

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	22
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	53

2	Strukturanalyse	55
2.1	Das reziproke Gitter	56
2.1.1	Definition des reziproken Gitters	56
2.1.2	Fourier-Analyse	57
2.1.3	Die reziproken Gittervektoren	57
2.1.4	Die erste Brillouin-Zone	61
2.1.5	Gitterebenen und Millersche Indizes	62
2.1.6	Gegenüberstellung von direktem und reziprokem Raum	64
2.2	Beugung	65
2.2.1	Die Bragg-Bedingung	66
2.2.2	Die von Laue Bedingung	67
2.2.3	Zusammenhang zwischen Bragg und von Laue Bedingung	70
2.2.4	Allgemeine Beugungstheorie	71
2.2.5	Beispiele für Strukturfaktoren	77
2.2.6	Inelastische Streuung	78
2.2.7	Der Debye-Waller Faktor	81
2.2.8	Vertiefungsthema: Der Mößbauer-Effekt	84
2.3	Experimentelle Methoden	87
2.3.1	Wellentypen	87
2.3.2	Methoden der Röntgendiffraktometrie	91
	Literatur	94
3	Bindungskräfte	95
3.1	Grundlagen	96
3.1.1	Bindungsenergie und Schmelztemperatur	96
3.1.2	Elektronische Struktur der Atome	97
3.2	Die Van der Waals Bindung	102
3.2.1	Wechselwirkung zwischen fluktuierenden Dipolen	103
3.2.2	Abstoßende Wechselwirkung	105
3.2.3	Gleichgewichtsgitterkonstante	107
3.2.4	Kompressibilität	109
3.3	Die ionische Bindung	110
3.3.1	Madelungenergie	111
3.3.2	Gleichgewichtsgitterkonstante	115
3.3.3	Kompressibilität	116
3.4	Die kovalente Bindung	117
3.4.1	Das H_2^+ -Molekülion	118
3.4.2	Das H_2 -Molekül	121
3.4.3	Vertiefungsthema: Hybridisierung	128
3.5	Die metallische Bindung	135
3.5.1	Bindungsenergie	136

3.6	Die Wasserstoffbrückenbindung	139
3.7	Atom- und Ionenradien	140
3.7.1	Atomradien	141
3.7.2	Ionenradien	141
	Literatur	142
4	Elastische Eigenschaften	143
4.1	Grundlagen	144
4.2	Spannung und Dehnung	144
4.2.1	Der Spannungstensor	144
4.2.2	Die Dehnungskomponenten	147
4.3	Der Elastizitätstensor	149
4.3.1	Elastische Energiedichte	151
4.3.2	Kristallsymmetrie und Elastizitätsmodul	152
4.4	Vertiefungsthema: Verspannungseffekte in epitaktischen Schichten	155
4.5	Technische Größen	158
4.6	Elastische Wellen	161
4.6.1	Elastische Wellen in kubischen Kristallen	162
4.6.2	Experimentelle Methoden	165
	Literatur	166
5	Gitterdynamik	169
5.1	Grundlegendes	170
5.1.1	Die adiabatische Näherung	170
5.1.2	Die harmonische Näherung	174
5.2	Klassische Theorie	176
5.2.1	Bewegungsgleichungen	176
5.2.2	Kristallgitter mit einatomiger Basis	178
5.2.3	Kristallgitter mit zweiatomiger Basis	183
5.2.4	Gitterschwingungen – dreidimensionaler Fall	189
5.3	Zustandsdichte im Phononenspektrum	191
5.3.1	Randbedingungen	192
5.3.2	Zustandsdichte im Impulsraum	195
5.3.3	Zustandsdichte im Frequenzraum	196
5.4	Quantisierung der Gitterschwingungen	199
5.4.1	Das Quantenkonzept	199
5.4.2	Phononen	200
5.4.3	Der Impuls von Phononen	202

5.5	Experimentelle Methoden	203
5.5.1	Inelastische Neutronenstreuung	206
5.5.2	Inelastische Lichtstreuung	207
	Literatur	212
6	Thermische Eigenschaften	213
6.1	Spezifische Wärme	214
6.1.1	Definition der spezifischen Wärme	214
6.1.2	Klassische Betrachtung	215
6.1.3	Quantenmechanische Betrachtung	219
6.1.4	Temperaturverlauf der spezifischen Wärme	222
6.1.5	Debye- und Einstein-Näherung	224
6.1.6	Phononenzahl und Nullpunktsenergie	230
6.1.7	Vertiefungsthema: Analogie zwischen Phononen- und Photonengas	231
6.2	Anharmonische Effekte	233
6.2.1	Anharmonisches Potenzial	234
6.3	Thermische Ausdehnung	237
6.3.1	Mittlere Auslenkung	237
6.3.2	Vertiefungsthema: Zustandsgleichung und thermische Ausdehnung	239
6.4	Wärmeleitfähigkeit	244
6.4.1	Definition der Wärmeleitfähigkeit	244
6.4.2	Transporttheorie	244
6.4.3	Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit	247
6.4.4	Spontaner Zerfall von Phononen	252
6.4.5	Vertiefungsthema: Wärmetransport in amorphen Festkörpern	253
6.4.6	Vertiefungsthema: Wärmetransport in niederdimensionalen Systemen	254
	Literatur	257
7	Das freie Elektronengas	259
7.1	Modell des freien Elektronengases	261
7.1.1	Grundzustand	261
7.1.2	Fermi-Gas bei endlicher Temperatur	269
7.1.3	Das chemische Potenzial	271
7.2	Spezifische Wärme	273
7.2.1	Theorie	273
7.2.2	Experimentelle Ergebnisse	276
7.3	Transporteigenschaften	278
7.3.1	Elektrische Leitfähigkeit	278
7.3.2	Thermische Leitfähigkeit	286
7.3.3	Thermokraft	289
7.3.4	Bewegung im Magnetfeld	291

7.4	Niedrigdimensionale Elektronengassysteme	301
7.4.1	Zweidimensionales Elektronengas	301
7.4.2	Eindimensionales Elektronengas	304
7.4.3	Nulldimensionales Elektronengas	305
7.5	Transporteigenschaften von niederdimensionalen Elektronengasen	305
7.5.1	Eindimensionales Elektronengas: Leitwertquantisierung	305
7.5.2	Vertiefungsthema: Nulldimensionales Elektronengas: Coulomb-Blockade .	308
Literatur		312
8	Energiebänder	315
8.1	Bloch-Elektronen	317
8.1.1	Bloch-Wellen im Ortsraum	320
8.1.2	Bloch-Wellen im \mathbf{k} -Raum	321
8.1.3	Der Kristallimpuls	322
8.1.4	Dispersionsrelation und Bandstruktur	323
8.1.5	Reduziertes Zonenschema	325
8.2	Die Näherung fast freier Elektronen	327
8.2.1	Qualitative Diskussion	328
8.2.2	Quantitative Diskussion	330
8.3	Die Näherung stark gebundener Elektronen	335
8.3.1	Beispiele: kubische Gitter	339
8.3.2	Weitere Methoden zur Bandstrukturberechnung	342
8.3.3	Vertiefungsthema: Spin-Bahn-Kopplung	344
8.4	Metalle, Halbmetalle, Halbleiter, Isolatoren	346
8.4.1	Anzahl der Zustände pro Band	347
8.4.2	Halbmetalle	349
8.4.3	Isolatoren	349
8.5	Zustandsdichte und Bandstrukturen	351
8.5.1	Zustandsdichte	351
8.5.2	Beispiele für Bandstrukturen	353
8.5.3	Experimentelle Bestimmung der Bandstruktur	355
8.6	Fermi-Flächen von Metallen	359
8.6.1	Quadratisches Gitter	359
Literatur		364
9	Dynamik	367
9.1	Semiklassisches Modell	369
9.1.1	Grundlagen des semiklassischen Modells	372
9.1.2	Gültigkeitsbereich des semiklassischen Modells	375

9.2	Bewegung von Kristallelektronen	376
9.2.1	Gefüllte Bänder	376
9.2.2	Teilweise gefüllte Bänder	377
9.2.3	Elektronen und Löcher	380
9.2.4	Semiklassische Bewegung im homogenen Magnetfeld	384
9.2.5	Semiklassische Bewegung in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern	388
9.2.6	Hall-Effekt und Magnetwiderstand im Hochfeldgrenzfall	389
9.3	Streuprozesse	393
9.3.1	Beschreibung von Streuprozessen	393
9.3.2	Streuquerschnitte	396
9.4	Boltzmann-Transportgleichung	403
9.4.1	Boltzmann-Gleichung und Relaxationszeit	404
9.4.2	Linearisierte Boltzmann-Gleichung	407
9.4.3	Relaxationszeit-Ansatz	409
9.5	Vertiefungsthema: Allgemeine Transportkoeffizienten	411
9.5.1	Elektrische Leitfähigkeit	414
9.5.2	Wärmeleitfähigkeit	416
9.5.3	Thermokraft	417
9.5.4	Peltier-Effekt	419
9.5.5	Thermomagnetische Effekte	421
9.5.6	Allgemeines Klassifizierungsschema	423
9.5.7	Anomaler Hall- und Nernst-Effekt	425
9.5.8	Spin-Hall- und Spin-Nernst-Effekt	428
9.5.9	Phononen-Mitführung	429
9.5.10	Quanteninterferenzeffekte	430
9.6	Vertiefungsthema: Magnetwiderstand	434
9.6.1	Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Einband-Modell	434
9.6.2	Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Zweiband-Modell	436
9.6.3	Hochfeld-Magnetwiderstand	440
9.7	Quantisierung der Bahnen	446
9.7.1	Freie Ladungsträger	447
9.7.2	Zustandsdichte im Magnetfeld	452
9.7.3	Kristallelektronen	452
9.7.4	Vertiefungsthema: Magnetischer Durchbruch	456
9.8	Experimentelle Bestimmung der Fermi-Flächen	458
9.8.1	De Haas-van Alphen-Effekt	459
9.8.2	Shubnikov-de Haas-Effekt	464
9.8.3	Vertiefungsthema: Zyklotronresonanz	465
9.8.4	Vertiefungsthema: Anomaler Skin-Effekt	467
	Literatur	467

10	Halbleiter	469
10.1	Grundlegende Eigenschaften.....	471
10.1.1	Klassifizierung von Halbleitern	471
10.1.2	Intrinsische Halbleiter	475
10.1.3	Dotierte Halbleiter	487
10.1.4	Elektrische Leitfähigkeit	494
10.1.5	Hall-Effekt.....	497
10.1.6	Vertiefungsthema: Seebeck- und Peltier-Effekt	499
10.2	Inhomogene Halbleiter.....	500
10.2.1	p - n Übergang im thermischen Gleichgewicht	501
10.2.2	p - n Übergang mit angelegter Spannung	507
10.2.3	Schottky-Kontakt	513
10.2.4	Schottky-Kontakt mit angelegter Spannung	515
10.3	Halbleiter-Bauelemente	517
10.3.1	Zener-Diode	518
10.3.2	Esaki- oder Tunnel diode	520
10.3.3	Solarzelle	521
10.3.4	Bipolarer Transistor	528
10.4	Realisierung von niedrigdimensionalen Elektronengassystemen.....	531
10.4.1	Zweidimensionale Elektronengase	532
10.4.2	Vertiefungsthema: Halbleiter-Laser	539
10.5	Zweidimensionales Elektronengas: Quanten-Hall-Effekt	541
10.5.1	Zweidimensionales Elektronengas im Magnetfeld	541
10.5.2	Transporteigenschaften des zweidimensionalen Elektronengases	544
10.5.3	Ganzzahliger Quanten-Hall-Effekt.....	546
10.5.4	Vertiefungsthema: Fraktionaler Quanten-Hall-Effekt	554
10.6	Topologische Quantenmaterialien	556
10.6.1	Topologie und Bandstruktur	558
10.6.2	Berry-Phase und Chern-Zahl	560
10.6.3	Klassifizierung von Topologischen Isolatoren	566
10.6.4	Zweidimensionale Topologische Isolatoren	567
10.6.5	Dreidimensionale Topologische Isolatoren	571
10.6.6	Topologische Supraleiter	571
10.6.7	Zukunftsperspektiven	572
Literatur		572
11	Dielektrische Eigenschaften	575
11.1	Makroskopische Elektrodynamik	577
11.1.1	Die dielektrische Funktion	577
11.1.2	Kramers-Kronig-Relationen	580
11.1.3	Absorption, Transmission und Reflexion von elektromagn. Strahlung	581

11.1.4	Das lokale elektrische Feld	583
11.2	Mikroskopische Theorie	586
11.3	Elektronische Polarisierung	588
11.3.1	Lorentzsches Oszillator-Modell	588
11.3.2	Vertiefungsthema: Quantenmechanische Beschreibung der elektronischen Polarisierung	592
11.4	Ionische Polarisierung	597
11.4.1	Eigenschwingungen von Ionenkristallen	599
11.4.2	Erzwungene Schwingungen von Ionenkristallen	601
11.5	Orientierungspolarisierung	608
11.5.1	Statische Polarisierung	608
11.5.2	Frequenzabhängige Polarisierung	609
11.6	Dielektrische Eigenschaften von Metallen und Halbleitern	611
11.6.1	Dielektrische Funktion eines freien Elektronengases	612
11.6.2	Longitudinale Plasmaschwingungen: Plasmonen	616
11.6.3	Erzwungene transversale Plasmaschwingungen: Plasmon-Polaritonen	618
11.6.4	Interband-Übergänge	619
11.6.5	Exzitonen	621
11.7	Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Abschirmung in Metallen	623
11.7.1	Statische Abschirmung	624
11.7.2	Vertiefungsthema: Lindhard Theorie	630
11.7.3	Vertiefungsthema: Abschirmung von Phononen in Metallen	634
11.7.4	Polaronen	637
11.7.5	Vertiefungsthema: Metall-Isolator-Übergang	640
11.7.6	Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Theorie der Fermi-Flüssigkeit	642
11.8	Ferroelektrizität	643
11.8.1	Landau-Theorie der Phasenübergänge	647
11.8.2	Klassifizierung von Ferroelektrika	650
11.8.3	Ferroelektrische Domänen	653
11.8.4	Piezoelektrizität	654
	Literatur	656
12	Magnetismus	659
12.1	Makroskopische Größen	661
12.1.1	Die magnetische Suszeptibilität	661
12.1.2	Lokales magnetisches Feld	663
12.1.3	Entmagnetisierungs- und Streufelder	663
12.1.4	Magnetostatische Selbstenergie	665
12.2	Mikroskopische Theorie	666
12.2.1	Dia-, Para- und Ferromagnetismus	666

12.3	Atomarer Dia- und Paramagnetismus	669
12.3.1	Atome im homogenen Magnetfeld	669
12.3.2	Statistische Betrachtung	671
12.3.3	Larmor-Diamagnetismus	674
12.3.4	Magnetische Momente in Festkörpern	675
12.3.5	Langevin-Paramagnetismus	681
12.3.6	Vertiefungsthema: Van Vleck Paramagnetismus	686
12.3.7	Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung	687
12.4	Para- und Diamagnetismus von Metallen	689
12.4.1	Pauli-Paramagnetismus	690
12.4.2	Landau-Diamagnetismus	693
12.5	Kooperativer Magnetismus	694
12.5.1	Dipol-Dipol-Wechselwirkung	695
12.5.2	Austauschwechselwirkung zwischen lokalisierten Elektronen	695
12.5.3	Dzyaloshinskii-Moriya Wechselwirkung	702
12.5.4	Spin-Bahn-Wechselwirkung	704
12.5.5	Zeeman-Wechselwirkung	708
12.5.6	Austauschwechselwirkung zwischen itineranten Elektronen	708
12.6	Magnetische Ordnungsphänomene	716
12.6.1	Magnetische Ordnungsstrukturen	716
12.6.2	Ferromagnetismus	717
12.6.3	Ferrimagnetismus	723
12.6.4	Antiferromagnetismus	727
12.7	Magnetische Anisotropie	731
12.7.1	Magnetische freie Energiedichte	733
12.7.2	Magnetokristalline Anisotropie	733
12.7.3	Formanisotropie	736
12.7.4	Induzierte Anisotropie	737
12.8	Magnetische Domänen	739
12.8.1	Ferromagnetische Domänen	739
12.8.2	Antiferromagnetische Domänen	741
12.8.3	Domänenwände	741
12.8.4	Abbildung der Domänenstruktur	744
12.8.5	Magnetisierungskurve	744
12.8.6	Magnetische Speichermedien	746
12.9	Magnetisierungsdynamik	747
12.9.1	Ferromagnetische Resonanz	750
12.10	Spin-Wellen	751
12.10.1	Austauschmoden	752
12.10.2	Dipolare Moden	760
12.10.3	Vertiefungsthema: Antiferromagnetische Spin-Wellen	760
Literatur	762

13	Supraleitung	765
13.1	Geschichte und grundlegende Eigenschaften	768
13.1.1	Geschichte der Supraleitung	768
13.1.2	Supraleitende Materialien	776
13.1.3	Sprungtemperaturen	779
13.1.4	Grundlegende Eigenschaften	779
13.2	Thermodynamische Eigenschaften von Supraleitern	787
13.2.1	Typ-I Supraleiter im Magnetfeld	788
13.2.2	Typ-II Supraleiter im Magnetfeld	792
13.3	Phänomenologische Modelle	793
13.3.1	London-Gleichungen	794
13.3.2	Verallgemeinerte London Theorie – Supraleitung als makroskopisches Quantenphänomen	797
13.3.3	Die Ginzburg-Landau-Theorie	809
13.4	Typ-I und Typ-II Supraleiter	821
13.4.1	Mischzustand und kritische Felder	821
13.4.2	Supraleiter-Normalleiter Grenzflächenenergie	822
13.4.3	Vertiefungsthema: Zwischenzustand und Entmagnetisierungseffekte	824
13.4.4	Kritische Felder	826
13.4.5	Vertiefungsthema: Nukleation an Oberflächen	830
13.4.6	Vertiefungsthema: Shubnikov-Phase und Flussliniengitter	830
13.4.7	Vertiefungsthema: Flusslinien in Typ-II Supraleitern	833
13.4.8	Kritische Stromdichte	839
13.5	Mikroskopische Theorie	842
13.5.1	Attraktive Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Cooper-Paare	844
13.5.2	Der BCS-Grundzustand	853
13.5.3	Energielücke und Anregungsspektrum	868
13.5.4	Quasiteilchentunneln	869
13.5.5	Thermodynamische Größen	874
13.6	Josephson-Effekt	877
13.6.1	Die Josephson-Gleichungen	879
13.6.2	Josephson-Kontakt mit Wechselspannung	883
13.6.3	Josephson-Kontakt im Magnetfeld	884
13.6.4	Supraleitende Quanteninterferometer	888
13.7	Kritische Ströme in Typ-II Supraleitern	890
13.7.1	Stromtransport im Mischzustand	890
13.7.2	Lorentz-Kraft	892
13.7.3	Reibungskraft	894
13.7.4	Haftkraft	896
13.8	Unkonventionelle Supraleitung	897

13.9	Kuprat-Supraleiter	899
13.9.1	Strukturelle Eigenschaften	900
13.9.2	Elektronische Eigenschaften	902
13.9.3	Supraleitende Eigenschaften	906
Literatur	915
A	Quantentheorie des Gitters	923
A.1	Der harmonische Oszillator	923
A.2	Quantisierung von Gitterschwingungen	924
A.2.1	Lineare Kette	924
A.2.2	Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren	927
B	Quantenstatistik	929
B.1	Identische Teilchen	929
B.1.1	Klassischer Fall: Maxwell-Boltzmann-Statistik	930
B.1.2	Quantenmechanischer Fall	930
B.2	Die quantenmechanischen Verteilungsfunktionen	932
B.2.1	Quantenstatistische Beschreibung	932
B.2.2	Photonen-Statistik	935
B.2.3	Die Fermi-Dirac-Statistik	936
B.2.4	Die Bose-Einstein-Statistik	938
B.2.5	Quantenstatistik im klassischen Grenzfall	939
C	Sommerfeld-Entwicklung	943
D	Geladenes Teilchen in elektromagnetischem Feld	945
D.1	Der verallgemeinerte Impuls	945
D.2	Lagrange-Funktion	945
D.3	Hamilton-Funktion	947
E	Dipolnaherung	949
F	Thermodynamik	951
F.1	Thermodynamische Potenziale	951
F.2	Innere Energie	952
F.2.1	Arbeit an Systemen in elektrischen und magnetischen Feldern	953
F.2.2	Zusammenhang zwischen innerer Energie und elektromagnetischer Arbeit	960
F.3	Freie Energie	961

F.4	Freie Enthalpie	962
F.5	Verwendung der thermodynamischen Potenziale	963
F.6	Spezifische Wärme	965
Literatur	965
G	Herleitungen zur Supraleitung	967
G.1	Madelung-Transformation	967
G.2	BCS Hamilton-Operator	970
G.3	Grundzustandsenergie	971
G.4	Josephson-Gleichungen	972
H	SI-Einheiten	975
H.1	Geschichte des SI-Systems	975
H.2	Die SI-Basiseinheiten	976
H.2.1	Einige von den SI-Einheiten abgeleitete Einheiten	977
H.3	Vorsätze	978
H.4	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	978
H.4.1	Länge, Fläche, Volumen	978
H.4.2	Masse	979
H.4.3	Zeit, Frequenz	979
H.4.4	Temperatur	979
H.4.5	Winkel	980
H.4.6	Kraft, Druck, Viskosität	980
H.4.7	Energie, Leistung, Wärmemenge	980
H.4.8	Elektromagnetische Einheiten	981
I	Physikalische Konstanten	983
Literatur		987
Abbildungsnachweis		991
Index		993

Erklärung der Icons



Vertiefen

Hier können Sie Ihr Wissen vertiefen.



Nachlesen

Hier finden Sie weiterführende Literaturhinweise.



Merken

Achtung, wichtiger Hinweis!