

# Springer-Lehrbuch

---

**Springer**

*Berlin*

*Heidelberg*

*New York*

*Barcelona*

*Budapest*

*Hongkong*

*London*

*Mailand*

*Paris*

*Santa Clara*

*Singapur*

*Tokio*

Wilhelm Brenig

---

# Statistische Theorie der Wärme

Gleichgewichtsphänomene

Vierte, neubearbeitete und erweiterte Auflage  
mit 104 Abbildungen, 19 Tabellen, 91 Aufgaben  
und zahlreichen Beispielen



Springer

Professor Dr. Wilhelm Brenig  
Technische Universität München  
Physik Department  
James-Franck-Straße  
D-85748 Garching  
e-mail: brenig@physik.tu-muenchen.de

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Brenig, Wilhelm:**

Statistische Theorie der Wärme / Wilhelm Brenig. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ;  
Budapest ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Santa Clara ; Singapur ; Tokio : Springer.

Gleichgewichtsphänomene : mit 19 Tabellen. – 4. erw. Aufl. – 1996  
(Springer-Lehrbuch)

ISBN-13:978-3-540-60345-0

ISBN-13:978-3-540-60345-0

e-ISBN-13:978-3-642-61038-7

DOI: 10.1007/978-3-642-61038-7

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 Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung 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 geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1975, 1982, 1992, 1996

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 dürften.

Datenkonvertierung durch Springer-Verlag

Herstellerin: P. Treiber

Einbandgestaltung: Design & Production, Heidelberg

SPIN: 10514920 56/3144 - 5 4 3 2 1 0 - Gedruckt auf säurefreiem Papier

## Vorwort zur vierten Auflage

Gegenüber der dritten Auflage wurden etwa dreißig Prozent des Textes umgearbeitet oder neugeschrieben. Insbesondere die mehr abstrakten Kapitel des ersten Teiles über die Grundlagen der Statistischen Mechanik wurden mit Beispielen angereichert. Bei der Formulierung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik wurden die Unterschiede zwischen „inneren“ und „äußeren“ Variablen noch deutlicher als bisher herausgearbeitet.

Aus aktuellem Anlaß wurden zwei neue Abschnitte über Bose-Einstein-Kondensation und Laserkühlung aufgenommen.

Meinem Kollegen und Freund Peter Vogel danke ich für viele Verbesserungsvorschläge, Herrn Dr. Berndt Gammel für die Anfertigung einer Reihe neuer Abbildungen und für seine Hilfe beim Korrekturlesen.

Dem Springer-Verlag danke ich für die angenehme und flexible Zusammenarbeit.

München, Januar 1996

*W. Brenig*

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Teil I</b>	<b>Statistische Gesamtheiten und das thermische Gleichgewicht</b>	<b>1</b>
<hr/>		
1.	Einleitung **	3
	Literatur	6
2.	Statistische und thermodynamische Physik	7
2.1	Statistische Gesamtheiten	7
2.2	Kanonische Gesamtheiten, Entropie und Temperatur	10
2.2.1	Zustandssumme und Entropie des idealen Gases *	17
	Aufgaben	18
	Literatur	19
	Ergänzende Literatur	19
3.	Grundbegriffe der Statistik	21
3.1	Klassische Statistik	21
3.2	Quantenstatistik	25
	Aufgaben	28
	Literatur	29
4.	Die Schwankungen makroskopischer additiver Größen	31
	Aufgaben	33
	Literatur	33
5.	Das thermische Gleichgewicht	35
	Ergänzende Literatur	37
6.	Statistische Gesamtheiten des Gleichgewichts	39
6.1	Die mikrokanonische Gesamtheit	40
6.2	Die kanonische Gesamtheit	45
6.3	Die großkanonische Gesamtheit	50
6.4	Systeme mit äußeren Kräften und die verallgemeinerte großkanonische Gesamtheit	51

---

(\*),(\*\*) Kapitel oder Abschnitte mit (\*) betreffen pädagogische Erläuterungen anhand von einfachen Beispielen, solche mit (\*\*) geben zusätzliche Hintergrundinformation, z. B. historische Bemerkungen oder Querverbindungen zu anderen Gebieten der Physik.

Aufgaben . . . . .	53
Ergänzende Literatur . . . . .	54
7. Die Maxwell-Boltzmann-Verteilung *	55
7.1 Barometrische Höhenformel . . . . .	55
7.2 Maxwell-Verteilung . . . . .	56
7.3 Druck und mittlere kinetische Energie . . . . .	57
Aufgaben . . . . .	58
Literatur . . . . .	59
Ergänzende Literatur . . . . .	59
8. Die kanonische Verteilung *	61
8.1 Klassische Statistik . . . . .	61
8.2 Quantenstatistik . . . . .	62
Aufgaben . . . . .	63
9. Thermodynamische Mittelwerte . . . . .	65
Aufgaben . . . . .	69
10. Entropie und Wahrscheinlichkeit . . . . .	71
10.1 Additivität, Extensivität . . . . .	72
10.2 Entropie und partielle Gleichgewichte . . . . .	73
10.3 Extremaleigenschaften . . . . .	76
Aufgaben . . . . .	83
Ergänzende Literatur . . . . .	83
11. Entropie und Information ** . . . . .	85
Literatur . . . . .	87
12. Mechanische Zustandsgrößen in der Thermodynamik . . . . .	89
Aufgaben . . . . .	91
Ergänzende Literatur . . . . .	91
13. Elektromagnetische Zustandsgrößen in der Thermodynamik . . . . .	93
Aufgaben . . . . .	96
Ergänzende Literatur . . . . .	96
14. Thermische Fluktuationen . . . . .	97
Aufgaben . . . . .	102
<hr/>	
<b>Teil II Gleichgewichtsthermodynamik . . . . .</b>	<b>103</b>
<hr/>	
15. Hauptsätze der Thermodynamik . . . . .	105
15.1 Wärmemenge . . . . .	105
15.2 Temperatur . . . . .	106
15.3 Der I. Hauptsatz . . . . .	107

15.4 Der II. Hauptsatz . . . . .	113
Aufgaben . . . . .	119
Literatur . . . . .	120
16. Carnot-Prozesse und thermodynamische Temperaturskala . . . . .	121
Aufgaben . . . . .	124
Literatur . . . . .	124
17. Thermodynamische Relationen . . . . .	125
Aufgaben . . . . .	129
18. Homogene Systeme . . . . .	131
Aufgabe . . . . .	135
Literatur . . . . .	135
19. Gleichgewicht in inhomogenen Feldern . . . . .	137
Aufgabe . . . . .	138
20. Stoffaustauschgleichgewichte . . . . .	139
20.1 Phasengleichgewichte . . . . .	139
20.2 Der osmotische Druck . . . . .	141
20.3 Gleichgewichtsverschiebungen in Lösungen . . . . .	142
20.4 Chemische Gleichgewichte . . . . .	145
Aufgaben . . . . .	148
21. Umwandlungswärmen und Clausius-Clapeyron-Gleichung . . . . .	149
21.1 Latente Wärmen bei Phasenumwandlungen . . . . .	149
21.2 Chemische Reaktionswärmen . . . . .	150
Aufgaben . . . . .	151
<hr/>	
<b>Teil III Berechnung thermodynamischer Funktionen . . . . .</b>	<b>153</b>
<hr/>	
22. Näherungsmethoden . . . . .	155
Ergänzende Literatur . . . . .	156
23. Die quasiklassische Näherung . . . . .	157
Aufgaben . . . . .	159
Literatur . . . . .	159
24. Gleichverteilungssatz und Virialsatz . . . . .	161
Aufgaben . . . . .	164
Literatur . . . . .	164
Ergänzende Literatur . . . . .	164
25. Quantenkorrekturen zur klassischen Statistik . . . . .	165



## X Inhaltsverzeichnis

26. Störungstheorie . . . . .	169
Aufgaben . . . . .	172
Ergänzende Literatur . . . . .	173
27. Verdünnte Gase und Lösungen . . . . .	175
28. Einatomige klassische ideale Gase . . . . .	179
Aufgaben . . . . .	181
Literatur . . . . .	182
29. Zweiatomige ideale Gase . . . . .	183
Aufgabe . . . . .	186
30. Die Virialentwicklung . . . . .	187
Aufgaben . . . . .	191
Literatur . . . . .	192
Ergänzende Literatur . . . . .	192
31. Die van der Waals-Gleichung . . . . .	193
Aufgaben . . . . .	199
Literatur . . . . .	199
Ergänzende Literatur . . . . .	199
32. Thermodynamische Ähnlichkeit ** . . . . .	201
Literatur . . . . .	203
Ergänzende Literatur . . . . .	203
33. Molekularfeldnäherung für inhomogene Systeme . . . . .	205
33.1 Die freie Energie im inhomogenen Feld . . . . .	205
33.2 Heuristische Herleitung der Dichtefluktuationen im Rahmen der Molekularfeldnäherung * . . . . .	207
33.3 Kompressibilität und langreichweitige Dichteschwankungen . . . . .	209
Aufgabe . . . . .	212
Literatur . . . . .	212
34. Systeme mit geladenen Teilchen . . . . .	213
Literatur . . . . .	216
35. Dichteschwankungen und Lichtstreuung ** . . . . .	217
Aufgabe . . . . .	219
36. Spinsysteme . . . . .	221
Aufgaben . . . . .	225
Literatur . . . . .	225
Ergänzende Literatur . . . . .	225

37. Quasiteilchen . . . . .	227
37.1 Elementare Anregungen in kondensierter Materie ** . . . . .	227
37.2 Quasifermionen . . . . .	229
37.3 Quasibosonen . . . . .	232
37.4 Bose-Kondensation . . . . .	233
37.5 Die spezifische Wärme bei tiefen Temperaturen . . . . .	235
Aufgabe . . . . .	236
Literatur . . . . .	236
38. Photonen im Strahlungshohlraum . . . . .	237
Aufgaben . . . . .	241
Literatur . . . . .	242
39. Phononen in festen Körpern . . . . .	243
Aufgaben . . . . .	249
40. Phononen und Rotonen im flüssigen He II . . . . .	251
Aufgaben . . . . .	256
Literatur . . . . .	256
Ergänzende Literatur . . . . .	256
41. Fermionen bei tiefen Temperaturen . . . . .	257
41.1 Normale Fermi-Flüssigkeiten . . . . .	257
41.2 Supraleiter . . . . .	262
Aufgaben . . . . .	264
Literatur . . . . .	265
Ergänzende Literatur . . . . .	265
42. Ferromagnetische Magnonen bei tiefen Temperaturen . . . . .	267
Aufgabe . . . . .	269
Ergänzende Literatur . . . . .	270
43. Phasenübergänge . . . . .	271
44. Feldtheorie kritischer Phänomene . . . . .	275
44.1 Molekularfeldtheorie homogener Systeme * . . . . .	275
44.2 Die freie Energie im kritischen Bereich . . . . .	277
44.3 Molekularfeldtheorie kritischer Phänomene . . . . .	278
44.4 Mehrkomponentige Felder . . . . .	281
Aufgaben . . . . .	283
Literatur . . . . .	283
45. Fluktuationen des Ordnungsparameterfeldes . . . . .	285
45.1 Fluktuationsbeiträge zur Suszeptibilität . . . . .	286
45.2 Fluktuationsbeiträge zur spezifischen Wärme . . . . .	288
Aufgaben . . . . .	290

Literatur . . . . .	291
Ergänzende Literatur . . . . .	291
46. Skaleninvarianz und kritische Exponenten . . . . .	293
Literatur . . . . .	300
47. Fluktuationsbeiträge zur freien Energie . . . . .	301
47.1 Die Terme erster Ordnung . . . . .	303
47.2 Die Terme zweiter Ordnung . . . . .	304
Aufgaben . . . . .	307
Literatur . . . . .	308
48. Berechnung kritischer Exponenten . . . . .	309
48.1 Der Exponent $\nu$ . . . . .	310
48.2 Der Exponent $\eta$ . . . . .	311
Literatur . . . . .	314
Ergänzende Literatur . . . . .	314
49. Die Renormierungsgruppe . . . . .	315
Aufgabe . . . . .	318
Literatur . . . . .	318
Ergänzende Literatur . . . . .	318
50. Renormierungsgruppen-Transformation im Impulsraum . . . . .	319
Aufgabe . . . . .	322
Literatur . . . . .	322
Ergänzende Literatur . . . . .	322
51. Renormierungsgruppen-Transformation im Ortsraum * . . . . .	323
Aufgabe . . . . .	325
Literatur . . . . .	325
Ergänzende Literatur . . . . .	326
A. Erzeugung tiefer Temperaturen . . . . .	327
A.1 Adiabatische Entspannung . . . . .	327
A.2 Das Gegenstromprinzip . . . . .	329
A.3 Gedrosselte Entspannung (Joule-Thomson-Effekt) . . . . .	330
Aufgabe . . . . .	331
A.4 Adiabatische Entmagnetisierung . . . . .	331
A.5 $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischung . . . . .	332
A.6 $^3\text{He}$ -Kompression (Pomerantschuk-Effekt) . . . . .	334
A.7 Laserkühlung . . . . .	335
Literatur . . . . .	337
Sachverzeichnis . . . . .	339