

Inhaltsverzeichnis

Zur Dynamik von Kristallen mit Punktdefekten. Von Privatdozent Dr. WOLFGANG LUDWIG, Jülich. Mit 52 Abbildungen	1
Neue Methoden in der kinetischen Theorie verdünnter Gase. Von Privatdozent Dr. KURT SUCHY, Marburg (Lahn). Mit 6 Abbil- dungen	103
Festkörperzerstäubung durch Ionenbeschuß. Von Dipl.-Physiker RAINER BEHRISCH, Garching bei München. Mit 124 Abbildungen	295
Inhalt der Bände XX-XXXV	
I. Namenverzeichnis	444
II. Sachverzeichnis	447

Zur Dynamik von Kristallen mit Punktdefekten^{*,**}

Von

WOLFGANG LUDWIG

Mit 52 Abbildungen

Inhalt

A. Einleitung	2
1. Vorbemerkungen	2
2. Bewegungsgleichung und Lösung für ideales Gitter	3
B. Gitter mit Punktdefekten. Allgemeine Methoden	10
3. Struktur der Defekte. Bewegungsgleichung	10
4. Störungsrechnung für die Eigenfrequenzen	12
5. Exakte Behandlung mittels Greenscher Funktion	14
a) Streulösungen	15
b) Lokalisierte Zustände	17
6. Variationsrechnung	19
7. Andere Methoden zur Berechnung lokalisierter Zustände	20
8. Gruppentheoretische Betrachtungen	21
C. Anwendungen und Beispiele	23
9. Die einatomige lineare Kette	23
a) Allgemeines	23
b) Störungsrechnung	26
c) Berechnung lokalisierter Schwingungszustände	27
d) Methode der Greenschen Funktion. Streuzustände	30
e) Diskussion der lokalisierten Schwingungen	35
f) Einfluß der Strukturänderung auf die lokalisierten Frequenzen	37
g) Einfluß der Wechselwirkung zwischen einzelnen Defekten auf lokalisierte Frequenzen	40
10. Die zweiatomige lineare Kette	42
a) Lokalisierte Schwingungszustände	42
b) Streuung von Schallwellen	49
11. Raumgitter. Lokalisierte Schwingungszustände	52
a) Allgemeine Betrachtungen	52
b) Fremdatom im einfach-kubischen Gitter	61
c) Modelle in anderen Gittern	67
d) Numerische Beispiele	70
12. Raumgitter. Streuung von Schallwellen	74

* Diese Arbeit stellt in Teilgebieten eine Weiterführung des Artikels von G. LEIBFRIED im Handbuch der Physik, Bd. VII/1 (1955) dar.

** Aus dem Institut für Reaktorwerkstoffe der Kernforschungsanlage Jülich und dem Lehrstuhl für Reaktorwerkstoffe der Technischen Hochschule Aachen. Habil.-Schrift zur Erlangung der Lehrberechtigung für Physik an der Technischen Hochschule Aachen.

D. Experimentelle Untersuchungen	79
13. Neutronenbeugung	79
14. Ultrarotabsorption	81
15. Wärmeleitung in Isolatoren	84
16. Andere Einflüsse der geänderten Gitterdynamik	84
Anhang	
a) Asymptotische Entwicklung der Greenschen Funktion für $\lambda > \lambda(\ell, \sigma)$ (lokalisierte Zustände)	87
b) Asymptotische Entwicklung für Frequenzen im Band (Streu- zustände)	89
c) Greensche Funktion für die einatomige lineare Kette	91
d) Greensche Funktion für die zweiatomige lineare Kette	92
e) Eigenvektoren lokalisierter Zustände für einige Defekte in kubischen Gittern	93
Literatur	99

Neue Methoden in der kinetischen Theorie verdünnter Gase

Von

KURT SUCHY

Mit 6 Abbildungen

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	105
Einleitung	105
1. Ausgangs-Gleichungen	107
11. Liouville-Gleichung	107
12. Kinetische Gleichung	109
13. Transport-Gleichung	110
14. Fokker-Planck-Gleichung	112
15. Transport-Gleichung für Zweier-Stöße	113
16. Entropie-Bilanz	114
17. Maxwellsche Geschwindigkeits-Verteilungen	116
18. Boltzmannsche Stoß-Integrale	119
19. Boltzmannsche Dichte-Verteilung	122
2. Bilanz-Gleichungen	124
21. Druck und Temperatur	124
22. Transport-Gleichung mit Eigen-Geschwindigkeiten und Gyro-Kräften	126
23. Kontinuitäts-Gleichung	127
24. Bewegungs-Gleichung	129
25. Druck-Bilanz	130
26. Energie-Bilanz	131
27. Spannungs-Bilanz	134
28. Energiestrom- und Wärmestrom-Bilanz	135
29. Lösungs-Methoden für das System der Bilanz-Gleichungen	138
3. Querschnitts-Integration der Stoß-Integrale	140
31. Stoß-Differenzen in Schwerpunkts- und Relativ-Koordinaten	140
32. Azimut-Integration	141
33. Bahn-Integral	143
34. Bahn-Integral für Zentral-Kräfte mit negativer Abstands-Potenz	144
35. Transport-Querschnitte	145
36. Transport-Faktoren	146
4. Geschwindigkeits-Mittelung mit Integral-Superposition von Gauß-Verteilungen	148
41. Schwerpunkts- und Relativ-Geschwindigkeit als Integrations-Variable	148
42. Geschwindigkeits-Verteilung als Integral-Superposition von Gauß-Verteilungen	149
43. Eigenschaften der Integral-Superposition von Gauß-Verteilungen	149
44. Normierte Geschwindigkeiten	151
45. Mittelung über den Raumwinkel der Relativ-Geschwindigkeit	153
46. Mittelung über den Betrag der Relativ-Geschwindigkeit (Hankel-Transformation)	154
47. Beispiele zur „Hankel“-Transformation	157
48. Mittelung über die Relativ-Geschwindigkeit	160
49. Mittelung über die Schwerpunkts-Geschwindigkeit	161

5. Geschwindigkeits-Mittelung der Stoß-Integrale	161
51. Mittelung der Stoß-Integrale über die Relativ-Geschwindigkeit	161
52. Mittelung der Stoß-Integrale über die Schwerpunkts-Geschwindigkeit	162
53. Stoß-Integrale der Bilanz-Gleichungen	163
54. Gemittelte Transport-Querschnitte	165
55. Gemittelte Transport-Faktoren	167
56. Lösungs-Methoden der Bilanz-Gleichungen mit Hilfe der Integral-Superposition	168
6. Probleme mit starken Gleichgewichts-Abweichungen	169
61. Bilanz-Gleichungen mit Integral-Superposition von Gauß-Verteilungen	169
62. Beispiele von Gewicht-Funktionen der Integral-Superposition	170
63. Gleichungen für das zeitliche Relaxations-Verhalten zweier Gauß-Verteilungen	172
64. Zeitliche Relaxation bei Maxwell'scher Wechselwirkung	175
65. Zeitliche Relaxation bei kurzreichender Wechselwirkung	175
66. Zeitliches Verhalten bei weitreichender Wechselwirkung	177
67. Andere Relaxations-Probleme	178
7. Stoß-Integrale für schwache Gleichgewichts-Abweichungen	179
71. Grads Orthogonal-Entwicklung der Verteilungs-Funktion	179
72. Bopp-Meixner-Entwicklung der Verteilungs-Funktion	182
73. Konvergenz der Bopp-Meixner-Entwicklung. Näherungen in den Bilanz-Gleichungen	183
74. Einführung der Differential-Integral-Operatoren $\Gamma_i^{(n)}$	186
75. „Gemischte“ Operatoren $\Gamma_{ik}^{(n)}$ und „gemischte“ Grad-Koeffizienten.	188
76. Stoß-Integral der Bewegungs-Gleichung	191
77. Stoß-Integral der Druck-Bilanz	193
78. Stoß-Integral der Wärmestrom-Bilanz	195
8. Hydrodynamische Transport-Querschnitte und Bilanz-Gleichungen	198
81. Definition und Deutung der hydrodynamischen Transport-Querschnitte	198
82. Eigenschaften der hydrodynamischen Transport-Querschnitte	200
83. Hydrodynamische Transport-Querschnitte für Wechselwirkungs-Potentiale mit negativer Abstands-Potenz	202
84. Null-Folge der hydrodynamischen Transport-Querschnitte. Näherungen in den Stoß-Integralen.	204
85. Hydrodynamische Bewegungs-Gleichung	207
86. Hydrodynamische Druck- und Energie-Bilanz	209
87. Hydrodynamische Spannungs-Bilanz	211
88. Hydrodynamische Wärmestrom-Bilanz	212
89. Stoß-Integrale der hydrodynamischen Wärmestrom-Bilanz	216
9. Spezielle Transport-Phänomene	218
91. Erste Näherung der Viscosität im einheitlichen Gas. Navier-Stokes-Gleichung	218
92. Erste Näherung der Wärmeleitung im einheitlichen Gas. Wärmeleitungs-Gleichung	221
93. Zweite Näherung von Viscosität und Wärmeleitung im einheitlichen Gas	222
94. Bilanz-Gleichungen für ein gleichförmig strömendes Gemisch	225
95. Onsager-Casimir-Relationen	228
96. Definition des Diffusions-Koeffizienten.	230
97. Elektronen-Beweglichkeit im Lorentz-Gas	232
98. Eigenwert-Darstellung des Beweglichkeits-Tensors	234
99. Elektronen-Schallwellen im Lorentz-Gas	238
10. Die Lorentz-Methode zur Behandlung des Lorentz-Gases	239
101. Multipol-Entwicklung der Geschwindigkeits-Verteilungsfunktion	239
102. Boltzmann-Gleichung mit Multipol-Entwicklung	242
103. Gleichungs-System für die Multipol-Koeffizienten	244
104. Lösung des Gleichungs-Systems für die Multipol-Koeffizienten	245
105. Tensorielle Koeffizienten für Diffusion, Beweglichkeit, Viscosität und Wärmeleitung	248

106. Eigenwerte der tensoriellen Transport-Koeffizienten. Transport-Integrale	250
107. Transport-Integrale für Stoß-Frequenzen, die einer Geschwindigkeits-Potenz proportional sind. Transport-Funktionen.	253
108. Transport-Funktionen für Stoß-Frequenzen, die den Geschwindigkeits-Potenzen $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ proportional sind.	255
Schlußbemerkungen	258
A. Anhang über Tensor-Rechnung	260
A 1. Vektor- und Tensor-Bezeichnungen.	260
A 2. Symmetrisierung von Tensoren	261
A 3. Reziproke Tensoren; Eigenwert-Darstellung; Lösung einer Tensor-Gleichung.	263
A 4. Verjüngung und Reduktion von Tensoren	267
A 5. Tensor-Differentiationen	270
A 6. „Gemischte“ Tensor-Differentiationen	273
A 7. Azimut-Integration von Tensoren	274
A 8. Gauß-Mittelung von Tensoren	276
B. Anhang über Integral-Transformationen, spezielle Integrale und Funktionen	278
B 1. Hankel-Transformation	278
B 2. Umrechnung von Kummer-Funktionen auf Exponential-Funktion und Fehler-Funktion	280
B 3. Berechnung von Transport-Funktionen	281
C. Anhang über Reihen-Entwicklungen der Geschwindigkeits-Verteilungsfunktion	284
C 1. Bopp-Meixner-Entwicklung nach Tensor-Ableitungen der Isotrop-Verteilung	284
C 2. Multipol-Entwicklung nach Tensor-Ableitungen von $1/C$	286
C 3. Entwicklung nach Kugelflächen-Funktionen.	288
Literatur	290

Festkörperzerstäubung durch Ionenbeschuß

Von

RAINER BEHRISCH

Mit 124 Abbildungen

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung	297
II. Experimente zur Zerstäubung	300
A. Welche Größen sind zur Beschreibung des Zerstäubungsvorganges interessant?	300
B. Bedingungen für reproduzierbare Messungen	301
1. Ionen.	301
2. Vakuum	302
3. Festkörperoberfläche	303
C. Untersuchungsmethoden.	304
1. Glimmentladungen (ältere Methode)	304
2. Sondenmethode	304
3. Ionenstrahlmethode	305
4. Zerstäubung durch energiereiche Rückstoßatome	307
D. Bestimmung der Menge des abgetragenen Materials	307
1. Gewichtsverlust des Festkörpers	307
2. Nachweis des abgetragenen Materials	308
a) Kondensation auf einer Oberfläche	308
b) Nachweis des Atomstrahls durch Ionisation	310
III. Zerstäubungsmessungen an polykristallinem Material	310
A. Bestimmung der Zerstäubungsrate in Abhängigkeit von der Ion-Fest- körperkombination und der Ionenenergie.	310
1. Vorbemerkung.	310
2. Schwellenenergie.	312
3. Zerstäubungsraten bei niedrigen Ionenenergien ($E < 1$ keV)	315
4. Zerstäubungsraten bei mittleren und höheren Ionenenergien	324
a) Zerstäubung von Edelmetallen mit Edelgasionen.	324
b) Zerstäubung verschiedener Metalle mit Edelgasionen	326
c) Zerstäubung mit den Ionen verschiedener Elemente	327
d) Selbstzerstäubung	331
B. Einfluß verschiedener Parameter auf die Zerstäubungsrate	232
1. Restgasdruck	332
2. Temperatur des Festkörpers	333
3. Ionenstromdichte, Molekülionen	335
4. Zerstäubungszeit und Schichtaufbau	336
5. Auffallwinkel der Ionen	338
C. Abgetragenes Material.	341
1. Neutrale Teilchen	341
a) Vorbemerkung	341
b) Winkelverteilung der abgetragenen Atome	341
c) Energie der abgetragenen Atome	346
d) Energieverteilung der abgetragenen Atome	349

2. Emission von geladenen Teilchen	350
a) Meßmethoden	350
b) Gesamte Ionenausbeute	351
c) Masse und Energie der Sekundärionen	352
IV. Zerstäubungsmessungen an Einkristallen	360
A. Zerstäubungsrate	360
B. Abgetragenes Material	365
1. Niedrige Ionenenergien	365
a) Richtungen bevorzugter Emission	365
b) Abhängigkeit der bevorzugten Emission von der Energie und der Masse der einfallenden Ionen	368
c) Zuordnung der Emissionsrichtungen zu den möglichen Fokussierungsrichtungen im Kristall	368
2. Mittlere und höhere Ionenenergien	372
a) Richtungen bevorzugter Emission	372
b) Abhängigkeit der bevorzugten Emission von der Temperatur des Einkristalls	374
V. Oberflächen von zerstäubten Festkörpern	376
A. Oberflächenbilder	376
1. Polykristallines Material	376
2. Einkristalle	378
B. Oberflächenstruktur	385
1. Aufsammeln von Edelgasen	385
2. Chemische Veränderungen der Oberfläche	386
3. Strukturänderungen, Legierungen	387
VI. Theoretische Überlegungen	388
A. Modelle für den Zerstäubungsvorgang	388
1. Zerstäubung durch Verdampfung	388
2. Zerstäubung durch Impulsübertragung	390
B. Aus der Theorie der Strahlenschäden	391
1. Elastische Zweierstöße zwischen Atomen	391
a) Allgemeine Stoßbetrachtungen	391
b) Zweierstoß bei niedrigen Energien	392
c) Zweierstöße bei mittleren Energien ($L_A < E < L_B$)	397
d) Zweierstöße bei hohen Energien ($E > L_B$)	397
e) Ionisierungseffekte	398
2. Fokussierende Stoßfolgen	399
a) Fokussierungsbedingungen für eine Reihe harter Kugeln	399
b) Näherung für kleine Winkel	401
c) Direkte Fokussierung in Kristallen, Fokussierungsenergie	402
d) Indirekte Fokussierung in Kristallen	402
e) Genauigkeit der Fokussierungsenergie	404
f) Wahrscheinlichkeit der Ausbildung von fokussierenden Stoßketten	407
3. Energieverlust einer fokussierenden Stoßfolge in einem Kristall	408
a) Energieverlust an die die Kette umgebenden Nachbaratome	408
b) Energieverlust durch Fremdatome im Gitter	410
c) Thermisch bedingter Energieverlust	410
d) Reichweite von fokussierenden Stoßfolgen in Kristallen	412
4. Sublimationswärme und Verlagerungsenergie	414
C. Zerstäubungstheorie	414
1. Vorbemerkung	414
2. Schwellenenergie	415
3. Berechnung der Zerstäubungsrate S	420
a) Niedrige Ionenenergien ($E < 1$ keV)	420
b) Höhere Ionenenergien ($E > 1$ keV)	422

c) Die Theorie von M. W. THOMPSON (267)	425
d) Halbempirische Zerstäubungstheorien	427
e) Abhängigkeit der Zerstäubungsrate von der Festkörpertemperatur	430
4. Winkelverteilung, Energie, Energieverteilung und Ladung des abgetragenen Materials	430
VII. Zusammenfassung	431
Literatur	432