

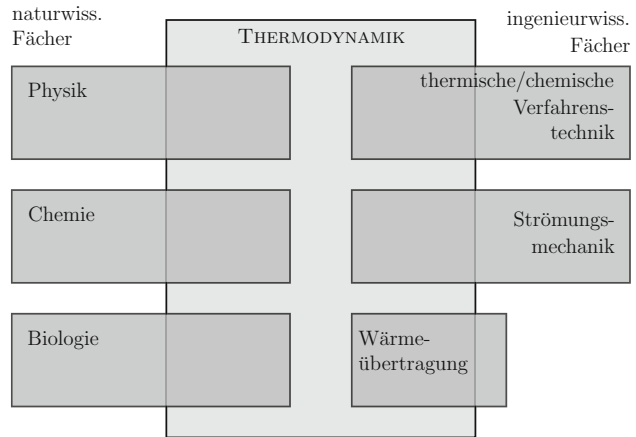
Bevor ab Kap. 3 thermodynamische Sachverhalte im Detail behandelt werden, soll zunächst das Fachgebiet der Thermodynamik charakterisiert und eingeordnet werden. Neben der schlichten Frage „Was ist Thermodynamik?“ geht es auch darum, wo dieses Gebiet im Verhältnis zu anderen natur- und ingenieurwissenschaftlichen Fächern anzusiedeln ist und ob (und wenn ja, warum) Thermodynamik „ein schwieriges Fach ist“. Die nachfolgenden Ausführungen nutzen zunächst die im Alltag gebräuchlichen Bedeutungen von Begriffen (wie System, Prozess, ...), bevor diese an späterer Stelle als thermodynamische Begriffe eingeführt und dann genau definiert werden.

## 2.1 Was ist Thermodynamik?

Als wissenschaftliches Gebiet befasst sich die Thermodynamik

- mit Systemen und Prozessen, zunächst weitgehend unabhängig von den Stoffen, die daran beteiligt sind. Es geht bei diesem Teilaspekt der Thermodynamik um Bilanzen physikalischer Größen. Dabei spielen die Energie sowie die Möglichkeit, diese in einem System durch Prozesse in andere Formen umzuwandeln, eine herausragende Rolle. Dies kann als der *Energie-Aspekt* der Thermodynamik bezeichnet werden.
- mit dem thermodynamischen Verhalten von Stoffen. Dabei geht es wesentlich um die Frage, wie sich einzelne Stoffe oder Stoffgemische bezüglich ihrer thermodynamischen Eigenschaften unterscheiden. Dies bezieht sich auf die Frage, wie einzelne Zustandsgrößen (Dichte, Druck, Temperatur, ...) bezüglich des betrachteten Stoffes miteinander verknüpft sind. Dazu gehören aber auch Fragen nach dem Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) und der Möglichkeit, diesen zu verändern (schmelzen, siedern, ...). Antworten darauf sind stets stoffbezogen, weshalb in diesem Zusammenhang vom *Stoffdaten-Aspekt* der Thermodynamik gesprochen werden kann.

**Abb. 2.1** Das Fachgebiet Thermodynamik im Umfeld anderer natur- und ingenieurwissenschaftlicher Fächer



In technischen Anwendungen, wie Anlagen zur Stromerzeugung, treten beide Aspekte gemeinsam auf, da der Verlauf von Prozessen davon abhängig ist, welche Stoffe daran beteiligt sind.

Die Einordnung des Fachgebietes Thermodynamik in den Kanon natur- und ingenieurwissenschaftlicher Fächer kann etwa wie in Abb. 2.1 skizziert erfolgen. Dabei sollen die Überschneidungen deutlich werden, ohne dass damit genauere Angaben zum Umfang dieser Überschneidungen verbunden wären. Eine gewisse Sonderstellung nimmt das Fachgebiet der Wärmeübertragung (engl.: heat transfer) ein, weil es eigentlich als originäres Teilgebiet der Thermodynamik angesehen werden könnte, ungeachtet dessen aber als eigenständiges Fach etabliert ist.

Historisch gesehen ist die Thermodynamik ein recht „junges“ Fach, das erst Anfang des 19. Jahrhundert entstanden ist und mit Namen wie Carnot, Joule, Clausius, Lord Kelvin, Gibbs, Nernst und Rankine, um nur einige zu nennen, in Zusammenhang gebracht werden kann. Eine der ersten grundlegenden Arbeiten stammt von N.L.S. Carnot (1824) und trägt den Titel „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen“.

## 2.2 Ist Thermodynamik ein „schwieriges Fach“?

Eine Befragung unter Studenten, die das Fach Thermodynamik (mehr oder weniger erfolgreich) bewältigt haben, würde mit hoher Wahrscheinlichkeit ergeben, dass dieses Fach als „schwierig“ eingestuft wird. Woran liegt dies bzw. was macht es zu einem Fach, das als sehr anspruchsvoll empfunden wird?

Ein erster Erklärungsversuch führt dazu, dass es an den „vordergründigen Inhalten“ wohl nicht liegen kann, da diese zumindest aus mathematischer Sicht ausgesprochen einfach sind. Ein wesentlicher Teil des Faches Thermodynamik befasst sich mit der Ver-

mittlung der beiden ersten Hauptsätze, die in einer „etwas verkürzten Form“ lauten:

$$1. \text{ Hauptsatz: } E = \text{const}$$

$$2. \text{ Hauptsatz: } S_{\text{irr}} \geq 0$$

Ohne  $E$  und  $S_{\text{irr}}$  eingeführt zu haben (es handelt sich um die *Gesamtenergie* und die *Entropieproduktion*), fällt die anspruchslose mathematische Form auf, die deshalb keine Erklärung für die Schwierigkeit des Faches liefert.

In der Tat ist es die Anwendung der recht einfachen Beziehungen auf sehr vielfältige und unter Umständen komplexe Systeme, bei der die eigentlichen Probleme zutage treten:

- Die „einfachen“ Hauptsätze können nur in dem Maße eingesetzt werden, in dem die Physik eines interessierenden Problems verstanden ist. Dies kann im Einzelfall ein hoher Anspruch sein.
- Die Anwendung auf die verschiedensten Fragestellungen erfordert neben physikalischen Kenntnissen auch ein hohes Abstraktionsvermögen, da es häufig gilt, die wesentlichen Zusammenhänge in einem komplexen Problem zu erkennen und auf den Zusammenhang von wenigen, aber entscheidenden Größen zurückzuführen.
- „Thermodynamisches Denken“ erfordert die Fähigkeit zur Modellbildung, d. h. ein physikalischer Zusammenhang muss in ein theoretisches Modell überführt werden können. Dies vereint im Grunde die beiden zuvor erwähnten Erfordernisse: Auf der Basis einer fundierten physikalischen Analyse eines Problems muss dieses zu einem physikalisch/mathematischen Modell abstrahiert werden. Nur dann können die „einfachen“ thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten sinnvoll zur Anwendung kommen.

Vor dem Hintergrund der relativ einfachen Mathematik, aber der gleichzeitig anspruchsvollen physikalischen Modellbildung kann die eingangs gestellte Frage (ob Thermodynamik ein schweres Fach sei) mit einem klaren „Ja“ beantwortet werden ...

---

## 2.3 Statistische/phänomenologische Thermodynamik

Zwei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten, sich thermodynamischen Fragen zu nähern, bestehen darin, die beteiligten Stoffe entweder als Ensemble von einzelnen Atomen bzw. Molekülen anzusehen oder sie als Kontinuum, d. h. unter Vernachlässigung der molekularen Struktur zu betrachten.

In der *statistischen Thermodynamik* wird der molekulare Aufbau der Materie zum Ausgangspunkt genommen. Aus Modellvorstellungen zum Verhalten der einzelnen Moleküle und ihrer Wechselwirkung sowie aus der Kenntnis ihrer kinetischen Energie und ihres Impulses wird abgeleitet, welche Werte den makroskopischen Größen wie der Dichte, dem Druck und der Temperatur zugeschrieben werden können. Dies gelingt sehr gut, solange die einzelnen Moleküle keine oder nur geringe Wechselwirkungen untereinander aufweisen, weil ihr Abstand voneinander groß ist, wie z. B. bei hochverdünnten Gasen. In dem

Maße, in dem sich der intermolekulare Abstand aber verringert, nimmt die Zahl der in einem betrachteten Volumen beteiligten Moleküle stark zu. Es können auf diesem Weg nur noch extrem kleine Volumina betrachtet werden, wenn die Wechselwirkung der Moleküle untereinander mit numerischen Methoden berücksichtigt werden soll.

In der *phänomenologischen Thermodynamik* wird von vornherein von einem Kontinuum ausgegangen. Dies ist eine sehr gute Näherung des tatsächlichen, molekularen Aufbaus der Materie, solange dabei Systeme betrachtet werden, die eine sehr große Anzahl von Molekülen enthalten. Dann spielen die statistischen Schwankungen, die auf molekularer Ebene stets vorhanden sind, keine Rolle, weil über eben diese große Anzahl von Teilchen „gemittelt“ wird. Da makroskopische Größen dann aber nicht mehr aus dem physikalischen Verhalten der Einzelteilchen abgeleitet werden können, ist man auf empirische Daten in Bezug auf das unterstellte Kontinuum angewiesen. In diesem Sinne handelt es sich also um eine phänomenologische Betrachtungsweise.

Die weiteren Ausführungen in diesem Buch orientieren sich fast ausschließlich an der phänomenologischen Thermodynamik. Nur in einigen Ausnahmefällen wird auf Aussagen der statistischen Thermodynamik Bezug genommen.

## 2.4 Thermodynamisches Gleichgewicht – grundlegende Definitionen

Der Begriff Thermo„dynamik“ suggeriert ein grundsätzlich „dynamisches“ Verhalten der betrachteten thermodynamischen Systeme. Dies ist in vielen Situationen jedoch nicht der Fall, weil es sich um Systeme im sog. *thermodynamischen Gleichgewicht* handelt. Dies ist ein entscheidender Begriff für das Verständnis thermodynamischer Vorgänge und soll deshalb schon an dieser Stelle definiert werden.

### **DEFINITION: Thermodynamischer Gleichgewichtszustand und Phase**

Ein räumlich abgegrenzter Bereich (thermodynamisches System) erreicht seinen *thermodynamischen Gleichgewichtszustand*, wenn alle Unterschiede innerhalb der einzelnen physikalischen Größen, die grundsätzlich mit fortschreitender Zeit abgebaut werden können, zu null geworden sind.

Das System befindet sich dann in einem Zustand, der als *Phase*<sup>1</sup> bezeichnet wird.

Diese Definition greift zwar mit mehreren Begriffen vor (erst später werden *System* und *Zustand* als thermodynamische Begriffe eingeführt), sie ist aber auch an dieser Stelle schon verständlich. Der Abbau von Gradienten physikalischer Größen bedeutet, dass z. B. keine Temperaturverteilung im System auftritt, sondern dieses eine einheitliche Tempera-

---

<sup>1</sup> Gelegentlich wird der Phasenbegriff enger gefasst und dient dann nur zur Unterscheidung nach fest, flüssig und gasförmig.

tur besitzt. Damit muss ausgeschlossen werden, dass im oder am System sog. *Hemmnisse* bestehen (engl.: constraints), die eine Ungleichverteilung aufrechterhalten würden.

Mit Hilfe dieses Begriffes kann eine grundsätzliche Einteilung der Thermodynamik in drei unterschiedliche Kategorien erfolgen, was wiederum in Form entsprechender Definitionen geschehen soll.

**DEFINITION: Gleichgewichts-Thermodynamik oder Phasen-Thermodynamik**

Unter *Gleichgewichts- bzw. Phasen-Thermodynamik* wird folgende Vorgehensweise verstanden:

Bei der thermodynamischen Analyse von Zuständen gelten zwischen den einzelnen physikalischen Größen die Beziehungen für das thermodynamische Gleichgewicht. Gradienten von physikalischen Größen treten im Allgemeinen nicht auf. Sie kommen nur dann vor, wenn bestimmte Hemmnisse nicht entfernt werden können, die zu einem Abbau der zugehörigen Gradienten führen würden. Ansonsten liegt das System als Phase vor.

Ein Glas Wasser, das lange Zeit in einer Umgebung mit konstanter Temperatur steht, könnte im Rahmen der Gleichgewichts-Thermodynamik beschrieben werden. Es treten dann keine Temperaturgradienten auf und die Geschwindigkeit im Wasser ist überall gleich (nämlich null). Es besteht aber ein Gradient im Druck ( $\rightarrow$  hydrostatische Druckverteilung), der jedoch in einem Schwerfeld nicht durch die Auflösung eines inneren Hemmnisses abgebaut werden könnte.

**DEFINITION: Quasigleichgewichts-Thermodynamik**

Unter *Quasigleichgewichts-Thermodynamik* wird folgende Vorgehensweise verstanden:

Bei der thermodynamischen Analyse von Zustandsänderungen gelten zwischen den einzelnen physikalischen Größen Beziehungen, die mit akzeptablen Abweichungen (im Ergebnis) durch die Beziehungen für das thermodynamische Gleichgewicht angenähert werden können.

Gradienten von Geschwindigkeiten und Temperaturen führen zu Spannungen und Wärmeströmen, die linear von diesen Gradienten abhängen.

Wenn das Wasser im Glas umgerührt wird und dabei in Bewegung gerät oder abkühlt, weil es anfangs wärmer als die Umgebung war, so können diese Vorgänge auf der Basis der Quasigleichgewichts-Thermodynamik beschrieben werden, „obwohl“ im System jetzt Gradienten der Geschwindigkeit und der Temperatur auftreten und das System streng genommen nicht mehr als Phase vorliegt.

**DEFINITION: Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik**

Unter *Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik* wird folgende Vorgehensweise verstanden:

Bei der thermodynamischen Analyse von *Zustandsänderungen* gelten zwischen den einzelnen physikalischen Größen Beziehungen, die nicht mit akzeptabler Abweichung (im Ergebnis) durch die Beziehungen für das thermodynamische Gleichgewicht angenähert werden können.

Gradienten von Geschwindigkeiten und Temperaturen führen zu Spannungen und Wärmeströmen, die nichtlinear von diesen Gradienten abhängen. Systeme mit solchen Eigenschaften können auch nicht mehr näherungsweise als Phasen behandelt werden.

Fast alle technisch interessierenden Systeme können aus thermodynamischer Sicht auf der Basis der Quasigleichgewichts-Thermodynamik (engl.: classical irreversible thermodynamics, CIT) analysiert werden. Die darin vorkommenden Gradienten der physikalischen Größen verhindern nicht, dass die im Gleichgewicht gewonnenen Zusammenhänge lokal (d. h. an einer bestimmten Stelle im System) und momentan (d. h. zu einem bestimmten Zeitpunkt) angewandt werden können. Deshalb wird dann auch von einem *lokalen und momentanen Gleichgewicht* oder einer *quasistatischen Zustandsänderung* gesprochen.

Nur in Extremfällen (wie z. B. in Stoßwellen beim Übergang von Über- auf Unterschallströmungen) treten so hohe Gradienten auf, dass eine Analyse auf der Basis der Nichtgleichgewichts-Thermodynamik (engl.: extended irreversible thermodynamics, EIT) erforderlich ist. Dies geht allerdings weit über den Rahmen dieses Buches hinaus.

---

## 2.5 Beispiele aus dem Alltag

Es gibt im Alltag sehr viele Situationen, die mit thermodynamischen Vorgängen im Zusammenhang stehen und deshalb auch thermodynamisch erklärt werden können.<sup>2</sup> Einige dieser Phänomene sollen nachfolgend aufgeführt werden, ohne dass an dieser Stelle bereits die thermodynamische Erklärung gegeben werden kann. Es sollte aber jedem Leser nach dem Studium des vorliegenden Buches möglich sein, die entscheidenden Aspekte der Erklärung zu benennen.

Entlang eines Tagesablaufes werden folgende drei Beispiele gegeben, die sehr eng mit thermodynamischen Fragestellungen verbunden sind:

---

<sup>2</sup> Ausführlich beschriebene Beispiele finden sich in: Herwig, H. (2014): „Ach, so ist das! 50 thermofluidynamische Alltagsphänomene anschaulich und wissenschaftlich erklärt“, Springer Vieweg Verlag.

- *morgens*: Im Badezimmer beschlägt der Spiegel nach dem Duschen meist vollständig, wird aber stets von unten beginnend wieder klar. Genauso bilden sich Stockflecken im Badezimmer (wenn überhaupt) stets oben, d. h. im Deckenbereich. WARUM?
- *mittags*: In der Küche wird die Linsensuppe im Schnellkochtopf innerhalb von 20 min gar, statt in einem normalen offenen Topf dafür über eine Stunde zu benötigen. Leider brennt sie aber auch regelmäßig an, wenn dieser Vorgang zwischendurch unterbrochen und der Schnellkochtopf geöffnet wird, um weitere Zutaten hinzuzugeben. WARUM?
- *abends*: Im Wohnzimmer auf dem Tisch mit dem guten Tischtuch gibt es hässliche Wasserflecken, obwohl die Weinflasche völlig trocken war, als sie aus dem Kühlschrank auf den Tisch kam. WARUM?

---

## 2.6 Beispiele aus technischen Anwendungen

Aus der Vielzahl von technischen Anwendungen, die ohne Kenntnis thermodynamischer Zusammenhänge meistens gar nicht erst hätten entstehen können, werden hier wiederum drei Beispiele ausgewählt. Die Antworten auf die dabei auftretenden Fragen bleiben wiederum dem Leser überlassen.

- Der Wirkungsgrad eines Kraftwerks wird als das Verhältnis aus der elektrischen Leistung, die das Kraftwerk liefert, und der Energie, die pro Zeit mit dem Brennstoff in das Kraftwerk eingespeist wird, definiert. Trotz größter Anstrengungen gelingt es nicht, in einem Kraftwerk Wirkungsgrade von deutlich mehr als 60 % zu erreichen. WARUM?
- Es ist technisch sehr einfach, einen Raum zu heizen (z. B. mit einem offenen Feuer, einem elektrischen Heizlüfter oder einer einfachen Warmwasserheizung), es ist aber sehr aufwendig, ihn zu kühlen (dies erfordert eine technisch aufwendige Kühlanlage). WARUM?
- Als Ergebnis intensiver Entwicklungsarbeit der Automobilindustrie benötigt ein PKW mit Otto-Motor und einer Leistung von 100 kW etwa neun Liter Treibstoff pro 100 km Fahrstrecke, während ein dieselgetriebenes Fahrzeug gleicher Leistung mit etwa sechs Liter pro 100 km auskommt. WARUM?

Technische Thermodynamik

Grundlagen und Anleitung zum Lösen von Aufgaben

Herwig, H.; Kautz, C.; Moschallski, A.

2016, XIII, 486 S. 142 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-11887-7