

1

Einleitung

Die Thermodynamik ist eine allgemeine Energielehre. Als Teilgebiet der Physik befasst sie sich mit den Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung von Energieumwandlungsvorgängen. Dabei sind solche Umwandlungsvorgänge von Interesse, die unter Wärmeerscheinungen ablaufen.

Die Thermodynamik als *axiomatische Wissenschaft* ist vergleichsweise jung und gegenüber den klassischen Wissenschaften, wie der Mathematik oder der Mechanik, erst seit ca. zweieinhalb Jahrhunderten bekannt. Anlass dafür, sich im 18. Jahrhundert Gedanken über die Umwandlung von thermischer Energie zu machen, war das Bestreben, die Alltagsarbeit durch den Einsatz von Maschinen zu erleichtern. Dabei stieß man auf die bahnbrechende Entdeckung, dass Wärme in mechanische Arbeit umwandelbar ist. Allerdings konnte diese Umwandlung, wie man feststellen musste, lediglich unvollständig durchgeführt werden. Die Verbesserung des Wirkungsgrades, mit dem die Umwandlung von Wärme in Arbeit erfolgt, wir sagen heute *Verbesserung der Energieeffizienz* dazu, bietet die Grundlage für wissenschaftliches Arbeiten und Forschen seit mehr als zwei Jahrhunderten hinweg.

Neben der Beschreibung von energietechnischen Prozessen ermöglicht die Thermodynamik grundlegende Aussagen für die Stoffumwandlung bei chemischen Reaktionen. Demgemäß unterscheidet man die Gebiete der „Technischen Thermodynamik“ sowie der „Chemischen Thermodynamik“. Eine weitere übergreifende Unterscheidung der Thermodynamik bezieht sich darauf, ob die Betrachtungsweise aus makroskopischer oder mikroskopischer (atomarer) Sicht erfolgt. Im ersten Fall spricht man von der *klassischen oder phänomenologischen Thermodynamik*, im zweiten Fall von der *statistischen Thermodynamik*.

1.1

Technische Thermodynamik

Wir wollen uns im Folgenden mit der für das Ingenieurwesen wichtigen „Technischen Thermodynamik“ befassen, die sich nahezu ausschließlich der phänomenologischen Darstellungweise bedient. Nach Schmidt *et al.* (1975) ist es das Ziel der technischen Thermodynamik

- die Energieumwandlungsgesetze einzuführen und deren Anwendung auf technische Prozesse zu zeigen sowie
- die Untersuchungen der Materie zu gestatten und damit die Bestimmung von Stoffeigenschaften zu ermöglichen.

Ganz allgemein lässt sich die „Technische Thermodynamik“ in eine sogenannte **Prozessthermodynamik** und in eine **Stoffthermodynamik** unterteilen:

Die **Prozessthermodynamik** befasst sich mit der Analyse von Energieumwandlungsvorgängen, die bei thermodynamischen Prozessen ablaufen. Dabei ist es zunächst völlig uninteressant, welcher Stoff – auch Arbeitsmittel genannt – bei der Energieumwandlung verwendet wird. Wenige makroskopisch messbare Größen, wie Druck, Temperatur oder Volumen reichen dabei aus, um den Zustand eines thermodynamischen Systems eindeutig zu charakterisieren, ohne etwas über die Natur der im betrachteten System befindlichen Materie aussagen zu müssen. Ein Vorteil der „Technischen Thermodynamik“ liegt darin, dass die quantitative Erfassung allgemeiner Energieumwandlungsvorgänge mithilfe weniger Erfahrungssätze (Hauptsätze) erfolgt. Diese Erfahrungssätze (**Axiome**) wurden formuliert, bevor Kenntnis über die Struktur der Materie vorlag. Die Hauptsätze der Thermodynamik sind mathematisch nicht beweisbar. Ihre Richtigkeit zeigt sich jedoch in der täglichen Praxis.

Die **Stoffthermodynamik** befasst sich mit den thermodynamischen Eigenschaften der Arbeitsmittel. Dieser Zweig der „Technischen Thermodynamik“ entwickelt auf Basis der Hauptsätze allgemeingültige Beziehungen zwischen Größen, die geeignet sind, den physikalischen Zustand des verwendeten Arbeitsmittels zu beschreiben. Die allgemeingültigen Beziehungen, auch Fundamentalgleichungen genannt, werden dann an die jeweiligen Stoffe, z. B. durch Experimente, angepasst.

1.2

Zur Handhabung des Arbeitsbuches

Das vorliegende Buch soll die Grundlagen der anwendungsorientierten „Technischen Thermodynamik“ vermitteln, die im Bereich der ingenieurwissenschaftlichen Hochschulausbildung benötigt werden. Dies erfolgt in einer möglichst kompakten Darstellung, die durch kurze Zusammenfassungen nach jedem Kapitel unterstützt wird.

Nach der Beschreibung von Aufgabe und Einteilung der Thermodynamik (Kapitel 1) werden thermodynamische Grundlagen wie die zu verwendende Nomenklatur, der Systembegriff, thermodynamische Größen und auch bereits der nulle Hauptsatz in Kapitel 2 eingeführt. Eine Übersicht über die verschiedenen, für die Bilanzierung thermodynamischer Systeme relevanten Energien sowie deren Verwendung im ersten Hauptsatz, ist in Kapitel 3 zu finden. Um bereits nach den Kapiteln 2 und 3 den Lernstoff anhand nichttrivialer Rechenaufgaben vertiefen zu können, wozu in der Regel kalorische Zusammenhänge zwischen Zustands-

größen benötigt werden, erfolgt eine Herleitung dieser Ansätze exemplarisch für Festkörper, Flüssigkeiten und ideale Gase, basierend auf den bis dahin eingeführten Grundlagen. Kapitel 4 widmet sich der Entropie sowie deren Verwendung im zweiten Hauptsatz. Die thermodynamischen Eigenschaften von Arbeitsstoffen, einschließlich des Spezialfalls „ideales Gas“, sind Gegenstand des Kapitels 5. In Kapitel 6 wird die Anwendung der Hauptsätze im Rahmen einfacher Zustandsänderungen idealer Gase und realer Stoffe verdeutlicht. Kapitel 7 behandelt die maximal gewinnbare Arbeit von Prozessen. Technische Anwendungen, z. B. Kreisprozesse ohne (Otto-, Diesel-, Joule-, Ericson-, Stirling-Prozess) und mit Phasenwechsel (Dampfkraftprozesse, Kaltdampfprozesse) des Arbeitsmittels, werden in Kapitel 8 betrachtet. Kapitel 9 ist den Gasgemischen und der feuchten Luft als Gas-Dampf-Gemisch vorbehalten, bevor im 10. Kapitel die Berechnung der Reaktionsenthalpie einfacher chemischer Reaktionen gezeigt wird.

Als Kontrolle, ob die thermodynamischen Grundlagen verstanden wurden, wird deren Anwendung auf technische Fragestellungen durch das Bearbeiten von Verständnis- und Übungsaufgaben in unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden nach jedem Kapitel ermöglicht. Der Schwierigkeitsgrad dieser Aufgaben wird durch Kennzeichnung mit „*“ (Einstiegswissen), „**“ (Routinewissen) und „***“ (Prüfungswissen) transparent gemacht.

Es wird empfohlen, die **Verständnisfragen** zuerst ohne Hilfsmittel zu beantworten. Die korrekten Antworten zu den Fragen sind separat angegeben. Falls keine Beantwortung möglich ist oder falsche Antworten gegeben wurden, sollten die Grundlagen im Lehrtext nochmals nachgelesen werden. Diese Stoffwiederholung dient der Verinnerlichung der Inhalte.

Zur Bearbeitung der **Übungsaufgaben** werden die Kapitelzusammenfassungen als ein Hilfsmittel empfohlen. Für jede Übungsaufgabe können Lösungshinweise in zwei Stufen (I, II) im Arbeitsbuch gefunden werden. Beim Lösungshinweis (I) erfolgt durch gezielte Fragestellungen bzw. Tipps ein Aufzeigen des möglichen Lösungsganges. Es werden dabei keine Formeln angegeben. Sollten diese textlichen Hinweise nicht zur Lösungsfundung ausreichen, so können im Lösungshinweis (II) – als Ergänzung zum Lösungshinweis (I) – passende Formelansätze gefunden werden. Die Zahlenwertlösungen der Übungsaufgaben sind separat angegeben und ermöglichen eine Kontrolle, ob alle relevanten Größen korrekt in SI-Einheiten in den Berechnungsgleichungen verwendet wurden.

Die Beschreibung thermodynamischer Aufgabenstellungen kann umfangreich und kompliziert sein, sodass die Gefahr besteht, wichtige Angaben zu überlesen bzw. nicht zu erkennen. Wie die Erfahrung des Autors zeigt, kann durch **fünf grundlegende Lösungsschritte** eine systematische Erfassung aller zur Problemlösung erforderlichen Informationen erfolgen (vgl. Abb. 1.1). Besonders hingewiesen sei dabei auf das Anlegen einer Zustandstabelle (tabellarische Zuordnung von Zustandsgrößen zu Zustandspunkten) und deren konsekutive Vervollständigung im Verlauf der Aufgabenbearbeitung. Eine ausgefüllte Zustandstabelle erlaubt eine meist einfache Berechnung abhängiger Größen, wie z. B. Arbeiten und Wärmen. Die Anwendung des in Abb. 1.1 gezeigten Lösungsschemas bietet keine Garantie für eine fehlerfreie Aufgabenbearbeitung und ein Erzielen des korrek-

5 Schritte beim Lösen thermodynamischer Probleme**1. Um welches Arbeitsmittel handelt es sich?**

- Je nach Arbeitsmittel resultieren spezielle Formeln und Ansätze für die thermischen und kalorischen Zustandsgleichungen

2. Anfertigen einer Apparateskizze

- Stationärer Fließprozess (offenes System): 1 Bild
- Geschlossenes System: 3 Bilder

Wichtig ist dabei die Abgrenzung des interessierenden Systems von der angrenzenden Umgebung durch die Systemgrenze!

3. Erfassen der gegebenen Zustands- und Prozessgrößen (Zustandstabelle)

- Anfertigen und Verwenden einer Zustandstabelle, die im Laufe der Aufgabenbearbeitung durch neu berechnete Größen zu komplettieren ist

4. Erkennen von Vereinfachungen (z. B. konstant bleibende Zustandsgrößen, reversibel, adiabat usw.)

- Hilfreich: Skizzierung von Zustandsänderungen in Diagrammen
(p,v -, T,s -, h,s -Diagramme)

5. Mathematische Beschreibung

- Aufstellen von Bilanzen für Energie (1. H.S.),
Masse,
Entropie (2. H.S.)
- Einbringen von kalorischen und thermischen Zustandsgleichungen, Vereinfachungen

Abb. 1.1 Lösungsschema für thermodynamische Probleme.

ten Ergebnisses. Vielmehr wird die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Aufgabenbearbeitung erhöht und man eignet sich, durch Verinnerlichen der einzelnen Lösungsschritte, eine Arbeitsmethodik an. Die Lösungsschritte 1–5 des Lösungsschemas werden für die Übungsaufgaben ab Kapitel 3 im Arbeitsbuch verwendet.