1	Bestimmung von Atomgrößen aus dem Kovolumen der van-der-Waals-Gleichung	27
2.4.2	Abschätzung der Atomgrößen aus den Transportkoeffizienten in Gasen	28
2.4.3	Beugung von Röntgenstrahlung an Kristallen	29
2.4.4	Vergleich der Methoden zur Atomgrößenbestimmung	30
2.5	Der elektrische Aufbau von Atomen	30
2.5.1	Kathoden- und Kanalstrahlen	31
2.5.2	Messung der Elementarladung	32
2.5.3	Erzeugung freier Elektronen	33
2.5.4	Erzeugung freier Ionen	34
2.5.5	Bestimmung der Elektronenmasse	37
2.5.6	Wie neutral ist ein Atom?	38
2.6	Elektronen- und Ionenoptik	39
2.6.1	Brechungsgesetz für Elektronenstrahlen	40
2.6.2	Elektronenbahnen in axialsymmetrischen Feldern	41
2.6.3	Elektrostatische Elektronenlinsen	43
2.6.4	Magnetische Linsen	44
2.6.5	Anwendungen der Elektronen- und Ionenoptik	46

2.7	Bestimmung der Atommassen; Massenspektrometer	46
2.7.1	Überblick	46
2.7.2	Parabelspektrograph von J. J. Thomson	47
2.7.3	Geschwindigkeitsfokussierung	48
2.7.4	Richtungsfokussierung	49
2.7.5	Massenspektrometer mit doppelter Fokussierung	50
2.7.6	Flugzeit-Massenspektrometer	51
2.7.7	Quadrupol-Massenspektrometer	52
2.7.8	Ionen-Zyklotron-Resonanz-Spektrometer	54
2.7.9	Isotope	56
2.8	Die Struktur von Atomen	57
2.8.1	Streuversuche; integraler und differentieller Streuquerschnitt . .	57
2.8.2	Grundlagen der klassischen Streutheorie	58
2.8.3	Bestimmung der Ladungsverteilung im Atom aus Streuexperimenten	62
2.8.4	Das Thomson'sche Atommodell	62
2.8.5	Rutherford'sches Atommodell	64
2.8.6	Rutherford'sche Streuformel	65
	Zusammenfassung	67
	Aufgaben	67
	Literatur	69
3	Entwicklung der Quantenphysik	71
3.1	Experimentelle Hinweise auf den Teilchencharakter elektromagnetischer Strahlung	72
3.1.1	Hohlraumstrahlung	72
3.1.2	Das Planck'sche Strahlungsgesetz	74
3.1.3	Wien'sches Verschiebungsgesetz	76
3.1.4	Das Stefan-Boltzmann'sche Strahlungsgesetz	77
3.1.5	Photoelektrischer Effekt	78
3.1.6	Compton-Effekt	80
3.1.7	Eigenschaften des Photons	80
3.1.8	Photonen im Gravitationsfeld	82
3.1.9	Wellen- und Teilchenbeschreibung von Licht	83
3.2	Der Wellencharakter von Teilchen	85
3.2.1	Die de Broglie-Wellenlänge und Elektronenbeugung	85
3.2.2	Beugung und Interferenz von Atomen	86
3.2.3	Bragg-Reflexion und Neutronenspektrometer	88
3.2.4	Neutronen-Interferometrie	88
3.2.5	Anwendungen der Welleneigenschaften von Teilchen	89
3.3	Materiewellen und Wellenfunktionen	89
3.3.1	Wellenpakete	90
3.3.2	Statistische Deutung der Wellenfunktion	92
3.3.3	Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation	93
3.3.4	Das Auseinanderlaufen eines Wellenpaketes	96
3.3.5	Unbestimmtheitsrelation für Energie und Zeit	96
3.4	Die Quantenstruktur der Atome	97
3.4.1	Atomspektren	98
3.4.2	Das Bohr'sche Atommodell	100
3.4.3	Die Stabilität der Atome	102
3.4.4	Franck-Hertz-Versuch	103
3.5	Was unterscheidet die Quantenphysik von der klassischen Physik? . . .	105
3.5.1	Klassische Teilchenbahnen gegen Wahrscheinlichkeitsdichten der Quantenphysik	105

3.5.2	Interferenzerscheinungen bei Licht- und Materiewellen	106
3.5.3	Die Rolle des Messprozesses	108
3.5.4	Die Bedeutung der Quantenphysik für unser Naturverständnis	108
	Zusammenfassung	110
	Aufgaben	111
	Literatur	112
4	Grundlagen der Quantenphysik	113
4.1	Die Schrödingergleichung	114
4.2	Anwendungsbeispiele der stationären Schrödingergleichung	115
4.2.1	Das freie Teilchen	116
4.2.2	Potentialstufe	116
4.2.3	Tunneleffekt	119
4.2.4	Teilchen im Potentialkasten	121
4.2.5	Harmonischer Oszillator	124
4.3	Mehrdimensionale Probleme	126
4.3.1	Teilchen im zweidimensionalen Potentialkasten	127
4.3.2	Teilchen im kugelsymmetrischen Potential	128
4.3.3	Der dreidimensionale harmonische Oszillator	131
4.4	Operatoren, Erwartungswerte und Eigenfunktionen	132
4.4.1	Operatoren und Eigenwerte	132
4.4.2	Der Drehimpuls in der Quantenmechanik	134
	Zusammenfassung	137
	Aufgaben	138
	Literatur	139
5	Das Wasserstoffatom	141
5.1	Schrödingergleichung für Einelektronen-Atome	142
5.1.1	Trennung von Schwerpunkt- und Relativbewegung	142
5.1.2	Lösung der Radialgleichung	143
5.1.3	Quantenzahlen und Wellenfunktionen des H-Atoms	145
5.1.4	Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und Erwartungswerte des Elektrons in verschiedenen Quantenzuständen	147
5.2	Normaler Zeeman-Effekt	149
5.3	Vergleich der Schrödinger-Theorie mit den experimentellen Befunden	152
5.4	Relativistische Korrektur der Energieterme	153
5.4.1	Relativistische Massenzunahme	153
5.4.2	Darwin-Term	155
5.5	Elektronenspin	155
5.5.1	Stern-Gerlach-Experiment	156
5.5.2	Einstein-de-Haas-Effekt	157
5.5.3	Spin-Bahn-Kopplung; Feinstruktur	158
5.5.4	Anomaler Zeeman-Effekt	161
5.6	Hyperfeinstruktur	163
5.7	Vollständige Beschreibung des Wasserstoffatoms	165
5.7.1	Gesamtwellenfunktion und Quantenzahlen	165
5.7.2	Termbezeichnung und Termschema	166
5.7.3	Lamb-Verschiebung	167

5.8	Korrespondenzprinzip	171
5.9	Das Modell des Elektrons und seine Probleme	172
	Zusammenfassung	174
	Aufgaben	175
	Literatur	175
6	Atome mit mehreren Elektronen	177
6.1	Das Heliumatom	178
6.1.1	Näherungsmodelle	178
6.1.2	Symmetrie der Wellenfunktion	179
6.1.3	Berücksichtigung des Elektronenspins	180
6.1.4	Das Pauliprinzip	181
6.1.5	Termschema des Heliumatoms	182
6.1.6	Heliumspektrum	184
6.2	Aufbau der Elektronenhüllen größerer Atome	184
6.2.1	Das Schalenmodell der Atomhüllen	185
6.2.2	Sukzessiver Aufbau der Atomhüllen mit steigender Kernladungszahl	186
6.2.3	Atomvolumen und Ionisierungsenergien	188
6.2.4	Das Periodensystem der Elemente	189
6.3	Alkaliatome	191
6.4	Theoretische Modelle von Mehrelektronen-Atomen	193
6.4.1	Modell unabhängiger Elektronen	194
6.4.2	Das Hartree-Verfahren	194
6.5	Elektronenkonfigurationen und Drehimpulskopplungen	195
6.5.1	Kopplungsschemata für die Elektronendrehimpulse	195
6.5.2	Elektronenkonfiguration und Atomzustände leichter Atome	200
6.6	Angeregte Atomzustände	202
6.6.1	Einfachanregung	202
6.6.2	Anregung mehrerer Elektronen, Autoionisation	203
6.6.3	Innerschalenanregung, Auger-Prozess	203
6.6.4	Rydbergzustände	204
6.6.5	Planetarische Atome	206
6.6.6	Atom-Ionen	206
6.7	Exotische Atome	207
6.7.1	Myonische Atome	207
6.7.2	Pionische und kaonische Atome	208
6.7.3	Antiwasserstoff	209
6.7.4	Positronium und Myonium	209
	Zusammenfassung	211
	Aufgaben	212
	Literatur	213
7	Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Atome	215
7.1	Übergangswahrscheinlichkeiten	216
7.1.1	Induzierte und spontane Übergänge; Einstein-Koeffizienten	216
7.1.2	Übergangswahrscheinlichkeiten und Matrixelemente	218
7.1.3	Messung relativer Übergangswahrscheinlichkeiten	219
7.1.4	Übergangswahrscheinlichkeiten für Absorption und induzierte Emission	220

7.2	Auswahlregeln	220
7.2.1	Auswahlregeln für die magnetische Quantenzahl	221
7.2.2	Paritätsauswahlregeln	222
7.2.3	Auswahlregeln für die Spinquantenzahl	223
7.2.4	Multipol-Übergänge höherer Ordnung	224
7.3	Lebensdauern angeregter Zustände	225
7.4	Linienbreiten der Spektrallinien	226
7.4.1	Natürliche Linienbreite	227
7.4.2	Doppler-Verbreiterung	229
7.4.3	Stoßverbreiterung von Spektrallinien	231
7.5	Röntgenstrahlung	233
7.5.1	Bremsstrahlung	234
7.5.2	Charakteristische Röntgenstrahlung	235
7.5.3	Absorption und Streuung von Röntgenstrahlung	236
7.5.4	Röntgenfluoreszenz	240
7.5.5	Messung von Röntgenwellenlängen	240
7.5.6	Röntgen-Optik	241
7.6	Kontinuierliche Absorptions- und Emissionsspektren	242
7.6.1	Photoionisation	243
7.6.2	Rekombinationsstrahlung	244
7.6.3	Synchrotronstrahlung	246
	Zusammenfassung	247
	Aufgaben	248
	Literatur	249
8	Laser	251
8.1	Physikalische Grundlagen	252
8.1.1	Schwellwertbedingung	252
8.1.2	Erzeugung der Besetzungsinversion	253
8.1.3	Frequenzverteilung der induzierten Emission	255
8.2	Optische Resonatoren	256
8.2.1	Offene optische Resonatoren	256
8.2.2	Moden des offenen Resonators	257
8.2.3	Beugungsverluste offener Resonatoren	259
8.2.4	Das Frequenzspektrum optischer Resonatoren	260
8.3	Einmodenlaser	260
8.4	Verschiedene Lasertypen	261
8.4.1	Festkörperlaser	262
8.4.2	Halbleiterlaser	263
8.4.3	Farbstofflaser	264
8.4.4	Gaslaser	265
8.5	Erzeugung kurzer Laserpulse	267
8.5.1	Güteschaltung von Laserresonatoren	267
8.5.2	Modengekoppelte Pulse	268
8.5.3	Optische Pulskompression	269
8.5.4	Vorstoß in den Attosekunden-Bereich	271
	Zusammenfassung	272
	Aufgaben	272
	Literatur	273

9 Moleküle 275

9.1 Das H_2^+ -Molekülion 276

9.1.1 Ansatz zur exakten Lösung für das starre Molekül 276

9.1.2 Molekülorbitale und die LCAO-Näherung 278

9.1.3 Verbesserungen des LCAO-Ansatzes 281

9.2 Das H_2 -Molekül 282

9.2.1 Molekülorbitalnäherung 282

9.2.2 Heitler-London-Näherung 283

9.2.3 Vergleich beider Näherungen 283

9.2.4 Verbesserungen der Näherung 284

9.3 Elektronische Zustände zweiatomiger Moleküle 285

9.3.1 Molekülorbitalkonfigurationen 286

9.3.2 Angeregte Molekülzustände 287

9.3.3 Excimere 288

9.3.4 Korrelationsdiagramme 289

9.4 Die physikalischen Ursachen der Molekülbindung 290

9.4.1 Chemische Bindung 290

9.4.2 Multipolentwicklung 291

9.4.3 Induzierte Dipolmomente und van-der-Waals-Potential 292

9.4.4 Allgemeine Potentialentwicklung 294

9.4.5 Bindungstypen 294

9.5 Rotation und Schwingung zweiatomiger Moleküle 295

9.5.1 Born-Oppenheimer-Näherung 295

9.5.2 Der starre Rotator 296

9.5.3 Zentrifugalaufweitung 298

9.5.4 Der Einfluss der Elektronenbewegung 299

9.5.5 Schwingung zweiatomiger Moleküle 300

9.5.6 Schwingungs-Rotations-Wechselwirkung 301

9.5.7 Rotationsbarriere 302

9.6 Spektren zweiatomiger Moleküle 303

9.6.1 Das Übergangsmatrixelement 303

9.6.2 Schwingungs-Rotations-Übergänge 304

9.6.3 Die Struktur elektronischer Übergänge 305

9.6.4 Franck-Condon-Prinzip 308

9.6.5 Kontinuierliche Spektren 309

9.7 Elektronische Zustände mehratomiger Moleküle 310

9.7.1 Das H_2O -Molekül 311

9.7.2 Hybridisierung 312

9.7.3 Das CO_2 -Molekül 315

9.7.4 Walsh-Diagramm 316

9.7.5 Das NH_3 -Molekül 316

9.7.6 π -Elektronensysteme 317

9.8 Rotation mehratomiger Moleküle 318

9.8.1 Rotation symmetrischer Kreisel-moleküle 319

9.8.2 Asymmetrische Kreisel-moleküle 320

9.9 Schwingungen mehratomiger Moleküle 320

9.9.1 Normalschwingungen 321

9.9.2 Quantitative Behandlung 321

9.10 Chemische Reaktionen 323

9.10.1 Reaktionen erster Ordnung 324

9.10.2 Reaktionen zweiter Ordnung 324

9.10.3 Exotherme und endotherme Reaktionen 325

9.10.4 Die Bestimmung der absoluten Reaktionsraten 326

9.11 Moleküldynamik und Wellenpakete	327
Zusammenfassung	328
Aufgaben	329
Literatur	330
10 Experimentelle Methoden der Atom- und Molekülphysik	331
10.1 Spektroskopische Verfahren	332
10.1.1 Mikrowellenspektroskopie	333
10.1.2 Fourierspektroskopie	335
10.1.3 Klassische Emissions- und Absorptionsspektroskopie	337
10.1.4 Ramanspektroskopie	338
10.2 Laserspektroskopie	340
10.2.1 Laser-Absorptionsspektroskopie	340
10.2.2 Optoakustische Spektroskopie	340
10.2.3 Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie	341
10.2.4 Resonante Zweistufen-Photoionisation	342
10.2.5 Laserspektroskopie in Molekularstrahlen	343
10.2.6 Nichtlineare Absorption	343
10.2.7 Sättigungsspektroskopie	344
10.2.8 Dopplerfreie Zweiphotonenabsorption	346
10.3 Messung magnetischer und elektrischer Momente von Atomen und Molekülen	347
10.3.1 Die Rabi-Methode	348
10.3.2 Stark-Spektroskopie	349
10.4 Elektronenspektroskopie	349
10.4.1 Elektronenstreuversuche	350
10.4.2 Photoelektronenspektroskopie	350
10.5 Molekül-Atom-Streuung	352
10.5.1 Elastische Streuung	352
10.5.2 Inelastische Streuung	354
10.5.3 Reaktive Streuung	354
10.6 Zeitaufgelöste Messungen an Atomen und Molekülen	355
10.6.1 Lebensdauermessungen	355
10.6.2 Zeitaufgelöste Messungen der Moleküldynamik	357
10.6.3 Energietransferprozess	358
10.7 Optisches Kühlen	358
10.8 Speicher für gekühlte Atome	361
10.9 Bose-Einstein-Kondensation	362
10.10 Atom-Interferometrie	363
10.11 Präzisions-Frequenzmessungen	365
Zusammenfassung	366
Aufgaben	367
Literatur	367
11 Die Struktur fester Körper	371
11.1 Die Struktur von Einkristallen	373
11.1.1 Symmetrien von Raumgittern	374
11.1.2 Bravaisgitter	376
11.1.3 Kristallstrukturen	378

- 11.1.4 Gitterebenen 380
- 11.2 Das reziproke Gitter 381
- 11.3 Experimentelle Methoden zur Strukturbestimmung 384
 - 11.3.1 Bragg-Reflexion 384
 - 11.3.2 Laue-Beugung 385
 - 11.3.3 Beziehung zwischen Lauebedingung und Bragg-Bedingung 386
 - 11.3.4 Debye-Scherrer-Verfahren 387
- 11.4 Genauere Behandlung der Röntgenbeugung 387
 - 11.4.1 Streuamplitude und Streufaktor 388
 - 11.4.2 Der atomare Streufaktor 389
 - 11.4.3 Debye-Waller-Faktor 390
- 11.5 Reale Kristalle 391
 - 11.5.1 Leerstellen im Gitter 391
 - 11.5.2 Frenkel'sche Fehlordnung 392
 - 11.5.3 Diffusion von Punktdefekten 393
 - 11.5.4 Gitterversetzungen 393
 - 11.5.5 Polykristalline Festkörper 394
- 11.6 Warum halten Festkörper zusammen? 394
 - 11.6.1 Edalgaskristalle 394
 - 11.6.2 Ionenkristalle 395
 - 11.6.3 Metallische Bindung 396
 - 11.6.4 Kovalente Kristalle 397
 - 11.6.5 Wasserstoffbrückenbindung 397
- Zusammenfassung 398
- Aufgaben 398
- Literatur 399
- 12 Dynamik der Kristallgitter 401**
 - 12.1 Gitterschwingungen 402
 - 12.1.1 Die lineare Kette 402
 - 12.1.2 Optische und akustische Zweige 404
 - 12.2 Spezifische Wärme von Festkörpern 407
 - 12.2.1 Das Einstein-Modell der spezifischen Wärme 407
 - 12.2.2 Das Debye-Modell der spezifischen Wärme 408
 - 12.3 Phononenspektroskopie 410
 - 12.3.1 Infrarotabsorption 411
 - 12.3.2 Brillouin- und Ramanstreuung 411
 - 12.3.3 Inelastische Neutronenstreuung 413
 - 12.3.4 Ist Phononenspektroskopie mit Röntgenstrahlung möglich? 414
 - 12.3.5 Phononenspektrum und Kraftkonstanten 414
 - 12.3.6 Phononen als Quasiteilchen 414
 - 12.4 Mößbauer-Effekt 415
 - Zusammenfassung 419
 - Aufgaben 419
 - Literatur 420

13	Elektronen im Festkörper	421
13.1	Freies Elektronengas	422
13.1.1	Elektronen im eindimensionalen Potentialkasten	422
13.1.2	Freies Elektronengas im dreidimensionalen Potentialkasten	424
13.1.3	Fermi-Dirac-Verteilung	425
13.1.4	Eigenschaften des Elektronengases bei $T = 0\text{ K}$	426
13.1.5	Elektronengas bei $T > 0\text{ K}$	426
13.1.6	Spezifische Wärme der Elektronen	427
13.2	Elektronen im periodischen Potential	428
13.2.1	Blochfunktionen	429
13.2.2	Energie-Impuls-Relationen	430
13.2.3	Energiebänder	431
13.2.4	Isolatoren und Leiter	432
13.2.5	Reale Bandstrukturen	432
13.3	Supraleitung	433
13.3.1	Das Cooper-Paar-Modell	434
13.3.2	Experimentelle Prüfung der BCS-Theorie	435
13.3.3	Hochtemperatursupraleiter	437
13.4	Nichtmetallische Leiter	438
13.5	Elektronenemission	439
13.5.1	Glühemission	440
13.5.2	Feldemission	440
	Zusammenfassung	442
	Aufgaben	443
	Literatur	443
14	Halbleiter	445
14.1	Reine Elementhalbleiter	446
14.1.1	Elektronen und Löcher	446
14.1.2	Effektive Masse	448
14.1.3	Elektrische Leitfähigkeit von reinen Halbleitern	449
14.1.4	Die Bandstruktur von Halbleitern	450
14.2	Dotierte Halbleiter	451
14.2.1	Donatoren und n-Halbleiter	451
14.2.2	Akzeptoren und p-Halbleiter	453
14.2.3	Halbleitertypen	453
14.2.4	Störstellen-Leitung	454
14.2.5	Der p-n-Übergang	454
14.3	Anwendungen von Halbleitern	457
14.3.1	Gleichrichter-Dioden	457
14.3.2	Heißleiter und Halbleiter-Thermometer	457
14.3.3	Photodioden und Solarzellen	457
14.3.4	Transistoren	459
14.3.5	Feldeffekt-Transistoren	461
14.3.6	Integrierte Schaltungen	462
	Zusammenfassung	463
	Aufgaben	464
	Literatur	464

- 15 Dielektrische und optische Eigenschaften von Festkörpern 465**
 - 15.1 Dielektrische Polarisation und lokales Feld 466
 - 15.2 Festkörper mit permanenten elektrischen Dipolen 468
 - 15.3 Frequenzabhängigkeit der Polarisation und dielektrische Funktion 469
 - 15.3.1 Elektronische Polarisation in Dielektrika 470
 - 15.3.2 Optische Eigenschaften von Ionenkristallen 471
 - 15.3.3 Experimentelle Bestimmung der dielektrischen Funktion 474
 - 15.4 Optische Eigenschaften von Halbleitern 475
 - 15.4.1 Interbandübergänge 475
 - 15.4.2 Dotierte Halbleiter 476
 - 15.4.3 Exzitonen 476
 - 15.5 Störstellen und Farbzentren 477
 - Zusammenfassung 479
 - Aufgaben 480
 - Literatur 480
- 16 Amorphe Festkörper; Flüssigkeiten, Flüssigkristalle und Cluster 481**
 - 16.1 Gläser 483
 - 16.1.1 Grundlagen 483
 - 16.1.2 Die Struktur von Glas 483
 - 16.1.3 Physikalische Eigenschaften von Gläsern 484
 - 16.2 Metallische Gläser 486
 - 16.2.1 Herstellungsverfahren 486
 - 16.2.2 Struktur metallischer Gläser 487
 - 16.2.3 Eigenschaften metallischer Gläser 487
 - 16.3 Amorphe Halbleiter 488
 - 16.3.1 Struktur und Herstellung von amorphem Silizium a-Si:H 488
 - 16.3.2 Elektronische und optische Eigenschaften 489
 - 16.4 Flüssigkeiten 489
 - 16.4.1 Makroskopische Beschreibung 489
 - 16.4.2 Mikroskopische Struktur 491
 - 16.4.3 Experimentelle Untersuchungsmethoden 493
 - 16.5 Flüssige Kristalle 493
 - 16.5.1 Strukturtypen 493
 - 16.5.2 Anwendungen von Flüssigkristallen 494
 - 16.6 Cluster 496
 - 16.6.1 Klassifikation der Cluster 496
 - 16.6.2 Herstellungsverfahren 497
 - 16.6.3 Physikalische Eigenschaften 499
 - 16.6.4 Anwendungen 500
 - Zusammenfassung 501
 - Aufgaben 502
 - Literatur 502
- 17 Oberflächen 505**
 - 17.1 Die atomare Struktur von Oberflächen 506
 - 17.2 Experimentelle Untersuchungsmethoden 507
 - 17.3 Adsorption und Desorption von Atomen und Molekülen 513

17.4 Chemische Reaktionen an Oberflächen	516
17.5 Schmelzen von Festkörperoberflächen	517
Zusammenfassung	517
Aufgaben	518
Literatur	518
18 Zeittafel	521
19 Lösungen der Übungsaufgaben	525
Weiterführende Literatur	575
Sach- und Namensverzeichnis	577