

WILHELM KULISCH

WILEY - SCHNELLKURS

# THERMO- DYNAMIK

- Die Grundlagen auf einen Blick
- Vom mathematischen Rüstzeug bis zur statistischen Thermodynamik
- Schnelltest: Mit Übungsaufgaben und Lösungen

WILEY



# Eingangstest

Zum Einstieg können Sie mit diesen Aufgaben testen, wo Sie in der Thermodynamik noch Lücken haben, die Sie schließen sollten. Dabei steht jede Aufgabe für ein Kapitel im Buch. Sollten Sie feststellen, dass Sie eine Aufgabe nicht lösen können, ist es vielleicht schlau, zuerst dieses Kapitel durcharbeiten, wenn Sie nur noch wenig Zeit haben.

## Aufgabe zu Kapitel 2

Berechnen Sie die folgenden Ableitungen bzw. Integrale:

- $\frac{d}{dx}(7x^4 + \sin(2x))$
- $\frac{d}{dx}(\ln(4x))$
- $\frac{\partial}{\partial x}(6x^2 \cdot \cos(y))$  und  $\frac{\partial}{\partial y}(6x^2 \cdot \cos(y))$
- $\int_1^2 \frac{1}{x} dx$

## Aufgabe zu Kapitel 3

Die Wärme eines Körpers ist ein Maß für die Bewegungen, die die den Körper bildenden Teilchen ausführen. Welche Bewegungsmöglichkeiten gibt es für die Teilchen in den drei Aggregatzuständen?

Alle Materialien sind durch drei thermodynamische Materialkonstanten gekennzeichnet, den linearen Ausdehnungskoeffizienten, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Erläutern Sie auf der Basis der Vorstellung, dass Wärme durch

Bewegung hervorgerufen wird, die Wärmeausdehnung, die Wärmespeicherung und die Wärmeleitung.

#### **Aufgabe zu Kapitel 4**

1. Ordnen Sie die folgenden thermodynamischen Größen den Begriffen extensive Zustandsgröße, intensive Zustandsgröße und Prozessgröße zu: Druck, Volumen, Temperatur, Arbeit, innere Energie, Entropie, Wärmemenge.  
Erläutern Sie Ihre Zuordnung im Fall des Drucks, der inneren Energie und der Arbeit.
2. Sowohl der Druck als auch die Temperatur sind Maße für die in einem System stattfindenden Bewegungen. Worin unterscheiden sie sich?

#### **Aufgabe zu Kapitel 5**

Was ist eine polytrophe Zustandsänderung? Was ist der Polytropenexponent? Wie lautet der Polytropenexponent im Fall von isothermen, isochoren, isobaren und adiabatischen Zustandsänderungen?

#### **Aufgabe zu Kapitel 6**

S	U	V
H		F
p	G	T

[Abbildung 1](#): Das Guggenheim-Quadrat

[Abbildung 1](#) zeigt das sogenannte Guggenheim-Quadrat. Leiten Sie daraus die beiden unabhängigen

(natürlichen) Variablen der vier thermodynamischen Potentiale innere Energie  $U$ , Enthalpie  $H$ , freie Energie  $F$  und freie Enthalpie  $G$  ab.

Wie lautet die Einheit der thermodynamischen Potentiale? Geben Sie für die Enthalpie  $H$  das vollständige Differential an.

### **Aufgabe zu Kapitel 7**

1. Wie lautet das ideale Gasgesetz? Erläutern Sie die darin auftauchenden Größen.
2. Auf welchen Näherungen beruht das ideale Gasgesetz?
3. Wie lautet die Van-der-Waals-Gleichung, die diese Näherungen korrigiert?
4. Ist die Van-der-Waals-Gleichung exakt oder wieder nur eine Näherung?

### **Aufgabe zu Kapitel 8**

$\text{CO}_2$  ist ein lineares dreiatomiges Molekül. Wie viele Freiheitsgrade besitzt ein Kohlendioxidmolekül? Wie sehen diese Freiheitsgrade aus? Wie groß ist der Isentropenexponent? Wie groß ist die innere Energie eines Mols  $\text{CO}_2$ ?

### **Aufgabe zu Kapitel 9**

Erklären Sie den Unterschied zwischen einem thermischen und einem thermodynamischen Gleichgewicht.

### **Aufgabe zu Kapitel 10**

1. Wie lautet der erste Hauptsatz der Thermodynamik?

2. Wie ändert sich die innere Energie bei einem isobaren Prozess?
3. Wie ändert sie sich bei einem adiabatischen Prozess?

### **Aufgabe zu Kapitel 11**

Bei den meisten physikalischen Prozessen spielt die Richtung der Zeitachse keine Rolle. Wenn man die Zeitachse umdreht, verlaufen die Prozesse umgekehrt. In der Thermodynamik ist dies nicht unbedingt der Fall. Es gibt durchaus Prozesse, die nur in eine Zeitrichtung verlaufen können. Wie nennt man derartige Prozesse? Nennen Sie einige Beispiele. Worauf beruht die Vorzugsrichtung der Zeit?

### **Aufgabe zu Kapitel 12**

Schlagen Sie eine Methode vor, mit der der absolute Nullpunkt der Temperatur erreicht werden kann. Lassen Sie dabei Ihrer Phantasie freien Lauf. Inwieweit Ihre Methode technisch realisiert werden kann, spielt keine Rolle.

### **Aufgabe zu Kapitel 13**

Erläutern Sie den Unterschied zwischen einer Wärmekraftmaschine, einer Wärmepumpe und einer Kältemaschine.

### **Aufgabe zu Kapitel 14**

Worin unterscheiden sich der Ottomotor und der Dieselmotor in ihrer Funktionsweise? Worin unterscheiden sich der Ottoprozess und der Dieselprozess thermodynamisch? Welcher der beiden Prozesse hat im Idealfall den größeren Wirkungsgrad?

### **Aufgabe zu Kapitel 15**

Eine Wasseroberfläche besitzt eine Temperatur von 50 °C. Sie bewerkstelligen es im Labor, dass sich oberhalb der Oberfläche des Wassers in einer Anordnung Vakuum, in einer zweiten Luft und in einer dritten ein  $\text{NH}_3\text{-CH}_4$ -Gemisch befindet. Ordnen Sie diese Systeme in der Reihenfolge aufsteigender Wasserdampfdrücke. Wie groß ist der Druck im Fall der Luft? Schätzen Sie ihn für die anderen drei Fälle ab.

### **Aufgabe zu Kapitel 16**

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, alle sechs Zahlen beim Lotto richtig zu tippen. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, den Hauptgewinn zu erzielen (also inklusive Superzahl)?

### **Aufgabe zu Kapitel 17**

Wie lautet die Definition der Entropie im Rahmen der statischen Thermodynamik? Wie lautet die entsprechende Definition der Temperatur?

# Lösungen des Eingangstests

Im Folgenden finden Sie die Lösungen des Eingangstests zu diesem Buch. Sie sollten zunächst versuchen, die Aufgaben des Tests eigenständig zu lösen und dann Ihre Überlegungen und Rechnungen mit diesen Lösungen vergleichen. Danach können Sie die Reihenfolge festlegen, in der Sie das Buch durcharbeiten.

## Lösung der Aufgabe zu Kapitel 2

- $\frac{d}{dx}(7x^4 + \sin(2x)) = 28x^3 + 2\cos(2x)$

- $\frac{d}{dx}(\ln(4x)) = 4 \cdot \frac{1}{x}$

- $\frac{\partial}{\partial x}(6x^2 \cdot \cos y) = 12x \cdot \cos y$

- $\frac{\partial}{\partial y}(6x^2 \cdot \cos y) = -6x^2 \cdot \sin y$

- $\int_1^2 \frac{1}{x} dx = \ln x \Big|_1^2 = 0,693 - 0 = 0,693$

## Lösung der Aufgabe zu Kapitel 3

1. In einem Festkörper können die Teilchen Schwingungen gegeneinander ausführen, in Gasen und Flüssigkeiten zudem Rotations- und Translationsbewegungen.
2. Die Wärmeausdehnung beruht auf der Tatsache, dass mit steigender Temperatur die Teilchen mehr Platz brauchen, um die zunehmenden Bewegungen ausführen zu können.

3. Die Wärmespeicherung und damit auch die spezifische Wärmekapazität hängt von der Anzahl der Möglichkeiten eines Teilchens in einem Körper ab, eine Bewegung auszuführen. Darüber hinaus spielen auch die Anzahl der Teilchen im Körper und die in der jeweiligen Bewegung gespeicherte Energie eine Rolle.
4. Die direkte Wärmeleitung beruht auf der Tatsache, dass die Bewegungen der Teilchen am heißen Ende eines Körpers ihren Bewegungszustand durch Stöße auf benachbarte Teilchen übertragen und auf diese Weise Wärme transportiert wird.

### **Lösung der Aufgabe zu Kapitel 4**

Die Einordnung der Begriffe finden Sie in folgender Tabelle.

<b>Intensive Zustandsgröße</b>	<b>Extensive Zustandsgröße</b>	<b>Prozessgröße</b>
Druck	Volumen	Arbeit
Temperatur	Innere Energie	Wärmemenge
	Entropie	

Tabelle 1: Die Klassifizierung der thermodynamischen Größen

- Eine intensive Zustandsgröße zeichnet sich dadurch aus, dass sie konstant bleibt, wenn das System vergrößert oder verkleinert wird. Insofern ist der Druck eine intensive Zustandsgröße.



- Die innere Energie ist eine extensive Zustandsgröße, da sie sich verdoppelt, wenn man das System verdoppelt.
- Die Arbeit ist eine Prozessgröße, da sie nicht geeignet ist, den Zustand eines Systems zu beschreiben. Sie ist vielmehr eine wichtige Größe, um Zustandsänderungen (d. h. Prozesse) zu beschreiben.
- Der Druck in einem Fluid (Flüssigkeit oder Gas) wird durch Stöße der Teilchen auf die Gefäßwände (allgemeiner eine Fläche) hervorgerufen. Der dabei übertragene Impuls bewirkt eine Kraft, die auf die Fläche normiert den Druck ergibt.
- Zum Druck tragen nur Translationsbewegungen der Teilchen bei. Die Temperatur ist hingegen ein Maß für alle in einem Körper stattfindenden Bewegungen. Dies sind neben den Translationsbewegungen auch Rotationen der Teilchen, die den Körper bilden, sowie Schwingungen der Atome in den Teilchen.

## Lösung der Aufgabe zu Kapitel 5

Bei einer polytropen Zustandsänderung gilt:

$$p \cdot V^n = \text{konst}$$

$n$  wird als Polytropenexponent bezeichnet. Für  $n$  gilt:

- Isobar:  $n = 0$ . Das Volumen ist unabhängig vom Druck (also gilt  $p \cdot V^n = pV^0 = p = \text{konst.}$ ).
- Isotherm:  $n = 1$ . Dies ist das Gesetz von Boyle-Mariotte.
- Adiabatisch bzw. isentrop:  $n = \kappa$ . Dabei ist  $\kappa = c_p/c_v$  der Isentropenexponent.
- Isochor:  $n = \infty$ . Das Volumen ist konstant.

## Lösung der Aufgabe zu Kapitel 6

Die natürlichen unabhängigen Variablen der einzelnen thermodynamischen Potentiale lauten wie folgt:

- Innere Energie  $U$ : Entropie  $S$  und Volumen  $V$
- Enthalpie  $H$ : Entropie  $S$  und Druck  $p$
- Freie Energie  $F$ : Volumen  $V$  und Temperatur  $T$
- Freie Enthalpie  $G$ : Druck  $p$  und Temperatur  $T$

Die Einheit aller thermodynamischen Potentiale ist das Joule. Das totale Differential der Enthalpie lautet:

$$dH(S,p) = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p dS + \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S dp = TdS - V dp$$

## Lösung der Aufgabe zu Kapitel 7

1. Das ideale Gasgesetz lautet:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Dabei ist  $p$  der Druck,  $V$  das Volumen,  $T$  die absolute Temperatur,  $n$  die Stoffmenge (in Mol) und  $R$  die universelle Gaskonstante.

2. Bei der Herleitung der idealen Gasgleichung wird angenommen, dass die Gasteilchen kein Eigenvolumen besitzen und nicht miteinander wechselwirken.

3. Die Van-der Waals-Gleichung lautet:

$$\left(p + a \cdot \left(\frac{n}{V}\right)^2\right) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T$$

Dabei sind der Kohäsionsdruck  $a$  und das Kovolumen  $b$  Materialkonstanten.

4. Auch die Van-der-Waals-Gleichung ist nur eine Näherung.

## Lösung der Aufgabe zu Kapitel 8

1. Das CO<sub>2</sub>-Molekül besteht aus  $m = 3$  Atomen. Daher beträgt die Anzahl der Freiheitsgrade  $f = 3m = 9$ .
2. Da das CO<sub>2</sub>-Molekül linear angeordnet ist, sind Rotationen um die Längsachse des Moleküls nicht möglich. Daher verteilen sich die Freiheitsgrade wie folgt:

$$3f_{\text{trans}} + 2f_{\text{rot}} + 4f_{\text{schw}} = 9$$

3. Der Isentropenexponent beträgt:

$$\kappa = \frac{f+2}{f} = \frac{11}{9} = 1,22$$

4. Für die innere Energie ergibt sich der folgende Ausdruck:

$$U = \frac{1}{2} \cdot N_A \cdot (f_{\text{trans}} + f_{\text{rot}} + 2 \cdot f_{\text{schw}}) \cdot k_B T$$
$$U_{\text{CO}_2} = \frac{13}{2} \cdot N_A \cdot k_B T$$

## Lösung der Aufgabe zu Kapitel 9

Bei einem thermischen Gleichgewicht ist die Temperatur aller Komponenten des Systems gleich. Selbst wenn sie sich in engem Kontakt miteinander befinden, fließt zwischen ihnen keine Wärme.

Im thermodynamischen Gleichgewicht sind nicht nur die Temperatur, sondern auch die Zustandsgrößen Druck und (mittlere) Stoffmenge konstant.

## Lösung der Aufgabe zu Kapitel 10

1. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik lautet:

$$\Delta U = \Delta W + \Delta Q$$

Dabei sind  $\Delta U$  die Änderung der inneren Energie,  $\Delta Q$  die ausgetauschte Wärmemenge und  $\Delta W$  die zugeführte/geleistete Arbeit. Letztere sind positiv, wenn sie dem System von außen zugeführt werden; sie sind negativ, wenn sie vom System abgegeben werden.

2. Bei einem isochoren Prozess ist das Volumen konstant; also muss keine Volumenarbeit geleistet werden. Daher gilt für die innere Energie:

$$\Delta U = \Delta Q$$

3. Bei einem adiabatischen Prozess wird keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht. Also gilt:

$$\Delta U = \Delta W$$

## **Lösung der Aufgabe zu Kapitel 11**

Ein Prozess, der nur in eine Zeitrichtung verlaufen kann, wird als irreversibel bezeichnet. Beispiele irreversibler Prozesse sind u. a.:

- Eine Vase fällt von einem Regal und zerschellt.
- In zwei benachbarten Behältern befinden sich zwei verschiedene Gase. Entfernt man die Trennung zwischen den Behältern, mischen sich die Gase unwiderruflich.
- Bringt man zwei Körper unterschiedlicher Temperatur in Kontakt, so gleichen sich die Temperaturen unwiderruflich an.
- Verbindet man einen gasgefüllten und einen evakuierten Behälter, so füllt das Gas das gesamte zur Verfügung stehende Volumen aus.

Die Ursache der Festlegung der Zeitachse ist der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Er besagt, dass die

Entropie in einem geschlossenen adiabatischen System niemals abnimmt. Genau dies wäre allerdings erforderlich, damit die hier dargestellten Prozesse umgekehrt ablaufen können.

### **Lösung der Aufgabe zu Kapitel 12**

Der absolute Nullpunkt der Temperatur kann nicht erreicht werden. Dies ist die zentrale Aussage des dritten Hauptsatzes der Thermodynamik. Sie brauchen Ihre Phantasie gar nicht spielen zu lassen. Das Ziel ist unerreichbar.

### **Lösung der Aufgabe zu Kapitel 13**

Bei allen drei Maschinen gibt es zwei Wärmereservoirs.

- Bei einer Wärmekraftmaschine wird einem heißen Reservoir Wärme entzogen und zum Teil in Arbeit umgewandelt. Die übrige Wärme wird an eine Wärmesenke abgegeben.
- Eine Wärmepumpe dient dazu, einen Körper oder ein System zu erwärmen. Dazu wird Wärme unter Aufwand von Arbeit einem kalten Reservoir entzogen und an den zu erwärmenden Körper weitergegeben.
- Eine Kältemaschine dient dazu, einen Körper oder ein System abzukühlen. Dazu wird ihm unter Aufwand von Arbeit Wärme entzogen und an ein Wärmereservoir abgegeben.

### **Lösung der Aufgabe zu Kapitel 14**

Beim Ottoprozess wird der Kraftstoff als Benzin-Luftgemisch angesaugt und dann durch die Zündkerze gezündet. Beim Dieselmotor wird der Kraftstoff zum geeigneten Zeitpunkt in die Luft eingespritzt, die so

stark komprimiert ist, dass sich das Gemisch selbst entzündet.

Thermodynamisch ist der Ottoprozess ein Gleichraumprozess, der Dieselprozess ein Gleichdruckprozess. Für den Ablauf der Kreisprozesse gilt:

- Ottoprozess: isentrop → isochor → isentrop → isochor
- Dieselprozess: isentrop → isobar → isentrop → isochor

Für die Wirkungsgrade gilt:

$$\eta_{\text{Otto,ideal}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$
$$\eta_{\text{Diesel,ideal}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa(\varphi - 1)}$$

Dabei sind  $\kappa$  der Isentropenexponent,  $\varepsilon$  das *Verdichtungsverhältnis* der beiden Volumina und  $\varphi$  das Volldruckverhältnis. Bei gleichem Verdichtungsverhältnis ist der Wirkungsgrad eines Ottomotors größer, aber beim Dieselmotor sind höhere Verdichtungsverhältnisse möglich.

### **Lösung der Aufgabe zu Kapitel 15**

Der Gleichgewichtsdruck von Wasserdampf über einer Oberfläche hängt nur von der Temperatur der Wasseroberfläche ab. Insofern ist er für alle drei Fälle gleich. Aus der Magnusformel ergibt sich:

$$p_{DS} = p_{DS}^0 \cdot \exp\left(\frac{C_1 \cdot T}{C_2 + T}\right)$$
$$= 611,2 \text{ Pa} \cdot \exp\left(\frac{17,621/^{\circ}\text{C} \cdot 50^{\circ}\text{C}}{243,12^{\circ}\text{C} + 50^{\circ}\text{C}}\right) = 1,84 \times 10^3 \text{ Pa}$$

### **Lösung der Aufgabe zu Kapitel 16**

Wichtig bei der Berechnung der Lottowahrscheinlichkeit ist, dass die Reihenfolge der Ziehung keine Rolle spielt. Zudem werden die gezogenen Kugeln nicht in die Trommel zurückgelegt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass Sie die als erste Zahl gezogene Kugel richtig haben, beträgt  $6/49$ . Bei der zweiten Kugel sind nur noch 48 Kugeln in der Trommel, aber sie haben nur noch fünf freie Plätze. Insgesamt gilt also:

$$6/49 \cdot 5/48 \cdot 4/47 \cdot 3/46 \cdot 2/45 \cdot 1/44 =$$

$$P_6 = \frac{1}{13.983.816}$$

Dies lässt sich auch folgendermaßen darstellen:

$$P_6 = \frac{6! \cdot 43!}{49!}$$

Die Wahrscheinlichkeit, auch die Superzahl richtig zu haben, beträgt:

$$P_{6+s} = \frac{1}{139.838.160}$$

## **Lösung der Aufgabe zu Kapitel 17**

Die Entropie eines Systems ist der Logarithmus seines Phasenraums multipliziert mit der Boltzmannkonstante:

$$S(E) = k_B \cdot \ln(\Omega(E))$$

Dabei ist der Phasenraum die Anzahl der Möglichkeiten, einen gegebenen Makrozustand durch Mikrozustände zu realisieren.

Die Temperatur ist als Ableitung der Entropie nach der Energie definiert:

$$\frac{1}{T(E)} = \frac{\partial S(E)}{\partial E}$$

*Wilhelm Kulisch*

# **Wiley Schnellkurs Thermodynamik**

Unter  
Mitarbeit von  
Regine  
Freudenstein

WILEY



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Auflage 2015

© 2015 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

All rights reserved including the right of reproduction in whole or in part in any form.

Alle Rechte vorbehalten inklusive des Rechtes auf Reproduktion im Ganzen oder in Teilen und in jeglicher Form.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie eventuelle Druckfehler keine Haftung.

**Umschlaggestaltung:** Torge Stoffers Graphik-Design, Leipzig

**Korrektur:** Bernhard Gerl und Marianne Hammer-Altmann

**Satz:** Beltz Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza

**Print ISBN:** 978-3-527-53010-6

**ePub ISBN:** 978-3-527-69326-9

**mobi ISBN:** 978-3-527-69327-6

# **Einleitung**

## **Über dieses Buch**

Dieses Buch bietet einen Schnellkurs der Thermodynamik. Es wurde weniger für Physikstudenten geschrieben, sondern für Studenten, die die Thermodynamik im Nebenfach hören. Es ist so ausgelegt, dass Sie alle Themen, die Sie als Nebenfachstudent für eine Prüfung oder eine Klausur benötigen, in relativ kurzer Zeit lernen können, um sich darauf vorzubereiten.

Die Thermodynamik ist ein weites Feld. Bei der Zusammenstellung des Stoffs habe ich versucht, die Themen zu wählen, mit denen es Nebenfachstudenten der Thermodynamik üblicherweise zu tun haben. Um Ihnen (und mir) das Leben leichter zu machen, habe ich auf eine vollständige physikalische Darstellung der Thermodynamik mit ihrem manchmal sehr mathematischen Formalismus verzichtet. Er würde zudem den Rahmen dieses Buchs sprengen. Eines sollten Sie beim Lesen und Bearbeiten des Buchs noch berücksichtigen: Es handelt sich um einen Schnellkurs. Er verzichtet weitgehend auf Herleitungen und stellt zumeist nur die wichtigsten Begriffe, Definitionen und Gesetzmäßigkeiten vor.

## **Zielgruppe dieses Buchs**

Dieses Buch richtet sich an Leser, die im Rahmen ihrer Ausbildung bzw. ihres Studiums Vorlesungen über Thermodynamik hören müssen und auch Klausuren oder Prüfungen in der Thermodynamik bestehen müssen, aber

nicht unbedingt an Studenten der Physik. In diesem Fall ist eine wesentlich umfangreichere, komplexere Darstellung erforderlich.

## **Die Voraussetzungen**

Beim Schreiben dieses Buchs bin ich davon ausgegangen, dass Sie als Nebenfachstudent zumindest eine Zwei-SWS-Vorlesung zur Thermodynamik hören. Vielleicht interessiert Sie die Thermodynamik nicht einmal besonders, aber Sie haben eine Prüfung oder Klausur vor sich und müssen jetzt da durch.

Wie bei jeder Naturwissenschaft ist auch in der Thermodynamik die Mathematik unumgänglich. In [Kapitel 2](#) wird kurz auf die Differentialrechnung eingegangen, die in der Thermodynamik eine besonders große Rolle spielt; sonst sollten sie mit Gleichungen arbeiten, sie umstellen und auflösen können.

## **Aufbau des Buchs**

Es ist mir bewusst, dass die Thermodynamik sowohl bei Physikstudenten als auch bei Studenten, die die Thermodynamik als Nebenfach hören müssen, nicht sonderlich beliebt ist. Sie gilt als trocken, nicht sehr anschaulich und sehr theoretisch. Ich habe mich bemüht, die Darstellung in diesem Buch so spannend wie möglich zu halten, aber es gibt auch eher theoretische Passagen, die Sie und ich gemeinsam bewältigen müssen.

Dieses Buch besteht aus sechs Teilen, die insgesamt 17 Kapitel enthalten. Es ist, wie jeder Schnellkurs des Wiley-Verlags, modular aufgebaut. Die einzelnen Teile sind also unabhängig voneinander; im Prinzip können sie in beliebiger Reihenfolge gelesen werden. Allerdings ist die

Thermodynamik sehr komplex. Daher ist es ratsam, falls Sie mit den grundlegenden Begriffen und Definitionen der Thermodynamik nicht sehr vertraut sind, sich zunächst Teil II vorzunehmen; danach haben Sie allerdings die freie Wahl.

Am Anfang des Buchs gibt es einen Eingangstest, in dem zu jedem Kapitel eine Aufgabe gestellt wird. Sie sollten sich zunächst diesen Test vornehmen. Das Ergebnis dieses Tests sollte dann die Reihenfolge festlegen, in der Sie dieses Buch angehen (falls Sie es nicht vorziehen, sich von vorne nach hinten durchzuarbeiten).

Wenn sich beim Test beispielsweise herausstellt, dass Sie die Themen der ersten Kapitel beherrschen, können Sie ihre Schwerpunkte durchaus auf die weiteren Kapitel des Buchs legen. Der ausführliche Index und vor allem auch das Glossar werden Ihnen dabei sicherlich hilfreich sein.

Zudem finden Sie in jedem Kapitel (neben zahlreichen Beispielen) auch Aufgaben, mit deren Hilfe Sie überprüfen können, ob Sie den Stoff des jeweiligen Kapitels beherrschen. Die Lösungen der Aufgaben finden Sie am Ende des Buchs.

## **Inhalt des Buchs**

Im Folgenden werden die Themen der sechs Teile dieses Buchs kurz zusammenfassend dargestellt.

- Im kurzen einleitenden Teil I wird zunächst die Thermodynamik definiert sowie ihr Umfang und ihre Arbeitsweise beschrieben. In [Kapitel 2](#) werden Ihre Kenntnisse in einigen Bereichen der Mathematik aufgefrischt. Dies betrifft insbesondere die Differentialrechnung und die Integration, die in der Thermodynamik eine große Rolle spielen.

- In Teil II werden die Grundlagen der Thermodynamik behandelt. [Kapitel 3](#) beschäftigt sich mit allgemeinen Wärmephänomenen wie der Wärmeausdehnung, der Wärmespeicherung und -kapazität sowie dem Wärmetransport. In [Kapitel 4](#) werden dann die Zustandsgrößen eingeführt, mit denen der Zustand eines thermodynamischen Systems beschrieben werden kann. Im folgenden [Kapitel 5](#) geht es um die thermodynamische Behandlung von Änderungen des Zustands eines Systems. Thema des 6. Kapitels sind die thermodynamischen Potentiale, deren Diskussion zu den komplexeren Themen der Thermodynamik gehört.
- Der III. Teil des Buchs ist den Gasen gewidmet. In [Kapitel 7](#) werden zunächst die Zustandsgleichungen idealer und realer Gase eingeführt, während sich [Kapitel 8](#) mit energetischen Betrachtungen beschäftigt.
- Der Inhalt des IV. Teils ist rasch dargestellt. Thema des Teils sind die vier Hauptsätze der Thermodynamik; jedem Hauptsatz ist ein eigenes Kapitel gewidmet.
- In Teil V werden die bislang in diesem Buch erworbenen Kenntnisse auf thermodynamische Vorgänge und Prozesse angewendet. In [Kapitel 13](#) werden zunächst ideale Prozesse betrachtet. Die beiden folgenden Kapitel beschäftigen sich dann mit realen Prozessen, wobei [Kapitel 14](#) zunächst Motoren und den sie beschreibenden Kreisprozessen gewidmet ist, während in [Kapitel 15](#) Dämpfe, Dampf/Gasgemische sowie ideale Mischungen diskutiert werden.
- Teil VI beschäftigt sich schließlich mit der statistischen Interpretation der Thermodynamik. In [Kapitel 16](#) werden zunächst die grundlegenden Gedanken und Begriffe eingeführt, die der Anwendung statistischer Methoden in der Physik im Allgemeinen und insbesondere in der Thermodynamik zugrunde liegen.

Abschließend wird in [Kapitel 17](#) die statistische Thermodynamik im Detail eingeführt.

Diese Darstellungsweise (zunächst die Darstellung der Grundlagen) bedingt, dass zuweilen Vorgriffe auf spätere Kapitel unumgänglich sind, insbesondere bei Beispielen oder Aufgaben. Das betrifft vor allem die ideale Gasgleichung, die Ihnen als angehenden Thermodynamiker wahrscheinlich ein Begriff ist, auch wenn Sie dieses Buch noch nicht gelesen haben. Andernfalls helfen Ihnen die Querverweise und der Index.

## Vereinbarungen in diesem Buch

In diesem Buch gibt es eigentlich nur zwei Vereinbarungen, die Sie sich merken müssen:

- Physikalische Größen sind *kursiv* gesetzt.
- Wichtige Begriffe sind ebenfalls *kursiv* gesetzt, wenn sie zum ersten Mal auftauchen.

## Elemente in diesem Buch

In diesem Buch sind einige Stellen besonders hervorgehoben. Es gibt graue Kästen, bei denen in der Kopfzeile der Zweck angegeben wird.

### **Tipp**

Kästen mit der Kopfzeile *Tipp* stellen zum einen besonders wichtige Zusammenhänge dar, die Sie sich unbedingt merken sollten. Sie können aber auch auf besondere Aspekte hinweisen, die im Rahmen des gerade betrachteten Themas von Interesse sind.

## **Warnung**

Es gibt auch in der Thermodynamik Fehler, die man unbedingt vermeiden muss. Sie können experimenteller Natur sein, aber auch die Beschreibung betreffen. In beiden Fällen wird vor diesen Fehlern in Kästen mit der Kopfzeile *Warnung* gewarnt.

## **Aufgabe**

Am Ende jedes Kapitels finden Sie einige Übungsaufgaben, die durch das *Aufgabensymbol* gekennzeichnet sind.

## **Beispiel**

In jedem Kapitel wird die Darstellung anhand von Zahlenbeispielen illustriert. Diese Beispiele sind durch grau umrandete Kästen gekennzeichnet.

# **Viel Spaß beim Lesen und Bearbeiten**

Wenn Sie mit diesem Buch erfolgreich arbeiten wollen, empfehle ich Ihnen, zunächst den Eingangstest zu bearbeiten. Danach besitzen Sie einen Überblick, bei welchen Kapiteln oder Teilen Sie Defizite aufweisen. Sie sollten dann mit diesen Kapiteln/Teilen beginnen. Wenn Sie die Zeit aufbringen können, sollten Sie allerdings das ganze Buch lesen.

An dieser Stelle bleibt mir nur noch, Ihnen viel Spaß beim Lesen und Bearbeiten dieses Buchs zu wünschen.

# **Teil I:**

## **Die Grundlagen**

In diesem einleitenden Teil des Buchs wird im vorliegenden Kapitel die Thermodynamik kurz vorgestellt. Im zweiten Kapitel werden dann Ihre Kenntnisse in einem wichtigen Teilbereich der Mathematik aufgefrischt, dem der Differential- und Integralrechnung.



# 1

## Eine kurze Einführung in die Thermodynamik

### In diesem Kapitel

- Definition der Thermodynamik
- Eine kurze Geschichte der Thermodynamik
- Makroskopische Thermodynamik und statistische Thermodynamik
- Die Rolle der Thermodynamik in der Physik und den übrigen Naturwissenschaften

In diesem Kapitel wird die Thermodynamik zunächst definiert. Nach einer kurzen Darstellung ihrer Geschichte wird gezeigt, dass die Thermodynamik zwei unterschiedliche Herangehensweisen verwendet, eine makroskopische und eine mikroskopische statistische. Schließlich wird kurz auf die Rolle der Thermodynamik in der Physik und den übrigen Natur- und Ingenieurwissenschaften eingegangen.

### Definition der Thermodynamik

Die *Thermodynamik* oder *Wärmelehre* ist ein Teilgebiet der klassischen Physik. Sie beschreibt den Transport und die Umwandlung unterschiedlicher Energieformen. Von besonderem Interesse sind Energieumwandlungsprozesse, an denen Wärme beteiligt ist, die eine spezielle Form der Energie darstellt. Dabei ist ein wichtiges Ziel der Thermodynamik, Energie in ihren verschiedenen Formen in Arbeit umzuwandeln. Ein weiteres wichtiges Thema der

Thermodynamik sind die Eigenschaften der Stoffe als Funktion der thermodynamischen Bedingungen, insbesondere der Temperatur.

Für viele naturwissenschaftliche und ingenieurwissenschaftliche Fächer stellt die Thermodynamik allerdings eine Art von Hilfswissenschaft dar. Die Thermodynamik ist nicht das eigentliche Ziel des Studiums oder der Forschungsarbeit, sie ist aber erforderlich, um in einem Fach erfolgreich arbeiten zu können. Auf diesen Aspekt wird weiter unten noch einmal eingegangen.

Dieses Buch richtet sich an Studenten solcher Fächer, die die Thermodynamik als Hilfsmittel betrachten.

## **Eine kurze Geschichte der Thermodynamik**

Die Geschichte der Thermodynamik beginnt im 18. Jahrhundert mit der Entwicklung der Gesetze, die später zur idealen Gasgleichung zusammengefasst wurden ([Kapitel 7](#)). Zu einer eigenständigen Wissenschaft entwickelte sich die Thermodynamik aber erst im 19. Jahrhundert, an dessen Ende sie ihren Höhepunkt erreichte. Dabei kann man zwei Entwicklungsstufen unterscheiden:

- Zunächst wurden Fluide wie Flüssigkeiten oder Gase als makroskopische Körper aufgefasst, denen man bestimmte makroskopische Eigenschaften wie etwa den Druck oder die Temperatur zuordnete, ohne zu fragen, wie diese Größen zustande kommen. In ähnlicher Weise kann man einem Festkörper einen Elastizitätsmodul zuordnen, der seine Steifigkeit beschreibt, ohne zu fragen, worauf die Steifigkeit beruht. Diese

Vorgehensweise wird auch bei Flüssigkeiten und Gasen als Kontinuumsmechanik bezeichnet.

- In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts setzte sich mehr und mehr die Vorstellung durch, dass Materie, gleich welcher Art, aus Teilchen aufgebaut ist (Atome und Moleküle). Die Konsequenzen dieses Teilchencharakters der Materie wurden vor allem von James Clerk Maxwell und Ludwig Boltzmann erarbeitet.

Dies ist kein Buch über die Geschichte der Thermodynamik, sondern ein Schnellkurs in diesem Teilgebiet der Physik. Dennoch wird im Folgenden kurz die Geschichte der Thermodynamik anhand einer Reihe von Forschern bzw. Personengruppen dargestellt.

- Am Anfang der Thermodynamik steht im 18. Jahrhundert die Entwicklung der idealen Gasgleichung durch Robert Boyle, Edme Mariotte, Joseph Louis Gay-Lussac, Guillaume Amontons, Jacques Charles und Amadeo Avogadro.
- Zu Beginn des 19. Jahrhunderts beschäftigte sich der französische Ingenieur und Physiker Nicolas Léonard Sadi Carnot mit Wärmekraftmaschinen wie beispielsweise der Dampfmaschine, die Ende des 18. Jahrhunderts von James Watt entwickelt worden war. Sadi Carnot erkannte als erster den Unterschied zwischen reversiblen und irreversiblen Prozessen. Er stellte zudem einen idealisierten Prozess vor (den in [Kapitel 13](#) diskutierten Carnotprozess), der bei gegebenen Bedingungen den größtmöglichen Wirkungsgrad besitzt; zugleich zeigte er, dass dieser stets kleiner als eins sein muss.
- Um die Mitte des 19. Jahrhunderts war Rudolf Clausius einer der entscheidenden Thermodynamiker, der vor allem im theoretischen Bereich arbeitete. Auf ihn geht

der Begriff der Entropie sowie der zweite Hauptsatz der Thermodynamik zurück.

- Ein weiterer wichtiger Name in der Geschichte der Thermodynamik ist William Thomson, der besser als Lord Kelvin bekannt ist. Auf ihn geht die nach ihm benannte Temperaturskala zurück, mit der er gleichzeitig den absoluten Nullpunkt der Temperatur einführte. Weitere Arbeiten Kelvins zur Thermodynamik betrafen unter anderem den Joule-Thomson-Effekt.
- Der Schotte James Clerk Maxwell ist vor allen durch seine Arbeiten zum Elektromagnetismus bekannt, die in den berühmten Maxwell'schen Gleichungen gipfelten, mit denen er den klassischen Elektromagnetismus vervollständigte. Maxwell beschäftigte sich aber auch mit der Thermodynamik. Einer seiner wichtigsten Beiträge ist die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung, die ausführlich in [Kapitel 8](#) vorgestellt wird.
- Das Gebäude der klassischen Thermodynamik wurde Ende des 19. Jahrhunderts von dem österreichischen Physiker Ludwig Boltzmann vervollständigt.

### **Tipp**

Nach Ludwig Boltzmann ist die wichtigste Konstante der Thermodynamik benannt, die *Boltzmannkonstante*  $k_B$ , die eine zentrale Rolle in der Thermodynamik und der statistischen Mechanik spielt.

- Schließlich muss in dieser Reihe noch der Name Max Planck genannt werden, der sich vor allem zu Beginn seiner Karriere mit der Thermodynamik beschäftigte. Er führte die Boltzmannkonstante ein, die er nach Ludwig

Boltzmann benannte, obwohl er mit vielen Auffassungen Boltzmanns nicht einverstanden war.

## **Makroskopische Thermodynamik und statistische Thermodynamik**

Aus der obigen Darstellung geht hervor, dass es in der Thermodynamik zwei grundsätzlich unterschiedliche Herangehensweisen gibt:

- Die makroskopische Thermodynamik
- Die statistische Thermodynamik

Diese beiden Vorgehensweisen schließen einander nicht aus. Ein wirkliches Verständnis der Thermodynamik kann im Gegenteil nur erreicht werden, wenn man beide Ansätze miteinander kombiniert.

### **Makroskopische Betrachtungsweise**

Bei der makroskopischen Herangehensweise an die Thermodynamik betrachtet man eine Flüssigkeit oder ein Gas als einen Körper, dem man als Ganzes Eigenschaften wie eine Temperatur oder eine Energie zuordnen kann. Die Frage, wie dieser Körper in seinem Inneren aufgebaut ist, ist irrelevant, ebenso, worauf Größen wie die Temperatur oder die Energie und auch die Entropie eigentlich beruhen.

Die zentralen Fragen der makroskopischen Thermodynamik lauten: Welche Eigenschaften besitzt ein Stoff und vor allem ein System bei gegebenen thermodynamischen Bedingungen? Wie ändern sich diese Eigenschaften, wenn sich die Bedingungen ändern?

### **Statistische Betrachtungsweise**

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts setzte sich mehr und mehr die Vorstellung durch, dass Körper aus einzelnen Teilchen (Atomen oder Molekülen bestehen). Im Prinzip könnte man ein Gas also auch beschreiben, indem man für jedes einzelne Teilchen die Bewegungsgleichungen aufstellt und diese dann unter Berücksichtigung der Tatsache löst, dass diese Teilchen untereinander sowohl stoßen als auch wechselwirken können und zudem auch mit den Wänden des Gefäßes stoßen können. Allerdings ist die Anzahl der Teilchen in einem Volumen größer als  $10^{23}$ ! Dieser Weg ist also ausgeschlossen. Er ist im Prinzip auch nicht von Interesse. Eine mikroskopische Einzelbeschreibung ist nicht möglich.

Es verbleibt aber immer noch die Möglichkeit, das Verhalten der Teilchen in einem Volumen statistisch zu beschreiben und so zur Definition von durchschnittlichen Größen zu gelangen. Genau dies ist der Ansatzpunkt der statistischen Mechanik oder statistischen Thermodynamik. Man kann zwar nicht die Bewegung einzelner Teilchen im Detail verfolgen, aber man kann durchaus Größen wie die mittlere Geschwindigkeit oder die mittlere Energie berechnen. Die statistische Thermodynamik ist zudem in der Lage, schwer zu fassende Begriffe wie die Temperatur und die Entropie exakt zu definieren.

In diesem Buch wird vorwiegend vom makroskopischen Ansatz der Thermodynamik Gebrauch gemacht, obwohl die statistischen Aspekte nicht außer Acht gelassen werden. Auf die eigentliche statistische Thermodynamik wird dann im letzten Teil dieses Buchs näher eingegangen.

## **Die Rolle der Thermodynamik in der Physik und den anderen Naturwissenschaften**