

Inhaltsverzeichnis

Vorwort		V
1	Kristallstruktur	1
1.1	Periodische Strukturen – Grundbegriffe und Definitionen	3
1.1.1	Das Bravais-Gitter	3
1.1.2	Klassifizierung von Kristallgittern	7
1.1.3	Richtungen und Ebenen in Kristallen	20
1.1.4	Quasikristalle	21
1.2	Einfache Kristallstrukturen	24
1.2.1	Die sc-Struktur	25
1.2.2	Die fcc-Struktur	25
1.2.3	Die bcc-Struktur	26
1.2.4	Die hcp-Struktur	27
1.2.5	Die dhcp-Struktur	28
1.2.6	Die Natriumchloridstruktur	28
1.2.7	Die Cäsiumchloridstruktur	29
1.2.8	Die Diamantstruktur	30
1.2.9	Die Zinkblende- und Wurtzit-Struktur	31
1.2.10	Die Graphitstruktur	33
1.3	Festkörperoberflächen	35
1.4	Reale Kristalle	37
1.4.1	Strukturelle Fehlordnung	37
1.4.2	Chemische Fehlordnung	43
1.5	Nicht-kristalline Festkörper	44
1.5.1	Die radiale Verteilungsfunktion	44
1.5.2	Flüssigkristalle	46
1.6	Vertiefungsthema: Direkte Abbildung von Kristallstrukturen	49
1.6.1	Elektronenmikroskopie	49
1.6.2	Rastersondentechniken	51
Literatur	.....	52
Übungsaufgaben	.....	53

2	Strukturanalyse	57
2.1	Das reziproke Gitter	58
2.1.1	Definition des reziproken Gitters	58
2.1.2	Fourier-Analyse	59
2.1.3	Die reziproken Gittervektoren	59
2.1.4	Die erste Brillouin-Zone	63
2.1.5	Gitterebenen und Millersche Indizes	64
2.1.6	Gegenüberstellung von direktem und reziprokem Raum	66
2.2	Beugung	67
2.2.1	Die Bragg-Bedingung	68
2.2.2	Die von Laue Bedingung	69
2.2.3	Zusammenhang zwischen Bragg und von Laue Bedingung	72
2.2.4	Allgemeine Beugungstheorie	73
2.2.5	Beispiele für Strukturfaktoren	79
2.2.6	Inelastische Streuung	80
2.2.7	Der Debye-Waller Faktor	83
2.2.8	Vertiefungsthema: Der Mößbauer-Effekt	86
2.3	Experimentelle Methoden	89
2.3.1	Wellentypen	89
2.3.2	Methoden der Röntgendiffraktometrie	93
	Literatur	96
	Übungsaufgaben	96
3	Bindungskräfte	101
3.1	Grundlagen	102
3.1.1	Bindungsenergie und Schmelztemperatur	102
3.1.2	Elektronische Struktur der Atome	103
3.2	Die Van der Waals Bindung	108
3.2.1	Wechselwirkung zwischen fluktuierenden Dipolen	109
3.2.2	Abstoßende Wechselwirkung	111
3.2.3	Gleichgewichtsgitterkonstante	113
3.2.4	Kompressibilität	115
3.3	Die ionische Bindung	116
3.3.1	Madelungenergie	117
3.3.2	Gleichgewichtsgitterkonstante	121
3.3.3	Kompressibilität	121
3.4	Die kovalente Bindung	122
3.4.1	Das H_2^+ -Molekülion	123
3.4.2	Das H_2 -Molekül	127
3.4.3	Vertiefungsthema: Hybridisierung	134

3.5	Die metallische Bindung	141
3.5.1	Bindungsenergie	142
3.6	Die Wasserstoffbrückenbindung	145
3.7	Atom- und Ionenradien	146
3.7.1	Atomradien	147
3.7.2	Ionenradien	147
Literatur	.....	148
Übungsaufgaben	.....	149
4	Elastische Eigenschaften	153
4.1	Grundlagen	154
4.2	Spannung und Dehnung	154
4.2.1	Der Spannungstensor	154
4.2.2	Die Dehnungskomponenten	157
4.3	Der Elastizitätstensor	159
4.3.1	Elastische Energiedichte	160
4.3.2	Kristallsymmetrie und Elastizitätsmodul	161
4.4	Vertiefungsthema: Verspannungseffekte in epitaktischen Schichten	164
4.5	Technische Größen.....	167
4.6	Elastische Wellen.....	170
4.6.1	Elastische Wellen in kubischen Kristallen.....	171
4.6.2	Experimentelle Methoden	174
Literatur	.....	175
Übungsaufgaben	.....	176
5	Gitterdynamik	177
5.1	Grundlegendes	178
5.1.1	Die adiabatische Näherung	178
5.1.2	Die harmonische Näherung.....	182
5.2	Klassische Theorie.....	184
5.2.1	Bewegungsgleichungen	184
5.2.2	Kristallgitter mit einatomiger Basis	186
5.2.3	Kristallgitter mit zweiatomiger Basis	191
5.2.4	Gitterschwingungen – dreidimensionaler Fall	197
5.3	Zustandsdichte im Phononenspektrum.....	199
5.3.1	Randbedingungen.....	200
5.3.2	Zustandsdichte im Impulsraum	203
5.3.3	Zustandsdichte im Frequenzraum	204

5.4	Quantisierung der Gitterschwingungen	207
5.4.1	Das Quantenkonzept	207
5.4.2	Phononen	208
5.4.3	Der Impuls von Phononen	210
5.5	Experimentelle Methoden	211
5.5.1	Inelastische Neutronenstreuung	214
5.5.2	Inelastische Lichtstreuung	215
Literatur		220
Übungsaufgaben		220
6	Thermische Eigenschaften	225
6.1	Spezifische Wärme	226
6.1.1	Definition der spezifischen Wärme	226
6.1.2	Klassische Betrachtung	227
6.1.3	Quantenmechanische Betrachtung	231
6.1.4	Temperaturverlauf der spezifischen Wärme	234
6.1.5	Debye- und Einstein-Näherung	236
6.1.6	Phononenzahl und Nullpunktsenergie	242
6.1.7	Vertiefungsthema: Analogie zwischen Phononen- und Photonengas	243
6.2	Anharmonische Effekte	245
6.2.1	Anharmonisches Potenzial	246
6.3	Thermische Ausdehnung	249
6.3.1	Mittlere Auslenkung	249
6.3.2	Vertiefungsthema: Zustandsgleichung und thermische Ausdehnung	251
6.4	Wärmeleitfähigkeit	256
6.4.1	Definition der Wärmeleitfähigkeit	256
6.4.2	Transporttheorie	256
6.4.3	Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit	259
6.4.4	Spontaner Zerfall von Phononen	264
6.4.5	Vertiefungsthema: Wärmetransport in amorphen Festkörpern	265
6.4.6	Vertiefungsthema: Wärmetransport in niederdimensionalen Systemen	266
Literatur		269
Übungsaufgaben		269
7	Das freie Elektronengas	273
7.1	Modell des freien Elektronengases	275
7.1.1	Grundzustand	275
7.1.2	Fermi-Gas bei endlicher Temperatur	283
7.1.3	Das chemische Potenzial	285

7.2	Spezifische Wärme	288
7.2.1	Theorie	288
7.2.2	Experimentelle Ergebnisse	290
7.3	Transporteigenschaften	292
7.3.1	Elektrische Leitfähigkeit	293
7.3.2	Thermische Leitfähigkeit	300
7.3.3	Thermokraft	303
7.3.4	Bewegung im Magnetfeld	305
7.4	Niedrigdimensionale Elektronengassysteme	315
7.4.1	Zweidimensionales Elektronengas	315
7.4.2	Eindimensionales Elektronengas	318
7.4.3	Nulldimensionales Elektronengas	319
7.5	Transporteigenschaften von niederdimensionalen Elektronengasen	319
7.5.1	Eindimensionales Elektronengas: Leitwertquantisierung	320
7.5.2	Vertiefungsthema: Nulldimensionales Elektronengas: Coulomb-Blockade ..	322
Literatur		327
Übungsaufgaben		328
8	Energiebänder	333
8.1	Bloch-Elektronen	335
8.1.1	Bloch-Wellen im Ortsraum	338
8.1.2	Bloch-Wellen im k -Raum	339
8.1.3	Der Kristallimpuls	340
8.1.4	Dispersionsrelation und Bandstruktur	341
8.1.5	Reduziertes Zonenschema	343
8.2	Die Näherung fast freier Elektronen	345
8.2.1	Qualitative Diskussion	346
8.2.2	Quantitative Diskussion	348
8.3	Die Näherung stark gebundener Elektronen	353
8.3.1	Beispiele: kubische Gitter	357
8.3.2	Weitere Methoden zur Bandstrukturberechnung	360
8.3.3	Vertiefungsthema: Spin-Bahn-Kopplung	361
8.4	Metalle, Halbmetalle, Halbleiter, Isolatoren	362
8.4.1	Anzahl der Zustände pro Band	364
8.5	Zustandsdichte und Bandstrukturen	366
8.5.1	Zustandsdichte	366
8.5.2	Beispiele für Bandstrukturen	368
8.5.3	Experimentelle Bestimmung der Bandstruktur	370

8.6	Fermi-Flächen von Metallen	373
8.6.1	Quadratisches Gitter	374
Literatur	.....	379
Übungsaufgaben	.....	379
9	Dynamik	381
9.1	Semiklassisches Modell	383
9.1.1	Grundlagen des semiklassischen Modells	386
9.1.2	Gültigkeitsbereich des semiklassischen Modells	389
9.2	Bewegung von Kristallelektronen	390
9.2.1	Gefüllte Bänder	390
9.2.2	Teilweise gefüllte Bänder	391
9.2.3	Elektronen und Löcher	394
9.2.4	Semiklassische Bewegung im homogenen Magnetfeld	398
9.2.5	Semiklassische Bewegung in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern	402
9.2.6	Hall-Effekt und Magnetwiderstand im Hochfeldgrenzfall	403
9.3	Streuprozesse	407
9.3.1	Beschreibung von Streuprozessen	407
9.3.2	Streuquerschnitte	410
9.4	Boltzmann-Transportgleichung	417
9.4.1	Boltzmann-Gleichung und Relaxationszeit	418
9.4.2	Linearisierte Boltzmann-Gleichung	421
9.4.3	Relaxationszeit-Ansatz	421
9.5	Vertiefungsthema: Allgemeine Transportkoeffizienten	423
9.5.1	Elektrische Leitfähigkeit	428
9.5.2	Wärmeleitfähigkeit	429
9.5.3	Thermokraft	430
9.5.4	Peltier-Effekt	433
9.5.5	Thermomagnetische Effekte	434
9.5.6	Phononen-Mitführung	437
9.5.7	Quanteninterferenzeffekte	438
9.6	Vertiefungsthema: Magnetwiderstand	441
9.6.1	Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Einband-Modell	442
9.6.2	Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Zweiband-Modell	444
9.6.3	Hochfeld-Magnetwiderstand	447
9.7	Quantisierung der Bahnen	454
9.7.1	Freie Ladungsträger	454
9.7.2	Zustandsdichte im Magnetfeld	459

9.7.3	Kristallelektronen	460
9.7.4	Vertiefungsthema: Magnetischer Durchbruch	464
9.8	Experimentelle Bestimmung der Fermi-Flächen	466
9.8.1	De Haas-van Alphen-Effekt	466
9.8.2	Shubnikov-de Haas-Effekt	472
9.8.3	Vertiefungsthema: Zyklotronresonanz	473
9.8.4	Vertiefungsthema: Anomaler Skin-Effekt	475
Literatur		475
Übungsaufgaben		476
10	Halbleiter	481
10.1	Grundlegende Eigenschaften	483
10.1.1	Klassifizierung von Halbleitern	483
10.1.2	Intrinsische Halbleiter	487
10.1.3	Dotierte Halbleiter	499
10.1.4	Elektrische Leitfähigkeit	506
10.1.5	Hall-Effekt	509
10.1.6	Vertiefungsthema: Seebeck- und Peltier-Effekt	511
10.2	Inhomogene Halbleiter	512
10.2.1	p - n Übergang im thermischen Gleichgewicht	513
10.2.2	p - n Übergang mit angelegter Spannung	519
10.2.3	Schottky-Kontakt	525
10.2.4	Schottky-Kontakt mit angelegter Spannung	527
10.3	Halbleiter-Bauelemente	529
10.3.1	Zener-Diode	530
10.3.2	Esaki- oder Tunneldiode	532
10.3.3	Solarzelle	533
10.3.4	Bipolarer Transistor	540
10.4	Realisierung von niedrigdimensionalen Elektronengassystemen	543
10.4.1	Zweidimensionale Elektronengase	544
10.4.2	Vertiefungsthema: Halbleiter-Laser	551
10.5	Zweidimensionales Elektronengas: Quanten-Hall-Effekt	553
10.5.1	Zweidimensionales Elektronengas im Magnetfeld	553
10.5.2	Transporteigenschaften des zweidimensionalen Elektronengases	555
10.5.3	Ganzzahliger Quanten-Hall-Effekt	557
10.5.4	Vertiefungsthema: Fraktionaler Quanten-Hall-Effekt	566
Literatur		568
Übungsaufgaben		570

11	Dielektrische Eigenschaften	573
11.1	Makroskopische Elektrodynamik	575
11.1.1	Die dielektrische Funktion	575
11.1.2	Kramers-Kronig-Relationen	578
11.1.3	Absorption, Transmission und Reflexion von elektromagnetischer Strahlung	579
11.1.4	Das lokale elektrische Feld	581
11.2	Mikroskopische Theorie	584
11.3	Elektronische Polarisierung	586
11.3.1	Lorentzsches Oszillator-Modell	586
11.3.2	Vertiefungsthema: Quantenmechanische Beschreibung der elektronischen Polarisation	590
11.4	Ionische Polarisierung	595
11.4.1	Eigenschwingungen von Ionenkristallen	597
11.4.2	Erzwungene Schwingungen von Ionenkristallen	599
11.5	Orientierungspolarisation	606
11.5.1	Statische Polarisierung	606
11.5.2	Frequenzabhängige Polarisierung	607
11.6	Dielektrische Eigenschaften von Metallen und Halbleitern	609
11.6.1	Dielektrische Funktion eines freien Elektronengases	610
11.6.2	Longitudinale Plasmaschwingungen: Plasmonen	614
11.6.3	Erzwungene transversale Plasmaschwingungen: Plasmon-Polaritonen	616
11.6.4	Interband-Übergänge	617
11.6.5	Exzitonen	619
11.7	Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Abschirmung in Metallen	621
11.7.1	Statische Abschirmung	621
11.7.2	Vertiefungsthema: Lindhard Theorie	628
11.7.3	Vertiefungsthema: Abschirmung von Phononen in Metallen	632
11.7.4	Vertiefungsthema: Metall-Isolator-Übergang	635
11.7.5	Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Theorie der Fermi-Flüssigkeit	636
11.8	Ferroelektrizität	638
11.8.1	Landau-Theorie der Phasenübergänge	641
11.8.2	Klassifizierung von Ferroelektrika	645
11.8.3	Ferroelektrische Domänen	648
11.8.4	Piezoelektrizität	649
	Literatur	651
	Übungsaufgaben	652

12	Magnetismus	655
12.1	Makroskopische Größen	657
12.1.1	Die magnetische Suszeptibilität	657
12.1.2	Lokales magnetisches Feld	659
12.1.3	Entmagnetisierungs- und Streufelder	659
12.1.4	Magnetostatische Selbstenergie	661
12.2	Mikroskopische Theorie	662
12.2.1	Dia-, Para- und Ferromagnetismus	662
12.3	Atomarer Dia- und Paramagnetismus	665
12.3.1	Atome im homogenen Magnetfeld	665
12.3.2	Statistische Betrachtung	667
12.3.3	Larmor-Diamagnetismus	670
12.3.4	Magnetische Momente in Festkörpern	671
12.3.5	Langevin-Paramagnetismus	677
12.3.6	Vertiefungsthema: Van Vleck Paramagnetismus	682
12.3.7	Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung	683
12.4	Para- und Diamagnetismus von Metallen	685
12.4.1	Pauli-Paramagnetismus	686
12.4.2	Landau-Diamagnetismus	689
12.5	Kooperativer Magnetismus	690
12.5.1	Dipol-Dipol-Wechselwirkung	691
12.5.2	Austauschwechselwirkung zwischen lokalisierten Elektronen	691
12.5.3	Spin-Bahn-Wechselwirkung	698
12.5.4	Zeeman-Wechselwirkung	700
12.5.5	Austauschwechselwirkung zwischen itineranten Elektronen	701
12.6	Magnetische Ordnungsphänomene	708
12.6.1	Magnetische Ordnungsstrukturen	709
12.6.2	Ferromagnetismus	710
12.6.3	Ferrimagnetismus	716
12.6.4	Antiferromagnetismus	720
12.7	Magnetische Anisotropie	723
12.7.1	Magnetische freie Energiedichte	725
12.7.2	Magnetokristalline Anisotropie	727
12.7.3	Formanisotropie	728
12.7.4	Induzierte Anisotropie	728
12.8	Magnetische Domänen	729
12.8.1	Ferromagnetische Domänen	729
12.8.2	Antiferromagnetische Domänen	731
12.8.3	Domänenwände	732

12.8.4	Magnetisierungskurve	734
12.8.5	Magnetische Speichermedien	735
12.9	Spin-Wellen	737
12.9.1	Austauschmoden	738
12.9.2	Dipolare Moden	745
12.9.3	Vertiefungsthema: Antiferromagnetische Spin-Wellen	746
Literatur	.....	748
Übungsaufgaben	.....	749
13	Supraleitung	753
13.1	Geschichte und grundlegende Eigenschaften	756
13.1.1	Geschichte der Supraleitung	756
13.1.2	Supraleitende Materialien	764
13.1.3	Sprungtemperaturen	767
13.1.4	Grundlegende Eigenschaften	767
13.2	Thermodynamische Eigenschaften von Supraleitern	774
13.2.1	Typ-I Supraleiter im Magnetfeld	774
13.2.2	Typ-II Supraleiter im Magnetfeld	779
13.3	Phänomenologische Modelle	780
13.3.1	London-Gleichungen	780
13.3.2	Verallgemeinerte London Theorie – Supraleitung als makroskopisches Quantenphänomen	783
13.3.3	Die Ginzburg-Landau-Theorie	795
13.4	Typ-I und Typ-II Supraleiter	807
13.4.1	Mischzustand und kritische Felder	807
13.4.2	Supraleiter-Normalleiter Grenzflächenenergie	808
13.4.3	Vertiefungsthema: Zwischenzustand und Entmagnetisierungseffekte	810
13.4.4	Kritische Felder	812
13.4.5	Vertiefungsthema: Nukleation an Oberflächen	816
13.4.6	Vertiefungsthema: Shubnikov-Phase und Flussliniengitter	817
13.4.7	Vertiefungsthema: Flusslinien in Typ-II Supraleitern	820
13.4.8	Kritische Stromdichte	825
13.5	Mikroskopische Theorie	829
13.5.1	Attraktive Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Cooper-Paare	830
13.5.2	Der BCS-Grundzustand	839
13.5.3	Quasiteilchentunneln	853
13.5.4	Thermodynamische Größen	858
13.6	Josephson-Effekt	861
13.6.1	Die Josephson-Gleichungen	863
13.6.2	Josephson-Kontakt im Magnetfeld	867
13.6.3	Supraleitende Quanteninterferometer	871

13.7	Kritische Ströme in Typ-II Supraleitern	873
13.7.1	Stromtransport im Mischzustand	874
13.7.2	Lorentz-Kraft	876
13.7.3	Reibungskraft	878
13.7.4	Haftkraft	879
13.8	Kuprat-Supraleiter	881
13.8.1	Strukturelle Eigenschaften	882
13.8.2	Elektronische Eigenschaften	884
13.8.3	Supraleitende Eigenschaften	888
Literatur	.....	897
Übungsaufgaben	.....	903
A	Quantentheorie des Gitters	907
A.1	Der harmonische Oszillator	907
A.2	Quantisierung von Gitterschwingungen	908
A.2.1	Lineare Kette	908
A.2.2	Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren	911
B	Quantenstatistik	913
B.1	Identische Teilchen	913
B.1.1	Klassischer Fall: Maxwell-Boltzmann-Statistik	914
B.1.2	Quantenmechanischer Fall	914
B.2	Die quantenmechanischen Verteilungsfunktionen	916
B.2.1	Quantenstatistische Beschreibung	916
B.2.2	Photonen-Statistik	919
B.2.3	Die Fermi-Dirac-Statistik	920
B.2.4	Die Bose-Einstein-Statistik	922
B.2.5	Quantenstatistik im klassischen Grenzfall	923
C	Sommerfeld-Entwicklung	927
D	Geladenes Teilchen in elektromagnetischem Feld	929
D.1	Der verallgemeinerte Impuls	929
D.2	Lagrange-Funktion	929
D.3	Hamilton-Funktion	931
E	Dipolnäherung	933

F	Thermodynamik	935
F.1	Thermodynamische Potenziale	935
F.2	Innere Energie	936
F.2.1	Arbeit an Systemen in elektrischen und magnetischen Feldern	937
F.2.2	Zusammenhang zwischen innerer Energie und elektromagnetischer Arbeit	944
F.3	Freie Energie	945
F.4	Freie Enthalpie	946
F.5	Verwendung der thermodynamischen Potenziale	947
F.6	Spezifische Wärme	949
	Literatur	949
G	SI-Einheiten	951
G.1	Geschichte des SI-Systems	951
G.2	Die SI-Basiseinheiten	952
G.2.1	Einige von den SI-Einheiten abgeleitete Einheiten	953
G.3	Vorsätze	954
G.4	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	954
G.4.1	Länge, Fläche, Volumen	954
G.4.2	Masse	955
G.4.3	Zeit, Frequenz	955
G.4.4	Temperatur	955
G.4.5	Winkel	956
G.4.6	Kraft, Druck, Viskosität	956
G.4.7	Energie, Leistung, Wärmemenge	956
G.4.8	Elektromagnetische Einheiten	957
H	Physikalische Konstanten	959
	Literatur	963
	Abbildungsnachweis	967
	Index	969