

---

# Einführung in die Festkörperphysik

---

von  
Charles Kittel

---

14., überarbeitete und erweiterte Auflage

---

 Oldenbourg Verlag München Wien

---

# Inhaltsverzeichnis

Über den Autor . . . . .	XVII
Vorwort . . . . .	XIX
Tabellenverzeichnis . . . . .	XXI
<b>1 Struktur der Kristalle</b>	<b>1</b>
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
Zinkblendestruktur . . . . .	21
Direkte Abbildung der atomaren Struktur . . . . .	22
Nichtideale Kristallstrukturen . . . . .	22
Zufällige Stapelung und Polytypie . . . . .	22
Strukturdaten von Kristallen . . . . .	23
Zusammenfassung . . . . .	23
Aufgaben . . . . .	26
<b>2 Beugung und reziprokes Gitter</b>	<b>27</b>
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
<b>3 Bindungsverhältnisse in Kristallen</b>	<b>55</b>
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
<b>4 Phononen I: Gitterschwingungen</b>	<b>101</b>
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
<b>5 Phononen II: Thermische Eigenschaften</b>	<b>121</b>
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
<b>6 Fermi-Gas freier Elektronen</b>	<b>149</b>
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

<b>7 Energiebänder</b>	<b>181</b>
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
<b>8 Halbleiterkristalle</b>	<b>207</b>
Bandlücke . . . . .	210
Bewegungsgleichungen . . . . .	212
Ableitung der Gleichung $\hbar \mathbf{k} = \mathbf{F}$ . . . . .	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

<b>9 Fermi-Flächen und Metalle</b>	<b>245</b>
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
 <b>10 Supraleitung</b>	 <b>283</b>
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

<b>11 Diamagnetismus und Paramagnetismus</b>	<b>327</b>
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
<b>12 Ferromagnetismus und Antiferromagnetismus</b>	<b>355</b>
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

<b>13 Magnetische Resonanz</b>	<b>397</b>
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
 <b>14 Plasmonen, Polaritonen und Polaronen</b>	 <b>431</b>
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



<b>15 Optische Prozesse und Exzitonen</b>	<b>467</b>
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
 <b>16 Dielektrische und ferroelektrische Festkörper</b>	 <b>495</b>
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
 <b>17 Oberflächen- und Grenzflächenphysik</b>	 <b>531</b>
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
<b>18 Nanostrukturen</b> . . . . .	<b>561</b>
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
<b>19 Nichtkristalline Festkörper</b>	<b>617</b>
Beugungsdiagramme . . . . .	618
Einatomige amorphe Substanzen . . . . .	619
Radiale Verteilungsfunktion . . . . .	620
Struktur von Quarzglas ( $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> ) . . . . .	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
<b>20 Punktdefekte</b>	<b>637</b>
Leerstellen im Gitter . . . . .	638
Diffusion . . . . .	642
Metalle . . . . .	645
Farbzentren . . . . .	646
F-Zentren . . . . .	646
Weitere Farbzentren . . . . .	647
Aufgaben . . . . .	650
<b>21 Versetzungen</b>	<b>651</b>
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
<b>22 Legierungen</b>	<b>675</b>
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
<b>Anhang</b>	<b>695</b>
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
<b>Index</b>	<b>736</b>