

---

# Statistische Physik

---

Torsten Fließbach

# Statistische Physik

Lehrbuch zur Theoretischen Physik IV

6. Auflage

 Springer Spektrum

Torsten Fließbach  
Universität Siegen  
Siegen, Deutschland

ISBN 978-3-662-58032-5      ISBN 978-3-662-58033-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58033-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Die erste Auflage dieses Buchs erschien 1993 im B.I.-Wissenschaftsverlag (Bibliographischen Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim).

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 1993, 1995, 1999, 2007, 2010, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Lisa Edelhäuser

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

# Vorwort

Das vorliegende Buch ist Teil einer Vorlesungsausarbeitung [1, 2, 3, 4] des Zyklus Theoretische Physik I bis IV. Es gibt den Stoff meiner Vorlesung Theoretische Physik IV über die *Statistische Physik* wieder. Diese Vorlesung für Physikstudenten wird häufig im 6. Semester (Bachelor- oder Diplomstudiengang) angeboten, gelegentlich aber auch erst im Masterstudium.

Die Darstellung bewegt sich auf dem durchschnittlichen Niveau einer Kursvorlesung in Theoretischer Physik. Der Zugang ist eher intuitiv anstelle von deduktiv; formale Ableitungen und Beweise werden ohne besondere mathematische Akribie durchgeführt.

In enger Anlehnung an den Text, teilweise aber auch zu dessen Fortführung und Ergänzung werden über 100 Übungsaufgaben gestellt. Diese Aufgaben erfüllen ihren Zweck nur dann, wenn sie vom Studenten möglichst eigenständig bearbeitet werden. Diese Arbeit sollte unbedingt vor der Lektüre der Musterlösungen liegen, die im *Arbeitsbuch zur Theoretischen Physik* [5] angeboten werden. Neben den Lösungen enthält das Arbeitsbuch ein kompaktes Repetitorium des Stoffs der Lehrbücher [1, 2, 3, 4].

Der Umfang des vorliegenden Buchs geht etwas über den Stoff hinaus, der während eines Semesters in einem Physikstudium üblicherweise an deutschen Universitäten behandelt wird. Der Stoff ist in Kapitel gegliedert, die im Durchschnitt etwa einer Vorlesungsdoppelstunde entsprechen. Natürlich bauen verschiedene Kapitel aufeinander auf. Es wurde aber versucht, die einzelnen Kapitel so zu gestalten, dass sie jeweils möglichst abgeschlossen sind. Damit wird einerseits eine Auswahl von Kapiteln für einen bestimmten Kurs (etwa in einem Bachelor-Studiengang) erleichtert, in dem der Stoff stärker begrenzt werden soll. Zum anderen kann der Student leichter die Kapitel nachlesen, die für ihn von Interesse sind.

Es gibt viele gute Darstellungen der statistischen Physik, die sich für ein vertiefendes Studium eignen. Ich gebe hier nur einige wenige Bücher an, die ich selbst bevorzugt zu Rate gezogen habe und die gelegentlich im Text zitiert werden. Als Standardwerk sei auf die *Statistische Physik und Theorie der Wärme* von Reif [6] hingewiesen, die meine Einführung der Grundlagen wesentlich beeinflusst hat. Daneben sind mir die Bücher von Brenig [7], Becker [8] und Landau-Lifschitz [9] besonders gut vertraut.

Gegenüber der fünften Auflage dieses Buchs wurden in der vorliegenden sechsten Auflage zahlreiche kleinere Korrekturen vorgenommen. Bei João da Providência Jr. (Übersetzer der portugiesischen Ausgabe) und einigen Lesern früherer

Auflagen bedanke ich mich für wertvolle Hinweise. Fehlermeldungen, Bemerkungen und sonstige Hinweise sind jederzeit willkommen, etwa über den Kontaktlink auf meiner Homepage [www2.uni-siegen.de/~flieba/](http://www2.uni-siegen.de/~flieba/). Auf dieser Homepage finden sich auch eventuelle Korrekturlisten.

August 2018

Torsten Fließbach

## Literaturangaben

- [1] T. Fließbach, *Mechanik*, 7. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2015
- [2] T. Fließbach, *Elektrodynamik*, 6. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2012
- [3] T. Fließbach, *Quantenmechanik*, 6. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2018
- [4] T. Fließbach, *Statistische Physik*, 6. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2018 (dieses Buch)
- [5] T. Fließbach und H. Walliser, *Arbeitsbuch zur Theoretischen Physik – Repetitorium und Übungsbuch*, 3. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2012
- [6] F. Reif, *Statistische Physik und Theorie der Wärme*, 2. Auflage, de Gruyter-Verlag, Berlin 1985
- [7] W. Brenig, *Statistische Theorie der Wärme*, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin 2002
- [8] R. Becker, *Theorie der Wärme*, Springer Verlag, Berlin 1966
- [9] L. D. Landau, E. M. Lifschitz, *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Band V, *Statistische Physik*, 8. Auflage, Akademie-Verlag, Berlin 1987

# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>Einleitung</b>                                  | <b>1</b>   |
| <b>I Mathematische Statistik</b>                   | <b>3</b>   |
| 1 Wahrscheinlichkeit . . . . .                     | 3          |
| 2 Gesetz der großen Zahl . . . . .                 | 10         |
| 3 Normalverteilung . . . . .                       | 17         |
| 4 Zentraler Grenzwertsatz . . . . .                | 24         |
| <b>II Grundzüge der statistischen Physik</b>       | <b>31</b>  |
| 5 Grundlegendes Postulat . . . . .                 | 31         |
| 6 Zustandssumme des idealen Gases . . . . .        | 42         |
| 7 1. Hauptsatz . . . . .                           | 49         |
| 8 Quasistatischer Prozess . . . . .                | 55         |
| 9 Entropie und Temperatur . . . . .                | 66         |
| 10 Verallgemeinerte Kräfte . . . . .               | 76         |
| 11 2. und 3. Hauptsatz . . . . .                   | 83         |
| 12 Reversibilität . . . . .                        | 92         |
| 13 Statistische Physik und Thermodynamik . . . . . | 103        |
| 14 Messung makroskopischer Größen . . . . .        | 109        |
| <b>III Thermodynamik</b>                           | <b>119</b> |
| 15 Zustandsgrößen . . . . .                        | 119        |
| 16 Ideales Gas . . . . .                           | 127        |
| 17 Thermodynamische Potentiale . . . . .           | 135        |
| 18 Zustandsänderungen . . . . .                    | 144        |
| 19 Wärmekraftmaschinen . . . . .                   | 154        |
| 20 Chemisches Potenzial . . . . .                  | 165        |
| 21 Austausch von Teilchen . . . . .                | 171        |
| <b>IV Statistische Ensembles</b>                   | <b>185</b> |
| 22 Zustandssummen . . . . .                        | 185        |
| 23 Zugeordnete Potentiale . . . . .                | 194        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 24         | Klassische Systeme . . . . .             | 201        |
| 25         | Einatomiges ideales Gas . . . . .        | 213        |
| <b>V</b>   | <b>Spezielle Systeme</b>                 | <b>219</b> |
| 26         | Ideales Spinsystem . . . . .             | 219        |
| 27         | Zweiatomiges ideales Gas . . . . .       | 225        |
| 28         | Verdünntes klassisches Gas . . . . .     | 239        |
| 29         | Ideales Quantengas . . . . .             | 247        |
| 30         | Verdünntes Quantengas . . . . .          | 259        |
| 31         | Ideales Bosegas . . . . .                | 264        |
| 32         | Ideales Fermigas . . . . .               | 276        |
| 33         | Phononengas . . . . .                    | 287        |
| 34         | Photonengas . . . . .                    | 297        |
| <b>VI</b>  | <b>Phasenübergänge</b>                   | <b>309</b> |
| 35         | Klassifizierung . . . . .                | 309        |
| 36         | Ferromagnetismus . . . . .               | 319        |
| 37         | Van der Waals-Gas . . . . .              | 330        |
| 38         | Flüssiges Helium . . . . .               | 340        |
| 39         | Landau-Theorie . . . . .                 | 354        |
| 40         | Kritische Exponenten . . . . .           | 365        |
| <b>VII</b> | <b>Nichtgleichgewichts-Prozesse</b>      | <b>373</b> |
| 41         | Einstellung des Gleichgewichts . . . . . | 373        |
| 42         | Boltzmann-Gleichung . . . . .            | 378        |
| 43         | Kinetisches Gasmodell . . . . .          | 385        |
|            | <b>Register</b>                          | <b>401</b> |