

# Inhalt

Vorwort — v

Liste der wichtigsten verwendeten Symbole und Abkürzungen — xiii

Einleitung — 1

- 1 Grundlagen der Statistischen Physik — 5**
  - 1.1 Zustände in der Quantenmechanik — 5
    - 1.1.1 Zustände, Observable, Erwartungswerte — 5
    - 1.1.2 Beispiele für gemischte Zustände — 8
    - 1.1.3 Die Zeitentwicklung — 9
  - 1.2 Statistische Beschreibung eines Systems — 10
    - 1.2.1 Makroskopische Systeme — 10
    - 1.2.2 Der Gleichgewichtszustand eines makroskopischen Systems — 11
  - 1.3 Nichtwechselwirkende Teilchen in einem Kasten — 14
  - 1.4 Energieänderung eines makroskopischen Systems — 16
    - 1.4.1 Wärme und Arbeit — 16
    - 1.4.2 Verallgemeinerte Kräfte — 17
  - 1.5 Entropie und Temperatur — 18
    - 1.5.1 Gleichgewicht und Randbedingungen — 18
    - 1.5.2 Makroskopische Systeme im thermischen Kontakt — 20
    - 1.5.3 Quasistatische Änderungen der Energie — 22
    - 1.5.4 Definition des Wärmebads — 23
    - 1.5.5 Ideales Gas — 23
  - 1.6 Systeme im Kontakt mit der Umgebung — 24
    - 1.6.1 Wärmeaustausch — 24
    - 1.6.2 Wärme- und Teilchenaustausch — 25
  - 1.7 Übungsaufgaben — 26
- 2 Thermodynamik — 28**
  - 2.1 Die Hauptsätze der Thermodynamik — 28
  - 2.2 Absolute Temperaturskala, Einheiten und Naturkonstanten — 28
  - 2.3 Thermodynamische Potentiale — 30
    - 2.3.1 Definition von extensiven und intensiven Größen — 30
    - 2.3.2 Legendre-Transformationen und thermodynamische Potentiale — 30
    - 2.3.3 Maxwell-Relationen — 31
    - 2.3.4 Die kalorische Zustandsgleichung — 32
    - 2.3.5 Materialgrößen — 35
    - 2.3.6 Die Adiabaten­gleichung — 40

2.4	Wärmemaschinen und Wärmereservoirs —	40
2.4.1	Der Wirkungsgrad —	40
2.4.2	Die Carnot-Maschine —	41
2.4.3	Der Wirkungsgrad eines allgemeinen Kreisprozesses —	42
2.4.4	Die Curzon-Ahlborn-Maschine —	43
2.5	Gleichgewichtsbedingungen —	45
2.5.1	Gleichgewicht bei Austauschprozessen —	45
2.5.2	Stabilitätsbedingungen —	46
2.5.3	Chemische Reaktionen und Reaktionsgleichgewicht —	47
2.6	Gleichgewicht zweier Phasen einer Substanz —	48
2.6.1	Koexistenz zweier Phasen einer Substanz —	48
2.6.2	Phasenübergang erster Ordnung —	49
2.6.3	Die Clausius-Clapeyron'schen Gleichung —	49
2.6.4	Die Dampfdruckkurve —	51
2.7	Übungsaufgaben —	52
<b>3</b>	<b>Thermodynamik idealer und realer Gase —</b>	<b>54</b>
3.1	Das van der Waals-Gas —	54
3.1.1	Die thermische Zustandsgleichung —	54
3.1.2	Die freie Energie des van der Waals-Gases —	54
3.1.3	Die Wärmekapazität bei konstantem Druck —	56
3.2	Ideale Gase und die Adiabatangleichung —	56
3.3	Freie Expansion eines Gases —	57
3.4	Der Joule-Thomson-Effekt —	58
3.5	Die Schallgeschwindigkeit —	59
3.5.1	Berechnung der Schallgeschwindigkeit —	59
3.5.2	Die Schallgeschwindigkeit in einem Gemisch von Gasen —	61
3.5.3	Schallwellen und die mittlere freie Weglänge —	62
3.5.4	Experimentelle Bestimmung der Gaskonstante —	63
3.6	Ideale Gase und das Dalton'sche Gesetz —	63
3.7	Reaktionsgleichgewichte idealer Gase —	64
3.7.1	Chemisches Potential idealer Gase —	64
3.7.2	Das Massenwirkungsgesetz —	66
3.8	Verdampfung und Verdunstung —	67
3.8.1	Die Dampfdruckkurve —	67
3.8.2	Die Verdampfungswärme —	69
3.8.3	Verdunstung —	71
3.9	Übungsaufgaben —	72
<b>4</b>	<b>Methoden der Statistischen Physik —</b>	<b>74</b>
4.1	Zustandssummen und thermodynamische Potentiale —	74
4.1.1	Mikrokanonische Zustandssumme —	74

- 4.1.2 Kanonische Zustandssumme — 74
- 4.1.3 Großkanonische Zustandssumme — 77
- 4.2 Zusammenfassung: Statistik → Thermodynamik — 79
- 4.3 Alternative Herleitung der Ensembles — 82
- 4.4 Die klassische Näherung — 84
  - 4.4.1 Vorbetrachtungen — 84
  - 4.4.2 Zustandssummen in klassischer Näherung — 86
  - 4.4.3 Die klassische Näherung am Beispiel des idealen einatomigen Gases — 88
- 4.5 Übungsaufgaben — 89
  
- 5 Systeme von Teilchen ohne Wechselwirkung — 91**
  - 5.1 Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung — 91
  - 5.2 Die barometrische Höhenformel — 92
  - 5.3 Der Gleichverteilungssatz — 93
    - 5.3.1 Herleitung des Gleichverteilungssatzes — 93
    - 5.3.2 Einatomiges ideales Gas — 93
    - 5.3.3 Zweiatomiges ideales Gas — 94
    - 5.3.4  $n$ -atomiges ideales Gas — 95
    - 5.3.5 Widersprüche zum Gleichverteilungssatz — 96
    - 5.3.6 Betrachtung zur Bedingung Gl. (5.16) — 96
  - 5.4 Das zweiatomige ideale Gas — 96
    - 5.4.1 Vorbetrachtungen — 96
    - 5.4.2 Vibrationen — 97
    - 5.4.3 Rotationen — 98
    - 5.4.4 Das Verhältnis von  $T_v$  zu  $T_r$  — 101
  - 5.5 Ortho- und Parawasserstoff — 102
  - 5.6 Wärmekapazität eines Systems mit zwei Energieniveaus — 105
  - 5.7 Verdünnte Lösungen — 107
    - 5.7.1 Die freie Enthalpie von verdünnten Lösungen — 107
    - 5.7.2 Der osmotische Druck — 109
    - 5.7.3 Die Siedepunktserhöhung — 111
    - 5.7.4 Die Gefrierpunktserniedrigung — 112
    - 5.7.5 Die Dampfdruckerniedrigung — 112
    - 5.7.6 Das Henry'sche Gesetz — 113
  - 5.8 Ionisierung einatomiger idealer Gase — 115
  - 5.9 Festkörper: Wärmekapazität des Gitters — 118
    - 5.9.1 Normalschwingungen — 119
    - 5.9.2 Regel von Dulong-Petit — 119
    - 5.9.3 Das Verhalten von  $C_V$  für  $T \rightarrow 0$  — 120
    - 5.9.4 Das Debye-Modell — 122
    - 5.9.5 Das Einstein-Modell und optische Phononen — 123

5.9.6	Vergleich mit dem Experiment — 124
5.9.7	Bemerkungen zur freien Energie und freien Enthalpie des Festkörpers — 125
5.10	Ideale Spinsysteme: Paramagnetismus — 126
5.10.1	Die Magnetisierung — 126
5.10.2	Magnetische Momente von Ionen und Atomen — 128
5.11	Adiabatische Entmagnetisierung — 129
5.11.1	Die freie Energie der paramagnetischen Ionen im Kristall — 129
5.11.2	Das Prinzip der Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung — 130
5.11.3	Thermodynamik der adiabatischen Entmagnetisierung — 131
5.11.4	Eine Näherung für $\chi(T, \mathcal{H})$ und $C_H(T, 0)$ — 131
5.11.5	Beispiele für paramagnetische Salze — 132
5.12	Ideale Quantengase — 133
5.12.1	Die Besetzungszahlen — 133
5.12.2	Der Limes kleiner Besetzungszahlen — 136
5.12.3	Illustration des Unterschieds zwischen den Statistiken — 137
5.12.4	Das freie ideale Quantengas — 137
5.12.5	Das ultrarelativistische ideale Quantengas — 140
5.13	Das Photonengas — 141
5.13.1	Das chemische Potential der Photonen — 141
5.13.2	Die Abzählung der Zustände — 141
5.13.3	Die Strahlungsgesetze der Hohlraumstrahlung — 142
5.13.4	Der Strahlungsdruck — 143
5.13.5	Strahlungsleistung eines Hohlraums — 143
5.13.6	Freie Energie und Entropie des Photonengases — 144
5.14	Ideales Bose-Gas — 144
5.14.1	Anzahl der Teilchen und Bose-Einstein-Kondensation — 144
5.14.2	Die Energie des idealen Bose-Gases — 146
5.14.3	Die Wärmekapazität — 147
5.14.4	Bemerkungen zur Realisierung der Bose-Einstein-Kondensation im Experiment — 148
5.15	Ideales Fermi-Gas — 149
5.15.1	Zustandsdichte und Energiedichte — 149
5.15.2	Der Limes $T \rightarrow 0$ — 150
5.15.3	Entwicklung der Energiedichte nach der Temperatur — 152
5.15.4	Die Wärmekapazität des idealen Fermi-Gases — 155
5.16	Magnetische Eigenschaften des idealen Fermi-Gases — 155
5.16.1	Der Pauli-Paramagnetismus — 156
5.16.2	Magnetfelder und thermodynamische Potentiale — 157
5.16.3	Das großkanonische Potential des idealen Fermi-Gases im Magnetfeld — 158
5.16.4	Der Landau-Diamagnetismus — 160

- 5.16.5 Der de Haas-van Alphen-Effekt — 162
- 5.17 Para- und Diamagnetismus im Festkörper — 163
- 5.17.1 Nichtmetall — 163
- 5.17.2 Metall — 165
- 5.18 Übungsaufgaben — 167
  
- 6 Systeme von Teilchen mit Wechselwirkung — 170**
  - 6.1 Reales Gas: Cluster- und Virialentwicklung — 170
    - 6.1.1 Die Clusterentwicklung — 170
    - 6.1.2 Die Virialentwicklung — 171
    - 6.1.3 Der Koeffizient  $B_2(T)$  — 172
  - 6.2 Die van der Waals-Gleichung — 172
    - 6.2.1 Virialentwicklung und van der Waals-Gleichung — 172
    - 6.2.2 Alternative Herleitung der van der Waals-Gleichung — 173
  - 6.3 Der Phasenübergang gasförmig – flüssig — 175
    - 6.3.1 Der kritische Punkt — 175
    - 6.3.2 Die Druckkurve für Temperaturen unterhalb von  $T_c$  — 176
    - 6.3.3 Der Phasenübergang — 179
  - 6.4 Oberflächeneffekte bei der Dampfkondensation — 180
    - 6.4.1 Das Systems Flüssigkeitstropfen – Dampf — 180
    - 6.4.2 Die Kelvin-Gleichung — 183
    - 6.4.3 Der Druck in einer Dampfblase — 185
    - 6.4.4 Die Stabilität von Tropfen, in denen Salze gelöst sind — 187
  - 6.5 Zustandsgleichung eines Plasmas mit niedriger Dichte — 190
    - 6.5.1 Der Debye-Radius — 190
    - 6.5.2 Kalorische und thermische Zustandsgleichung des Plasmas — 192
  - 6.6 Der Ferromagnetismus — 194
    - 6.6.1 Die Austauschwechselwirkung — 194
    - 6.6.2 Das Heisenberg-Modell — 196
    - 6.6.3 Die Weiss'sche Näherung — 196
    - 6.6.4 Die Magnetisierung in der Weiss'schen Näherung — 197
    - 6.6.5 Ferromagnetische Materialien und Effekte — 199
    - 6.6.6 Die Grenzen der Weiss'schen Näherung — 200
  - 6.7 Übungsaufgaben — 201
  
- 7 Annäherung an das Gleichgewicht — 202**
  - 7.1 Mastergleichungen — 202
    - 7.1.1 Bilanzgleichungen — 202
    - 7.1.2 Magnetische Resonanz — 207
  - 7.2 Die Boltzmann-Gleichung — 208
    - 7.2.1 Vorbetrachtungen — 208
    - 7.2.2 Herleitung der Boltzmann-Gleichung — 210

7.2.3	Der Gleichgewichtszustand eines verdünnten Gases —	212
7.2.4	Lokale Gleichgewichtsverteilung —	215
7.2.5	Die Relaxationszeitnäherung —	215
7.3	Transportphänomene in Metallen —	216
7.3.1	Annahmen und Voraussetzungen —	216
7.3.2	Transportphänomene —	217
7.3.3	Physikalische Interpretation der Resultate —	219
7.4	Temperaturausgleich —	220
7.4.1	Die Wärmeleitungsgleichung —	220
7.4.2	Einfache Anwendungen der Wärmeleitungsgleichung —	221
7.5	Übungsaufgaben —	222

Lösungen der Übungsaufgaben — 223

Tabellen — 245

Literatur — 247

Stichwortverzeichnis — 249