

Rudolf Gross, Achim Marx

# **Festkörperphysik**

---

3. Auflage

**DE GRUYTER**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>1 Kristallstruktur</b>	<b>1</b>
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

<b>2</b>	<b>Strukturanalyse</b>	<b>55</b>
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 .....	65
2.2	Beugung von Wellen an periodischen Strukturen .....	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
<b>3</b>	<b>Bindungskräfte</b>	<b>95</b>
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 .....	122
3.4.3	Vertiefungsthema: Hybridisierung .....	129
3.5	Die metallische Bindung .....	136
3.5.1	Bindungsenergie .....	137

3.6	Die Wasserstoffbrückenbindung .....	140
3.7	Atom- und Ionenradien .....	141
3.7.1	Atomradien .....	142
3.7.2	Ionenradien .....	142
Literatur	.....	143
<b>4</b>	<b>Elastische Eigenschaften</b>	<b>145</b>
4.1	Grundlagen .....	146
4.2	Spannung und Dehnung .....	146
4.2.1	Der Spannungstensor .....	146
4.2.2	Die Dehnungskomponenten .....	149
4.3	Der Elastizitätstensor .....	151
4.3.1	Elastische Energiedichte .....	153
4.3.2	Kristallsymmetrie und Elastizitätsmodul .....	154
4.4	Vertiefungsthema: Verspannungseffekte in epitaktischen Schichten .....	157
4.5	Technische Größen.....	160
4.6	Elastische Wellen .....	163
4.6.1	Elastische Wellen in kubischen Kristallen.....	164
4.6.2	Experimentelle Methoden .....	167
Literatur	.....	168
<b>5</b>	<b>Gitterdynamik</b>	<b>171</b>
5.1	Grundlegendes .....	172
5.1.1	Die adiabatische Näherung .....	172
5.1.2	Die harmonische Näherung.....	176
5.2	Klassische Theorie.....	178
5.2.1	Bewegungsgleichungen .....	178
5.2.2	Kristallgitter mit einatomiger Basis .....	180
5.2.3	Kristallgitter mit zweiatomiger Basis.....	185
5.2.4	Gitterschwingungen – dreidimensionaler Fall .....	191
5.3	Zustandsdichte im Phononenspektrum.....	193
5.3.1	Randbedingungen.....	194
5.3.2	Zustandsdichte im Impulsraum.....	196
5.3.3	Zustandsdichte im Frequenzraum .....	196
5.4	Quantisierung der Gitterschwingungen .....	200
5.4.1	Das Quantenkonzept.....	200
5.4.2	Phononen .....	200
5.4.3	Der Impuls von Phononen .....	202

5.5	Experimentelle Methoden .....	204
5.5.1	Inelastische Neutronenstreuung .....	206
5.5.2	Inelastische Lichtstreuung .....	208
	Literatur .....	212
<b>6</b>	<b>Thermische Eigenschaften</b> .....	<b>213</b>
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.....	243
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 .....	252
6.4.6	Vertiefungsthema: Wärmetransport in niederdimensionalen Systemen.....	254
	Literatur .....	257
<b>7</b>	<b>Das freie Elektronengas</b> .....	<b>259</b>
7.1	Modell des freien Elektronengases .....	261
7.1.1	Grundzustand .....	261
7.1.2	Fermi-Gas bei endlicher Temperatur .....	270
7.1.3	Das chemische Potenzial .....	272
7.2	Spezifische Wärme .....	274
7.2.1	Theorie .....	274
7.2.2	Experimentelle Ergebnisse .....	276
7.3	Transporteigenschaften .....	279
7.3.1	Elektrische Leitfähigkeit .....	279
7.3.2	Thermische Leitfähigkeit.....	287
7.3.3	Thermokraft.....	290
7.3.4	Bewegung im Magnetfeld .....	292

7.4	Niedrigdimensionale Elektronengassysteme .....	302
7.4.1	Zweidimensionales Elektronengas .....	302
7.4.2	Eindimensionales Elektronengas .....	305
7.4.3	Nulldimensionales Elektronengas .....	306
7.5	Transporteigenschaften von niederdimensionalen Elektronengasen .....	306
7.5.1	Eindimensionales Elektronengas: Leitwertquantisierung .....	306
7.5.2	Vertiefungsthema: Nulldimensionales Elektronengas: Coulomb-Blockade ..	309
Literatur	.....	313
<b>8</b>	<b>Energiebänder</b>	<b>315</b>
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 .....	328
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 .....	343
8.4	Metalle, Halbmetalle, Halbleiter, Isolatoren .....	345
8.4.1	Anzahl der Zustände pro Band .....	346
8.4.2	Halbmetalle .....	348
8.4.3	Isolatoren .....	348
8.5	Zustandsdichte und Bandstrukturen .....	350
8.5.1	Zustandsdichte .....	350
8.5.2	Beispiele für Bandstrukturen .....	352
8.5.3	Experimentelle Bestimmung der Bandstruktur .....	354
8.6	Fermi-Flächen von Metallen .....	358
8.6.1	Quadratisches Gitter .....	358
8.7	Wechselwirkende Elektronensysteme .....	363
8.7.1	Hartree-Fock-Methode .....	364
8.7.2	Dichtefunktionaltheorie .....	365
8.7.3	Hubbard-Modell .....	365
Literatur	.....	367

<b>9</b>	<b>Dynamik von Kristallelektronen</b>	<b>369</b>
9.1	Semiklassisches Modell .....	371
9.1.1	Grundlagen des semiklassischen Modells.....	374
9.1.2	Gültigkeitsbereich des semiklassischen Modells .....	377
9.2	Bewegung von Kristallelektronen .....	378
9.2.1	Gefüllte Bänder .....	378
9.2.2	Teilweise gefüllte Bänder .....	380
9.2.3	Elektronen und Löcher.....	382
9.2.4	Semiklassische Bewegung im homogenen Magnetfeld .....	386
9.2.5	Semiklassische Bewegung in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern .....	390
9.2.6	Hall-Effekt und Magnetwiderstand im Hochfeldgrenzfall .....	391
9.3	Streuprozesse.....	395
9.3.1	Beschreibung von Streuprozessen.....	395
9.3.2	Streuquerschnitte .....	398
9.4	Boltzmann-Transportgleichung.....	405
9.4.1	Boltzmann-Gleichung und Relaxationszeit .....	406
9.4.2	Linearisierte Boltzmann-Gleichung.....	409
9.4.3	Relaxationszeit-Ansatz .....	409
9.5	Thermoelektrische und thermomagnetische Effekte.....	413
9.5.1	Thermoelektrische Effekte .....	414
9.5.2	Thermomagnetische Effekte .....	425
9.6	Spin-Transport .....	428
9.6.1	Allgemeines Klassifizierungsschema.....	428
9.6.2	Spin-Ströme .....	431
9.7	Vertiefungsthema: Relativistische und topologische Effekte .....	434
9.7.1	Anomaler Hall- Effekt .....	435
9.7.2	Anomaler Nernst-Effekt .....	445
9.7.3	Spin-Hall- und Spin-Nernst-Effekt .....	446
9.8	Vertiefungsthema: Quanteninterferenzeffekte .....	448
9.8.1	Mesoskopische Systeme .....	450
9.9	Vertiefungsthema: Magnetwiderstand .....	452
9.9.1	Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Einband-Modell.....	453
9.9.2	Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Zweiband-Modell .....	455
9.10	Quantisierung der Bahnen .....	459
9.10.1	Freie Ladungsträger .....	459
9.10.2	Zustandsdichte im Magnetfeld.....	464
9.10.3	Kristallelektronen .....	465
9.10.4	Vertiefungsthema: Magnetischer Durchbruch.....	468
9.11	Experimentelle Bestimmung der Fermi-Flächen .....	470

9.11.1	De Haas-van Alphen-Effekt .....	471
9.11.2	Shubnikov-de Haas-Effekt .....	476
9.11.3	Vertiefungsthema: Zyklotronresonanz .....	477
9.11.4	Vertiefungsthema: Anomaler Skin-Effekt .....	479
Literatur	.....	480
<b>10</b>	<b>Halbleiter</b>	<b>483</b>
10.1	Grundlegende Eigenschaften .....	485
10.1.1	Klassifizierung von Halbleitern .....	485
10.1.2	Intrinsische Halbleiter .....	489
10.1.3	Dotierte Halbleiter .....	501
10.1.4	Elektrische Leitfähigkeit .....	508
10.1.5	Hall-Effekt .....	511
10.1.6	Vertiefungsthema: Seebeck- und Peltier-Effekt .....	513
10.2	Inhomogene Halbleiter .....	514
10.2.1	$p$ - $n$ Übergang im thermischen Gleichgewicht .....	515
10.2.2	$p$ - $n$ Übergang mit angelegter Spannung .....	522
10.2.3	Schottky-Kontakt .....	527
10.2.4	Schottky-Kontakt mit angelegter Spannung .....	529
10.3	Halbleiter-Bauelemente .....	532
10.3.1	Zener-Diode .....	532
10.3.2	Esaki- oder Tunneliode .....	534
10.3.3	Solarzelle .....	536
10.3.4	Bipolarer Transistor .....	542
10.4	Realisierung von niedrigdimensionalen Elektronengassystemen .....	546
10.4.1	Zweidimensionale Elektronengase .....	546
10.4.2	Vertiefungsthema: Halbleiter-Laser .....	554
10.5	Zweidimensionales Elektronengas: Quanten-Hall-Effekt .....	555
10.5.1	Zweidimensionales Elektronengas im Magnetfeld .....	556
10.5.2	Transporteigenschaften des zweidimensionalen Elektronengases .....	558
10.5.3	Ganzzahliger Quanten-Hall-Effekt .....	560
10.5.4	Vertiefungsthema: Fraktionaler Quanten-Hall-Effekt .....	569
Literatur	.....	571
<b>11</b>	<b>Dielektrische Eigenschaften</b>	<b>573</b>
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 elektromagn. Strahlung .....	579
11.1.4	Das lokale elektrische Feld .....	581
11.2	Mikroskopische Theorie .....	584



11.3	Elektronische Polarisisation .....	586
11.3.1	Lorentzches Oszillator-Modell .....	587
11.3.2	Vertiefungsthema: Quantenmechanische Beschreibung der elektronischen Polarisisation .....	590
11.4	Ionische Polarisisation .....	596
11.4.1	Eigenschwingungen von Ionenkristallen.....	597
11.4.2	Erzwungene Schwingungen von Ionenkristallen .....	600
11.5	Orientierungspolarisation.....	606
11.5.1	Statische Polarisisation .....	606
11.5.2	Frequenzabhängige Polarisisation .....	608
11.6	Dielektrische Eigenschaften von Metallen und Halbleitern.....	610
11.6.1	Dielektrische Funktion eines freien Elektronengases .....	610
11.6.2	Longitudinale Plasmaschwingungen: Plasmonen .....	614
11.6.3	Erzwungene transversale Plasmaschwingungen: Plasmon-Polaritonen .....	617
11.6.4	Interband-Übergänge .....	618
11.6.5	Exzitonen .....	620
11.7	Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Abschirmung in Metallen .....	622
11.7.1	Statische Abschirmung.....	623
11.7.2	Vertiefungsthema: Lindhard Theorie .....	629
11.7.3	Vertiefungsthema: Abschirmung von Phononen in Metallen .....	633
11.7.4	Polaronen .....	637
11.7.5	Vertiefungsthema: Metall-Isolator-Übergang.....	640
11.7.6	Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Theorie der Fermi-Flüssigkeit.....	641
11.8	Ferroelektrizität .....	643
11.8.1	Landau-Theorie der Phasenübergänge .....	646
11.8.2	Klassifizierung von Ferroelektrika .....	649
11.8.3	Ferroelektrische Domänen .....	653
11.8.4	Piezoelektrizität .....	653
Literatur	.....	656
<b>12</b>	<b>Magnetismus</b> .....	<b>659</b>
12.1	Makroskopische Größen .....	662
12.1.1	Die magnetische Suszeptibilität .....	662
12.1.2	Magnetische Feldstärke und Flussdichte .....	664
12.1.3	Entmagnetisierungs- und Streufelder .....	665
12.1.4	Lokales magnetisches Feld .....	666
12.1.5	Magnetostatische Selbstenergie .....	667
12.2	Mikroskopische Theorie .....	668
12.2.1	Dia-, Para- und Ferromagnetismus .....	668
12.3	Atomarer Dia- und Paramagnetismus .....	671
12.3.1	Atome im homogenen Magnetfeld.....	671

12.3.2	Statistische Betrachtung .....	674
12.3.3	Larmor-Diamagnetismus .....	676
12.3.4	Magnetische Momente in Festkörpern .....	678
12.3.5	Langevin-Paramagnetismus .....	684
12.3.6	Vertiefungsthema: Van Vleck Paramagnetismus .....	688
12.3.7	Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung .....	689
12.4	Para- und Diamagnetismus von Metallen .....	692
12.4.1	Pauli-Paramagnetismus .....	693
12.4.2	Landau-Diamagnetismus .....	696
12.5	Kooperativer Magnetismus .....	697
12.5.1	Dipol-Dipol-Wechselwirkung .....	698
12.5.2	Austauschwechselwirkung zwischen lokalisierten Elektronen .....	698
12.5.3	Dzyaloshinskii-Moriya Wechselwirkung .....	705
12.5.4	Spin-Bahn-Wechselwirkung .....	707
12.5.5	Zeeman-Wechselwirkung .....	710
12.5.6	Austauschwechselwirkung zwischen itineranten Elektronen .....	711
12.6	Magnetische Ordnungsphänomene .....	719
12.6.1	Magnetische Ordnungsstrukturen .....	719
12.6.2	Ferromagnetismus .....	720
12.6.3	Ferrimagnetismus .....	726
12.6.4	Antiferromagnetismus .....	730
12.7	Magnetische Anisotropie .....	734
12.7.1	Magnetische freie Energiedichte .....	736
12.7.2	Magnetokristalline Anisotropie .....	736
12.7.3	Formanisotropie .....	740
12.7.4	Induzierte Anisotropie .....	740
12.8	Magnetische Domänen .....	742
12.8.1	Ferromagnetische Domänen .....	742
12.8.2	Antiferromagnetische Domänen .....	744
12.8.3	Domänenwände .....	744
12.8.4	Abbildung der Domänenstruktur .....	747
12.8.5	Magnetisierungskurve .....	748
12.8.6	Magnetische Speichermedien .....	749
12.9	Magnetisierungsdynamik .....	751
12.9.1	Ferromagnetische Resonanz .....	753
12.10	Spin-Wellen .....	754
12.10.1	Austauschmoden .....	756
12.10.2	Dipolare Moden .....	763
12.10.3	Vertiefungsthema: Antiferromagnetische Spin-Wellen .....	764
Literatur	.....	766

<b>13</b>	<b>Supraleitung</b>	<b>769</b>
13.1	Geschichte und grundlegende Eigenschaften .....	772
13.1.1	Geschichte der Supraleitung .....	772
13.1.2	Supraleitende Materialien .....	780
13.1.3	Sprungtemperaturen .....	783
13.1.4	Grundlegende Eigenschaften.....	784
13.2	Thermodynamische Eigenschaften von Supraleitern .....	792
13.2.1	Typ-I Supraleiter im Magnetfeld .....	792
13.2.2	Typ-II Supraleiter im Magnetfeld .....	797
13.3	Phänomenologische Modelle .....	798
13.3.1	London-Gleichungen .....	798
13.3.2	Verallgemeinerte London Theorie – Supraleitung als makroskopisches Quantenphänomen .....	801
13.3.3	Die Ginzburg-Landau-Theorie .....	813
13.4	Typ-I und Typ-II Supraleiter .....	825
13.4.1	Mischzustand und kritische Felder .....	826
13.4.2	Supraleiter-Normalleiter Grenzflächenenergie.....	827
13.4.3	Vertiefungsthema: Zwischenzustand und Entmagnetisierungseffekte .....	829
13.4.4	Kritische Felder .....	830
13.4.5	Vertiefungsthema: Nukleation an Oberflächen .....	834
13.4.6	Vertiefungsthema: Shubnikov-Phase und Flussliniengitter .....	835
13.4.7	Vertiefungsthema: Flusslinien in Typ-II Supraleitern.....	838
13.4.8	Kritische Stromdichte .....	843
13.5	Mikroskopische Theorie .....	847
13.5.1	Attraktive Elektron-Elektron-Wechselwirkung und Cooper-Paare .....	849
13.5.2	Der BCS-Grundzustand .....	858
13.5.3	Energielücke und Anregungsspektrum .....	873
13.5.4	Quasiteilchentunneln .....	875
13.5.5	Thermodynamische Größen .....	879
13.6	Josephson-Effekt .....	883
13.6.1	Die Josephson-Gleichungen .....	883
13.6.2	Josephson-Kontakt mit Wechselspannung.....	888
13.6.3	Josephson-Kontakt im Magnetfeld.....	889
13.6.4	Supraleitende Quanteninterferometer .....	893
13.7	Kritische Ströme in Typ-II Supraleitern.....	895
13.7.1	Stromtransport im Mischzustand .....	896
13.7.2	Lorentz-Kraft .....	898
13.7.3	Reibungskraft .....	900
13.7.4	Haftkraft.....	901
13.8	Unkonventionelle Supraleitung .....	903

13.9	Kuprat-Supraleiter .....	905
13.9.1	Strukturelle Eigenschaften .....	906
13.9.2	Elektronische Eigenschaften .....	907
13.9.3	Supraleitende Eigenschaften .....	912
Literatur	.....	921
<b>14</b>	<b>Topologische Quantenmaterie</b>	<b>929</b>
14.1	Geschichte und Grundlegende Aspekte .....	930
14.2	Topologie und Bandstruktur .....	932
14.2.1	Klassifizierung von geometrischen Körpern .....	933
14.2.2	Elektronische Bandstruktur und topologische Invarianten .....	934
14.3	Berry-Phase und Chern-Zahl .....	935
14.3.1	Berry-Phase .....	935
14.3.2	Chern-Zahl .....	937
14.3.3	Beispiel Spin-1/2-System .....	940
14.3.4	Beispiel Aharonov-Bohm-Effekt .....	941
14.4	Topologische Phasen und Phasenübergänge .....	942
14.4.1	Kosterlitz-Thouless-Übergang .....	943
14.4.2	Klassifizierung von topologischen Phasen .....	946
14.4.3	Oberflächen und Grenzflächen .....	947
14.5	Zweidimensionale Topologische Isolatoren .....	949
14.5.1	TI mit gebrochener Zeitumkehrsymmetrie .....	949
14.5.2	TI ohne gebrochene Zeitumkehrsymmetrie .....	950
14.5.3	Quanten-Hall-Effekte .....	952
14.6	Dreidimensionale Topologische Isolatoren .....	953
14.7	Topologische Supraleiter .....	954
14.8	Zukunftsperspektiven .....	955
Literatur	.....	955
<b>A</b>	<b>Quantentheorie des Gitters</b>	<b>957</b>
A.1	Der harmonische Oszillator .....	957
A.2	Quantisierung von Gitterschwingungen .....	958
A.2.1	Lineare Kette .....	958
A.2.2	Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren .....	961
<b>B</b>	<b>Quantenstatistik</b>	<b>963</b>
B.1	Identische Teilchen .....	963
B.1.1	Klassischer Fall: Maxwell-Boltzmann-Statistik .....	964

B.1.2	Quantenmechanischer Fall .....	964
B.2	Die quantenmechanischen Verteilungsfunktionen .....	966
B.2.1	Quantenstatistische Beschreibung .....	966
B.2.2	Photonen-Statistik .....	969
B.2.3	Die Fermi-Dirac-Statistik .....	970
B.2.4	Die Bose-Einstein-Statistik .....	972
B.2.5	Quantenstatistik im klassischen Grenzfall .....	973
<b>C</b>	<b>Sommerfeld-Entwicklung</b>	<b>977</b>
<b>D</b>	<b>Geladenes Teilchen in elektromagnetischem Feld</b>	<b>979</b>
D.1	Der verallgemeinerte Impuls .....	979
D.2	Lagrange-Funktion .....	979
D.3	Hamilton-Funktion .....	981
<b>E</b>	<b>Symmetrietransformationen</b>	<b>983</b>
E.1	Symmetrien in der Physik .....	983
E.2	Zeitumkehrtransformation .....	984
E.3	Parität .....	985
E.4	Ladungskonjugation .....	987
<b>F</b>	<b>Dipolnäherung</b>	<b>989</b>
<b>G</b>	<b>Thermodynamische Eigenschaften von Festkörpern</b>	<b>991</b>
G.1	Thermodynamische Potenziale .....	991
G.2	Innere Energie .....	992
G.2.1	Arbeit an Systemen in elektrischen und magnetischen Feldern .....	993
G.2.2	Zusammenhang zwischen innerer Energie und elektromagnetischer Arbeit	1000
G.3	Freie Energie .....	1001
G.4	Freie Enthalpie .....	1002
G.5	Verwendung der thermodynamischen Potenziale .....	1004
G.6	Spezifische Wärme .....	1005
Literatur	.....	1006

<b>H</b>	<b>Herleitungen zur Supraleitung</b>	<b>1007</b>
H.1	Madelung-Transformation .....	1007
H.2	BCS Hamilton-Operator .....	1010
H.3	Grundzustandsenergie .....	1011
H.4	Josephson-Gleichungen .....	1012
<b>I</b>	<b>SI-Einheiten</b>	<b>1015</b>
I.1	Geschichte des SI-Systems .....	1015
I.2	Die SI-Basiseinheiten .....	1016
I.2.1	Einige von den SI-Einheiten abgeleitete Einheiten .....	1017
I.3	Vorsätze .....	1018
I.4	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren .....	1018
I.4.1	Länge, Fläche, Volumen .....	1018
I.4.2	Masse .....	1019
I.4.3	Zeit, Frequenz .....	1019
I.4.4	Temperatur .....	1019
I.4.5	Winkel .....	1020
I.4.6	Kraft, Druck, Viskosität .....	1020
I.4.7	Energie, Leistung, Wärmemenge .....	1020
I.4.8	Elektromagnetische Einheiten .....	1021
<b>J</b>	<b>Physikalische Konstanten</b>	<b>1023</b>
	<b>Literatur</b>	<b>1027</b>
	<b>Abbildungsnachweis</b>	<b>1031</b>
	<b>Index</b>	<b>1033</b>

### Erklärung der Icons



#### Vertiefen

Hier können Sie Ihr Wissen vertiefen.



#### Nachlesen

Hier finden Sie weiterführende Literaturhinweise.



#### Merken

Achtung, wichtiger Hinweis!