

Inhaltsverzeichnis

Über den Autor	XVII
Vorwort	XIX
Tabellenverzeichnis	XXI
1 Struktur der Kristalle	1
Periodische Anordnungen von Atomen	2
Gitter-Translationsvektoren	4
Basis und Kristallstruktur	4
Primitive Elementarzelle	5
Fundamentale Gitterarten	7
Zweidimensionale Gittertypen	8
Dreidimensionale Gittertypen	9
Indizierung von Kristallebenen	13
Einfache Kristallstrukturen	15
Natriumchloridstruktur	15
Cäsiumchloridstruktur	17
Hexagonal dichteste Kugelpackung (hcp)	18
Diamantstruktur	20
Zinkblendestructur	21
Direkte Abbildung der atomaren Struktur	22
Nichtideale Kristallstrukturen	22
Zufällige Stapelung und Polytypie	22
Strukturdaten von Kristallen	23
Zusammenfassung	23
Aufgaben	26
2 Beugung und reziprokes Gitter	27
Beugung von Wellen am Kristall	28
Bragg-Bedingung	28
Amplitude der gestreuten Welle	31
Fourier-Analyse	31
Reziproke Gittervektoren	34
Beugungsbedingungen	35
Laue-Gleichungen	38

Brillouin-Zonen	39
Reziprokes Gitter des einfach kubischen (sc)-Gitters	41
Reziprokes Gitter des kubisch raumzentrierten (bcc)-Gitters	42
Reziprokes Gitter des kubisch flächenzentrierten (fcc)-Gitters	43
Fourier-Analyse der Basis	45
Strukturfaktor des bcc-Gitters	47
Strukturfaktor des fcc-Gitters	48
Atomformfaktor	49
Zusammenfassung	50
Aufgaben	51
3 Bindungsverhältnisse in Kristallen	55
Edelgaskristalle	60
Van-der-Waals-Wechselwirkung	62
Repulsive Wechselwirkung	65
Gitterkonstanten im Gleichgewicht	67
Bindungsenergie	68
Ionenkristalle	69
Elektrostatische Energie oder Madelung-Energie	71
Berechnung der Madelung-Konstanten	73
Kovalente Kristalle	76
Metalle	78
Wasserstoffbrückenbindung	79
Atomradien	80
Radien in Ionenkristallen	82
Beschreibung der elastischen Dehnung	83
Dilation	85
Spannungskomponenten	86
Elastische Konstanten der Nachgiebigkeit und Steifigkeit	87
Elastische Energiedichte	87
Steifigkeitskonstanten kubischer Kristalle	88
Kompressionsmodul und Kompressibilität	90
Elastische Wellen in kubischen Kristallen	91
Wellen in [100]-Richtung	92
Wellen in [110]-Richtung	93
Zusammenfassung	95
Aufgaben	97
4 Phononen I: Gitterschwingungen	101
Schwingungen in Kristallen mit einatomiger Basis	102
Erste Brillouin-Zone	105
Gruppengeschwindigkeit	106

Langwelliger Grenzfall	107
Experimentelle Kraftkonstanten	107
Gitter mit zwei Atomen in der primitiven Basis	108
Quantisierung elastischer Wellen	113
Impuls der Phononen	114
Inelastische Streuung durch Phononen	114
Zusammenfassung	116
Aufgaben	117
5 Phononen II: Thermische Eigenschaften	121
Gitterbeitrag zur Wärmekapazität	122
Planck-Verteilung	122
Abzählen der Eigenschwingungen	124
Zustandsdichte im Eindimensionalen	124
Zustandsdichte im Dreidimensionalen	127
Zustandsdichte im Debye-Modell	128
Debyesches T^3 -Gesetz	130
Einstein-Modell für die Zustandsdichte	132
Allgemeines Ergebnis für $D(\omega)$	134
Anharmonische Wechselwirkungen in Kristallen	137
Wärmeausdehnung	137
Wärmeleitfähigkeit	139
Wärmewiderstand des Phononengases	140
Umklapp-Prozesse	143
Kristallfehler	144
Aufgaben	146
6 Fermi-Gas freier Elektronen	149
Energieniveaus im Eindimensionalen	151
Einfluss der Temperatur auf die Fermi-Dirac-Verteilung	153
Freies Elektronengas im Dreidimensionalen	154
Wärmekapazität des Elektronengases	158
Experimente zur Wärmekapazität von Metallen	163
Schwere Fermionen	165
Elektrische Leitfähigkeit und Ohmsches Gesetz	166
Experimente zum elektrischen Widerstand von Metallen	167
Umklapp-Streuung	170
Bewegung in Magnetfeldern	172
Hall-Effekt	173
Thermische Leitfähigkeit von Metallen	175
Verhältnis von thermischer zu elektrischer Leitfähigkeit	176
Aufgaben	177

7 Energiebänder	181
Modell des nahezu freien Elektrons	183
Ursprung der Energielücke	185
Größe der Energielücke	187
Bloch-Funktionen	187
Kronig-Penney-Modell	188
Wellengleichung eines Elektrons in einem periodischen Potential	191
Weiterer Beweis für das Blochsche Theorem	194
Quasiimpuls eines Elektrons	194
Lösung der Hauptgleichung	195
Kronig-Penney-Modell im reziproken Raum	196
Näherung des leeren Gitters	198
Näherungslösung nahe einer Zonengrenze	199
Anzahl der Niveaus in einem Band	202
Metalle und Isolatoren	203
Zusammenfassung	204
Aufgaben	204
8 Halbleiterkristalle	207
Bandlücke	210
Bewegungsgleichungen	212
Ableitung der Gleichung $\hbar \dot{\mathbf{k}} = \mathbf{F}$	214
Löcher	215
Effektive Masse	219
Physikalische Interpretation der effektiven Masse	220
Effektive Massen in Halbleitern	222
Silizium und Germanium	224
Ladungsträgerkonzentration bei Eigenleitung	228
Beweglichkeit bei Eigenleitung	231
Störstellenleitung	232
Thermische Ionisierung von Donatoren und Akzeptoren	237
Thermoelektrische Effekte in Halbleitern	238
Halbmetalle	239
Übergitter	240
Bloch-Oszillator	240
Zener-Tunneln	241
Zusammenfassung	241
Aufgaben	242

9 Fermi-Flächen und Metalle	245
Reduziertes Zonenschema	247
Periodisches Zonenschema	248
Konstruktion von Fermi-Flächen	250
Quasifreie Elektronen	252
Elektronenbahnen, Lochbahnen und offene Bahnen	254
Berechnung von Energiebändern	256
Methode der starken Kopplung	256
Wigner-Seitz-Methode	260
Bindungsenergie	262
Pseudopotentialmethoden	264
Experimentelle Methoden zur Untersuchung von Fermi-Flächen	267
Bahnquantisierung in einem Magnetfeld	268
De-Haas-van-Alphén-Effekt	270
Magnetischer Zusammenbruch	277
Zusammenfassung	278
Aufgaben	279
10 Supraleitung	283
Experimenteller Überblick	284
Auftreten der Supraleitung	287
Zerstörung der Supraleitung durch Magnetfelder	287
Meißner-Effekt	288
Wärmekapazität	291
Energilücke	293
Verhalten im Mikrowellen- und Infrarotbereich	294
Isotopeneffekt	295
Theoretischer Überblick	296
Thermodynamik des supraleitenden Phasenübergangs	296
London-Gleichung	299
Kohärenzlänge	301
BCS-Theorie der Supraleitung	304
BCS-Grundzustand	305
Flussquantisierung in einem supraleitenden Ring	306
Dauerströme	309
Supraleiter zweiter Art	310
Einteilchen-Tunneln	315
Josephson-Tunneln in Supraleitern	316
Hochtemperatur-Supraleiter	322
Zusammenfassung	322
Aufgaben	323

11 Diamagnetismus und Paramagnetismus	327
Langevin-Gleichung des Diamagnetismus	329
Quantentheorie des Diamagnetismus mononuklearer Systeme	331
Paramagnetismus	331
Quantentheorie des Paramagnetismus	332
Ionen seltener Erden	335
Hundsche Regeln	336
Ionen der Eisengruppe	338
Kristallfeldaufspaltung	338
Auslöschung des Bahndrehimpulses	339
Spektroskopischer Aufspaltungsfaktor	341
Van Vleckscher temperaturunabhängiger Paramagnetismus	342
Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung	343
Kernentmagnetisierung	346
Paramagnetische Suszeptibilität der Leitungselektronen	347
Zusammenfassung	349
Aufgaben	350
12 Ferromagnetismus und Antiferromagnetismus	355
Ferromagnetische Ordnung	356
Curie-Punkt und Austauschintegral	356
Temperaturabhängigkeit der Sättigungsmagnetisierung	359
Sättigungsmagnetisierung am absoluten Nullpunkt	362
Magnonen	364
Thermische Anregung von Magnonen	368
Magnetische Neutronenstreuung	369
Ferrimagnetische Ordnung	371
Curie-Temperatur und Suszeptibilität von Ferrimagneten	373
Antiferromagnetische Ordnung	374
Suszeptibilität unterhalb der Néel-Temperatur	378
Antiferromagnetische Magnonen	379
Ferromagnetische Domänen	381
Anisotropieenergie	383
Übergangsbereich zwischen Domänen	384
Ursprung der Domänen	386
Koerzitivfeldstärke und Hysterese	387
Eindomänenpartikel	389
Geomagnetismus und Biomagnetismus	390
Magnetkraft-Mikroskopie	391
Zusammenfassung	392
Aufgaben	393

13 Magnetische Resonanz	397
Kernspinresonanz	399
Bewegungsgleichungen	400
Linienbreite	406
Linienverschmälerung durch Bewegung	407
Hyperfeinaufspaltung	409
Beispiele: Paramagnetische Punktdefekte	412
Knight-Shift	414
Kernquadrupolresonanz	415
Ferromagnetische Resonanz	416
Einfluss der Probengestalt	416
Spinwellen-Resonanz	418
Antiferromagnetische Resonanz	420
Paramagnetische Elektronenresonanz	422
Austauschverschmälerung	422
Nullfeldaufspaltung	422
Die Wirkungsweise des Masers	423
Drei-Niveau-Maser	424
Laser	425
Zusammenfassung	427
Aufgaben	427
14 Plasmonen, Polaritonen und Polaronen	431
Dielektrische Funktion des Elektronengases	432
Plasmaoptik	433
Dispersionsrelation für elektromagnetische Wellen	435
Transversale optische Schwingungen in einem Plasma	435
Longitudinale Plasmaschwingungen	437
Plasmonen	439
Elektrostatische Abschirmung	441
Mottscher Metall-Isolator-Übergang	446
Abschirmung und Phononen in Metallen	448
Polaritonen	449
LST-Beziehung	453
Elektron-Elektron-Wechselwirkung	456
Fermi-Flüssigkeit	456
Elektron-Phonon-Wechselwirkung: Polaronen	459
Peierls-Instabilität linearer Metalle	461
Zusammenfassung	463
Aufgaben	464

15 Optische Prozesse und Exzitonen	467
Optische Reflexion	469
Kramers-Kronig-Relationen	470
Elektronische Interband-Übergänge	474
Exzitonen	475
Frenkel-Exzitonen	477
Schwach gebundene (Mott-Wannier) Exzitonen	481
Exzitonen-Kondensation zu Elektron-Loch-Tröpfchen (EHD)	482
Raman-Effekt in Kristallen	484
Elektronenspektroskopie mit Röntgenstrahlen	488
Energieverlust schneller Teilchen in einem Festkörper	489
Zusammenfassung	491
Aufgaben	491
16 Dielektrische und ferroelektrische Festkörper	495
Maxwell-Gleichungen	496
Polarisation	496
Makroskopisches elektrisches Feld	497
Depolarisationsfeld, E_1	499
Lokales elektrisches Feld am Ort eines Atoms	501
Lorentz-Feld, E_2	503
Feld der Dipole innerhalb eines Hohlraums, E_3	504
Dielektrizitätskonstante und Polarisierbarkeit	505
Elektronische Polarisierbarkeit	506
Strukturelle Phasenübergänge	509
Ferroelektrische Kristalle	510
Klassifizierung ferroelektrischer Kristalle	511
Verschiebungsübergänge	513
Weiche optische Phononen	516
Landau-Theorie des Phasenübergangs	517
Phasenübergang zweiter Ordnung	518
Phasenübergang erster Ordnung	519
Antiferroelektrizität	521
Ferroelektrische Domänen	522
Piezoelektrizität	524
Zusammenfassung	525
Aufgaben	526
17 Oberflächen- und Grenzflächenphysik	531
Rekonstruktion und Relaxation	532
Kristallographie der Oberfläche	533
Elektronische Struktur der Oberfläche	537

Austrittsarbeit	537
Thermische Elektronenemission	538
Oberflächenzustände	539
Tangentialer Oberflächentransport	540
Magnetischer Widerstand in einem zweidimensionalen Kanal	541
Integraler Quanten-Hall-Effekt (IQHE)	543
IQHE in realen Systemen	545
<i>p-n</i> -Übergänge	548
Gleichrichtung	549
Solarzellen und Photodetektoren	551
Schottky-Barrieren	551
Heterostrukturen	552
<i>p-N</i> -Heteroübergänge	553
Halbleiterlaser	555
Leuchtdioden	557
Aufgaben	558
18 Nanostrukturen	561
Abbildungstechniken für Nanostrukturen	565
Elektronenmikroskopie	566
Optische Mikroskopie	567
Rastertunnel-Mikroskop	569
Rasterkraft-Mikroskop	572
Elektronische Struktur von 1D-Systemen	574
Eindimensionale (1D) Subbänder	574
Spektroskopie von van-Hove-Singularitäten	576
1D Metalle – Coulomb Wechselwirkungen und Gitterkopplungen	576
Elektrischer Transport in 1D	580
Leitfähigkeitsquantisierung und Landauer-Formel	580
Zwei Barrieren in Serie – Resonantes Tunneln	583
Inkohärente Addition und Ohmsches Gesetz	586
Lokalisierung	587
Spannungssonden und der Büttiker-Landauer-Formalismus	588
Elektronische Struktur von 0D-Systemen	593
Quantisierte Energieniveaus	593
Halbleiter-Nanokristalle	594
Metallische Quantenpunkte	596
Diskrete Ladungszustände	598
Elektrischer Transport in 0D	601
Coulomb-Oszillationen	601
Spin, Mott-Isolator und Kondo-Effekt	604

Cooper-Paare in supraleitenden Quantenpunkten	606
Schwingungseigenschaften und thermische Eigenschaften	607
Quantisierte Schwingungszustände	607
Transversale Schwingungen	609
Wärmekapazität und Wärmetransport	611
Zusammenfassung	613
Aufgaben	613
19 Nichtkristalline Festkörper	617
Beugungsdiagramme	618
Einatomige amorphe Substanzen	619
Radiale Verteilungsfunktion	620
Struktur von Quarzglas (α -SiO ₂)	621
Gläser	624
Viskosität und Sprung-(Hopping-)Rate	625
Amorphe Ferromagnetika	627
Amorphe Halbleiter	628
Niederenergetische Anregungen in amorphen Festkörpern	630
Berechnung der Wärmekapazität	630
Wärmeleitfähigkeit	632
Glasfaseroptik	633
Rayleigh-Streuung	634
Aufgabe	635
20 Punktdefekte	637
Leerstellen im Gitter	638
Diffusion	642
Metalle	645
Farbzentren	646
F-Zentren	646
Weitere Farbzentren	647
Aufgaben	650
21 Versetzungen	651
Schubfestigkeit von Einkristallen	652
Gleiten	654
Versetzungen	655
Burgers-Vektoren	658
Spannungsfelder von Versetzungen	659
Kleinwinkelkorngrenzen	661
Versetzungsdichten	664
Versetzungsvervielfachung und Gleiten	665

Festigkeit von Legierungen	667
Versetzungen und Kristallwachstum	669
Whisker	670
Härte von Stoffen	672
Aufgaben	673
22 Legierungen	675
Allgemeine Betrachtungen	676
Substitutions-Mischkristalle, Hume-Rothery-Regeln	679
Ordnung-Unordnungs-Übergang	682
Elementare Theorie der Ordnung	684
Phasendiagramme	687
Legierungen der Übergangsmetalle	689
Kondo-Effekt	692
Aufgaben	694
Anhang	695
A: Temperaturabhängigkeit der Bragg-Reflexe	696
B: Die Ewaldsche Berechnung der Gittersummen	699
C: Quantisierung elastischer Wellen: Phononen	704
D: Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion	709
E: Ableitung der $d\mathbf{k}/dt$ -Gleichung	712
F: Boltzmannsche Transportgleichung	714
G: Vektorpotential, Feldimpuls und Eichtransformationen	719
H: Cooper-Paare	725
I: Ginzburg-Landau-Gleichung	727
J: Elektron-Phonon-Stöße	732
Index	736