

Inhaltsverzeichnis

1.	Übersicht	1	A. Einleitung
2.	Grundbegriffe und -tatsachen	2	
3.	Symmetrie	3	B. Statik der Kristallgitter
3.1.	Anisotropie	3	
3.2.	Punktsymmetriegruppen und Raumgruppen	3	
3.3.	Begrenzungs- und Netzebenen	13	
3.4.	Das reziproke Gitter	17	
4.	Strukturbestimmung mit Interferenzen	20	
4.1.	Röntgeninterferenzen	20	
4.2.	Experimentelle Bestimmung von Gitterkonstanten	24	
4.3.	Intensität der Reflexe und Feinbau der Zelle	26	
4.4.	Elektronen- und Neutroneninterferenzen	31	
4.5.	Ergebnisse von Röntgen-Strukturanalysen	32	
4.5.1.	Isotypie	33	
4.5.2.	Bauverbände	34	
4.5.3.	Polymorphie	38	
4.5.4.	Ionen- und Atomradien	39	
5.	Fehlordnung in Kristallen	43	
5.1.	Übersicht	43	
5.2.	Strukturelle Fehlordnung	44	
5.2.1.	Punktdefekte	44	
5.2.2.	Die Anomalie der plastischen Verformung	47	
5.2.3.	Versetzungen	48	
5.2.3.1.	Stufenversetzungen	48	
5.2.3.2.	Schraubenversetzungen	50	
5.2.3.3.	Systeme von Versetzungen	51	
5.2.3.4.	Plastische Verformung von Metallen	52	
5.2.4.	Flächendefekte	54	
5.2.4.1.	Mosaik-Blockgrenzen in Einkristallen	54	
5.2.4.2.	Korngrenzen in Vielkristallen	55	
5.3.	Chemische Fehlordnung	55	
5.3.1.	Übersicht	55	
5.3.2.	F-Zentren in Alkalihalogenidkristallen	55	
6.	Chemische Bindung in Kristallen	57	C. Dynamik der Kristallgitter
6.1.	Bindungstypen	57	
6.2.	Gitterenergie von Ionenkristallen	62	
6.3.	Oberflächenenergien von Ionenkristallen	68	
7.	Die Elastizität von Kristallen	71	
7.1.	Phänomenologische Elastizitätstheorie der anisotropen Kontinua	71	
7.2.	Experimentelle Bestimmung von elastischen Konstanten	78	
7.3.	Elastizität und Gitterkräfte	79	
8.	Gitterschwingungen	81	
8.1.	Eigenschwingungen einer unendlichen linearen Kette	81	
8.2.	Abzählung der Eigenschwingungen einer linearen AB-Kette	89	
8.3.	Eigenschwingungen eines Raumgitters	91	
8.4.	Quantelung der Gitterschwingungen. Phononen	96	
8.5.	Nichtlineare Kräfte	97	
9.	Experimentelle Bestimmung von Eigenschwingungen	100	
9.1.	Ultrarotspektren von Kristallen	101	

	9.2.	Unelastische Streuung von Neutronen und Röntgenphotonen	110
	9.3.	Brillouin- und Ramanstreuung	112
	9.4.	Elektronen-Schwingungsspektren	115
	10.	Das Schwingungssystem im thermischen Gleichgewicht	116
	10.1.	Statistische Grundlagen	116
	10.2.	Die Debyesche Theorie der Schwingungswärme	117
	10.3.	Vergleich mit der Planckschen Hohlraumstrahlung	123
	10.4.	Experimentelle Prüfung der Debyeschen Theorie	124
	10.5.	Vielkörperproblem und modifiziertes Einatom-Modell von Einstein	125
D. Kristalle in äußerem Feldern. Makroskopische Beschreibung	11.	Kristalle im elektrischen Feld	127
	11.1.	Grundlagen. Statische Dielektrizitätskonstante	127
	11.2.	Materie im elektrischen Wechselfeld. Kristalloptik	130
	11.3.	Multipolstrahlung	134
	12.	Kristalle im Temperaturfeld	136
	12.1.	Thermische Ausdehnung	136
	12.2.	Wärmeleitung	136
	13.	Piezoelektrizität	138
E. Ionen in Kristalfeldern	14.	Qualitative Beschreibung eines Ions im Kristallgitter	141
	14.1.	Fallunterscheidung und Modell	141
	14.2.	Atome im homogenen Kondensatorfeld (Stark-Effekt)	143
	14.3.	Ionen im inhomogenen elektrischen Kristalfeld	145
	15.	Termschema eines Ions im Kristalfeld	149
	15.1.	Das Kristalfeld	149
	15.2.	Die Kristalfeldenergie 1. Näherung. Matrixelemente. Beispiel .	152
	15.3.	Kristalfeldzustände und Symmetrieeartung	158
	15.4.	Der Kramers'sche Satz: Zeitumkehr	164
	16.	Zeeman-Effekt von Ionen in Kristallen	169
	16.1.	Hamilton-Operator und Störungsrechnung	169
	16.2.	Beschreibung durch Spin-Hamilton-Operatoren	172
	17.	Ionen in schwingenden Kristallen: Elektron-Phonon-Wechselwirkung	175
	17.1.	Schwingungsstruktur der Elektronenterme	175
	17.2.	Strahlungslose Übergänge	175
	17.3.	Phonen-Raman-Effekt	176
	17.4.	Lebensdauer und Breite eines Elektronenterms	176
	18.	Spektren von Ionen in Kristalfeldern	178
	18.1.	Auswahlregeln für elektrische Dipolstrahlung	178
	18.2.	Auswahlregeln für magnetische Dipolstrahlung	180
	18.3.	Beispiele und Ergebnisse aus der Kristallspektroskopie	181
	18.3.1.	Vorbemerkung zur Analyse von Kristallspektren	181
	18.3.2.	Spektren von Verbindungen der Seltenen Erden	182
	18.3.3.	Spektren von Verbindungen mit offenen d-Schalen	191
	18.4.	Spektren und elektronische spezifische Wärme	193
F. Magnetismus von Kristallen	19.	Maßsysteme. Grundlagen	195
	19.1.	Maßsysteme	195
	19.2.	Grundgrößen und Definitionen	195
	19.3.	Modellmäßige Einteilung der Substanzen	198
	20.	Diamagnetismus von Isolatoren	200
	21.	Paramagnetismus von Ionenkristallen	202
	21.1.	Statistische Grundlagen	202
	21.2.	Paramagnetismus freier Atome	204
	21.3.	Magnetische Ionen im Kristalfeld	207
	21.3.1.	Ionen mit offener 3d-Schale	207
	21.3.2.	Ionen mit offener 4f-Schale	210

22.	Kopplung magnetischer Momente untereinander und mit den Gitterschwingungen	215
22.1.	Magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkung	215
22.2.	Elektrische Multipol-Wechselwirkung	220
22.3.	Austauschwechselwirkung	221
22.3.1.	Direkter Austausch	221
22.3.2.	Indirekter Austausch	224
22.4.	Molekularfeld und Anisotropiefeld	225
23.	Paramagnetische Relaxation	227
23.1.	Makroskopische Beschreibung	227
23.2.	Verschiedene Relaxationsarten	232
23.3.	Spin-Gitter-Relaxation	232
23.4.	Spin-Spin-Relaxation	239
23.5.	Kreuzrelaxation	242
23.6.	Magnetische Kühlung	244
24.	Ferromagnetismus	248
24.1.	Grundtatsachen und Modell	248
24.2.	Die Molekularfeldnäherung	251
24.3.	Ferromagnetische Spinwellen	258
24.3.1.	Die lineare Spinkette mit isotropem Austausch	258
24.3.2.	Spinwellen im Raumgitter	265
24.3.3.	Magnonen im thermischen Gleichgewicht	265
24.3.4.	Experimenteller Nachweis von Spinwellen	268
24.4.	Anisotropie und Domänenstruktur	275
24.4.1.	Ferromagnetische Anisotropie	275
24.4.2.	Domänenstruktur	280
25.	Antiferromagnetismus	284
25.1.	Kollinear-antiferromagnetische Strukturen mit zwei Untergittern	284
25.1.1.	Beispiele	284
25.1.2.	Molekularfeldnäherung	286
26.	Kompliziertere magnetische Strukturen. Ferrimagnetismus	295
26.1.	Antiferromagnetismus mit verkanteten Spins	295
26.2.	Modulierte Strukturen in Selten-Erd-Metallen	296
26.3.	Ferrimagnetische Strukturen	297
26.3.1.	Ferrite. Molekularfeldnäherung	298
26.3.2.	Granate	302
26.3.3.	Selten-Erd-Perowskite	304
27.	Ferrimagnetische und antiferromagnetische Spinwellen	306
27.1.	Die lineare AB-Spinkette	306
27.2.	Spinwellen im Raumgitter	312
28.	Grundlagen	317
28.1.	Maßsysteme	317
28.2.	Grundgrößen und Definitionen	317
28.3.	Dipolares, inneres und lokales elektrisches Feld	318
29.	Dipolmomente und elektrische Polarisierbarkeiten. Dispersion	319
29.1.	Übersicht	319
29.2.	Orientierungspolarisation	321
29.2.1.	Statische Elektrisierung und Polarisierbarkeit	321
29.2.2.	Orientierungs-Relaxation	325
29.3.	Ionen- und Elektronenpolarisation	325
29.3.1.	Das Lorentz'sche Modell	325
29.3.2.	Elektronische Spektren	327
29.3.3.	Schwingungsspektren	328
29.4.	Die Gesamtpolarisation	329
30.	Kopplung zwischen Lichtwellen und ultrarotaktiven Schwingungen in Ionenkristallen	330
30.1.	Freie Schwingungen: Lyddane-Sachs-Teller-Theorem	330
30.2.	Erzwungene Schwingungen und anomale Dispersion. Polaritonen	334

	31.	Spontanpolarisation	340
	31.1.	Symmetrie und spontane elektrische Polarisation	340
	31.2.	Ferroelektrizität	341
	31.2.1.	Phänomenologische Beschreibung	341
	31.2.2.	Experimentelle Ergebnisse	342
	31.2.3.	Mikrophysikalisches Modell	346
	31.3.	Antiferroelektrizität	350
H. Leitungselektronen: Metalle	40.	Das Modell: Übersicht	353
	41.	Einelektronenzustände I	355
	41.1.	Ein Kristallelektron im eindimensionalen Gitter	355
	41.1.1.	Translationssymmetrie und Bloch-Zustände	355
	41.1.2.	Energieschema und Zustandsdichte eines freien Elektrons	357
	41.1.3.	Das reduzierte Energieschema	358
	41.2.	Ein Kristallelektron im dreidimensionalen Gitter	361
	41.2.1.	Translationssymmetrie und Bloch-Zustände a	361
	41.2.2.	Der Grenzfall des freien Elektrons	363
	41.2.3.	Das reduzierte Energieschema	364
	42.	Das Fermi-Sommerfeld-Gas freier Elektronen	369
	42.1.	Das Modell	369
	42.2.	Die Fermi-Fläche	370
	42.3.	Die thermische Energie	372
	42.4.	Die magnetischen Eigenschaften	375
	42.4.1.	Paulischer Spinmagnetismus	375
	42.4.2.	Elektronenspinresonanz	378
	42.4.3.	Zyklotronresonanz	378
	42.4.4.	Landausches Niveauschema	379
	42.4.5.	Der Bahnmagnetismus	382
	43.	Das Kristallelektronengas im Gitterpotential	387
	43.1.	Einelektronenzustände II	387
	43.1.1.	Zeitumkehr	387
	43.1.2.	Translationssymmetrie b	388
	43.2.	Energiebänder im eindimensionalen Gitter	389
	43.3.	Energiebänder im dreidimensionalen Gitter	393
	43.3.1.	Fermiflächen	393
	43.3.2.	Struktur der Energiebänder	398
	43.3.3.	Isolatoren, Halbleiter, Metalle, Schmelzen	400
	43.4.	Das Teilchenbild der Kristallelektronen: Effektivmassen-Dynamik	403
	43.4.1.	Dynamik eines Kristallelektrons	404
	43.4.2.	Ein Kristallelektron im elektrischen Feld	407
	43.4.3.	Ein Kristallelektron im magnetischen Feld	409
	43.4.4.	Experimentelle Bestimmung der Fermifläche von Metallen	413
	43.4.4.1.	Elektromagnetische Zyklotronresonanz und de Haas-van Alphen-Effekt	414
	43.4.4.2.	Dämpfung von Ultraschall im Magnetfeld	417
	43.4.5.	Elektronen oder/und Löcher	419
	43.5.	Optische Eigenschaften und spektroskopische Bestimmung der Bandstruktur	422
	43.5.1.	Übersicht	422
	43.5.2.	Interbandübergänge	423
	43.6.	Grenzflächenprobleme	427
	43.6.1.	Die Austrittsarbeit	427
	43.6.2.	Kontakt- und Thermospannung	431
	44.	Streuung von Leitungselektronen: die elektrische Leitung	434
	44.1.	Streuprozesse	434
	44.1.1.	Streuung an Phononen	434
	44.1.2.	Streuung an Gitterfehlern	434
	44.1.3.	Elektron-Elektron-Streuung	435
	44.2.	Die elektrische Leitfähigkeit von Metallen	435

44.2.1. Der Relaxationsmechanismus	435	
44.2.2. Das Ohmsche Gesetz im Gleichfeld	437	
44.2.3. Leitfähigkeit im Wechselfeld	443	
44.2.3.1. Leitfähigkeit. Skineffekt	443	
44.2.3.2. Dielektrizitätskonstante der Leitungselektronen	446	
44.2.4. Plasmawellen	449	
44.2.5. Leitung in gekreuzten Feldern: galvanomagnetische Effekte	451	
44.2.5.1. Hall-Effekt	452	
44.2.5.2. Magnetische Widerstandsänderung	455	
 45. Homogene Halbleiter	457	I. Leitungselektronen: Halbleiter
45.1. Übersicht und Grundbegriffe	457	
45.2. Trägerkonzentrationen und elektrische Leitfähigkeit	462	
45.2.1. Elektronenverteilung im thermischen Gleichgewicht	462	
45.2.2. Die elektrische Leitfähigkeit	467	
45.3. Galvanomagnetische Effekte	470	
45.3.1. Hall-Effekt und Beweglichkeiten	470	
45.3.2. Magnetische Widerstandsänderung	473	
45.4. Zyklotronresonanz und effektive Massen	474	
45.5. Optische Eigenschaften	477	
45.5.1. Absorption durch freie Ladungsträger	477	
45.5.2. Interbandübergänge	478	
45.5.3. Störstellenabsorption	480	
46. Inhomogene Halbleiter	481	
46.1. Diffusion und Rekombination von Ladungsträgern	481	
46.2. Der p-n-Übergang	483	
46.3. Der p-n-Gleichrichter	486	
 47. Einelektronenzustände in der LCAO-Näherung	489	J. Gebundene Zustände in Kristallen
48. Exzitonen	495	
48.1. Frenkel-Exzitonen	497	
48.2. Mott-Wannier-Exzitonen	499	
48.3. k -Abhängigkeit, Strahlung und Zerfall von Exzitonen	502	
48.4. Resonanzkopplung innerhalb einer Gitterzelle	503	
48.5. Exzitonenspektren	505	
49. Polaronen	509	
 50. Makroskopische Phänomene	513	K. Supraleitung
50.1. Die elektrische Leitung im Gleichfeld	513	
50.2. Die Magnetisierung	516	
50.3. Zwischenzustand und Magnetisierungskurve	518	
50.4. Thermodynamische Eigenschaften	521	
50.5. Die London'schen Feldgleichungen	526	
50.6. Flußquantelung	529	
51. Grundlagen und Ergebnisse der BCS-Theorie	532	
51.1. Die Cooper-Paare	532	
51.2. Der Grundzustand eines Supraleiters bei $T = 0$ K	534	
51.3. Die Energiefülle eines Supraleiters bei $T = 0$ K	536	
51.4. Die Energiefülle eines Supraleiters bei $T > 0$ K	539	
52. BCS-Theorie und makroskopische Phänomene der Supraleitung	541	
52.1. Elektrische Leitfähigkeit und das kritische Magnetfeld	541	
52.2. Die thermodynamischen Eigenschaften	542	
52.3. Nachweis der Cooper-Paare und des Bindungsmechanismus	543	
52.4. Experimentelle Bestimmung der Energiefülle	543	
52.4.1. Spezifische Wärme und Übergangstemperatur	543	
52.4.2. Optische und Ultraschall-Absorption	543	
52.4.3. Tunnelübergänge von Einzelelektronen	545	
52.5. Josephson-Effekte	550	

52.5.1. Experimenteller Befund	550
52.5.2. Theoretische Begründung	552
52.6. Deutung des Meißner-Ochsenfeld-Effektes	553
53. Grenzflächenprobleme	555
53.1. Kohärenzlängen	555
53.2. Die Phasengrenzenergie	556
53.3. Supraleiter 2. Art	558
 L. Anregungen und Energietransport	
54. Anregungen	563
55. Wärmeleitung	565
55.1. Grundbegriffe und -tatsachen	565
55.2. Wärmewiderstand durch Phononenstreuung	566
55.2.1. Übersicht	566
55.2.2. Phonon-Phonon- und Oberflächenstreuung	568
55.2.3. Streuung an Gitterfehlern	571
55.2.4. Amorphe und teilkristalline Stoffe	573
55.3. Wärmeleitung in magnetischen Kristallen	576
55.4. Wärmeleitung in Metallen	577
55.4.1. Wärmeleitung im normalleitenden Zustand	577
55.4.2. Wärmeleitung im supraleitenden Zustand	579
 Bildtafeln	581
 Anhang	
A: Maßsysteme	599
B: Konstanten der Atomphysik	603
C: Ersatzeinheiten für atomare Energien, Umrechnungstabelle . . .	604
D: Ebene elektromagnetische Wellen in Materie, nach der klassischen Kontinuumstheorie	606
Literatur	611
Sachverzeichnis	619