

Jan Löser
Marco Klemm
Andreas Hiller

Technische Thermodynamik

in ausführlichen Beispielen



HANSER

Löser, Klemm, Hiller
**Technische Thermodynamik
in ausführlichen Beispielen**

Jan Löser,
Marco Klemm,
Andreas Hiller

Technische Thermodynamik in ausführlichen Beispielen

Mit 57 Bildern und einem Anhang mit zahlreichen
Tabellen und Diagrammen

Die Lösungen zu den Übungsaufgaben befinden sich unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/9783446442795>



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Jan Löser

Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik
Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

Dr.-Ing. Marco Klemm

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Bereich Bioraffinerien
Arbeitsgruppenleiter Chemische Biomasseveredelungsverfahren

Dr.-Ing. Andreas Hiller

Technische Universität Dresden, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Professur für Energieverfahrenstechnik



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.

ISBN 978-3-446-44279-5

E-Book-ISBN 978-3-446-44512-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag

© 2018 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Ute Eckardt und Volker Herzberg

Copy editing: Klaus Vogelsang

Herstellung: Katrin Wulst

Einbandrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: le-tex publishing services GmbH

Druck und Bindung: Hubert&Co, Göttingen

Printed in Germany

Vorwort

Die Energie steht nicht nur als Existenzgrundlage jeder Zivilisation im Mittelpunkt wichtiger aktueller Diskussionen, sie ist als eine der physikalischen Grundgrößen von zentraler Bedeutung für die **naturwissenschaftliche Beschreibung unserer Welt**. Die Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik ermöglichen es, diese physikalische Größe, ihre Wechselwirkungen mit der Materie und die dadurch ausgelösten Vorgänge zu erfassen und zu beschreiben. Damit sind zentrale Bereiche des Lebens, der Naturwissenschaften und Technik berührt. Die Anwendungen sind äußerst vielfältig und ziehen sich von den klassischen Einsatzfeldern in Energiewirtschaft und Energietechnik bis in die verschiedensten Bereiche der Natur- und Ingenieurwissenschaften.

Dabei löst die Thermodynamik bei vielen, die als Studenten oder im Berufsleben erstmalig enger mit ihr in Berührung kommen, ein gewisses Unbehagen aus. Abgesehen davon, dass sicher nicht in jedem Fall die Umstände dieser ersten Berührung ideal sind, ist dies sicher auch in der **Methodik der Thermodynamik** begründet, die sich in vielen von der der klassischen Mechanik als Fundament der Physik und Technik unterscheidet. Während die Größen und Vorgänge der Mechanik mit den menschlichen Sinnen erlebbar sind, trifft dies für die Thermodynamik nur zu einem kleinen Teil zu. Vielmehr ist die Verwendung von Größen unerlässlich, die selbst kaum fassbar, in ihrer Wirkung aber sehr real sind, wie etwa die Energie und die Entropie.

Dies macht zum Einstieg in das Themengebiet einen gewissen Gewöhnungsprozess erforderlich. Deshalb verbindet dieses Buch zur Erleichterung des Selbststudiums kurze einführende Texte mit umfangreich erläuterten Beispielen und Übungsaufgaben. So soll, aufbauend auf begrenzten Vorkenntnissen, ein schnelles Verständnis der Sachlage ermöglicht werden.

Das Buch wendet sich dabei an alle Einsteiger in das Gebiet der technischen Thermodynamik, Studenten im Grundlagenstudium, Nebenfachstudenten, Auszubildende energietechnischer Berufe, aber auch jede Art von „Quereinsteigern“ und Interessierten.

Jan Löser
Marco Klemm
Andreas Hiller

Chemnitz und Dresden im Mai 2018

Inhalt

1	Einleitung	15
1.1	Was will dieses Buch? Inhalt und Bedeutung der Thermodynamik	15
1.2	Wozu brauche ich Thermodynamik?	16
1.3	An wen wendet sich dieses Buch?	18
1.4	Wie benutzt man dieses Buch?	19
2	System, Zustand und ihre Beschreibung	21
2.1	Allgemeines und Grundlagen	21
2.2	System und Zustand	21
2.3	Thermodynamisches Gleichgewicht	23
2.4	Zustandsgrößen	24
2.4.1	Stoff, Masse und Stoffmenge	24
2.4.2	Volumen	25
2.4.3	Dichte und spezifisches Volumen	25
2.4.4	Molvolumen und molare Masse	26
2.4.5	Druck	28
2.4.6	Temperatur	32
2.4.7	Energie	33
2.5	Bezugssysteme, Normbedingungen und Standardbedingungen	34
2.6	Zustandsänderung, Prozess und Prozessgrößen	35
3	Stoffeigenschaften	36
3.1	Allgemeines und Grundlagen	36
3.2	Spezifische Wärmekapazität	36
3.2.1	Allgemeines	36
3.2.2	Mittlere spezifische Wärmekapazität	37
3.2.3	Beispiele	38
3.2.4	Übungsaufgaben	43
3.3	Eigenschaften von Gasmischungen	43
3.3.1	Allgemeines	43
3.3.2	Beispiele	49
3.3.3	Übungsaufgaben	61

4	Energie und Energieerhaltung	62
4.1	Allgemeines und Grundlagen	62
4.2	Arbeit und Wärme	63
4.3	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	65
4.4	Energiebilanzierung	65
4.5	Arbeit am offenen System und Enthalpie	67
4.5.1	Beispiel	68
5	Zustandsänderung ohne Änderung des Aggregatzustandes	71
5.1	Allgemeines und Grundlagen	71
5.2	Das ideale Gas	71
5.3	Die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase	72
5.3.1	Beispiele	73
5.3.2	Übungsaufgaben	76
5.4	Energetische Aspekte der Zustandsänderung im idealen Gas	78
5.4.1	Beispiele	82
5.5	Spezielle Zustandsänderungen idealer Gase	83
5.5.1	Zustandsänderung bei gleichbleibendem Volumen (isochore Zustandsänderung)	84
5.5.2	Zustandsänderung bei gleichbleibendem Druck (isobare Zustandsänderung)	85
5.5.3	Zustandsänderung bei gleichbleibender Temperatur (isotherme Zustandsänderung)	86
5.5.4	Zustandsänderung ohne Wärmeübertragung (adiabate Zustandsänderung)	88
5.5.5	Polytrope Zustandsänderung	92
5.5.6	Beispiele	93
5.5.7	Übungsaufgaben	105
5.6	Zustandsänderungen in Feststoffen und Flüssigkeiten	106
5.6.1	Wärmedehnung von Flüssigkeiten und Feststoffen	107
5.6.2	Beispiele	108
6	Die Grenzen der Energieumwandlung, zweiter Hauptsatz der Thermodynamik, Entropie	111
6.1	Allgemeines und Grundlagen	111
6.2	Kontinuierliche Prozesse, Kreisprozesse	111
6.3	Reversible und irreversible Prozesse	113
6.4	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	114

6.5	Die Entropie	115
6.6	Die Entropie der speziellen Zustandsänderungen idealer Gase	117
6.7	Wirkungsgrad und Gütegrad	119
6.8	Der Carnot-Kreisprozess und der Carnot-Wirkungsgrad	120
6.9	Beispiele	122
6.9.1	Carnot-Wirkungsgrad	122
6.9.2	Carnot-Prozess, Nutzarbeit, (thermischer) Carnot-Wirkungsgrad.....	123

7	Anwendung von Kreisprozessen ohne Änderung des Aggregatzustandes	128
7.1	Allgemeines und Grundlagen	128
7.2	Kontinuierliche rechtsläufige Kreisprozesse, der Gasturbinenprozess	129
7.2.1	Wirkungsgradsteigernde Verbesserungsmöglichkeiten für den Joule-Prozess	133
7.2.2	Strahltriebwerke als Sonderform der Gasturbinen	134
7.2.3	Beispiele	135
7.2.4	Übungsaufgabe	139
7.3	Periodische rechtsläufige Kreisprozesse, Prozesse in Kolbenmaschinen	139
7.3.1	Prozesse in Verbrennungsmotoren	140
7.3.2	Periodische rechtsläufige Kreisprozesse mit externer Wärmezuführung	161
7.4	Verdichter (Kompressoren)	162
7.4.1	Beispiele	165
7.4.2	Übungsaufgaben	173

8	Zustandsänderungen mit Änderung des Aggregatzustands	175
8.1	Allgemeines und Grundlagen	175
8.2	Schmelzen und Erstarren	176
8.2.1	Beispiele	177
8.2.2	Übungsaufgaben	177
8.3	Sieden und Kondensieren	178
8.3.1	Der Ablauf der Aggregatzustandsänderung beim Verdampfen und Dampfarmen	178
8.3.2	Enthalpie und Entropie des Verdampfens und Kondensierens	180
8.3.3	Diagramme für die Betrachtung der Aggregatzustandsänderung flüssig-gasförmig	182
8.3.4	Beispiele	184
8.3.5	Übungsaufgaben	202
8.4	Weitere Aggregatzustandsänderungen	203

9	Anwendung von Kreisprozessen mit Änderung des Aggregatzustandes	205
9.1	Allgemeines und Grundlagen	205
9.2	Der ideale Vergleichsprozess der Dampfkraftprozesse, der Clausius-Rankine-Prozess	206
9.2.1	Wirkungsgradsteigerung durch optimierte Prozessparameter	211
9.2.2	Wirkungsgradsteigerung durch Zwischenüberhitzung	211
9.2.3	Regenerative Speisewasservorwärmung zur Wirkungsgradsteigerung ..	213
9.2.4	Beispiele	214
9.2.5	Übungsaufgaben	222
9.3	Nicht wässrige Arbeitsmedien	223
9.4	Dampfkraftprozesse in Kolbenmaschinen	223
10	Linksgängige Kreisprozesse, Kältemaschinen und Wärmepumpen	225
10.1	Allgemeines und Grundlagen	225
10.2	Prinzip des Linksprozesses	225
10.3	Linksprozesse ohne Änderung des Aggregatzustandes	228
10.4	Linksprozesse mit Änderung des Aggregatzustandes	230
10.5	Beispiele	232
10.5.1	Gaskälteprozess, offener Prozess, linkslaufender reversibler Joule-Prozess	232
10.5.2	Kältekreisprozess für NH_3 , Dampfkälteprozess, Grundlagen	236
10.6	Übungsaufgaben	240
10.6.1	Unterkühlter Dampfkälteprozess, $\lg p, h$ -Diagramm für Ammoniak NH_3	240
11	Spezielle Prozesse in strömenden Medien	241
11.1	Allgemeines und Grundlagen	241
11.2	Fließprozess	241
11.3	Die adiabate Drosselung	242
11.4	Düse und Diffusor	243
11.5	Das Ausströmen von Gasen und Dämpfen	243
11.6	Beispiele	247
11.6.1	Ausströmvorgang, kleines Druckgefälle, Geschwindigkeitsbeiwert, Kontraktionszahl	247
11.6.2	Ausströmvorgang, kein kleines Druckgefälle, Ausströmgeschwindigkeit, Massestrom	248
11.6.3	Ausströmender Dampf, Laval-Düse, h, s -Diagramm, Dampfgehalt	250

11.7 Übungsaufgaben	253
11.7.1 Strahlpumpe, Ausströmen, kein kleines Druckgefälle, Laval-Düse, Unterdruck.....	253

12 Die Verbrennung als Vorgang der Umwandlung chemischer Energie in thermische Energie	254
12.1 Allgemeines und Grundlagen	254
12.2 Vollständige Verbrennung und Luftüberschuss	255
12.2.1 Verbrennung gasförmiger Brennstoffe	255
12.2.2 Verbrennung fester und flüssiger Brennstoffe	262
12.3 Verbrennungsvorgänge bei Luftmangel	267
12.3.1 Verbrennung gasförmiger Brennstoffe bei Luftmangel	268
12.3.2 Verbrennung fester und flüssiger Brennstoffe bei Luftmangel	271
12.4 Beispiele	274
12.4.1 Verbrennung eines gasförmigen Brennstoffes (Gasgemisch) mit Luftüberschuss, Luftbedarf, Rauchgaszusammensetzung	274
12.4.2 Verbrennung eines festen Brennstoffes (Kohle) mit Luftüberschuss, Rauchgaszusammensetzung	278
12.4.3 Ermittlung des Luftverhältnisses aus der Rauchgaszusammensetzung.	280
12.4.4 Verbrennung eines flüssigen Brennstoffes (Heizöl EL) unter Luftmangel	281
12.5 Übungsaufgaben	283
12.5.1 Ermittlung des Luftverhältnisses aus der Rauchgaszusammensetzung bei stickstoffhaltigem Brenngas	283
12.5.2 Verbrennung eines gasförmigen Brennstoffes (Erdgas) unter Luftmangel	283
12.6 Energetische Betrachtung der Verbrennung	283
12.6.1 Energetische Kenngrößen einer Feuerung	287
12.6.2 Berechnung der Heizwerte aus der Brennstoffanalyse	289
12.7 Beispiele	291
12.7.1 Heizwert eines festen Brennstoffes (Steinkohle) aus der Elementaranalyse	291
12.7.2 Heizwert eines gasförmigen Brennstoffes aus seiner Zusammensetzung	292
12.7.3 Heizwertminimierung durch Brenngasfeuchte	293
12.7.4 Adiabate Verbrennungstemperatur	294
12.7.5 Maximale Luftzahl aus erforderlicher Feuerungstemperatur	299
12.8 Übungsaufgaben	302
12.8.1 Brennwert und Heizwert	302
12.8.2 Heizwert eines gasförmigen Brennstoffes aus seiner Zusammensetzung	302

13	Wärmetransport	303
13.1	Allgemeines und Grundlagen	303
13.2	Mechanismen der Wärmeübertragung	304
13.2.1	Konduktion oder Wärmeleitung	304
13.2.2	Konvektion oder Wärmemitführung	305
13.2.3	Radiation oder Wärmestrahlung	310
13.3	Wärmedurchgang als kombinierter Vorgang	314
13.3.1	Wärmedurchgang durch eine ebene Wand	315
13.3.2	Wärmedurchgang durch die Rohrwand	317
13.4	Wärmeübertrager als Apparate zur Übertragung von Wärme zwischen Stoffströmen	320
13.4.1	Grundlagen	320
13.4.2	Wichtige technische Beispiele von Wärmeübertragern	323
13.5	Beispiele	324
13.5.1	Wärmedurchgangskoeffizient ebene Wand	324
13.5.2	Vergleich Wärmedurchgang Rohrwand mit ebener Wand	325
13.5.3	Wärmeübergang und Wärmedurchgang	329
13.6	Übungsaufgaben	331
13.6.1	Wärmedurchgangskoeffizient ebene Wand	332
13.6.2	Wärmedurchgangskoeffizient Ziegelwand	332
13.6.3	Wärmedurchgangskoeffizient einer gedämmten Ziegelwand	332
13.6.4	Wärmedurchgangskoeffizient für verschmutzte ebene Wand	332
13.6.5	Wärmedurchgangskoeffizient verschmutzte mehrschichtige ebene Wand	332
13.6.6	Wandtemperaturen beim Wärmestrom von Wasserdampf an Wasser ..	333
13.6.7	Wärmedurchgangskoeffizient zur Schwitzwasservermeidung	333
13.6.8	Berechnung der Dämmplattendicke	333
13.6.9	Vergleich Gleichstrom- und Gegenstromwärmeübertrager	333
13.6.10	Berechnung Wärmeübergangskoeffizient	334
13.6.11	Berechnung der Wärmeleistung pro Flächeneinheit	334
13.6.12	Verbrennung, Taupunkt, Wärmedurchgang, Heizwert	334
13.6.13	Heizflächenberechnung	335
13.6.14	Spezifische Wärmeleistung Kondensator	335
13.6.15	Überprüfung eines k-Wertes	335
13.6.16	Berechnung Wärmeübergangskoeffizient	335
13.6.17	Strahlungswärme Kessel/Wand	336
13.6.18	Wärmeverlust einer Rohrleitung	336
13.6.19	Dynamische Viskosität (Vorübung)	336
13.6.20	Wärmeabgabe eines Kachelofens	336

14	Gas-Dampf-Gemische, feuchte Luft	337
14.1	Allgemeines und Grundlagen	337
14.2	Zustandseigenschaften	337
14.3	Enthalpie der feuchten Luft	340
14.4	Das h_{1+x} , x_W -Diagramm für feuchte Luft	342
14.5	Mischen feuchter Luft	345
14.6	Beispiele	347
14.6.1	Zustandsgrößen feuchter Luft	347
14.6.2	Taupunkt feuchter Luft.....	350
14.6.3	Luft als Arbeitsstoff in der Trocknung	352
14.6.4	Kühlen, Entfeuchten, Nachheizen, Konditionierung feuchter Luft	355
14.6.5	Mischen feuchter Luft	358
14.6.6	Psychrometer	361
14.6.7	Taupunkt eines feuchten Rauchgases	363
14.7	Übungsaufgaben	366
14.7.1	Verdichtung feuchter Luft	366
14.7.2	Befeuchtung mit Wasser oder Dampf, Konditionierung feuchter Luft ..	366
14.7.3	Mischen mit Nebelluft	366
	Anhang	367
A.1	Benutzte Formelzeichen mit gebräuchlichen Einheiten und stoffunabhängige Konstanten	367
A.2	Indizes	372
A.3	Zeiger	374
A.4	Stoffdatensammlung	375
A.4.1	Stoffeigenschaften wichtiger Gase	375
A.4.2	Mittlere Zusammensetzung und spezifischer Heizwert fester und flüssiger Brennstoffe (typische Anhaltswerte)	376
A.4.3	Mittlere Zusammensetzung und spezifischer Heizwert gasförmiger Brennstoffe (typische Anhaltswerte)	377
A.4.4	Zündeigenschaften verschiedener Brennstoffe (typische Anhaltswerte)	378
A.4.5	Spezifische Verbrennungsenthalpie und spezifischer Heizwert einiger Stoffe (Mittelwerte, gerundet)	379
A.4.6	Mittlere spezifische Wärmekapazität $c_{p,m}$ von Gasen und Dämpfen zwischen 0°C und ϑ bei konstantem Druck $p = 0$ bar	380
A.4.7	Wahre spezifische Wärmekapazität c_p von Gasen und Dämpfen bei konstantem Druck $p = 0$ bar	381
A.4.8	Wahre molare Wärmekapazität \bar{c}_p von Gasen und Dämpfen bei konstantem Druck $p = 0$ bar	382

A.4.9	Mittlere spezifische Wärmekapazität c_m fester und flüssiger Stoffe	383
A.4.10	Wassertafel, Stoffwerte von idealem flüssigem Wasser (nach IAPWS-IF97)	384
A.4.11	Sattdampf tabel – Zustandsgrößen von siedendem Wasser und Dampf bei Sättigung (nach IAPWS-IF97)	387
A.4.12	Mittlere spezifische Wärmekapazität c_p des überhitzten Wasserdampfes (Heißdampf) (nach IAPWS-IF97)	391
A.4.13	Heißdampf tabel – Zustandsgrößen für überhitzten Wasserdampf (nach IAPWS-IF97)	393
A.4.14	Zustandsgrößen für gesättigte feuchte Luft im Temperaturbereich $-20 \dots 95 \text{ }^\circ\text{C}$ (nach IAPWS-IF97)	395
A.4.15	Zustandsgrößen und Stoffwerte für trockene Luft als ideales Gas im Temperaturbereich $-20 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$	397
A.4.16	Sattdampf tabel für Ammoniak (NH_3) – Zustandsgrößen von siedendem Ammoniak und Ammoniak-Dampf bei Sättigung	399
A.4.17	Strahlungskoeffizient C und Gesamtemissionsgrad ε verschiedener Oberflächen bei $0 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$	400
A.4.18	Temperaturfaktor β	401
A.4.19	mittlere Wärmeleitfähigkeit λ und spezifische Wärmekapazität c von Metallen, Legierungen und Kunststoffen	402
A.4.20	Wärmeleitfähigkeit λ und Dichte ρ ausgewählter Stoffe mit durchschnittlichem Feuchtegehalt bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$	404
A.4.21	Wärmeleitfähigkeit λ von Wasser und Wasserdampf bei verschiedenen Temperaturen und Drücken	407
A.4.22	Kennzeichnende Stoffwerte für die Wärmeübertragung (nach IAPWS-IF97, VDI-Wärmeatlas)	408
A.4.23	Dynamische Viskosität η verschiedener Gase und Dämpfe in Abhängigkeit der Temperatur mit Hilfe der Sutherland-Konstante C	414
A.4.24	Schüttdichten ρ wichtiger technischer Stoffe (Anhaltswerte)	415
A.4.25	Längen- und Volumenausdehnungskoeffizienten α und γ wichtiger technischer Stoffe	416
A.4.26	Spezifische Schmelzenthalpien und Schmelztemperaturen wichtiger technischer Stoffe (Anhaltswerte bei $p_N = 1013,25 \text{ mbar}$)	418
A.5	Formelsammlung	419
A.5.1	Auswahl dimensionsloser Ähnlichkeitskennzahlen des konvektiven Wärmeübergangs	419
A.5.2	Anhaltswerte des Wärmeübergangskoeffizienten α und der Nußelt-Zahl Nu	421
A.6	Umrechnung von Einheiten	431
A.6.1	Temperatureinheiten	431
A.6.2	Druckeinheiten	432

A.6.3	(Arbeits-) Energieeinheiten	433
A.6.4	Leistungseinheiten	434
A.7	Beilagen	435
A.7.1	Mollier- h, s -Diagramm für Wasserdampf.....	435
A.7.2	T, s -Diagramm für Wasserdampf	436
A.7.3	$\lg p, h$ -Diagramm für Ammoniak (NH_3)	437
A.7.4	Mollier- h_{1+x}, x_W -Diagramm für feuchte Luft	438
Literatur	439
Index	441

1

Einleitung

■ 1.1 Was will dieses Buch? Inhalt und Bedeutung der Thermodynamik

Die **Thermodynamik** ist ein Bereich der Naturwissenschaften, der sich mit der Beschreibung jener Vorgänge beschäftigt, die auf die ungerichtete, statistische Bewegung der Elementarteilchen der Materie zurückzuführen sind. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Bewegungsintensität der Elementarteilchen und der Energieform „thermische Energie“. Damit schafft die Thermodynamik eine Verbindung zwischen energetischen Größen und den Eigenschaften der Materie. Sie ermöglicht die Beschreibung der Beeinflussung von Aufbau und Erscheinungsform der Materie durch Energie sowie die Beschreibung der Energieumwandlung. In diesem Sinne steht die Thermodynamik auch an einer Berührungsstelle von Physik und Chemie.

Die Bedeutung der Thermodynamik hängt damit direkt mit der Bedeutung des Energiebegriffes zusammen. Die Energie steht nicht nur als Existenzgrundlage jeder Zivilisation im Mittelpunkt wichtiger historischer, aktueller und sicher auch zukünftiger Diskussionen, sie ist als eine der physikalischen Grundgrößen von zentraler Bedeutung für die naturwissenschaftliche Erklärung unserer Welt. Mit der Benutzung dieser Größe erschließt sich ein neuer Betrachtungshorizont für physikalische und chemische Vorgänge.

Die **technische Thermodynamik** verzichtet auf eine Betrachtung der Vorgänge auf der Ebene der Elementarteilchen und beschreibt ausschließlich die makroskopischen Erscheinungen. Mit der damit erreichten Anwendungsnähe stellt sie somit auch ein Bindeglied zwischen den Naturwissenschaften Physik und Chemie und den Ingenieurwissenschaften dar.

Seit der Beherrschung des Feuers nutzt der Mensch thermodynamische Vorgänge, wobei mit Beispielen wie Metallschmelzöfen oder Hypokaustenheizung bereits in der Antike erste Höhepunkte erreicht wurden. Spätestens seit die Dampfmaschine zum Motor der industriellen Revolution wurde, sind thermodynamische Prozesse und der Fortschritt der Menschheit untrennbar miteinander verbunden. Aus dem Drang zur Optimierung dieser Lösungen entwickelte sich die Thermodynamik als Wissenschaft.

Als Modell der für eine einfache mathematische Beschreibung oft zu komplexen Wirklichkeit betrachtet die Thermodynamik durch vorhandene oder gedachte Grenzen abgetrennte Bereiche, sogenannte Systeme, als Ganzes. Ziel ist es dann, die Eigenschaften des Systems und den Austausch bzw. den Übertrag an den Systemgrenzen zu beschreiben. Für eine Detaillierung der Betrachtung können Systeme in Teilsysteme zerlegt werden. Grundlage der Thermodynamik ist die Betrachtung der Systemeigenschaften für das Gleichgewicht, thermodynamischer Zustand genannt. Eine Änderung eines Zustandes ist im Rahmen dieses Buches immer so zu verstehen, dass sie über eine Folge von Gleichgewichtszuständen erfolgt, dass also zu jedem beliebigen Zeitpunkt einer Zustandsänderung das System in sich im Gleichgewicht ist.

Während die Größen und Vorgänge der Mechanik zum wesentlichen Teil mit den menschlichen Sinnen erlebbar sind, erfordert die Beschreibung der Eigenschaften eines thermodynamischen Systems und der Vorgänge der Änderung dieser Eigenschaften die Verwendung von Größen, die selbst kaum fassbar, in ihrer Wirkung aber sehr real sind, wie etwa die Energie und die Entropie. Dies macht zum Einstieg in das Themengebiet einen gewissen Gewöhnungsprozess erforderlich. Deshalb verbindet dieses Buch kurze einführende Texte, die versuchen, diese Größen verständlich zu machen, mit umfangreich erläuterten Beispielen für das Selbststudium und Übungsaufgaben. Ist diese Gewöhnung erfolgt, so ermöglicht aber gerade diese Betrachtungsweise eine einfache Bearbeitung komplex erscheinender Fragestellungen mit einem überschaubaren und sicheren Handwerkszeug und begrenztem mathematischen Aufwand.

Diese neue Betrachtungsweise mit „abstrakten“ Größen ist sicher eine der Hauptursachen dafür, dass die Thermodynamik bei vielen, die als Studenten oder im Berufsleben erstmalig mit ihr enger in Berührung kommen, ein gewisses Unbehagen auslöst. Wenn man sich aber darauf einlässt und sich selbst einen gewissen Gewöhnungsprozess zugesteht, wird sich sicher auch schnell die Begeisterung darüber einstellen, für welch breiten Bereich an Fragestellungen man einen fundamentalen und trotzdem einfachen Zugang gewinnt. Die Autoren jedenfalls hat die Faszination nach einer ersten Hürde niemals wieder losgelassen.

■ 1.2 Wozu brauche ich Thermodynamik?

Schon allein aus der grundlegenden Bedeutung der Energie für alle natürlichen Vorgänge und technischen Prozesse lässt sich die Rolle einer Wissenschaft ableiten, die die Energie zum Gegenstand hat.

In wichtigen Bereichen der Wirtschaft spielt thermische Energie und damit die Thermodynamik die zentrale Rolle. Diese Bereiche sind zum Beispiel: Technik erneuerbarer Energien, Kraftwerkstechnik, Verfahrenstechnik, Energiemaschinenbau, Verbrennungsmotorentechnik, Gebäudetechnik.

Dabei macht die allgegenwärtige, berechtigte Forderung nach Energieeinsparung und danach, erneuerbare Energien zur Basis unseres Lebens und Wirtschaftens zu machen, die Beschäftigung mit der Thermodynamik in keiner Weise weniger als bisher bedeutsam. Vielmehr entstehen dadurch neue und besonders vielfältige Fragestellungen, die nur mit einem breiten, aber grundlagenbasierten Fachwissen angegangen werden können. Für die Anwendung der Solarthermie, der Geothermie, der Nutzung von Ab- und Umgebungswärme und der Energie aus Biomasse stellt die Thermodynamik die wissenschaftliche Grundlage dar.

Auch außerhalb der Bereiche, in deren Zentrum auf die eine oder andere Art und Weise die Umwandlung von Energie steht, sind thermodynamische Fragestellungen in Naturwissenschaften und Technik allgegenwärtig. Dies soll im Folgenden an Beispielen gezeigt werden:

Beispiel 1

Die Auslegung und Konstruktion von Textilmaschinen ist eine typische Fragestellung des klassischen kalten Maschinenbaus. Eine leistungsfähige Variante zur Bildung einer textilen Flä-

che stellt dabei die Kettenwirktechnik dar. Sie ist von zwei grundlegenden Merkmalen gekennzeichnet: Die Herstellung einer textilen Bindung durch Maschen erfolgt gleichzeitig mit einer Vielzahl paralleler Fäden durch die dafür benötigten technischen Einrichtungen, Wirkwerkzeuge genannt. Sie werden gemeinsam durch sie tragende Schienen, auch Barren genannt, bewegt. Daraus folgt das Problem einer Kombination aus der Bewegung lang gestreckter Bauteile mit der Kollisionsfreiheit der Vielzahl von diesen bewegten Wirkwerkzeugen.

Beispielsweise sind Maschinen mit einer Arbeitsbreite von 213'' (5,41 m) im Einsatz, bei denen auf einem Zentimeter die Wirkwerkzeuge, eine hakenförmige Wirknadel, ein Draht zum Verschließen dieses Hakens (Schließdraht), Haltebleche (Platinen) und eine oder mehrere fadenführende Lochnadeln jeweils 16-mal nebeneinander angeordnet sind (genannt Feinheit 40, d. h. 40 Wirkwerkzeuge pro 1''). Dabei müssen die Lochnadeln mit jeweils einem Faden mehr als 1 000-mal in der Minute die nur wenige Zehntelmillimeter breite Gasse zwischen den Wirknadeln, bei gleichzeitiger Bewegung der Wirknadeln und des Schließdrahtes aneinander entlang, passieren, wobei schon leichtes Touchieren zu fehlerhaftem textilem Produkt und ein Aufeinandertreffen zur Zerstörung der Maschine führt. Die thermische Ausdehnung von metallenen Maschinenteilen übersteigt schon bei Temperaturunterschieden im Bereich weniger Kelvin die Dimension der für die Bewegungen zur Verfügung stehenden Gassen. Dabei erfolgt, etwa über die Reibung in Getrieben oder die Reibung zwischen Faden und Nadel, ein ständiger Wärmeeintrag. Es ist hieraus klar ersichtlich, dass die Berücksichtigung der thermodynamischen Verhältnisse essenziell für eine erfolgreiche Konstruktion ist.

Es wurden Lösungswege entwickelt, die heute in der Regel gemeinsam zur Anwendung kommen. Eine Lösung ist die Vorwärmung der Maschine mit heißem, sie durchströmendem Öl bis in die Nähe der zu erwartenden Temperatur im Betrieb, kombiniert mit einer anschließenden Feineinstellung im warmen Zustand. Da sich der thermische Zustand im Betrieb gegenüber dem Vorwärmzustand wesentlich weniger ändert als gegenüber einer Maschine auf Raumtemperatur, sind auch die thermischen Verformungen im Betriebszustand gegenüber der Feineinstellung geringer. Als Zweites werden heute für die Barren verbreitet Materialien ohne thermische Dehnung in Längsrichtung, wie kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, eingesetzt. Damit kann aber nur die thermische Dehnung der Barren selbst eliminiert werden, während andere Bauteile, etwa in Getrieben, weiterhin aus Metall bestehen müssen und damit weiterhin einen zu berücksichtigenden Temperatureausdehnungseffekt verursachen. Die dritte Lösung besteht schließlich in einer Auslegung der Maschine, in die thermodynamische Betrachtungen als integraler Bestandteil einfließen.

Dazu werden im Kern die numerische Simulation der Temperaturverteilung in der Maschine und die Simulation der Spannungen und Verformungen miteinander kombiniert. Ausgangspunkt ist ein Modell der Erwärmung, das die Wärmeübertragung von der und an die Umgebung ebenso berücksichtigt wie die innere Erwärmung durch Reibung und natürlich die Vorwärmung. Eine damit erstellbare rechnerische Temperaturverteilung führt in Kombination mit den Temperatureausdehnungskoeffizienten der einzelnen Materialien zu Vorhersagen über die zu erwartende Verschiebung einzelner wesentlicher Punkte gegeneinander. Wichtig für eine Modellvalidierung ist dabei weiterhin ein möglichst exaktes Nachmessen der Temperaturverteilung unter Versuchsbedingungen. Auf Basis des validierten Modells sind dann Optimierungen der Konstruktion, aber auch des Inbetriebnahmeablaufes möglich, bis bei einer erneuten Simulation der Verhältnisse (und in Realität) die temperaturbedingten Verschiebungen an keiner Stelle mehr den maximal tolerablen Wert übersteigen.

Beispiel 2

Funktionsentscheidend ist ein geeignetes Temperatur- und Wärmemanagement auch bei elektronischen Bauteilen. Die Informationsverarbeitung ist mit einer elektrischen Leistungsaufnahme verbunden, die nahezu komplett in Wärme umgesetzt wird. Von besonderer Bedeutung ist dieses Problem bei den Prozessoren in CPUs und Grafikkarten von PCs und Tablets. An den Oberflächen mancher Prozessoren werden Wärmestromdichten erreicht, die beim mehr als Zehnfachen der Wärmestromdichte an der Oberfläche einer handelsüblichen elektrischen Kochplatte liegen [1]. Dabei steigt die Wärmefreisetzung für denselben Prozessor mit der Erhöhung der Taktung und damit der Verarbeitungsgeschwindigkeit. Aufgrund der äußerst geringen Wärmekapazitäten der kleinen Bauteile würden die vorhandenen Wärmeleistungen sehr schnell zu einer Erhitzung bis zur Zerstörung führen. Dieses Problem wird noch dadurch verschärft, dass bei höheren Temperaturen die Halbleitereigenschaften des Siliciums verloren gehen und die Kleinteiligkeit der Strukturen die Anfälligkeit für eine thermische Beanspruchung erhöht. Deshalb ist ein Kühlkonzept unerlässlich, das nicht nur für eine sichere Wärmeabfuhr, sondern auch für eine gleichmäßige Temperaturverteilung sorgt. Weiterhin muss eine solche Kühlung die Forderung nach einem geringen Gewicht und einer geringen Lärmemission erfüllen. Bei der Entwicklung moderner Mikroprozessoren ist deshalb die Entwicklung eines geeigneten Kühlkonzeptes und geeigneter Bauteile für die Kühlung integraler Bestandteil. Die damit zusammenhängenden Fragestellungen beschäftigen auch regelmäßig die universitäre Forschung. Als Lösungen für die Wärmeabfuhr kommen metallische, gut wärmeleitende Kühlrippen mit und ohne aktive Anströmung mit Kühlluft, Heat-Pipes und auch Flüssigkeitsumlaufkühlungen infrage.

Die Liste der Beispiele für Anwendungen der Thermodynamik außerhalb der Energietechnik ließe sich weiterführen, bis hin zu Bereichen wie der Medizintechnik, wo spezielle Behandlungen eine thermodynamische Vorplanung benötigen.

■ 1.3 An wen wendet sich dieses Buch?

Das Buch wendet sich an eine breite Schicht von Nutzern, die in Studium, Ausbildung oder Beruf erstmalig oder auffrischend tiefer in die technische Thermodynamik einsteigen wollen. Dafür baut es auf begrenzten Grundkenntnissen, etwa vergleichbar dem Physik-Grundkurs im Abitur, auf. Es eignet sich als Begleiter für Studenten im Grundlagenstudium, Nebenfachstudenten, Auszubildende energietechnischer Berufe, aber auch für jede Art von „Quereinsteigern“. Die enge Verzahnung von erläuternden Texten, Beispielen und Übungsaufgaben soll dabei das Selbststudium erleichtern. Auf sehr umfangreiche Ausführungen und Formelableitungen wurde bewusst verzichtet, vielmehr soll die Kombination aus einer prägnanten Einführung und umfangreich erläuterten Beispielen den Nutzer dazu befähigen, eigenständig die Übungsaufgaben zu lösen und ein grundlegendes Verständnis sowie ein gewisses notwendiges „Gefühl“ für die Materie zu entwickeln. Demjenigen, der darüber hinausgehende Erläuterungen sucht, seien die Fachliteratur und Vorlesungen im Fach empfohlen. Das Buch strebt nicht danach, in die wissenschaftliche Tiefe zu führen, es soll vielmehr einer breiten Nutzerschaft ein wichtiges und grundlegendes Handwerkszeug zugänglich machen.

Das vorliegende Buch basiert unter anderem auf dem Werk *Werner Berties, Übungsbeispiele aus der Wärmelehre*, welches zuletzt in seiner 20. Auflage erschien und bis dahin von Roland

Möschwitzer weitergeführt wurde. Dieses Buch ist empfohlene Literatur in verschiedensten Studien- und Ausbildungsgängen sowie akademischen Weiterbildungsangeboten an Universitäten, Fachhochschulen, Fachschulen und Berufsschulen in Deutschland und im deutschsprachigen Ausland. Dabei umfassen die Studiengänge, die auf dieses Buch zurückgreifen, nicht nur Fächer wie Energietechnik, Verfahrenstechnik und Maschinenbau, sondern auch zum Beispiel Rettungsingenieurwesen, Fahrzeugtechnik, Werkstoffwissenschaften, Gebäudemanagement und Lebensmitteltechnologie.

■ 1.4 Wie benutzt man dieses Buch?

Aufbau, einführender Text, Beispiele, Übungsaufgaben

Die Kapitel dieses Buches bauen aufeinander auf. Vorkapitel auf den Stoff nachfolgender Kapitel wurden weitgehend vermieden.

Ein erläuternder Text am Beginn jedes Kapitels soll dem Leser eine rasche Einführung in den Themenbereich vermitteln.

Die relevanten Formeln sind deutlich gekennzeichnet und die dort verwendeten Größen mit ihren praktisch zu verwendenden Einheiten angegeben.

Anhaltswerte bestimmter technischer Größen werden, tabellarisch aufbereitet, dem Leser in den Kapiteln zur Verfügung gestellt.

Die den meisten Kapiteln folgende Sammlung von Beispielen soll die verschiedenen Herangehensweisen an die Lösung der Aufgabenstellung zeigen und die Notwendigkeit eines methodischen Vorgehens verdeutlichen. Oft erschließt sich erst so der Lösungsweg. Sämtliche Beispiele werden in ihrer Lösung ausführlich und Schritt für Schritt dargestellt.

Internationales Einheitensystem (SI), Umrechnung von Einheiten

Im Buch wird mit dem internationalen Einheitensystem (SI) für physikalische Größen gearbeitet. An entsprechender Stelle wird auf früher im deutschsprachigen Raum gebräuchliche, nicht mit dem SI übereinstimmende Einheiten hingewiesen und die jeweilige Umrechnung in SI-Einheiten angegeben. Hierzu wurde auch der Anhang A.6 zusammenfassend erarbeitet.

Die Umrechnung von Einheiten soll immer nachvollziehbar dokumentiert erfolgen, weshalb sich die Verfahrensweise des „Multiplizierens mit 1“ bewährt hat. Die „1“ steht dabei für die nach 1 umgestellte Größengleichung. Beispiel:

$$1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$$

$$1 = \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}}$$

Hier ein ausführliches Beispiel der Umrechnung eines Massestromes von $2016 \frac{\text{t}}{\text{d}}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$.

$$\dot{m} = 2016 \frac{\text{t}}{\text{d}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$\dot{m} = 23,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Umgang mit zugeschnittenen Größengleichungen

Die zugeschnittenen Größengleichungen, sie kommen hauptsächlich im Kapitel 13 und in der Formelsammlung im Anhang A.5 vor, sind stets so anzuwenden, wie es die jeweilig zur Gleichung gehörende Größen- und Einheitentabelle vorgibt. Werden die Größen in anderen Einheiten oder auch schon anderen Dezimal-Präfixen in der Größengleichung verwendet, so führt das zu falschen Ergebnissen.

Verwendung der Tabellen, Stoffdaten- und Formelsammlung

Die Tabellen in den Kapiteln und die der Stoffdaten- und Formelsammlung sind so aufbereitet, dass sie den praktischen Erfordernissen zur Lösung der hier in diesem Buch gezeigten Beispiele und gestellten Aufgaben genügen. Darüber hinaus enthalten sie eine Vielzahl an Stoff- und Anhaltswerten, die in der täglichen Praxis des Wärmetechnikers nützlich sind. Die Daten entsprechen den Standards von IUPAC, IAPWS, VDI, sind eigene Messwerte bzw. entstammen Sammlungen der Autoren.

Anhaltswerte sind als solche gekennzeichnet, entsprechend gerundet und weisen somit eine gewisse Streubreite im Wert auf, was trotzdem zu hinreichend genauen Ergebnissen führt.

Alle die zur Lösung der Beispiele und Aufgaben notwendigen Stoffwerte und stoffunabhängigen Konstanten sind in der Stoffdatensammlung (Anhang A.4) bzw. im Formelverzeichnis (Anhang A.1) zu finden. Sekundärliteratur ist hier nicht notwendig.

Tabellenwerte und lineare Interpolation

Nicht immer ist es möglich und notwendig, Tabellen so fein aufzulösen, dass genau der gesuchte Wert x in der Tabelle steht und somit der zugehörige Wert y in ihr zu finden ist. Mithilfe der linearen Interpolation und hinreichend dicht liegenden Nachbarwerten von x und y ist man in der Lage, den gesuchten Wert zu finden. Bei der Lösung der Beispiele wird an entsprechender Stelle darauf hingewiesen und es kommt immer folgende lineare Interpolationsgleichung, hier in allgemeiner Form, zum Einsatz:

$$y(x) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) + y_1,$$

wobei hier x_1, y_1 und x_2, y_2 ablesbare Wertepaare aus einer Tabelle sind und $y(x)$ der gesuchte Wert zum zwischen den Tabellenwerten x_1 und x_2 liegenden Wert x ist.

Übungsaufgaben

Zum Ende der Kapitel bzw. Abschnitte werden Übungsaufgaben angeboten. Es empfiehlt sich, diese – nach dem Studium der einführenden Texte und dem Nachrechnen der Beispiele – eigenständig zu lösen. Der ausführliche Lösungsweg und ggf. die Diskussion der Ergebnisse, ähnlich der der Beispiele, sind online im Kapitel Lösungen zusammengefasst. Die Lösungen finden Sie in der Kategorie „Extras“ unter <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446442795>.

2

System, Zustand und ihre Beschreibung

■ 2.1 Allgemeines und Grundlagen

Worum geht es im Kapitel?

Klärung grundlegender und allgemeiner Begriffe, Definition wichtiger Größen für die weitere Arbeit

Anwendungsgebiete:

Grundlage der weiteren Arbeit mit diesem Buch

Siehe auch:

1.4 Wie benutzt man dieses Buch?, 3. Stoffeigenschaften

■ 2.2 System und Zustand

Für thermodynamische Betrachtungen ist es essentiell, festzulegen, was Gegenstand der Betrachtungen sein soll. So macht es beispielsweise einen bedeutenden Unterschied, ob man bei einer Warmwasserheizung den Heizkessel, den Warmwasserkreislauf oder einen einzelnen Heizkörper untersucht. Deshalb betrachtet man abgrenzbare Bereiche, die durch vorhandene oder gedachte Grenzen von der Umgebung abgetrennt sind. Ein solcher Bereich wird **thermodynamisches System** genannt. Dabei können die gedachten Grenzen im Prinzip willkürlich festgelegt werden. Es ist lediglich erforderlich, sie so zu wählen, dass die Vorgänge an diesen Grenzen bekannt sind und beschrieben werden können. Mitunter ist es auch vorteilhaft, mit beweglichen Systemgrenzen zu arbeiten, so lässt sich etwa ein Kolbenhub einfacher analysieren. Zudem ist es möglich, ein System zur detaillierteren Untersuchung in Teilsysteme zu untergliedern.

Alle folgenden Betrachtungen innerhalb der Thermodynamik beziehen sich auf Eigenschaftsänderungen von thermodynamischen Systemen und auf deren Wechselwirkungen an den Systemgrenzen, den Stoffaustausch und die Energieübertrag. Dabei kann der Energieübertrag mit dem Stoffaustausch gekoppelt oder von diesem unabhängig erfolgen.

Die Eigenschaften eines Systems werden durch bestimmte physikalische (und chemische) Größen beschrieben. Deren Gesamtheit wird **thermodynamischer Zustand** genannt, diese Größen heißen Zustandsgrößen.

Ein für die Betrachtung abgegrenzter Bereich wird System genannt.

Ein System wird durch die Wechselwirkungen über die Systemgrenzen beeinflusst.

Die Gesamtheit der physikalischen Größen, die ein System beschreiben, wird Zustand genannt.

Eine grundlegende Einteilung von Systemen lässt sich danach treffen, welche Wechselwirkungen mit der Umgebung möglich sind. Diese Einteilung erleichtert eine Vielzahl der weiteren Arbeiten.

Ein **offenes System** ist vorhanden, wenn mit der Umgebung ein Energieübertrag und ein Stoffaustausch stattfinden können.

Ein **geschlossenes System** ist vorhanden, wenn mit der Umgebung kein Stoffaustausch, aber ein Energieübertrag stattfinden kann.

Ein **abgeschlossenes (thermisch isoliertes) System** ist vorhanden, wenn mit der Umgebung weder Energieübertrag noch Stoffaustausch stattfinden können.

Beispiele für thermodynamische Systeme:

- offenes System (massedurchlässig): Verbrennungsmotor (Bild 2.1), gut wärmegeämmte Dampfturbine (Bild 2.2), ein- und austretende Stoffströme, die auch Energie transportieren
- geschlossenes System (massedicht): druckfester Dampfkochtopf (Bild 2.3), Energietransport ist nur über die Systemgrenze in Form von Wärme möglich
- abgeschlossenes System: wärmegeämmter Wärmespeicher, z. B. eine Thermoskanne, weder Stoff- noch Energietransport ist über die Systemgrenzen möglich

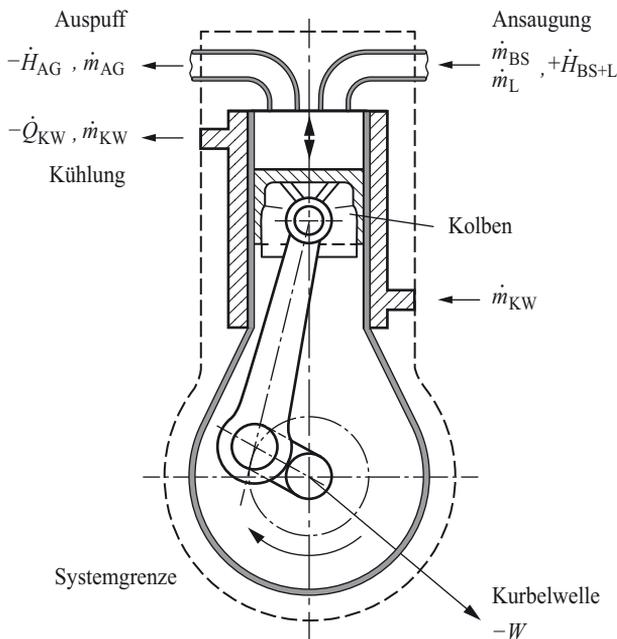


Bild 2.1 Offenes, nicht adiabates System

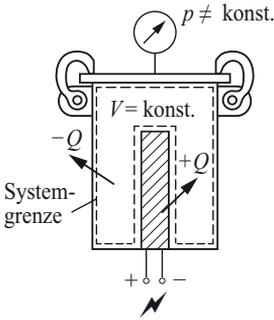


Bild 2.2 Offenes massedurchlässiges, weitgehend adiabates System

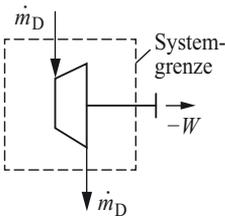


Bild 2.3 Geschlossenes, nicht adiabates System

Die Systembedingungen werden in vielen Fällen nur näherungsweise erfüllt, insbesondere ist es technisch nicht möglich, den Energietransport durch Wärme (siehe Kapitel 13) völlig zu unterbinden.

2.3 Thermodynamisches Gleichgewicht

Die Betrachtungen in der Thermodynamik beziehen sich auf das **thermodynamische Gleichgewicht**. Dieses umfasst das thermische und das chemische Gleichgewicht. Die Beschreibung von Systemen im Gleichgewicht ist im Vergleich zu Systemen, die sich nicht im Gleichgewicht befinden, deutlich vereinfacht.

Ein System befindet sich im thermodynamischen Gleichgewicht, wenn an jedem Ort im System die thermodynamischen Zustandsgrößen zeitlich unveränderlich sind [2].

Nach der Erfahrung streben alle sich selbst überlassene geschlossenen Systeme einem Gleichgewichtszustand zu, den sie ohne Einwirkung von außen nie wieder verlassen [3].

Bei einem offenen System spricht man vom Beharrungszustand, wenn nur solche Prozesse (siehe Abschnitt 2.6) ablaufen, die sich zeitlich nicht ändern (stationäre Prozesse) [3].

■ 2.4 Zustandsgrößen

Der Zustand eines thermodynamischen Systems wird durch bestimmte physikalische und chemische Größen charakterisiert, diese heißen **Zustandsgrößen**. Ändert sich der Zustand eines Systems, so ändern sich dadurch bestimmte Zustandsgrößen. Die bei der betrachteten Zustandsänderung veränderlichen Zustandsgrößen werden manchmal Zustandsvariablen genannt. Sie sind untereinander durch Zustandsfunktionen verknüpft. Günstigerweise wählt man zur Beschreibung eines Zustandes die Zustandsgrößen, die sich einfach messen oder beeinflussen lassen.

Zustandsgrößen werden nach ihren Eigenschaften in Gruppen eingeteilt:

Extensive Zustandsgrößen sind von der Größe des Systems abhängig, sie gelten nur integral für das ganze System, sie verändern sich, wenn man das System teilt oder ein System durch Vereinigung mit einem anderen gleichartigen System vergrößert. Typische extensive Zustandsgrößen sind die Masse, die Stoffmenge, das Volumen und der Energieinhalt eines Systems.

Intensive Zustandsgrößen sind nicht von der Größe des Systems abhängig, sie gelten lokal und ändern sich beim Teilen des Systems oder der Vereinigung gleichartiger Systeme nicht. Typische intensive Zustandsgrößen sind die Temperatur und der Druck.

Eine **spezifische Zustandsgröße** erhält man, wenn man eine extensive Zustandsgröße auf die Masse bezieht. Ein bekanntes Beispiel ist das spezifische Volumen, welches man erhält, wenn man das Volumen eines Systems auf seine Masse bezieht. Das spezifische Volumen ist der Kehrwert der Dichte und wird in der Thermodynamik häufig stattdessen verwendet.

Eine **molare Zustandsgröße** erhält man, wenn man eine extensive Zustandsgröße auf die Stoffmenge bezieht. Für die Betrachtung von chemischen Vorgängen ist die Nutzung molarer Größen in aller Regel vorteilhaft.

Spezifische und molare Zustandsgrößen sind Sonderfälle der intensiven Zustandsgrößen. Im Folgenden soll eine kleine Einführung zu den wesentlichen Zustandsgrößen gegeben werden.

2.4.1 Stoff, Masse und Stoffmenge

Da eine Vielzahl von Eigenschaften von der **Art des vorliegenden Stoffes** abhängt, ist der im System vorliegende Stoff bzw. sind die vorliegenden Stoffe wesentliches Charakteristikum für das System. Auf Details geht Kapitel 3 ein.

Die **Masse** m ist aus den Grundlagen der allgemeinen Physik als Maß für die Trägheit eines Körpers oder als Ursache der Gravitation bekannt. Die Masse wird durch Wägung, das heißt durch Vergleich mit Vergleichsmassen, bestimmt. Die Maßeinheit der Masse ist das Kilogramm (kg).

Die **Stoffmenge** n ist ein Maß für die Anzahl der Teilchen, aus denen die Menge eines Stoffes besteht. Dabei sind mit Teilchen beispielsweise Moleküle oder Atome gemeint. Diese Teilchenzahlen sind im Allgemeinen so groß, dass sie sehr schwer vorstellbar und benutzbar sind. Deshalb ist als Einheit diejenige Anzahl an Teilchen definiert, aus denen 12 kg des Kohlenstoffisotops ^{12}C bestehen. Diese Einheit heißt Kilomol (kmol). Die Anzahl der in einem Kilomol enthaltenen Teilchen beträgt $6,022\,1409 \cdot 10^{26}$. Diese Zahl wird *Avogadro-Konstante* N_A genannt. Die Einheit ein Mol (1 mol) als tausendster Teil des Kilomol (1 kmol) ist ebenfalls üblich und häufig im Gebrauch.

Die Stoffmenge ein Kilomol (1 kmol) entspricht der Anzahl an Teilchen, die in 12 kg des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind. Die Anzahl Teilchen eines Kilomols wird durch die *Avogadro*-Konstante $N_A = 6,022\,1409 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{kmol}}$ ausgedrückt.

Die Stoffmenge eignet sich besonders zur Beschreibung chemischer Prozesse, da in chemischen Reaktionen die Teilchen und damit die Stoffmengen immer im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen miteinander reagieren.

Die Phänomene, die im Rahmen der Thermodynamik betrachtet werden, haben ihre Ursache in den Bewegungen der Teilchen der Stoffe. Theorien, die sich damit beschäftigen, wie etwa die kinetische Gastheorie bzw. die statistische Thermodynamik, werden im Rahmen dieses Buches nicht behandelt.

2.4.2 Volumen

Das **Volumen** V ist ein Maß für den Raumbedarf eines Systems. Auch das Volumen ist aus den Grundlagen der allgemeinen Physik bekannt. Seine Einheit ist der Kubikmeter (m^3).

2.4.3 Dichte und spezifisches Volumen

Die **Dichte** ρ erhält man, wenn man die Masse eines Systems auf sein Volumen bezieht.

Das **spezifische Volumen** v ergibt sich, wenn man das Volumen eines Systems auf seine Masse bezieht. Es ist damit eine typische spezifische Zustandsgröße und der Kehrwert der Dichte.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

ρ Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 m Masse in kg
 V Volumen in m^3

$$v = \frac{V}{m} \quad (2.2)$$

v spezifisches Volumen in $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
 V Volumen in m^3
 m Masse in kg

Damit gilt auch der Zusammenhang:

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

v spezifisches Volumen in $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
 ρ Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

2.4.4 Molvolumen und molare Masse

Das auf die Stoffmenge bezogene Volumen heißt **Molvolumen** \bar{v} . Die Einheit ist $\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$ bzw. $\frac{1}{\text{mol}}$.

$$\bar{v} = \frac{V}{n} \quad (2.4)$$

\bar{v} Molvolumen in $\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$
 V Volumen in m^3
 n Stoffmenge in kmol

Für ideale Gase (siehe auch Abschnitt 5.2) gilt: Bei gleichem Druck und gleicher Temperatur sind in gleichen Räumen (d. h. in einem gleichen Volumen) gleich viel kleinste Teilchen (Moleküle) vorhanden (Gesetz von *Avogadro*).

Bei gleichem Druck und gleicher Temperatur sind die Molvolumina aller vollkommenen (idealen) Gase gleich (Gesetz von *Avogadro*).

Es ist das Molvolumen aller (idealen) Gase im Normzustand (0°C und $1013,25\text{ mbar}$) im Mittelwert $\bar{v} = 22,41 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$.

Die auf die Stoffmenge bezogene Masse heißt **molare Masse** M oder auch **Molmasse** M . Ihre Einheit ist $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$. Bei der molaren Masse handelt es sich um eine Stoffkonstante, sie hängt ausschließlich von dem vorliegenden Stoff und von keinen anderen Zustandsgrößen ab. Die molare Masse wichtiger Stoffe ist im Anhang A.4.1 tabelliert.

$$M = \frac{m}{n} \quad (2.5)$$

M molare Masse in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
 m Masse in kg
 n Stoffmenge in kmol

Zwischen den Größen spezifisches Volumen (Dichte), Molvolumen und molare Masse besteht ein einfacher Zusammenhang.

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{\bar{v}}{M} \quad (2.6)$$

v spezifisches Volumen in $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
 ρ Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 \bar{v} Molvolumen in $\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$
 M molare Masse in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

2.4.4.1 Beispiele

2.4.4.1.1 Spezifisches Volumen, Dichte, Molvolumen, Stoffmenge

Im Transportbehälter eines Lastkraftwagens befinden sich 10 m^3 Wasserstoff (H_2) mit einer Einwaage von $0,15\text{ t}$ unter dem Druck von ca. 180 bar bei 20°C .

Es sind für diese Zustandsbedingungen spezifisches Volumen, Dichte, Molvolumen des Wasserstoffs und die sich im Behälter befindende Stoffmenge zu ermitteln.

gegeben:	Volumen H ₂	$V = 10,0 \text{ m}^3$
	Masse H ₂	$m = 0,15 \text{ t} = 150 \text{ kg}$
	molare Masse H ₂ (Anhang A.4.1)	$M = 2,016 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
gesucht:	spezifisches Volumen	v in $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
	Dichte	ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	Molvolumen	\bar{v} in $\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$
	Stoffmenge	n in kmol

Lösung:

Nach Gleichung (2.2) ist das spezifische Volumen definiert als

$$v = \frac{V}{m}$$

$$v = \frac{10,0 \text{ m}^3}{150 \text{ kg}} = 0,0666 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 66,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Damit ist die Dichte nach Gleichung (2.3)

$$\rho = \frac{1}{v}$$

$$\rho = \frac{1}{66,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 15,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Aus Gleichung (2.6) ergibt sich für das molare Volumen der Zusammenhang

$$\bar{v} = v \cdot M$$

$$\bar{v} = 66,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 2,016 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 0,134 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$$

Schließlich ist die im Behälter eingeschlossene Stoffmenge nach Gleichung (2.5)

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n = \frac{150 \text{ kg}}{2,016 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 74,41 \text{ kmol}$$

2.4.4.1.2 Berechnen von Dichten aus molaren Größen

Es sind die Dichten von Sauerstoff O₂, Stickstoff N₂ und Kohlenstoffdioxid CO₂ im Normzustand (Index N) aus den jeweiligen molaren Massen zu berechnen, die dem Anhang A.4.1 zu entnehmen sind.

gegeben:	molare Masse O ₂	$M_{\text{O}_2} = 31,999 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
	molare Masse N ₂	$M_{\text{N}_2} = 28,016 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
	molare Masse CO ₂	$M_{\text{CO}_2} = 44,010 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
	Molvolumen i. N. O ₂	$\bar{v}_{\text{N},\text{O}_2} = 22,394 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$
	Molvolumen i. N. N ₂	$\bar{v}_{\text{N},\text{N}_2} = 22,404 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$
	Molvolumen i. N. CO ₂	$\bar{v}_{\text{N},\text{CO}_2} = 22,262 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$
gesucht:	Dichten i. N.	ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Lösung:

Nach Gleichung (2.6) ist die Dichte:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\bar{v}}{M},$$

also

$$\rho = \frac{M}{\bar{v}}$$

$$\rho_{\text{N},\text{O}_2} = \frac{M_{\text{O}_2}}{\bar{v}_{\text{N},\text{O}_2}} = \frac{31,999 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{22,394 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}} = 1,429 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{N},\text{N}_2} = \frac{M_{\text{N}_2}}{\bar{v}_{\text{N},\text{N}_2}} = \frac{28,016 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{22,404 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}} = 1,251 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{N},\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{\bar{v}_{\text{N},\text{CO}_2}} = \frac{44,010 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{22,262 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}} = 1,977 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

2.4.5 Druck

Der **Druck** p ist der Quotient aus der senkrecht auf eine Fläche wirkenden Kraft und dieser Fläche, auf die diese Kraft flächig gleich verteilt wirkt. Die Einheit ist das Pascal (Pa). In der Technik ist häufig noch die Einheit bar anzutreffen, in einigen Bereichen wie der Kraftwerks- und der Verfahrenstechnik dominiert diese. Alle anderen Druckeinheiten sind heute als historisch anzusehen. Dabei gilt:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$p = \frac{F}{A} = \rho \cdot g \cdot l \tag{2.7}$$

- p Druck in Pa
- F Kraft in N
- A Fläche in m²

- ρ Dichte des die Säule bildenden Stoffes in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 g Fallbeschleunigung in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
 l Höhe der Säule in m

Ein Druck kann nicht nur von außen auf ein System wirken, der Druck ist auch eine Zustandsgröße. Der Druck von Flüssigkeiten und Gasen wirkt immer allseitig gleichmäßig.

Der Druck (Absolutdruck) in einem System ist gleich der Summe aus dem Umgebungsdruck und dem Überdruck gegenüber der Umgebung bzw. der Differenz aus dem Umgebungsdruck und dem Unterdruck gegenüber der Umgebung.

$$p = p_b + \Delta p_{\text{ü}} \quad (2.8)$$

- p Druck (Absolutdruck) in Pa oder bar
 p_b barometrischer Druck (Umgebungsdruck) in Pa oder bar
 $\Delta p_{\text{ü}}$ Überdruck in Pa oder bar

$$p = p_b - \Delta p_{\text{u}} \quad (2.9)$$

- p Druck (Absolutdruck) in Pa oder bar
 p_b barometrischer Druck (Umgebungsdruck) in Pa oder bar
 Δp_{u} Unterdruck in Pa oder bar

Wird nichts Weiteres angegeben, so bedeutet die Bezeichnung Druck in diesem Buch immer den Absolutdruck.

2.4.5.1 Beispiele

2.4.5.1.1 Absolutdruck und Überdruck

Das Manometer eines Dampferzeugers zeigt einen Überdruck von 9,2 bar an. Wie hoch ist der absolute Druck im Kessel, wenn der Luftdruck 1 032 mbar beträgt?

- gegeben: Überdruck $\Delta p_{\text{ü}} = 9,2$ bar
 Luftdruck $p_b = 1\,032$ mbar = 1,032 bar

- gesucht: absoluter Druck p in bar

Lösung:

Nach Gleichung (2.8) ist der absolute Druck:

$$\begin{aligned}
 p &= p_b + \Delta p_{\text{ü}} \\
 p &= (1,032 + 9,2) \text{ bar} = 10,232 \text{ bar}
 \end{aligned}$$

Der absolute Druck bildet sich aus der Summe von Umgebungsdruck und Überdruck. Er beträgt 10,232 bar.

2.4.5.1.2 Wassersäule in einem Sicherheitsstandrohr

Bei einem Luftdruck von 981 mbar soll in einer historischen Industrie-Niederdruckdampfheizung der Überdruck 0,1 bar betragen.