

Lux-Steiner Hohl

---

# Aufgabensammlung zur Festkörperphysik

---

Mit 122 Abbildungen, 32 Tabellen  
und 83 umfangreichen, mehrteiligen Aufgaben  
und ausführlichen Lösungswegen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona  
Budapest

M. Ch. Lux-Steiner  
H. H. Hohl  
Universität Konstanz  
Fakultät für Physik  
Postfach 5560, D-78434 Konstanz

ISBN 3-540-56813-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg NewYork

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Lux-Steiner, Martha: Aufgabensammlung zur Festkörperphysik : mit 28 Tabellen und umfangreichen, mehrteiligen Aufgaben und ausführlichem Lösungsweg / Lux-Steiner ; Hohl. - Berlin ; Heidelberg ; New York ; London ; Paris ; Tokyo ; Hong Kong ; Barcelona ; Budapest : Springer 1994

(Springer-Lehrbuch)

ISBN 3-540-56813-1

NE: Hohl, Heinrich:

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Verfielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Verfielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994  
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden könnten.

Satz: Reproduktionsreife Vorlagen von den Autoren mit Springer TEX-Makros

56/3140-5 4 3 2 1 0 - Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Kristalliner Zustand der Materie</b> .....	1
1.1 Struktur idealer Kristalle .....	1
1.1.1 Raumerfüllung von kubischen Gittern ....	1
1.1.2 Tetragonales und pseudotetragonales Gitter .....	1
1.1.3 Raumerfüllung und Härte von Diamant ..	2
1.1.4 Zwischengitterplätze in kubischen Gittern .....	2
1.1.5 Zwischengitterplätze in hexagonalen Gittern .....	2
1.1.6 Zusammenhang zwischen fcc- und ccp-Gitter .....	3
1.1.7 Kubischer Perovskit in hexagonaler Darstellung .....	4
1.2 Reziprokes Gitter .....	5
1.2.1 Brillouin zonen eines quadratischen Gitters .....	5
1.2.2 Reziprokes Gitter zum hexagonalen Bravais-Gitter .....	5
1.3 Kristallstrukturanalyse .....	7
1.3.1 Pulverdiffraktometrie an $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_7$ ....	7
1.3.2 Auslöschungsgesetze für Röntgenreflexe ..	8
1.3.3 Indizierung kubischer Substanzen .....	9
1.4 Bindungsarten im Kristall .....	10
1.4.1 Radienquotientenregel für ionische Verbindungen .....	10

1.4.2	Madelungkonstante einer eindimensionalen Ionenkette .....	10
1.4.3	Madelungkonstante eines zweidimensionalen Ionengitters .....	11
1.4.4	Bindungsenergie ionischer Verbindungen ..	12
	Lösungen zu Abschnitt 1.1 .....	14
	Lösungen zu Abschnitt 1.2 .....	26
	Lösungen zu Abschnitt 1.3 .....	30
	Lösungen zu Abschnitt 1.4 .....	37
<b>2.</b>	<b>Dynamik des Kristallgitters .....</b>	<b>45</b>
2.1	Modell der linearen Kette .....	45
2.1.1	Dispersionsrelation von Phononen bei Berücksichtigung nächster Nachbarn .....	45
2.1.2	Dispersionsrelation von Phononen bei Berücksichtigung sämtlicher Nachbarn ....	46
2.2	Zustandsdichte von Phononen .....	47
2.2.1	Zustandsdichte von Phononen in der Debeyeschen Kontinuumsnäherung .....	47
2.2.2	Debeyesche Kontinuumsnäherung für zwei- und eindimensionale Systeme .....	48
2.2.3	Zustandsdichte der Phononen einer eindimensionalen linearen Kette .....	48
	Lösungen zu Abschnitt 2.1 .....	49
	Lösungen zu Abschnitt 2.2 .....	52
<b>3.</b>	<b>Elektronen im Festkörper .....</b>	<b>59</b>
3.1	Modell des freien Elektronengases .....	59
3.1.1	Fermienergie von Elektronen in Metallen .....	59
3.1.2	Zustandsdichte eines freien Fermigases ...	60
3.1.3	Mittlere Energie von Elektronen .....	60
3.1.4	Chemisches Potential eines Fermigases ...	61
3.1.5	Druck und Kompressibilität eines Fermigases .....	61
3.1.6	Kalorische Zustandsgleichung .....	62

3.2	Weitere Anwendung des Fermigas-Modells .....	62
3.2.1	Fermigas-Kernmodell .....	62
3.2.2	Fermigase in der Astrophysik .....	63
3.3	Bändertheorie des Festkörpers .....	64
3.3.1	Reduziertes und erweitertes Zonenschema .....	64
3.3.2	Zweidimensionales System quasigebundener Elektronen .....	65
3.4	Zustandsdichtefunktionen .....	66
3.4.1	Berechnung von $D(E)$ mittels Differentiation .....	66
3.4.2	Berechnung von $D(E)$ mittels Integration .....	67
3.4.3	Formeln zur Berechnung von $D(E)$ bei zwei- und eindimensionalen Systemen ....	67
3.4.4	Zustandsdichte eines zweidimensionalen Systems quasigebundener Elektronen ....	68
3.5	Kristallelektronen im magnetischen Feld .....	69
3.5.1	De Haas-van Alphen-Effekt in Gold .....	69
3.5.2	Extremalbahnen im reziproken Raum ....	70
3.5.3	Zyklotronresonanz bei Kalium .....	71
3.5.4	Bahnquantisierung im Magnetfeld .....	72
3.5.5	Freies Elektronengas im magnetischen Feld .....	74
3.6	Transporteigenschaften des Elektronengases ....	75
3.6.1	Wiedemann-Franz-Gesetz .....	75
3.6.2	Thermische Leitfähigkeit von Diamant ...	76
3.6.3	Temperaturverlauf im Innern eines homogenen Wärmeleiters .....	76
	Lösungen zu Abschnitt 3.1 .....	78
	Lösungen zu Abschnitt 3.2 .....	86
	Lösungen zu Abschnitt 3.3 .....	90
	Lösungen zu Abschnitt 3.4 .....	96
	Lösungen zu Abschnitt 3.5 .....	105
	Lösungen zu Abschnitt 3.6 .....	118

<b>4. Halbleiter</b>	123
4.1 Grundlegende Eigenschaften von Halbleitern	123
4.1.1 Bindungsregel von Pearson	123
4.1.2 Zustandsdichtemasse von Ladungsträgern	124
4.1.3 Anwendung der Fermi-Integrale bei Halbleitern	126
4.2 Eigenschaften intrinsischer Halbleiter	128
4.2.1 Ladungsträgerdichte nichtentarteter Halbleiter	128
4.2.2 Temperaturabhängigkeit der Fermienergie intrinsischer Halbleiter	130
4.2.3 Temperaturabhängigkeit der Bandlücke	130
4.3 Dotierte Halbleiter	132
4.3.1 Temperaturabhängigkeit der Fermienergie dotierter Halbleiter	132
4.3.2 Ladungsträgerkonzentration und Wärmekapazität von hoch dotiertem n-leitendem ZnO	133
4.3.3 Leitfähigkeit und Hall-Koeffizient nichtentarteter Halbleiter	133
4.4 Bandschemata von Halbleitern	135
4.4.1 GaAs/ZnSe-Heterodioden	135
Lösungen zu Abschnitt 4.1	138
Lösungen zu Abschnitt 4.2	143
Lösungen zu Abschnitt 4.3	150
Lösungen zu Abschnitt 4.4	158
 <b>5. Dielektrika</b>	 161
5.1 Dielektrika im elektrischen Feld	161
5.1.1 Entelektrisierungsfaktor	161
5.1.2 Makroskopisches elektrisches Feld	162
5.1.3 Clausius-Mossotti-Gleichung	163

5.2	Optische Eigenschaften isotroper Festkörper	164
5.2.1	Elektromagnetische Wellen in Materie	164
5.2.2	Reflexionsvermögen bei senkrechter Inzidenz	165
5.2.3	Hagen–Rubens-Gesetz	166
5.3	Plasmaschwingungen	167
5.3.1	Einfaches Modell für Plasmaschwingungen	167
5.3.2	Energieverlustfunktion	168
5.3.3	Plasmafrequenz einiger Metalle	169
	Lösungen zu Abschnitt 5.1	170
	Lösungen zu Abschnitt 5.2	178
	Lösungen zu Abschnitt 5.3	191
<b>6.</b>	<b>Magnetismus</b>	<b>199</b>
6.1	Diamagnetismus	199
6.1.1	Diamagnetismus ionischer Verbindungen	199
6.2	Paramagnetismus lokalisiert magnetischer Momente	200
6.2.1	Zweizustandssystem	200
6.2.2	Brillouinfunktion	202
6.2.3	Hundsche Regeln	203
6.2.4	Magnetische Momente von 4f-Ionen	204
6.2.5	Spinmagnetismus von Übergangsmetallionen	204
6.2.6	Magnetische Suszeptibilität von Magnesiumtitanat	205
6.3	Elektrisches Kristallfeld	206
6.3.1	Reellwertige Lösungen der Schrödingergleichung	206
6.3.2	Kristallfeldaufspaltung von Energieniveaus	208
6.4	Magnetismus delokalisierter Elektronen	210
6.4.1	Magnetische Suszeptibilität von Kupfer und Aluminium	210

6.5	Kooperative magnetische Erscheinungen .....	211
6.5.1	Klassische Dipol-Dipol-Wechselwirkung ..	211
6.5.2	Curie–Weiss-Gesetz .....	212
6.5.3	Makroskopisches magnetisches Feld .....	213
6.5.4	Molekularfeldnäherung des Ferromagnetismus .....	214
6.5.5	Klassifizierung von Ferromagneten .....	216
	Lösungen zu Abschnitt 6.1 .....	218
	Lösungen zu Abschnitt 6.2 .....	220
	Lösungen zu Abschnitt 6.3 .....	236
	Lösungen zu Abschnitt 6.4 .....	247
	Lösungen zu Abschnitt 6.5 .....	250
<b>7.</b>	<b>Supraleitung</b> .....	269
7.1	Supraleiter im magnetischen Feld .....	269
7.1.1	Eindringen des Magnetfeldes in einen Supraleiter .....	269
7.1.2	Zwischenzustand von Supraleitern 1. Art .....	271
7.2	Verlustfreier Stromtransport in Supraleitern .....	271
7.2.1	Kritische Stromstärke eines supraleitenden Drahtes .....	271
7.2.2	Dauerstromversuch .....	273
7.3	Thermodynamik des supraleitenden Zustandes ..	274
7.3.1	Allgemeine thermodynamische Betrachtungen .....	274
7.3.2	Vergleich thermodynamischer Beziehungen mit dem Experiment .....	276
	Lösungen zu Abschnitt 7.1 .....	278
	Lösungen zu Abschnitt 7.2 .....	287
	Lösungen zu Abschnitt 7.3 .....	295
<b>A.</b>	<b>Thermodynamische Relationen</b> .....	303
A.1	Thermodynamische Potentiale .....	303
A.2	Thermodynamisches Quadrat .....	305



A.3    Allgemeine Form des Thermodynamischen Quadrates .....	308
<b>B.    Physikalische Konstanten</b> .....	311
B.1    Konstanten in SI-Einheiten .....	311
B.2    Konstanten in anderen Einheiten .....	312
B.3    Die cgs-Einheiten „Gauß“ und „Oersted“ .....	312
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	313
<b>Sachverzeichnis</b> .....	315