

Inhaltsverzeichnis

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	21
1.1.4	Quasikristalle	22
1.2	Einfache Kristallstrukturen	25
1.2.1	Die sc-Struktur	26
1.2.2	Die fcc-Struktur	26
1.2.3	Die bcc-Struktur	27
1.2.4	Die hcp-Struktur	28
1.2.5	Die dhcp-Struktur	29
1.2.6	Die Natriumchloridstruktur	29
1.2.7	Die Cäsiumchloridstruktur	31
1.2.8	Die Diamantstruktur	32
1.2.9	Die Zinkblende- und Wurtzit-Struktur	33
1.2.10	Die Graphitstruktur	35
1.3	Festkörperoberflächen	38
1.4	Reale Kristalle	39
1.4.1	Strukturelle Fehlordnung	39
1.4.2	Chemische Fehlordnung	46
1.5	Nicht-kristalline Festkörper	46
1.5.1	Die radiale Verteilungsfunktion	47
1.5.2	Flüssigkristalle	49
1.6	Vertiefungsthema: Direkte Abbildung von Kristallstrukturen	52
1.6.1	Elektronenmikroskopie	52
1.6.2	Rastersondentechniken	54
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	60
2.1.4	Die erste Brillouin-Zone	63
2.1.5	Gitterebenen und Millersche Indizes	65

2.1.6	Gegenüberstellung von direktem und reziprokem Raum	67
2.2	Beugung	68
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	74
2.2.5	Beispiele für Strukturfaktoren	80
2.2.6	Inelastische Streuung	82
2.2.7	Der Debye-Waller Faktor	84
2.2.8	Vertiefungsthema: Der Mößbauer-Effekt	87
2.3	Experimentelle Methoden	90
2.3.1	Wellentypen	90
2.3.2	Methoden der Röntgendiffraktometrie	95
3	Bindungskräfte	99
3.1	Grundlagen	100
3.1.1	Bindungsenergie und Schmelztemperatur	100
3.1.2	Elektronische Struktur der Atome	101
3.2	Die Van der Waals Bindung	106
3.2.1	Wechselwirkung zwischen fluktuierenden Dipolen	107
3.2.2	Abstoßende Wechselwirkung	110
3.2.3	Gleichgewichtsgitterkonstante	111
3.2.4	Kompressibilität	114
3.3	Die ionische Bindung	115
3.3.1	Madelungenergie	117
3.3.2	Gleichgewichtsgitterkonstante	120
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	143
3.5.1	Bindungsenergie	144
3.6	Die Wasserstoffbrückenbindung	146
3.7	Atom- und Ionenradien	147
3.7.1	Atomradien	147
3.7.2	Ionenradien	149
4	Elastische Eigenschaften	151
4.1	Grundlagen	152

4.2	Spannung und Dehnung	152
4.2.1	Der Spannungstensor	152
4.2.2	Die Dehnungskomponenten	155
4.3	Der Elastizitätstensor	158
4.3.1	Elastische Energiedichte	159
4.3.2	Kristallsymmetrie und Elastizitätsmodul	160
4.4	Vertiefungsthema: Verspannungseffekte in epitaktischen Schichten	163
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
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	185
5.2.1	Bewegungsgleichungen	185
5.2.2	Kristallgitter mit einatomiger Basis	187
5.2.3	Kristallgitter mit zweiatomiger Basis	192
5.2.4	Gitterschwingungen – dreidimensionaler Fall	198
5.3	Zustandsdichte im Phononenspektrum	201
5.3.1	Randbedingungen	201
5.3.2	Zustandsdichte im Impulsraum	205
5.3.3	Zustandsdichte im Frequenzraum	206
5.4	Quantisierung der Gitterschwingungen	209
5.4.1	Das Quantenkonzept	210
5.4.2	Phononen	210
5.4.3	Der Impuls von Phononen	212
5.5	Experimentelle Methoden	214
5.5.1	Inelastische Neutronenstreuung	216
5.5.2	Inelastische Lichtstreuung	219
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	235
6.1.5	Debye- und Einstein-Näherung	237
6.1.6	Phononenzahl und Nullpunktsenergie	244

6.1.7	Vertiefungsthema: Analogie zwischen Phononen- und Photonengas	245
6.2	Anharmonische Effekte	247
6.2.1	Anharmonisches Potenzial	248
6.3	Thermische Ausdehnung	250
6.3.1	Mittlere Auslenkung	252
6.3.2	Vertiefungsthema: Zustandsgleichung und thermische Ausdehnung	253
6.4	Wärmeleitfähigkeit	259
6.4.1	Definition der Wärmeleitfähigkeit	259
6.4.2	Transporttheorie	259
6.4.3	Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit	263
6.4.4	Spontaner Zerfall von Phononen	268
6.4.5	Vertiefungsthema: Wärmetransport in amorphen Festkörpern	269
6.4.6	Vertiefungsthema: Wärmetransport in niederdimensionalen Systemen	270
7	Das freie Elektronengas	275
7.1	Modell des freien Elektronengases	277
7.1.1	Grundzustand	277
7.1.2	Fermi-Gas bei endlicher Temperatur	286
7.1.3	Das chemische Potenzial	287
7.2	Spezifische Wärme	291
7.2.1	Theorie	291
7.2.2	Experimentelle Ergebnisse	293
7.3	Transporteigenschaften	296
7.3.1	Elektrische Leitfähigkeit	296
7.3.2	Thermische Leitfähigkeit	304
7.3.3	Thermokraft	307
7.3.4	Bewegung im Magnetfeld	310
7.4	Niedrigdimensionale Elektronengassysteme	320
7.4.1	Zweidimensionales Elektronengas	320
7.4.2	Eindimensionales Elektronengas	323
7.4.3	Nulldimensionales Elektronengas	324
7.5	Transporteigenschaften von niederdimensionalen Elektronengasen	324
7.5.1	Eindimensionales Elektronengas: Leitwertquantisierung	325
7.5.2	Vertiefungsthema: Nulldimensionales Elektronengas: Coulomb-Blockade	328
8	Energiebänder	335
8.1	Bloch-Elektronen	337

8.1.1	Bloch-Wellen im Ortsraum	339
8.1.2	Bloch-Wellen im \mathbf{k} -Raum	341
8.1.3	Der Kristallimpuls	342
8.1.4	Dispersionsrelation und Bandstruktur	344
8.1.5	Reduziertes Zonenschema	346
8.2	Die Näherung fast freier Elektronen	348
8.2.1	Qualitative Diskussion	349
8.2.2	Quantitative Diskussion	351
8.3	Die Näherung stark gebundener Elektronen	356
8.3.1	Beispiele: kubische Gitter	360
8.3.2	Weitere Methoden zur Bandstrukturberechnung	364
8.3.3	Vertiefungsthema: Spin-Bahn-Kopplung	365
8.4	Metalle, Halbmetalle, Halbleiter, Isolatoren	366
8.4.1	Anzahl der Zustände pro Band	368
8.5	Zustandsdichte und Bandstrukturen	371
8.5.1	Zustandsdichte	371
8.5.2	Beispiele für Bandstrukturen	372
8.5.3	Experimentelle Bestimmung der Bandstruktur	375
8.6	Fermi-Flächen von Metallen	379
8.6.1	Quadratisches Gitter	379
9	Dynamik	385
9.1	Semiklassisches Modell	387
9.1.1	Grundlagen des semiklassischen Modells	390
9.1.2	Gültigkeitsbereich des semiklassischen Modells	393
9.2	Bewegung von Kristallelektronen	395
9.2.1	Gefüllte Bänder	395
9.2.2	Teilweise gefüllte Bänder	396
9.2.3	Elektronen und Löcher	399
9.2.4	Semiklassische Bewegung im homogenen Magnetfeld	403
9.2.5	Semiklassische Bewegung in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern	407
9.2.6	Hall-Effekt und Magnetwiderstand im Hochfeldgrenzfall	409
9.3	Streuprozesse	412
9.3.1	Beschreibung von Streuprozessen	413
9.3.2	Streuquerschnitte	416
9.4	Boltzmann-Transportgleichung	423
9.4.1	Boltzmann-Gleichung und Relaxationszeit	424
9.4.2	Linearisierte Boltzmann-Gleichung	427
9.4.3	Relaxationszeit-Ansatz:	428

9.5	Vertiefungsthema: Allgemeine Transportkoeffizienten	430
9.5.1	Elektrische Leitfähigkeit	435
9.5.2	Wärmeleitfähigkeit	437
9.5.3	Thermokraft	438
9.5.4	Peltier-Effekt	440
9.5.5	Thermomagnetische Effekte	442
9.5.6	Phononen-Mitführung	445
9.5.7	Quanteninterferenzeffekte	446
9.6	Vertiefungsthema: Magnetwiderstand	450
9.6.1	Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Einband-Modell	451
9.6.2	Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Zweiband-Modell	453
9.6.3	Hochfeld-Magnetwiderstand	457
9.7	Quantisierung der Bahnen	464
9.7.1	Freie Ladungsträger	464
9.7.2	Zustandsdichte im Magnetfeld	471
9.7.3	Kristallelektronen	471
9.7.4	Vertiefungsthema: Magnetischer Durchbruch	475
9.8	Experimentelle Bestimmung der Fermi-Flächen	477
9.8.1	De Haas–van Alphen–Effekt	478
9.8.2	Shubnikov–de Haas–Effekt	484
9.8.3	Vertiefungsthema: Zyklotronresonanz	485
9.8.4	Vertiefungsthema: Anomaler Skin-Effekt	487
10	Halbleiter	489
10.1	Grundlegende Eigenschaften	491
10.1.1	Klassifizierung von Halbleitern	491
10.1.2	Intrinsische Halbleiter	495
10.1.3	Dotierte Halbleiter	508
10.1.4	Elektrische Leitfähigkeit	516
10.1.5	Hall-Effekt	519
10.1.6	Vertiefungsthema: Seebeck- und Peltier-Effekt	521
10.2	Inhomogene Halbleiter	523
10.2.1	p - n Übergang im thermischen Gleichgewicht	524
10.2.2	p - n Übergang mit angelegter Spannung	530
10.2.3	Schottky-Kontakt	536
10.2.4	Schottky-Kontakt mit angelegter Spannung	539
10.3	Halbleiter-Bauelemente	542
10.3.1	Zener-Diode	542

10.3.2	Esaki- oder Tunnelodiode	545
10.3.3	Solarzelle	546
10.3.4	Bipolarer Transistor	553
10.4	Realisierung von niedrigdimensionalen Elektronengassystemen	557
10.4.1	Zweidimensionale Elektronengase	557
10.4.2	Vertiefungsthema: Halbleiter-Laser	565
10.5	Zweidimensionales Elektronengas: Quanten-Hall-Effekt	567
10.5.1	Zweidimensionales Elektronengas im Magnetfeld	567
10.5.2	Transporteigenschaften des zweidimensionalen Elektronengases	569
10.5.3	Ganzahliger Quanten-Hall-Effekt	572
10.5.4	Vertiefungsthema: Fraktionaler Quanten-Hall-Effekt	580
11	Dielektrische Eigenschaften	583
11.1	Makroskopische Elektrodynamik	585
11.1.1	Die dielektrische Funktion	585
11.1.2	Kramers-Kronig-Relationen	589
11.1.3	Absorption, Transmission und Reflexion von elektromagnetischer Strahlung	589
11.2	Mikroskopische Theorie	593
11.3	Elektronische Polarisierung	595
11.3.1	Lorentzsches Oszillator-Modell	595
11.3.2	Vertiefungsthema: Quantenmechanische Beschreibung der elektronischen Polarisierung	597
11.3.3	Das lokale elektrische Feld	603
11.4	Ionische Polarisierung	609
11.4.1	Eigenschwingungen von Ionenkristallen	610
11.4.2	Erzwungene Schwingungen von Ionenkristallen	613
11.5	Orientierungspolarisation	621
11.5.1	Statische Polarisierung	621
11.5.2	Frequenzabhängige Polarisierung	622
11.6	Dielektrische Eigenschaften von Metallen und Halbleitern	625
11.6.1	Dielektrische Funktion eines freien Elektronengases	625
11.6.2	Longitudinale Plasmaschwingungen: Plasmonen	630
11.6.3	Erzwungene transversale Plasmaschwingungen: Plasmon-Polaritonen ...	632
11.6.4	Interband-Übergänge	633
11.6.5	Exzitonen	635
11.7	Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Abschirmung in Metallen	639
11.7.1	Statische Abschirmung	639
11.7.2	Vertiefungsthema: Lindhard Theorie	646

11.7.3	Vertiefungsthema: Abschirmung von Phononen in Metallen	651
11.7.4	Vertiefungsthema: Metall-Isolator-Übergang	654
11.7.5	Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Theorie der Fermi-Flüssigkeit ..	655
11.8	Ferroelektrizität	658
11.8.1	Landau-Theorie der Phasenübergänge	661
11.8.2	Klassifizierung von Ferroelektrika	664
11.8.3	Ferroelektrische Domänen	668
11.8.4	Piezoelektrizität	669
12	Magnetismus	673
12.1	Makroskopische Größen	676
12.1.1	Die magnetische Suszeptibilität	676
12.1.2	Lokales magnetisches Feld	678
12.1.3	Entmagnetisierungs- und Streufelder	678
12.1.4	Magnetostatische Selbstenergie	680
12.2	Mikroskopische Theorie	681
12.2.1	Dia-, Para- und Ferromagnetismus	681
12.3	Atomarer Dia- und Paramagnetismus	684
12.3.1	Atome im homogenen Magnetfeld	684
12.3.2	Statistische Betrachtung	686
12.3.3	Larmor-Diamagnetismus	689
12.3.4	Magnetische Momente in Festkörpern	691
12.3.5	Langevin-Paramagnetismus	697
12.3.6	Vertiefungsthema: Van Vleck Paramagnetismus	702
12.3.7	Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung	703
12.4	Para- und Diamagnetismus von Metallen	706
12.4.1	Pauli-Paramagnetismus	707
12.4.2	Landau-Diamagnetismus	710
12.5	Kooperativer Magnetismus	711
12.5.1	Dipol-Dipol-Wechselwirkung	712
12.5.2	Austauschwechselwirkung zwischen lokalisierten Elektronen	712
12.5.3	Spin-Bahn-Wechselwirkung	719
12.5.4	Zeeman-Wechselwirkung	721
12.5.5	Austauschwechselwirkung zwischen itineranten Elektronen	722
12.6	Magnetische Ordnungsphänomene	730
12.6.1	Magnetische Ordnungsstrukturen	730
12.6.2	Ferromagnetismus	731
12.6.3	Ferrimagnetismus	738
12.6.4	Antiferromagnetismus	742
12.7	Magnetische Anisotropie	747

12.7.1	Magnetische freie Energiedichte	748
12.7.2	Magnetokristalline Anisotropie	750
12.7.3	Formanisotropie	751
12.7.4	Induzierte Anisotropie	752
12.8	Magnetische Domänen	752
12.8.1	Ferromagnetische Domänen	753
12.8.2	Antiferromagnetische Domänen	756
12.8.3	Domänenwände	756
12.8.4	Magnetisierungskurve	759
12.8.5	Magnetische Speichermedien	760
12.9	Spin-Wellen	761
12.9.1	Austauschmoden	763
12.9.2	Dipolare Moden	771
12.9.3	Vertiefungsthema: Antiferromagnetische Spin-Wellen	771
13	Supraleitung	775
13.1	Geschichte und grundlegende Eigenschaften	778
13.1.1	Geschichte der Supraleitung	778
13.1.2	Supraleitende Materialien	786
13.1.3	Sprungtemperaturen	789
13.1.4	Grundlegende Eigenschaften	789
13.2	Thermodynamische Eigenschaften von Supraleitern	796
13.2.1	Typ-I Supraleiter im Magnetfeld	797
13.2.2	Typ-II Supraleiter im Magnetfeld	801
13.3	Phänomenologische Modelle	802
13.3.1	London-Gleichungen	803
13.3.2	Verallgemeinerte London Theorie — Supraleitung als makroskopisches Quantenphänomen	806
13.3.3	Die Ginzburg-Landau-Theorie	819
13.4	Typ-I und Typ-II Supraleiter	831
13.4.1	Mischzustand und kritische Felder	832
13.4.2	Supraleiter-Normalleiter Grenzflächenenergie	832
13.4.3	Vertiefungsthema: Zwischenzustand und Entmagnetisierungseffekte	835
13.4.4	Kritische Felder	836
13.4.5	Vertiefungsthema: Nukleation an Oberflächen	841
13.4.6	Vertiefungsthema: Shubnikov-Phase und Flussliniengitter	842
13.4.7	Vertiefungsthema: Flusslinien in Typ-II Supraleitern	845
13.4.8	Kritische Stromdichte	852

13.5	Mikroskopische Theorie	855
13.5.1	Attraktive Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Cooper-Paare	856
13.5.2	Der BCS-Grundzustand	866
13.5.3	Temperaturabhängigkeit der Energielücke	876
13.5.4	Thermodynamische Größen	879
A	Kristallsymmetrie	883
B	Quantentheorie des Gitters	893
B.1	Der harmonische Oszillator	893
B.2	Quantisierung von Gitterschwingungen	894
B.2.1	Lineare Kette	894
B.2.2	Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren	898
C	Quantenstatistik	899
C.1	Identische Teilchen	899
C.1.1	Klassischer Fall: Maxwell-Boltzmann-Statistik	900
C.1.2	Quantenmechanischer Fall	900
C.2	Die quantenmechanischen Verteilungsfunktionen	902
C.2.1	Quantenstatistische Beschreibung	903
C.2.2	Photonen-Statistik	906
C.2.3	Die Fermi-Dirac-Statistik	907
C.2.4	Die Bose-Einstein-Statistik	909
C.2.5	Quantenstatistik im klassischen Grenzfall	910
D	Sommerfeld-Entwicklung	915
E	Dipol-Näherung	917
F	Thermodynamik	919
F.1	Thermodynamische Potenziale	919
F.2	Innere Energie	920
F.2.1	Arbeit an Systemen in elektrischen und magnetischen Feldern	921
F.2.2	Zusammenhang zwischen innerer Energie und elektromagnetischer Arbeit	929
F.3	Freie Energie	929
F.4	Freie Enthalpie	930
F.5	Verwendung der thermodynamischen Potenziale	932
F.6	Spezifische Wärme	934
G	Literatur	935

H	SI-Einheiten	939
H.1	Geschichte des SI Systems	939
H.2	Die SI Basiseinheiten	941
H.2.1	Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten	941
H.3	Vorsätze	942
H.4	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	942
H.4.1	Länge, Fläche, Volumen	943
H.4.2	Masse	943
H.4.3	Zeit, Frequenz	943
H.4.4	Temperatur	944
H.4.5	Winkel	944
H.4.6	Kraft, Druck, Viskosität	944
H.4.7	Energie, Leistung, Wärmemenge	944
H.4.8	Elektromagnetische Einheiten	945
I	Physikalische Konstanten	947
Index		951