

Springer-Lehrbuch

Für weitere Bände:

<http://www.springer.com/series/1183>

Klaus Stierstadt

Thermodynamik

Von der Mikrophysik zur Makrophysik

unter Mitwirkung von Günther Fischer

 Springer

Prof. Dr. Klaus Stierstadt
Universität München
Physik-Department
Schellingstr. 4
80799 München
Deutschland
Klaus.Stierstadt@physik.uni-muenchen.de

ISSN 0937-7433
ISBN 978-3-642-05097-8 e-ISBN 978-3-642-05098-5
DOI 10.1007/978-3-642-05098-5
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

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.

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.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Thermodynamik ist die Lehre von den Verwandlungen der Energie. Das Leben und die Technik beruhen auf solchen Umwandlungen der Energie von einer ihrer Erscheinungsformen in eine andere. Wenn wir das Leben und die Technik verstehen wollen, müssen wir Thermodynamik können. Sie ist aber sowohl bei Studenten als auch bei manchen Professoren unbeliebt und wird als langweilig und schwierig angesehen. Woher kommt das?

Schwierig ist die Thermodynamik aus mehreren Gründen: Zum einen kommen thermodynamische Eigenschaften wie Temperatur, Druck, Wärme, Entropie usw. nur durch das Zusammenwirken sehr vieler Atome oder Moleküle zustande. Die einzelnen dieser Teilchen haben solche Eigenschaften nicht. Man muss sie daher auf die anderen, intrinsischen Eigenschaften der Atome und Moleküle zurückführen. Das geht nicht ohne ein gewisses Maß an Abstraktion und Rechenarbeit. Eine weitere Schwierigkeit bei der Vermittlung der Thermodynamik besteht in der Notwendigkeit, viele Idealisierungen durchzuführen: Ein thermodynamisches Gleichgewicht, ein abgeschlossenes System, quasistatische und reversible Prozesse, stationäre Strömungen, ein thermodynamischer Limes usw. – all dieses sind nur Annäherungen an die Wirklichkeit. Solche Idealisierungen von Systemen, Zuständen und Prozessen sind aber notwendig, um überhaupt etwas Brauchbares ausrechnen zu können. Der tiefere Grund dafür liegt in der Notwendigkeit, gleichzeitig sehr viele Teilchen behandeln zu müssen. Während in der klassischen Mechanik schon das Dreikörperproblem nicht mehr lösbar ist, haben wir es in der Thermodynamik fast immer mit der Größenordnung von 10^{23} Körpern zu tun. Das sind sehr, sehr viele, und es erschwert den Überblick. Die beiden angesprochenen Schwierigkeiten – die mikroskopische Begründung makroskopischer Eigenschaften und die Idealisierungen der Vielteilchenphysik – sind die Hauptursachen für die Unbeliebtheit der Thermodynamik, sowohl bei Studenten als auch bei manchen Dozenten.

Langweilig wird die Thermodynamik empfunden, weil sie aus heute unverständlichen Gründen oft zu früh im Lehrplan des Studiums auftaucht. Im zweiten Semester sind nämlich die Voraussetzungen zur Bewältigung der gerade genannten Schwierigkeiten noch nicht vorhanden. Und dann muss man sich auf die mehr oder weniger qualitative Behandlung stark vereinfachter Phänomene und Prozesse beschränken: Auf das ideale Gas, auf idealisierte Maschinen, auf ideale Magnete usw. Das Ganze umfasst dann nur einen etwas erweiterten Schulstoff auf der Wissens-

basis des 19. Jahrhunderts. Im Berkeley–Kurs steht die Thermodynamik daher aus gutem Grund erst im 5. Semester am Ende des Grundstudiums.

Dies alles ist sehr schade, denn die Thermodynamik ist dasjenige Teilgebiet der Physik, das im wahrsten Sinn des Wortes universelle Gültigkeit besitzt. Ihre Aussagen sind von so allgemeiner Natur, dass sie für alle denkbaren Systeme vieler Teilchen gelten, seien es Elementarteilchen, Atomkerne, Gase, Flüssigkeiten, Kristalle, lebende Zellen und Populationen, Sterne oder Galaxien. Ein Verständnis der Eigenschaften solcher Systeme ist ohne thermodynamisches Wissen unvorstellbar. Insbesondere braucht man die Thermodynamik für alle Energieumwandlungs–Prozesse in Physik, Chemie, Biologie, Technik, Medizin, Meteorologie und Astrophysik. Dazu gehören auch die chemische Verfahrenstechnik und das „Energieproblem“ der Menschheit: Ohne Thermodynamik sieht unsere Zukunft recht finster aus! Schließlich sind die thermodynamischen Aussagen von so allgemeiner Art, dass sie wohl niemals ihre Gültigkeit verlieren werden. Neue physikalische Einsichten und Entdeckungen werden daran nichts ändern. Sie werden immer in das Begriffssystem der Thermodynamik einzuordnen sein. Diese kühne Behauptung beruht auf folgender Tatsache: Die Thermodynamik enthält oder liefert kein neues oder spezielles Naturgesetz. Sie beschreibt vielmehr die Möglichkeiten und Grenzen der Eigenschaften von Materie und Energie, welche durch die bekannten Naturgesetze bestimmt sind (nach H. B. Callen, „Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics“, Wiley, New York 1985).

Wie also kann und sollte man Thermodynamik lernen, ohne sie als zu schwierig oder langweilig zu empfinden? Dazu verhilft ihre moderne Darstellung in einigen ausgezeichneten neueren Lehrbüchern. Deren Charakteristikum ist es, dass die thermodynamischen Begriffe, Temperatur, Wärme und Entropie von Anfang an atomistisch bzw. mikroskopisch begründet werden. Das heißt, sie werden aus den Eigenschaften und dem Zusammenwirken sehr vieler Teilchen erklärt, und zwar nicht nur am idealen Gas. Auf diesem Gebiet hat die Physikdidaktik in den vergangenen Jahrzehnten vorbildliche Arbeit geleistet. Heutzutage wird wohl kein Autor eines einführenden Lehrbuchs mehr einen anderen Weg beschreiten und etwa dem makroskopischen Empirismus des 19. Jahrhunderts huldigen. Schließlich befinden wir uns im Jahr 130-plus nach Boltzmann. Näheres dazu finden Sie in den didaktischen Anmerkungen im Anhang B.

Der Stoff ist natürlich auch in diesem Buch nach den heute als sinnvoll erkannten Gesichtspunkten entwickelt und geordnet. Die ersten sechs Kapitel führen in die Grundlagen der thermodynamischen Begriffe ein, von der Erklärung der Temperatur bis zur Boltzmann–Verteilung. Dann folgen zwei Kapitel zur Technik und Problematik der Energieumwandlung. Schließlich werden die Eigenschaften der Stoffe und deren Temperaturabhängigkeit in den Kap. 9, 10 und 11 behandelt: Response, Transport und Wechselwirkungen in realen Systemen. Den Abschluss bilden zwei Kapitel, die etwas tiefer in die Thermodynamik hineinführen: Potenziale und Schwankungen. Dieses Buch enthält somit die wichtigsten Grundlagen und Anwendungen der Thermodynamik. Weiterführende Themen bleiben vertieften Darstellungen vorbehalten, wie zum Beispiel Mehrstoffsysteme, die Statistik von Ensembles, die Stoßtheorie, Quantengase, Photonen und Phononen sowie die

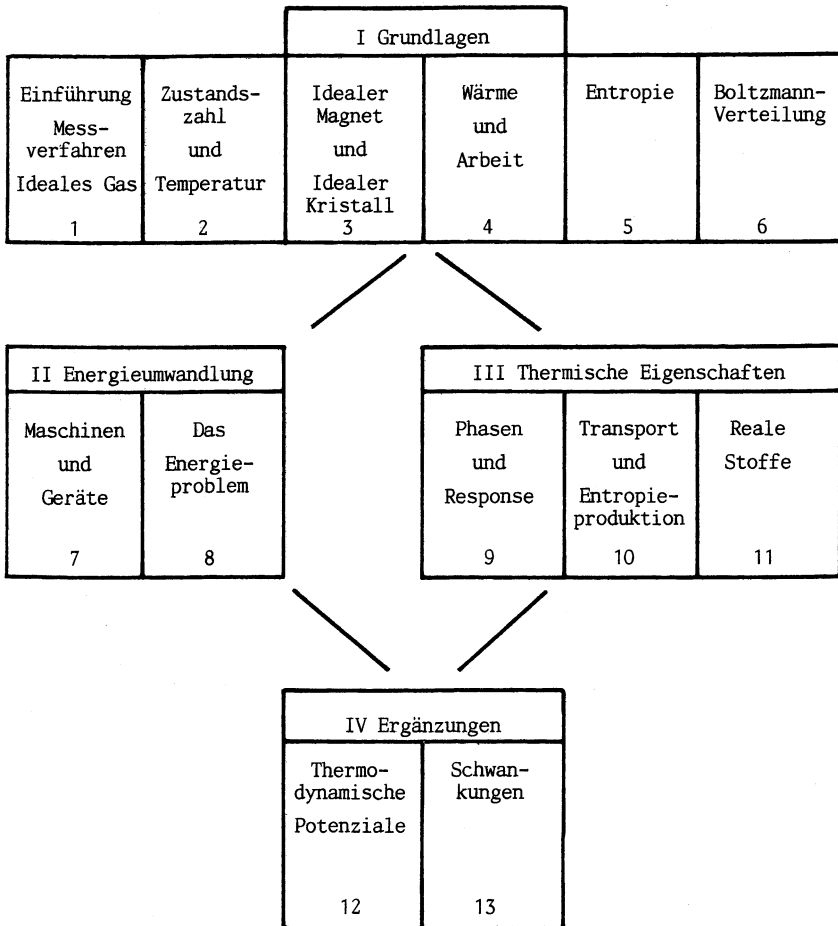


Abb. 1 Gliederung des Stoffes

chemische Thermodynamik. Bei den technischen Anwendungen haben wir einige moderne Beispiele besonders herausgestellt, so etwa die Direktumwandlung von Energie in Brennstoff- und Solarzellen, den Wärmeübergang in Fenstern und Wänden, moderne Wärmekraftwerke usw. In den Ergänzungskapiteln 12 und 13 besprechen wir dann noch zwei wichtige Teilaspekte unseres Gebiets: die für praktische Zwecke äußerst nützlichen thermodynamischen Potenziale und ihre Anwendungen sowie das aktuelle Gebiet der Fluktuationen in kleinen Systemen, das für die Nanotechnologie große Bedeutung erlangen wird.

Formales: Die Lebensdaten der Wissenschaftler sind nur bei ihrer erstmaligen Erwähnung angegeben. Ihre Nationalität wurde weggelassen, da sie oft mehrmals gewechselt hat. Abschnitte, die mit einem Sternchen * versehen sind, können überschlagen werden, weil sie für das Folgende nicht so wichtig sind. Die Nummern

wiederholt freigestellter Gleichungen werden in doppelte runde Klammern gesetzt. Besonders wichtige Gleichungen sind grau unterlegt. In eckige Klammern gesetzte Größen $[x]$ bezeichnen ihre Maßeinheit.

München, Deutschland
2010

Klaus Stierstadt

Inhaltsverzeichnis

Teil I Grundlagen

1	Einführung	3
1.1	Wozu Wärmelehre?	4
1.1.1	Was ist Wärme und was ist Temperatur?	4
1.1.2	Die Temperaturabhängigkeit der Stoffeigenschaften	6
1.1.3	Energieumwandlung	8
1.1.4	Thermodynamik und statistische Physik	10
1.2	Messmethoden für Temperatur und Wärmeenergie	11
1.2.1	Temperaturmessung und Thermometer	11
1.2.2	Temperaturskalen	15
1.2.3	Wärmemessung und Kalorimeter	19
1.2.4	Thermisches Gleichgewicht und „nullter Hauptsatz“	22
1.3	Ein einfaches System: das ideale Gas	24
1.3.1	Zustandsgleichung und Zustandsfläche	24
1.3.2	Das ideale Gasmodell	27
1.3.3	Messmethoden für atomare Größen	32
1.3.4	Die Suszeptibilitäten idealer Gase	36
1.3.5	Mehratomige ideale Gase	40
2	Was ist Temperatur?	51
2.1	Anknüpfung an die Erfahrung	52
2.2	Die Definition der Temperatur	53
2.3	Die Energiezustände eines klassischen Teilchens	60
2.4	Die Zustandszahl für ein ideales Gas	68
2.5	Vergleich zwischen berechneter und gemessener Temperatur	74
2.6	Analyse der Zustandsfunktion $\Omega(U)$ eines idealen Gases*	76
Anhang	Quantenmechanische Herleitung der Zustandsfunktion $\Omega(U)$ eines idealen Gases	82

3	Zwei interessante Modellsysteme: Idealer Paramagnet und idealer Kristall	93
3.1	Idealer Paramagnet („Spinsystem“)	93
3.1.1	Das Modell	93
3.1.2	Zustandszahl, Temperatur und magnetische Energie	96
3.1.3	Die Magnetisierung	99
3.1.4	Die Spintemperatur*	101
3.2	Idealer Kristall („Einstein–Kristall“)	104
3.2.1	Das Modell	104
3.2.2	Zustandszahl, Temperatur und Kristallenergie	105
3.2.3	Die Wärmekapazität	108
3.3	Unterschiede der drei behandelten Modellsysteme	109
4	Erster Hauptsatz der Thermodynamik, Wärme und Arbeit	113
4.1	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	114
4.1.1	Erster Hauptsatz und Energiebilanz	114
4.1.2	Ideales Gas	117
4.1.3	Idealer Paramagnet	120
4.1.4	Idealer Kristall	122
4.2	Der Unterschied zwischen Wärme und Arbeit	123
4.3	Quasistatische Zustandsänderungen	128
5	Die Entropie	133
5.1	Der Entropiebegriff (Überblick)	134
5.2	Messung und Berechnung der Entropie	139
5.2.1	Vergleich der Entropiebeziehungen von Clausius und Boltzmann	139
5.2.2	Experimentelle Bestimmung der Entropie	140
5.2.3	Berechnung der Entropie	143
5.3	Reversibilität	145
5.4	Beispiele zur Entropieberechnung	152
5.5	Mischungsentropie	157
5.6	Die Temperaturabhängigkeit und allgemeiner Nutzen der Entropie	159
5.7	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	162
5.7.1	Die verschiedenen Formen des zweiten Hauptsatzes	162
5.7.2	Zweiter Hauptsatz und Grundannahme	165
5.7.3	Zweiter Hauptsatz als Naturgesetz oder als Wahrscheinlichkeitsaussage?	166
5.7.4	Maxwells Dämon*	167
5.8	Der dritte Hauptsatz der Thermodynamik	170
5.8.1	Die Entropie für $T \rightarrow 0$	170
5.8.2	Die Unerreichbarkeit von $T = 0$	173
5.9	Entropie und Information	175
Anhang	Die Entropieproduktion eines elektrischen Netzwerks*	181

6	Wechselwirkung zwischen Systemen und Boltzmann-Verteilung	187
6.1	Wechselwirkende Systeme ähnlicher Größe	188
6.2	Wechselwirkende Systeme von sehr verschiedener Größe und die Boltzmann-Verteilung	191
6.3	Der schwebende Guru*	197
6.4	Teilchen im Gravitationsfeld und barometrische Höhenformel	199
6.5	Die Temperaturabhängigkeit angeregter Zustände in Atomen	201
6.6	Idealer Paramagnet	203
6.7	Die Maxwell-Verteilung der Geschwindigkeiten von Gasmolekülen	204
6.8	Sternatmosphären	207
6.9	Der Gleichverteilungssatz der Energie	208

Teil II Energieumwandlung

7	Geräte und Maschinen zur Energieumwandlung	215
7.1	Übersicht über die Methoden der Energieumwandlung	216
7.2	Wärme-Kraft-Maschinen und Kühlmaschinen	219
7.2.1	Gemeinsame Merkmale solcher Maschinen, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor	219
7.2.2	Der Heißluftmotor	226
7.2.3	Der Carnot-Prozess	234
7.2.4	Verbrennungsmotoren	240
7.2.5	Dampfmaschinen	246
7.2.6	Turbinen	249
7.2.7	Kühlmaschinen	252
7.3	Kreisprozesse und reale Maschinen	256
7.3.1	Zustandsänderungen und Kreisprozesse	256
7.3.2	Wirkungsgrade realer Maschinen	259
7.3.3	Optimierung von Maschinen	265
7.3.4	Exergie und Anergie	271
7.4	Direktumwandlung von Energie	273
7.4.1	Die Brennstoffzelle	273
7.4.2	Die Solarzelle	277
8	Das Energieproblem	287
8.1	Der Energiebedarf	288
8.2	Die Deckung des Energiebedarfs und die Entropieproduktion	291
8.3	Die Vorräte	295
8.4	Die kurzfristige Lösung	298
8.5	Schädliche Nebenwirkungen der Energieumwandlung	299
8.5.1	Der Treibhauseffekt	299
8.5.2	Der „Atom Müll“	307
8.6	„Unerschöpfliche“ Energiequellen	312

8.7	Noch nicht funktionierende und utopische Energiequellen	316
8.8	Energieproduktion und Thermodynamik der Sonne	320
8.8.1	Beobachtungsdaten und Struktur der Sonne	321
8.8.2	Die Entstehung der Sonne	321
8.8.3	Die Energieproduktion der Sonne	324
8.8.4	Der Energietransport in der Sonne	325
8.8.5	Die Entropieproduktion der Sonne	327
8.8.6	Die Energiebilanz der Sonne	327
8.8.7	Die Wärmekapazität der Sonne	330
8.8.8	Die Zukunft der Sonne	331

Teil III Thermische Eigenschaften der Stoffe

9	Phasen und Gleichgewichtseigenschaften reiner Stoffe	337
9.1	Die Erscheinungsformen der kondensierten Materie	338
9.1.1	Charakterisierung von Phasen	338
9.1.2	Existenzbedingungen von Phasen	338
9.1.3	Wege in der Zustandsfläche	342
9.1.4	Zustandsdiagramme verschiedener Stoffe	345
9.1.5	Der Ordnungsparameter und die Merkmale von Phasen	347
9.2	Phasenumwandlungen	350
9.2.1	Die Umwandelungsenthalpie	350
9.2.2	Sublimations-, Schmelz- und Siedekurven	353
9.2.3	Verschiedene Arten von Phasenumwandlungen	356
9.2.4	Die Universalität an kritischen Punkten	359
9.2.5	Kritische Fluktuationen	360
9.3	Response-Eigenschaften	363
9.3.1	Klassifikation von Response-Größen	363
9.3.2	Beziehungen zwischen Response-Koeffizienten*	370
9.3.3	Die Temperaturabhängigkeit der Stoffeigenschaften*	375
10	Transportprozesse	383
10.1	Überblick über die Transportprozesse	384
10.2	Die freie Weglänge von Molekülen	391
10.3	Wärmeleitung	395
10.4	Viskosität und Scherströmung	398
10.5	Diffusion	402
10.6	Driftdiffusion	408
10.7	Zusammenhänge zwischen Transportkoeffizienten	415
10.8	Wärmeübergang und Wärmedurchgang	415
10.8.1	Zwei Arten des Energietransports	415
10.8.2	Wärmetransport durch Mehrfachschichten	420

10.9	Entropieproduktion bei Transportprozessen	426
10.9.1	Gleichgewicht und Nichtgleichgewicht	426
10.9.2	Lineare Transportprozesse und Entropieerzeugung	428
10.9.3	Dissipative Strukturen	431
10.9.4	Biologische Evolution	435
11	Systeme wechselwirkender Teilchen*	439
11.1	Reale Gase	439
11.1.1	Zustandsgleichungen und Molekularkräfte	440
11.1.2	Gleichgewichtseigenschaften realer Gase und Fluide	452
11.1.3	Gase als Kühlmittel: Joule-, Thomson- und Kelvin-Effekte	459
11.2	Reale Magnete	469
11.2.1	Magnetische Ordnung und magnetische Zustandsfläche	469
11.2.2	Paramagnetismus	473
11.2.3	Ferromagnetismus	476
11.2.4	Magnetische Maßsysteme	487
11.2.5	Antiferromagnetismus*	488
11.2.6	Ferrimagnetismus*	492
11.2.7	Die Ursachen der magnetischen Wechselwirkung	496
11.3	Reale Kristalle	503

Teil IV Ergänzungen

12	Thermodynamische Potenziale	519
12.1	Die freien Energien und Enthalpien	520
12.1.1	Definition und Bedeutung der thermodynamischen Potenziale	520
12.1.2	Maxwell-Beziehungen	529
12.1.3	Der Zusammenhang zwischen den Potenzialen und der Mikrophysik*	532
12.1.4	Ein Beispiel für den Nutzen des großen Potenzials*	537
12.2	Das chemische Potenzial	541
12.2.1	„Chemische Arbeit“ und Energiebilanz	541
12.2.2	Das chemische Potenzial verschiedener Systeme	547
12.2.3	Die „Messung“ des chemischen Potenzials	550
12.2.4	Das chemische Potenzial bei der Osmose	551
12.2.5	Der Dampfdruck verdünnter Lösungen	556
12.2.6	Chemisches Potenzial in äußeren Feldern	559
13	Schwankungserscheinungen	563
13.1	Brownsche Bewegung	564
13.2	Fluktuationstheoreme	571
13.3	Das Freie-Energie-Theorem (Jarzynski-Gleichung)	587

Nachwort	593
Anhänge	595
A Literaturempfehlungen, eine persönliche Auswahl	597
B Didaktische Anmerkungen	601
C Umrechnung von Energie- und Leistungseinheiten	605
D Natur- und Maßsystem-Konstanten	607
E Umrechnungsfaktoren für mechanische und thermische Einheiten ...	609
Literaturhinweise zu den Abbildungen	611
Namensverzeichnis	613
Sachverzeichnis	615

Mein Dank

Angeregt durch Frederick Reifs Neudarstellung der Wärmelehre im Berkeley Physics Course begann ich vor 40 Jahren mit einführenden Vorlesungen zur statistisch fundierten Thermodynamik. Diese Vorlesungen habe ich bis heute, unter mehrfach wechselnden Ansprüchen durch Studienpläne, fortgeführt. Während dieser Zeit erfuhr ich von einer großen Zahl von Kollegen, Freunden, Mitarbeitern und Studenten Hilfe und Unterstützung. Zu allererst möchte ich meinen Lehrern Walther Gerlach und Louis Néel danken sowie meinem Vater, dem Physiker Otto Stierstadt. Die Liebe zur Thermodynamik selbst verdanke ich vor allem meinen Kollegen Michael Fisher, Pierre-Gilles de Gennes, Hermann Haken, Leo Kadanoff, Rolf Landauer und Eugene Stanley. Ebenso zu Dank verpflichtet bin ich den Autoren vieler vorzüglicher Lehrbücher, von denen einige im Anhang A kurz charakterisiert sind. Dabei handelt es sich natürlich nur um eine kleine Auswahl aus den mehr als 200 aktuellen Werken auf diesem Gebiet. Es ist ja nicht so, dass man aus 20 oder 200 Büchern ein neues zusammenbastelt. Das wäre nicht der Mühe wert. Vielmehr habe ich versucht, die didaktischen Erkenntnisse der letzten Jahrzehnte zu nutzen, um auch die modernen Aspekte der Thermodynamik auf dem Niveau des Grundstudiums darzustellen, wie zum Beispiel das Energieproblem, die Nanotechnologie und andere.

Die ersten Vorlesungen auf statistischer Basis im Grundstudium hatte ich vor vielen Jahren zusammen mit Jorrit de Boer, Ārtomir Zupanĉiĉ und Rudolf Sizmann gehalten. Und mit Letzterem habe ich auch ein deutschsprachiges Lehrbuch zu schreiben begonnen, das leider durch seinen frühen Tod nicht zustande kam. Die Kap. 2, 4 und 10 des vorliegenden Buches tragen aber noch seine Handschrift. In den folgenden Jahren haben mir zahlreiche Freunde und Kollegen bei der immerwährenden Verbesserung des Textes geholfen, allen voran Herbert Wagner, dessen tiefe Vertrautheit mit der statistischen Thermodynamik viel zur Klarheit und zur Präzisierung des Stoffes beigetragen hat. Günther Fischer hat diesem Buch in jeder Phase seiner Entstehung mit wertvollen Ideen und nützlicher Kritik zur Vollendung verholfen. Kollegiale Unterstützung mit Rat und Tat habe ich außerdem erhalten von Markus Baur, Stefan Berez, Hermann Gaub, Dietmar Hein, Klaus Heinloth, Dieter Jung, Stefan Ludwig, Johann Peisl, Franz Roth, Udo Seifert, Johannes Straub, Jürgen Teichmann und vielen anderen. Allen Genannten verdanke ich auf die eine oder andere Weise, dass dieses Buch zustande kommen konnte. Die Verantwortung für

immer noch nicht ausgemerzte Fehler liegt natürlich bei mir. Und ich wäre allen Lesern sehr dankbar für Verbesserungsvorschläge und Korrekturen.

Die Texterfassung verdanke ich der sorgfältigen und kenntnisreichen Mitarbeit von Frau Eyleen Schneider. Hermann Gump hat bei der Datenverarbeitung geholfen und Friedrich Schmidt hat zahlreiche Photovorlagen in eine druckreife Form gebracht. Bei den Korrekturen hat meine Frau, Hildegard Stierstadt mitgewirkt. Die Fakultät für Physik der Ludwig–Maximilians–Universität in München hat die Fertigstellung des Buches in großzügiger Weise unterstützt und mich ermutigt, es auf den Weg zu bringen. Hierfür bin ich besonders dankbar. Herrn Dr. Thorsten Schneider und den Mitarbeitern des Springer–Verlags danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Klaus Stierstadt