



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Autor:

Prof. Dr.-Ing. Gernot Wilhelms

Professor für Energietechnik, Kältetechnik und Technische Mechanik

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel

g.wilhelms@ostfalia.de

Mitautor bis zur 5. Auflage:

Prof. Dipl.-Ing. Hans-Joachim Hoffmann (gest. 1980)

Professor für Thermodynamik, Energietechnik und Klimatechnik

Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

Mitautor bis zur 18. Auflage:

Prof. Dr.-Ing. Günter Cerbe

Professor für Thermodynamik, Energietechnik und Gastechnik

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel

Günter Cerbe

Gernot Wilhelms

Technische Thermodynamik

Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

19., überarbeitete Auflage

Mit 217 Bildern, 40 Tabellen, 136 Beispielen, 139 Aufgaben und 182 Kontrollfragen

HANSER

Autor:

Prof. Dr.-Ing. Gernot Wilhelms, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

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 – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2021 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Der Buchmacher, Arthur Lenner, Windach

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © Siemens-Pressebild

Satz: Lumina Datamatics GmbH, München

Druck und Bindung: Friedrich Pustet GmbH & Co. KG, Regensburg

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-46519-0

E-Book-ISBN 978-3-446-46813-9

Vorwort zur neunzehnten Auflage

Die neunzehnte Auflage knüpft im Wesentlichen an die achtzehnte Auflage an.

In drei einführenden Abschnitten werden als Grundlagen zunächst die thermodynamischen Größen und Begriffe eingeführt, anschließend werden zum ersten Hauptsatz die Energie, die Energieerhaltung und die Energiebilanz und danach zum zweiten Hauptsatz die Energieentwertung behandelt. Schon diese ersten Schritte werden mit praxisnahen einfachen Beispielen unterstützt und vertieft.

Zur Erleichterung des Einstiegs in das Fachgebiet werden die grundsätzlichen Zusammenhänge zunächst mithilfe des idealen Gases erläutert, um darauf aufbauend auf das Verhalten der realen Stoffe einzugehen.

Das Lehrbuch zielt in allen Bereichen auf die technischen Anwendungen ab. Unter diesem Blickwinkel werden das Verhalten und die Bewertung thermischer Maschinen und Anlagen, die Grundlagen der Gemische, die Strömungsvorgänge, die Wärmeübertragung, die Einführung in chemische Reaktionen, die Verbrennung einschließlich der Emissionen und deren Minderung sowie die Brennstoffzellen dargestellt. Wegen der zunehmenden Bedeutung realer Gemische wurde ab der achtzehnten Auflage mit Abschnitt 6.5 eine Einführung in reale Gemische aufgenommen. In der vorliegenden Auflage wurde der Begriff Arbeitsverhältnis präzisiert. Für Kreisprozesse, die in einem geschlossenen System ablaufen, wird nun die Arbeit des reversiblen Kreisprozesses auf die insgesamt abgegebene Volumenänderungsarbeit bezogen. Technische Entwicklungen, Normen, Regeln, Rechenverfahren und technische Daten, z. B. beim Klimaschutz, bei Emissionen, bei Kraftwerks-Anlagen, bei Brennstoffzellen u. a., sind in ihrem aktuellen Stand wiedergegeben.

Das Grundwissen der Thermodynamik ist in nur einem Band zusammengefasst, der neben den grundlegenden thermodynamischen Fragestellungen auch die technische Praxis berücksichtigt. Darüber hinaus enthält dieses Buch einige Themenbereiche, die i. Allg. in Lehrbüchern der Thermodynamik nicht behandelt werden, uns aber notwendig erscheinen. So wird eine Einführung in Größen und Einheitensysteme vorangestellt, um das Lösen von Beispielen und Aufgaben zu erleichtern. Die thermische Ausdehnung wird wegen der häufigen Anwendung in der technischen Praxis behandelt, der Abschnitt Wärmeübertragung dient der Abrundung des gesamten Wissensgebietes. Das alles erfordert eine knappe Darstellung, sodass nicht alle Teilgebiete in gleicher Tiefe behandelt werden können und auf die spezielle Fachliteratur verwiesen werden muss, z. B. bei der Wärmeübertragung oder auch bei technischen Anlagen.

Bis auf wenige Ausnahmen wie z. B. bei der Verbrennungsrechnung werden grundsätzlich Größengleichungen verwendet. Bei Beispielen im Bereich der Grundlagen setzen wir den Druck in der SI-Einheit Pa ein. Im Bereich der technischen Anwendungen verwenden wir überwiegend die Einheit bar. Bei der Bezeichnung und den Formelzeichen

verwenden wir die in der thermodynamischen Fachliteratur bevorzugten. Dadurch wird auch der Zugang zur weiterführenden Literatur erleichtert.

Wie bisher haben wir uns um korrekte Definitionen der Begriffe bemüht und gleichzeitig versucht, das manchmal als schwer zugänglich angesehene Wissensgebiet von vermeidbaren Schwierigkeiten zu befreien. Das eigentliche Ziel auch dieser Auflage bleibt die Umsetzung der thermodynamischen Grundlagen in die technische Anwendung. Hierbei sollen die 136 Beispiele mit durchgerechneten Lösungen und Aufgaben mit Lösungsergebnissen helfen. Gemeinsam mit 182 Kontrollfragen mit Antworten sollen sie das Studium erleichtern, das Wissen vertiefen, den Übergang zur technischen Anwendung schaffen sowie das Selbststudium ermöglichen.

Durch die schon in früheren Auflagen vorgenommene Straffung der Grundlagen konnte sichergestellt werden, dass bei der Einführung der Bachelor- und Masterstudiengänge keine Inhalte gegenüber den Diplomstudiengängen preisgegeben wurden.

Inhaltlich abgestimmt mit diesem Lehrbuch ist das dazugehörige Übungsbuch „Wilhelms, G.: Übungsaufgaben Technische Thermodynamik“. Es hat sich als gute Hilfe bei der Erarbeitung und Vertiefung des Wissens, beim Selbststudium und bei der Examensvorbereitung erwiesen.

Die vorliegende Auflage wurde in allen Bereichen aktualisiert, an vielen Stellen wurden Texte zum besseren Verständnis präzisiert und ergänzt. Zu den Änderungen und Ergänzungen wurden wir durch zahlreiche Anmerkungen von Fachkollegen angeregt und bestärkt. Ihnen allen, insbesondere meinem Kollegen Prof. Dr.-Ing. Henning Zindler, danken wir herzlich.

Die vorliegende Fassung wendet sich gleichermaßen an die Ingenieur- und Physikstudierenden der Fachhochschulen und der Technischen Universitäten/Hochschulen, um ihnen den Weg von den *theoretischen Grundlagen zu den praktischen Anwendungen* zu erleichtern.

Wolfenbüttel, im Frühjahr 2021

Gernot Wilhelms

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	15
1 Grundlagen der Thermodynamik	21
1.1 Aufgabe der Thermodynamik	21
1.2 Größen und Einheitensysteme	21
1.2.1 Physikalische Größen und Größenarten	21
1.2.2 Größengleichungen	23
1.2.3 Zahlenwertgleichungen	24
1.2.4 Einheitensysteme	24
1.3 Thermische Zustandsgrößen	28
1.3.1 Volumen	28
1.3.2 Druck	29
1.3.3 Temperatur	35
1.4 Thermische Zustandsgleichung	38
1.4.1 Thermische Zustandsgleichung eines homogenen Systems	38
1.4.2 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	38
1.5 Mengenmaße Kilomol und Normvolumen; molare Gaskonstante	42
1.5.1 Kilomol	42
1.5.2 Normvolumen	44
1.5.3 Molare Gaskonstante	45
1.6 Thermische Ausdehnung	47
1.6.1 Längenänderung	47
1.6.2 Volumenänderung	50
1.7 Thermodynamisches System	54
1.7.1 Systeme und Systemgrenzen	54
1.7.2 Zustandsgrößen und Prozessgrößen	56
1.7.3 Zustandsänderungen und Prozesse	56
Kontrollfragen	58
2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	61
2.1 Energieerhaltung, Energiebilanz	61
2.2 Arbeit am geschlossenen System	61
2.3 Innere Energie	65
2.4 Wärme	68

2.5 Arbeit am offenen System und Enthalpie	70
2.6 Formulierungen des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik	76
2.7 Kalorische Zustandsgleichungen	78
2.7.1 Kalorische Zustandsgleichungen eines homogenen Systems	78
2.7.2 Spezifische Wärmekapazitäten eines homogenen Systems	79
2.7.3 Kalorische Zustandsgleichungen des idealen Gases	84
2.7.4 Spezifische Wärmekapazitäten des idealen Gases	86
2.7.5 Molare Wärmekapazitäten des idealen Gases	90
Kontrollfragen	92

3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik **95**

3.1 Aussagen des zweiten Hauptsatzes	95
3.2 Entropie	95
3.2.1 Einführung der Entropie	95
3.2.2 Entropiebilanzen	97
3.2.3 T,S -Diagramm	102
3.3 Fundamentalgleichungen	103
3.4 Einfache Zustandsänderungen des idealen Gases	104
3.4.1 Isochore Zustandsänderung	105
3.4.2 Isobare Zustandsänderung	109
3.4.3 Isotherme Zustandsänderung	114
3.4.4 Isentrope Zustandsänderung	118
3.4.5 Polytrope Zustandsänderung	125
3.4.6 Zustandsänderungen in adiabaten Systemen	135
3.5 Kreisprozesse	137
3.5.1 Kontinuierlicher Ablauf in Kreisprozessen	137
3.5.2 Arbeit und Prozessverlauf	139
3.5.3 Wärmekraftmaschine	143
3.5.4 Grenzen der thermischen Energieumwandlung	146
3.5.5 Vergleich reversibler und irreversibler Kreisprozesse	149
3.5.6 Wärmepumpe und Kältemaschine	154
3.6 Adiabate Drosselung	158
3.7 Instationäre Prozesse	162
3.7.1 Füllen eines Behälters	162
3.7.2 Temperatenausgleich	164
3.8 Wärmetransport	167
3.8.1 Entropieerzeugung beim Wärmetransport	167
3.8.2 Thermodynamische Mitteltemperatur	169
3.9 Exergie und Anergie	170

3.9.1 Begrenzte Umwandelbarkeit der inneren Energie und der Wärme	170
3.9.2 Exergie und Anergie eines strömenden Fluids	172
3.9.3 Exergie und Anergie eines geschlossenen Systems	176
3.9.4 Exergie und Anergie der Wärme	177
3.9.5 Exergieverlust	181
3.9.6 Exergetischer Wirkungsgrad	184
3.9.7 Energie- und Exergie-Flussbild	185
Kontrollfragen	187

4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen 191

4.1 Kreisprozesse für Wärme- und Verbrennungskraftanlagen	191
4.1.1 Vergleichsprozesse	191
4.1.2 Bewertungszahlen für die Kreisprozesse	192
4.2 Kreisprozesse der Gasturbinenanlagen	199
4.2.1 Arbeitsprinzip der Gasturbinenanlagen	199
4.2.2 Joule-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	199
4.2.3 Ericsson-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	208
4.2.4 Der wirkliche Prozess in der Gasturbinenanlage	211
4.3 Kreisprozess des Heißgasmotors	219
4.3.1 Arbeitsprinzip des Heißgasmotors	219
4.3.2 Stirling-Prozess als Vergleichsprozess des Heißgasmotors	220
4.3.3 Der wirkliche Prozess im Heißgasmotor	222
4.4 Kreisprozesse der Verbrennungsmotoren	223
4.4.1 Übertragung des Arbeitsprinzips der Motoren in einen Kreisprozess	223
4.4.2 Otto-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichraumprozess)	224
4.4.3 Diesel-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichdruckprozess)	228
4.4.4 Seiliger-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gemischter Vergleichsprozess)	231
4.4.5 Der wirkliche Prozess in den Verbrennungsmotoren	232
4.5 Kolbenverdichter	233
4.5.1 Der verlustlose Kolbenverdichter ohne Schadraum	234
4.5.2 Bewertungszahlen für den Kolbenverdichter	238
Kontrollfragen	246

5 Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen 247

5.1 Das reale Verhalten der Stoffe	247
5.1.1 Aggregatzustandsänderungen, Phasenwechsel	247

5.1.2	Thermische Zustandsgleichungen realer Fluide	252
5.1.3	p, v, T -Diagramm	254
5.2	Wasserdampf	256
5.2.1	Zustandsgleichungen des Wasserdampfes	256
5.2.2	Spezifische Zustandsgrößen	257
5.2.3	Gleichung von Clausius und Clapeyron	271
5.2.4	Zustandsänderungen des Wasserdampfes	272
5.3	Dampfkraftanlagen	275
5.3.1	Arbeitsprinzip der Dampfkraftanlagen	275
5.3.2	Clausius-Rankine-Prozess als Vergleichsprozess der Dampfkraftanlage	276
5.3.3	Verfahren zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades	282
5.3.4	Zwischenüberhitzen. Verfahren zur Verringerung des Wassergehaltes im Abdampf	287
5.3.5	Der wirkliche Prozess in Dampfkraftanlagen	289
5.4	Kombiniertes Gas-Dampf-Kraftwerk (GUD-Prozess)	296
5.4.1	Zweck der Kombination	296
5.4.2	Grundschaltung des Gas-Dampf-Kraftwerkes	297
5.4.3	Wirkungsgrade beim Gas-Dampf-Kraftwerk	299
5.4.4	Schaltungsbeispiele	301
5.5	Organische Rankine-Prozesse (ORC)	307
5.5.1	Prozessverlauf	307
5.5.2	Organische Arbeitsfluide	308
5.6	Linkslaufende Kreisprozesse mit Dämpfen	312
	Kontrollfragen	318

6 Gemische 321

6.1	Zusammensetzung von Gemischen	321
6.1.1	Massenanteil	321
6.1.2	Stoffmengenanteil (Molanteil)	322
6.1.3	Molare Masse des Gemisches	322
6.1.4	Beladung	324
6.2	Ideale Gemische	325
6.2.1	Gesetz von Amagat	325
6.2.2	Partialdichte (Massenkonzentration) und Gemischdichte	326
6.2.3	Raumanteil	327
6.2.4	Die extensiven Zustandsgrößen des idealen Gemisches	329
6.3	Gemisch idealer Gase	334
6.3.1	Thermische Zustandsgleichung	334
6.3.2	Partialdruck (Gesetz von Dalton)	335

6.3.3	Mischungsentropie und Exergie eines Gemisches idealer Gase	336
6.3.4	Zusammensetzung von Gemischen idealer Gase	339
6.4	Gas-Dampf-Gemisch; Feuchte Luft	342
6.4.1	Sättigungszustand, Taupunkt	342
6.4.2	Feuchte Luft als Beispiel eines Gas-Dampf-Gemisches	344
6.4.3	Zusammensetzung feuchter Luft	345
6.4.4	Spezifisches Volumen feuchter Luft	349
6.4.5	Spezifische Enthalpie feuchter Luft	351
6.4.6	h,x -Diagramm von Mollier	353
6.4.7	Einfache isobare Zustandsänderungen feuchter Luft im h,x -Diagramm	356
6.5	Reale Gemische	366
	Kontrollfragen	372

7	Strömungsvorgänge	375
7.1	Kontinuitätsgleichung	375
7.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für Strömungsvorgänge	376
7.2.1	Arbeitsprozesse	376
7.2.2	Strömungsprozesse	381
7.3	Kraftwirkung bei Strömungsvorgängen	385
7.3.1	Impulssatz	385
7.3.2	Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	389
7.4	Düsen- und Diffusorströmung	391
7.4.1	Energieumwandlung in Düsen und Diffusoren	391
7.4.2	Reibungsfreie Düsenströmung	392
7.4.3	Schallgeschwindigkeit	396
7.4.4	Reibungsfreie Diffusorströmung	397
7.4.5	Ausbildung einer Laval-Düse oder eines Überschall-Diffusors	398
	Kontrollfragen	403

8	Wärmeübertragung	405
8.1	Arten der Wärmeübertragung	405
8.2	Wärmeleitung	405
8.2.1	Ebene Wand	406
8.2.2	Zylindrische Wand	413
8.2.3	Hohlkugelwand	414
8.3	Konvektiver Wärmeübergang	415
8.3.1	Wärmeübergangsbeziehungen	415
8.3.2	Ähnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs	416
8.3.3	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen	427

8.4 Temperaturstrahlung	431
8.4.1 Einführung	431
8.4.2 Wärmeübertragung durch Strahlung	436
8.4.3 Gas- und Flammenstrahlung	438
8.5 Wärmedurchgang	439
8.5.1 Wärmedurchgangsbeziehungen	439
8.5.2 Beeinflussung des Wärmedurchgangs	440
8.5.3 Zwischentemperaturen	441
8.6 Wärmeübertrager	442
8.6.1 Gegen-, Gleich- und Kreuzstrom	442
8.6.2 Berechnungsverfahren	445
8.6.3 Verfahrensoptimierung bei der Wärmenutzung	449
8.6.4 Exergieverlust im Wärmeübertrager	451
Kontrollfragen	453

9	Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	455
9.1 Umwandlung der Brennstoffenergie durch Verbrennung	455	
9.1.1 Verbrennungstechnische Eigenschaften der Brennstoffe	455	
9.1.2 Verbrennungsvorgang	459	
9.1.3 Reaktionsgleichungen	460	
9.2 Verbrennungsrechnung	461	
9.2.1 Feste und flüssige Brennstoffe	461	
9.2.2 Gasförmige Brennstoffe	469	
9.2.3 Näherungslösungen	474	
9.3 Verbrennungskontrolle	475	
9.3.1 Messmethode	475	
9.3.2 Auswertung der Messung	476	
9.3.3 Verbrennungsdreiecke	480	
9.4 Theoretische Verbrennungstemperatur	484	
9.5 Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad	490	
9.5.1 Konventionelle Verbrennungsanlagen	490	
9.5.2 Verbrennungsanlagen mit Kondensation im Abgas	491	
9.6 Abgastaupunkt	495	
9.7 Emissionen aus Verbrennungsanlagen	496	
9.7.1 Einführung	496	
9.7.2 Minderung der Schwefeloxidemission	500	
9.7.3 Minderung der Stickstoffoxidemission	503	
9.7.4 Minderung der Kohlenstoffdioxidemission	505	

9.8 Chemische Reaktionen und Irreversibilität der Verbrennung	511
9.8.1 Enthalpie, Entropie, freie Enthalpie	511
9.8.2 Brennstoffexergie	519
9.8.3 Exergieverlust bei der Verbrennung	524
9.9 Brennstoffzellen	525
9.9.1 Wirkprinzip	525
9.9.2 Energetische Bewertung	526
9.9.3 Bauarten	530
Kontrollfragen	534
10 Lösungsergebnisse der Aufgaben	537
11 Antworten auf die Kontrollfragen	547
11.1 Grundlagen der Thermodynamik	547
11.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	548
11.3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	549
11.4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	552
11.5 Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	553
11.6 Gemische	555
11.7 Strömungsvorgänge	557
11.8 Wärmeübertragung	557
11.9 Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	559
A Anhang	561
A1 Schrifttum	561
A2 Nachweis verwendeter Unterlagen	565
A3 Wiederholung häufig benutzter Tabellen	566
S Sachwortverzeichnis	589

Formelzeichen

A	Fläche	G	freie Enthalpie (Gibbs-Funktion)
a	Absorptionskoeffizient (Strahlung)	G	Gewichtskraft
a	Ascheanteil	Gr	Grashof-Zahl
a	Beschleunigung	g	Fallbeschleunigung
a	Temperaturleitfähigkeit		
B	Anergie	H	Enthalpie
b	spezifische Anergie	H_m	molare Enthalpie
C_{12}	Strahlungsaustauschkonstante	H_o, H_u	spezifischer Brennwert, Heizwert
c	Geschwindigkeit	H_{om}	molarer Brennwert
c	Kohlenstoffanteil (Brennstoff)	H_{um}	– Heizwert
c	spezifische Wärmekapazität	H_{on}, H_{un}	auf das Normvolumen bezogener Brennwert, Heizwert
c_p, c_v	–, konst. Druck (isobar), konst. Vol. (isochor)	h	spezifische Enthalpie
C_m	molare Wärmekapazität	h	Höhe, Länge
C_{mp}, C_{mv}	–, konst. Druck (isobar), konst. Vol. (isochor)	h	Wasserstoffanteil (Brennstoff)
c_s	Schallgeschwindigkeit	$\vec{I}$	Impuls
d	Durchlasskoeffizient (Strahlung)	I	elektrische Stromstärke
d	Durchmesser		
E	Exergie, Arbeitsfähigkeit	k	Boltzmann-Konstante
E_B	Brennstoffexergie	k	Wärmedurchgangskoeffizient
E_g	Exergie eines geschlossenen Systems	l	Länge
E_m	molare Exergie	l	Verbrennungsluftmenge
E_q	Exergie der Wärme	l_a	Luftgehalt des Abgases
E_v	Exergieverlust		
E^*	Exergie eines strömenden Fluids	M	molare Masse
e	spezifische Exergie	M	spezifische Ausstrahlung
F	Faraday-Konstante	M_s	–, des schwarzen Körpers
F	freie Energie (Helmholtz-Funktion)	M_λ	spektrale spezifische Ausstrahlung
F	Kraft	$M_{\lambda s}$	–, des schwarzen Körpers
		M_d	Drehmoment
		m	Masse
		Ma	Mach-Zahl
		N_A	Avogadro- oder Loschmidt-Konstante
		Nu	Nußelt-Zahl

n	Drehzahl	R_l	Wärmeleitwiderstand
n	Polytrophenexponent	R_m	molare (od. universelle) Gaskonstante
n	Stickstoffanteil (Brennstoff)	$R_{\ddot{u}}$	Wärmeübergangswiderstand
n	Stoffmenge (kmol)	Ra	Rayleigh-Zahl
		Re	Reynolds-Zahl
o	Sauerstoffanteil (Brennstoff)	r	Radius
o	Sauerstoffmenge (zur Verbrennung)	r	Raumanteil
		r	Reflexionskoeffizient (Strahlung)
P	Leistung	r	spezifische Verdampfungsenthalpie
P_{BZ}	Leistung der Brennstoffzelle	r_v, r_t	Arbeitsverhältnis
P_{diss}	dissipierte Leistung		
P_e	Kupplungsleistung	S	Entropie
P_{ei}	Eigenbedarfsleistung	S_{diss}	Entropieerzeugung
P_{gen}	Generatorleistung	S_M	Entropietransport durch Materie
P_{GUD}	Leistung des GUD-Kraftwerks	S_m	molare Entropie
P_{ind}	indizierte Leistung	S_q	Entropietransport durch Wärme
P_{kl}	Klemmenleistung	S_{trans}	Entropietransport
P_t	technische Leistung	S_{Syst}	Entropie des Systems
Pe	Péclet-Zahl	s	spezifische Entropie
Pr	Prandtl-Zahl	s	Schwefelanteil (Brennstoff)
p	Druck, Absolutdruck		
p_{abs}	Absolutdruck	T	thermodynamische Temperatur
p_{amb}	atmosphärischer Bezugsdruck	t	Celsius-Temperatur
p_d	Differenzdruck (allgemein)		
$p_{dü}$	Düsendruck, kritischer Druck	U	innere Energie
p_e	Überdruck (über Atmosphärendruck)	U	elektrische Spannung
p_{kin}	kinetischer Druck (Staudruck)	u	spezifische innere Energie
p_t	Totaldruck (Strömung)	u	Umfangsgeschwindigkeit
p^*	Partialdruck		
		V	Volumen
Q	Wärme	V_f	Volumen der feuchten Luft
$\dot{Q}$	Wärmestrom, Wärmeleistung	V_m	molares Volumen
$\dot{Q}_B$	Brennstoffleistung, Feuerungswärmeleistung	v	spezifisches Volumen
		v_f, v_t	Abgasmenge, feucht, trocken
Q^{rev}	Wärme bei reversiblen Vorgängen		
q	auf die Masse bezogene Wärme	W	Arbeit
$\dot{q}$	Wärmestromdichte, Heizflächenbelastung	W_{BZ}	Arbeit der Brennstoffzelle
		W_{diss}	Dissipationsenergie
q_a	Abgasverlust	W_e	Kupplungsarbeit
q_f	spezifische Flüssigkeitsenthalpie	W_g	Gesamtarbeit (geschlossenes System)
		W_{ind}	indizierte Arbeit
R	Gaskonstante	W_k	Arbeit des irreversiblen Kreisprozesses
R_d	Wärmedurchgangswiderstand	W_k^{rev}	Arbeit des reversiblen Kreisprozesses
R_i	individuelle (od. spezielle) Gaskonstante	W_n	Nutzarbeit an der Kolbenstange
		W_R	Reaktionsarbeit (elektrochem. Reaktion)

W_r	Reibungsarbeit	ε_0	relativer Schadraum (Kolbenverdichter)
W_t	technische Arbeit (offenes System)		
W_t^{rev}	reversible technische Arbeit		
W_t^*	technische Arbeit (kin. und pot. Energieänderung berücksichtigt)	ζ	exergetischer Wirkungsgrad
$W_{t\text{verl}}$	Arbeitsverlust (Turbine)	η	dynamische Viskosität
$W_{tV\text{verl}}$	Arbeitsmehraufwand (Verdichter)	η	Wirkungsgrad
W_u	Verschiebearbeit	η_a	Ausnutzungsgrad (GUD-Prozess)
W_v	Volumenänderungsarbeit	η_A	Abkühlgrad (Rückkühlwerk)
w	spezifische Arbeit	η_{Ab}	Abtrenngrad (CO ₂ -Abtrennung)
w	Geschwindigkeit	η_{BZ}	Wirkungsgrad der Brennstoffzelle
w	Wasseranteil (Brennstoff)	η_c	Carnot-Faktor, η_{th} beim Carnot-Prozess
x	Dampfgehalt im Nassdampf	η_D	wärmetechnischer Kraftwerksnettowirkungsgrad
x	Feuchtegehalt feuchter Luft	η_{Diff}	Diffusorwirkungsgrad
y	Stoffmengenanteil	$\eta_{Dü}$	Düsenwirkungsgrad
		η_{ei}	Eigenbedarfswirkungsgrad
Z	extensive Zustandsgröße	η_f	feuerungstechnischer Wirkungsgrad
Z	Realgasfaktor	$\eta_{f\text{kon}}$	feuerungstechnischer Wirkungsgrad (Kondensation im Abgas)
z	Höhe	η_{gen}	Generatorwirkungsgrad
α	Düsenbeiwert	η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad, Kraftwerksnettowirkungsgrad
α	Längenausdehnungskoeffizient		
α	Verhältnis vergaster/vorhandener Kohlenstoff	η_{GUD}	Gesamtwirkungsgrad des GUD-Kraftwerks
α	Wärmeübergangskoeffizient	η_i	innerer Wirkungsgrad
β	Schaufelwinkel	η_{id}	idealer Wirkungsgrad der Brennstoffzelle
		η_{ind}	indizierter Wirkungsgrad
γ	Volumenausdehnungskoeffizient	η_{isen}	isentropen Wirkungsgrad
γ	Wichte	η_k	Kesselwirkungsgrad
		η_m	mechanischer Wirkungsgrad
$\Delta_B H_m^0$	molare Standardbildungsenthalpie	η_r	Rohrleitungswirkungsgrad
$\Delta_R G$	freie Reaktionsenthalpie	η_{th}	thermischer Wirkungsgrad (Wärmekraftmaschine)
$\Delta_R H$	Reaktionsenthalpie		
$\Delta_R S$	Reaktionsentropie	η_{th}^{rev}	thermischer Wirkungsgrad der reversiblen Wärmekraftmaschine
δ	Wandstärke		
ε	Emissionskoeffizient	κ	Isentropenexponent, Verhältnis c_p/c_v
ε	Längendehnung		
ε	Verdichtungsverhältnis (Kolbenmaschine)	λ	Liefergrad von Kolbenverdichtern
		λ	Luftverhältnis bei der Verbrennung
$\varepsilon_{KM}, \varepsilon_{WP}$	Leistungszahl, Kältemaschine, Wärmepumpe	λ	Wellenlänge
		λ	Wärmeleitfähigkeit

λ_A	Aufheizgrad (Kolbenverdichter)	B, b	Brennstoff
λ_P	Drosselgrad (Kolbenverdichter)	BZ	Brennstoffzelle
μ	Füllungsgrad von Kolbenverdichtern	b	Bezugszustand, Umgebungszustand
μ	Massenanteil	b	Komponente (Gemisch)
ν	kinematische Viskosität	c	Komponente (Gemisch)
ν	stöchiometrische Zahl	car	Carnot-Prozess
		c/r	Clausius-Rankine-Prozess
ζ	Heizzahl	D	Dampfkraftanlage
ϱ	Dichte	D, d	Dampf
ϱ	innere Verdampfungsenthalpie	d	Diesel-Prozess
ϱ^*	Partialdichte	diss	Dissipation
σ	spezifische Schmelzenthalpie	e	effektiv (Kupplung)
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	eis	Eis
		er	Ericsson-Prozess
τ	Zeit	f	feucht, Flüssigkeit
φ	Einspritzverhältnis (Verbrennungsmotor)	G	Gasturbinenanlage
φ	relative Feuchte	GUD	GUD-Kraftwerk
ψ	äußere Verdampfungsenthalpie	g	Gas
ψ	Druckverhältnis (Verbrennungsmotor)	g	geschlossen (System)
ψ	Durchflussfunktion (Düsenströmung)	gef	gefördert (Kolbenverdichter)
ω	Winkelgeschwindigkeit	IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
	Indizes	i	beliebige Komponente
0	(hochgestellt), chem. Standardzustand (25 °C, 1,0 bar, auch 1,013 25 bar)	i	Impuls
0	Zustand bei 0 K oder 0 °C	ib	isobar
1	vor der Zustandsänderung	ich	isochor
2	nach der Zustandsänderung	id	ideal
1 2	Änderung vom Zustand 1 nach 2	ind	indiziert
		isen	isentrop
		ith	isotherm
A, a	Abgas, Verbrennungsgas	j	Joule-Prozess
a	Wert aus Abgas- bzw. Verbrennungsgasanalyse	k	Kesselaustritt
a	in Achsrichtung	k	Kreisprozess
a	Komponente (Gemisch)	k, kr	kritisch
ab	abgeführt	kin	kinetisch (Druck)
ad	adiabat	kon	Kondensation (im Abgas)
amb	Umgebungszustand	KM	Kältemaschine
		KV	Kolbenverdichter

L, l	Luft	V	Verdichter
		v	vor der Verbrennung
M	Materie	verl	Verlust
Mi	Mischungswert		
m	mechanisch	w	Wand
m	in Meridianrichtung	w	Wasser
m	Mittelwert	w	Welle
m	molare Größe	wg	Kühlgrenze (f. Luft)
		WP	Wärmepumpe
N, n	Normalrichtung (senkrecht)		
n	Normzustand, physikalischer	x	beliebiger Zwischenzustand, Variable
	Normzustand	x	Nassdampf
n	Nullpunkt		
n	Nutzen	z	zwischenüberhitzt
		zu	zugeführt
o	Otto-Prozess		
ORC	Organic Rankine Cycle	τ	Taupunkt
pol	polytrop	'	siedende Flüssigkeit
		"	Sattdampf
r	Reibung	·	zeitliche Ableitung eines Wertes, z. B. Massenstrom $\dot{m}$
rev	(hochgestellt) reversibel	*	Änderung der kinet. und pot. Energie berücksichtigt
s	Sättigungs-, Siedezustand	*	brennwertbezogen (Wirkungsgrad)
s	Seiliger-Prozess	*	vereinfachter Clausius-Rankine- Prozess
st	Stirling-Prozess	*	Partialgröße (Gemisch)
T	Turbine		
t	total (Druck)		
t	trocken		
th	thermisch		
tr	Tripelpunkt		
u	in Umfangsrichtung		
u	Umgebung		
u	unvollständig verbrannt		

1

Grundlagen der Thermodynamik

■ 1.1 Aufgabe der Thermodynamik

Das zentrale Thema der Thermodynamik ist die Energie. Man kann die Thermodynamik daher als allgemeine Energielehre innerhalb der Physik betrachten, die Grundlage für fast alle Ingenieurdisziplinen ist.

Aufgabe der Thermodynamik ist die Entwicklung von Verfahren, mit denen Energieumwandlungen und -übertragungen allgemein beschrieben werden. Das geschieht auf der Basis von zwei naturwissenschaftlichen Erfahrungstatsachen: dem 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Der 1. Hauptsatz verknüpft die unterschiedlichen Energieformen, der 2. Hauptsatz gestattet eine Bewertung der Energie. Die Folgerungen aus den beiden Hauptsätzen gehen weit über das engere Fachgebiet der Thermodynamik hinaus.

Die Verfahren zur Energieumwandlung und Energieübertragung erfordern Apparate und Maschinen, die in ihrer Grundkonzeption dargestellt werden. In den Maschinen und Apparaten befinden sich Gase und Flüssigkeiten, deren thermisches Verhalten daher ebenfalls eingehend untersucht wird.

■ 1.2 Größen und Einheitensysteme

1.2.1 Physikalische Größen und Größenarten

Physikalische Größen G kennzeichnen physikalische Eigenschaften von Stoffen oder physikalischen Erscheinungen.

Der Wert einer physikalischen Größe, der *Größenwert*, wird als Produkt aus *Zahlenwert* $\{G\}$ und *Einheit* $[G]$ angegeben:

$$G = \{G\} \cdot [G]$$

Oft werden Größenwerte auch als Größen bezeichnet, gemeinsames Formelzeichen ist G .

Die Einheit ist eine willkürlich wählbare, aber vereinbarte Größe der gleichen Art wie die betrachtete Größe. Der Zahlenwert gibt das Vielfache der physikalischen Größe in der vereinbarten Einheit an. Die physikalische Größe „Durchmesser eines Kolbens“ mit dem

Größenwert $d = 0,1 \text{ m}$ z. B. besteht aus dem Zahlenwert $\{d\} = 0,1$ und der Einheit $[d] = \text{m}$. Statt der Einheit m kann eine andere Einheit verwendet werden, sie muss jedoch von der Art einer Länge sein, wie z. B. cm oder Zoll. Das ändert an dieser physikalischen Größe nichts, sie wird dann beispielsweise beschrieben durch $d = 10 \text{ cm}$, mit dem Zahlenwert $\{d\} = 10$ und der Einheit $[d] = \text{cm}$, oder durch $d = 3,94 \text{ Zoll}$.

Unter dem Begriff *Größenart* sind gleichartige Größen zusammengefasst; z. B. stellt die Größe Arbeit etwas anderes als die Größe Wärme dar, beide gehören jedoch der gemeinsamen Größenart Energie an.

Die überwiegende Zahl der physikalischen Größenarten ist durch die Naturgesetze miteinander verknüpft. Einige jedoch müssen unabhängig voneinander definiert werden. Man bezeichnet sie als *Grundgrößenarten* oder *Basisgrößen*. Aus ihnen werden mittels der Naturgesetze die *abgeleiteten Größenarten* definiert. Zum Beispiel müssen in dem Naturgesetz für gleichförmige Bewegung

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$$

zwei Größenarten unabhängig voneinander festgelegt sein, dann kann die dritte abgeleitet werden.

Die Dimension erfasst den begrifflichen Inhalt einer physikalischen Größe. Für die Dimensionen der Basisgrößen verwendet man Großbuchstaben, z. B. L (Länge), T (Zeit). Die Dimensionen abgeleiteter Größen werden als Potenzprodukte der Dimensionen der Basisgrößen gebildet. Für die Dimension der Geschwindigkeit c gilt z. B.:

$$\dim c = \text{LT}^{-1}$$

Größen gleicher Art haben immer gleiche Dimension, dagegen müssen bei gleicher Dimension die Größen nicht unbedingt gleicher Art sein; z. B. haben die Größen Volumen und Widerstandsmoment die gleiche Dimension, sind aber nicht gleicher Art. Die manchmal anzutreffende falsche Bezeichnung „Dimension“ für den Begriff der Einheit muss vermieden werden.

Welche Größenart Basisgröße ist, ist weitgehend als Vereinbarung anzusehen, lediglich die Anzahl liegt fest. In obigem Beispiel ist die Geschwindigkeit die abgeleitete Größenart, da Länge und Zeit als Basisgrößen vereinbart sind. Nur für die Basisgrößen müssen Einheiten festgelegt werden, man bezeichnet sie als *Grundeinheiten* oder *Basiseinheiten*. Ihre Wahl erfolgt willkürlich. Bedingung ist lediglich eine möglichst internationale Vereinbarung über ihre gemeinsame Verwendung. Für die abgeleiteten Größenarten werden aufgrund der mathematisch formulierten Naturgesetze die *abgeleiteten Einheiten* gebildet, für die Geschwindigkeit beispielsweise

$$\text{Geschwindigkeitseinheit} = \frac{\text{Längeneinheit}}{\text{Zeiteinheit}}$$

Mit den Basiseinheiten m für die Länge und s für die Zeit wird die abgeleitete Einheit für die Geschwindigkeit m/s. Häufig gibt man der abgeleiteten Einheit eine neue Bezeichnung, wie z. B. der Arbeit die Einheit J (*Joule*¹⁾).

1.2.2 Größengleichungen

Gleichungen zwischen physikalischen Größen heißen *Größengleichungen*. Da die Naturgesetze von der Wahl der Einheiten unabhängig sind, müssen auch Größengleichungen so formuliert sein, dass beliebige Einheiten für die einzelnen Größen eingesetzt werden können. Größengleichungen enthalten nur die Formelzeichen der physikalischen Größen und Zahlenwerte, die aus der mathematischen Entwicklung der Gleichung, z. B. beim Differenzieren, entstehen; andere Zahlenwerte und Zeichen, die aus der Umrechnung verschiedener Einheiten herrühren, enthalten sie nicht.

In Größengleichungen muss der Wert der physikalischen Größe vollständig, d. h. als Produkt aus Zahlenwert und Einheit, eingesetzt werden. Betrachten wir als Beispiel das physikalische Gesetz

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$$

$$W = F \cdot s$$

Bei einer Kraft von $F = 10\,000\text{ N}$ (*Newton*²⁾) sind der Zahlenwert $\{F\} = 10\,000$ und die Einheit $[F] = \text{N}$ in die Größengleichung einzusetzen; entsprechend ist mit dem Weg von beispielsweise $s = 7,2\text{ m}$ zu verfahren. Die Arbeit ist dann, mit der Einheit $1\text{ N m} = 1\text{ J}$:

$$W = F s = 10\,000\text{ N} \cdot 7,2\text{ m} = 72\,000\text{ N m} = 72\,000\text{ J}$$

In Ausnahmefällen ist bei wiederholt vorkommenden Berechnungen die Verwendung einer *zugeschnittenen Größengleichung* als Rechenerleichterung von Nutzen. Ist beispielsweise in einer tabellarischen Berechnung die Arbeit in kW h zu ermitteln, so lässt sich durch Einsetzen des Umrechnungsfaktors $3,6 \cdot 10^6\text{ J}/(\text{kW h})$ (T 2.1) folgende zugeschnittene Größengleichung bilden:

$$W = F s = F s \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \frac{\text{kW h}}{\text{N m}} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \left(\frac{F}{\text{N}} \right) \left(\frac{s}{\text{m}} \right) \text{kW h}$$

Die Einheiten sind als Faktoren zu behandeln, sie können daher an beliebiger Stelle geschrieben werden. Am anschaulichsten ist es, wenn sie bei den Formelzeichen der dazugehörigen Größen stehen, d. h. die Einheit N bei der Kraft F und die Einheit m bei dem Weg s .

Auch diese Gleichung ist eine Größengleichung, da die Kraft F und der Weg s in beliebigen Einheiten eingesetzt werden können, lediglich für die Arbeit liegt die auf

¹⁾ *Joule* (sprich dʒuˈl) (1818–1889), engl. Physiker, untersuchte besonders die Wärmeentwicklung elektrischer Ströme (Joule'sches Gesetz) und das Verhalten von Gasen bei Drosselung (Joule-Thomson-Effekt).

²⁾ *Isaac Newton* (sprich njut(ə)n) (1643–1727), Prof. für Naturwissenschaften in England, einer der genialsten Naturforscher, befasste sich u. a. mit der Bewegung der Himmelskörper, fand das Gravitationsgesetz.

diesen Rechnungszweck „zugeschnittene“ Einheit kW h fest. Aufgrund ihres Aufbaus ist die Gleichung allerdings für die Krafteinheit N und die Längeneinheit m besonders gut geeignet, da sich dann die einzusetzenden Einheiten mit den in der Gleichung vorhandenen kürzen. Für das obige Beispiel ergibt die Berechnung nach der zugeschnittenen Größengleichung

$$W = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \frac{10\,000 \text{ N}}{\text{N}} \frac{7,2 \text{ m}}{\text{m}} \text{ kW h} = 0,02 \text{ kW h}$$

Größengleichungen gelten unabhängig von den gewählten Einheiten, wir werden sie daher, wann immer es möglich ist, benutzen.

1.2.3 Zahlenwertgleichungen

Beziehungen zwischen reinen Zahlen sind *Zahlenwertgleichungen*. Wir verwenden sie nur in Sonderfällen. Beispielsweise wird neben der *Celsius*-Temperaturskala¹⁾ in englisch sprechenden Ländern die *Fahrenheit*-Skala²⁾ verwendet. Die Zahlenwerte bei den unterschiedlichen Einheiten sind durch eine Zahlenwertgleichung verknüpft.

$$\{t_C\} = \frac{5}{9} (\{t_F\} - 32)$$

Die Gleichung ergibt den Zahlenwert der Celsius-Temperatur; für die Temperatur der Fahrenheit-Skala ist deren reiner Zahlenwert einzusetzen. Für 122°F ergibt sich z. B.

$$\{t_C\} = \frac{5}{9} (122 - 32) = 50$$

Man findet manchmal zu Zahlenwertgleichungen umgearbeitete Größengleichungen, beispielsweise in der Form

$$W = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} F s$$

Die Gleichung ist aus der zugeschnittenen Größengleichung des Abschnittes 1.2.2 hervorgegangen. Sie gilt nur für ganz bestimmte Einheiten von W , F und s , die unbedingt zusätzlich genannt werden müssen. Solche Art Gleichungen wollen wir grundsätzlich vermeiden, da sie leicht zu Fehlern Anlass geben und oft keinen Rückschluss auf den physikalischen Sachverhalt ermöglichen.

1.2.4 Einheitensysteme

Werden die für ein bestimmtes Gebiet der Physik erforderlichen Basisgrößen und Basiseinheiten vereinbart, so lässt sich ein Einheitensystem entwickeln.

¹⁾ *Anders Celsius* (1701–1744), schwedischer Astronom, führte die nach ihm benannte Thermometereinteilung ein.

²⁾ *Daniel Gabriel Fahrenheit* (1686–1726), Physiker in Danzig und Amsterdam.

Durch die freie Wahl der Basisgrößen und Basiseinheiten sowie der Umrechnungsfaktoren für abgeleitete Einheiten sind im Laufe der Entwicklung der Naturwissenschaften mehrere Einheitensysteme entstanden. Weltweit ist überwiegend das von der Generalkonferenz für Maß und Gewicht 1960 beschlossene *Internationale Einheitensystem (SI)* gebräuchlich.¹⁾ Es ist in Deutschland durch das „Gesetz über Einheiten im Meßwesen“ seit 1969 vorgeschrieben. Dem SI liegen sieben Basisgrößen mit sieben Basiseinheiten zu Grunde (**T 1.1**):

T 1.1 Basisgrößen und Basiseinheiten des SI [41; Tabelle 1]

Basisgröße	Basiseinheit	
	Bezeichnung	Einheitenzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektr. Stromstärke	Ampere	A
Thermodyn. Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Die Einheit Meter ist seit 1983 mithilfe der Lichtgeschwindigkeit definiert und damit von eventuellen Veränderungen des Urmeters, das etwas kürzer als der 40millionste Teil des Pariser Meridians ist, unabhängig. Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft (17. Generalkonferenz für Maß und Gewicht, 1983).

Die Einheit Kilogramm wird durch die Masse eines bei Paris aufbewahrten Zylinders aus 90 Teilen Platin und 10 Teilen Iridium (Internationaler Kilogrammprototyp) verkörpert.²⁾ Ursprünglich verstand man unter 1 kg die Masse von 1 Liter Wasser bei 4 °C.

Die Einheit Sekunde wurde ursprünglich aus der Umlaufzeit der Erde um die Sonne definiert. Sie wird heute mittels der Periodendauer der Strahlung des Nuklids Zäsium ¹³³Cs festgelegt.

Die Einheit Ampere ist die Stärke eines elektrischen Stromes, der zwischen zwei parallelen Leitern eine bestimmte Kraft pro Meter Leiterlänge hervorruft.

Die Einheit Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers (vgl. Abschn. 1.3.3).

¹⁾ In einigen Ländern wird auch das angelsächsische Einheitensystem verwendet.
²⁾ An einer Neudefinition des Kilogramms wird gearbeitet. Angestrebt wird eine Rückführung auf Fundamentalkonstanten der Physik oder auf eine bestimmte Anzahl Siliziumatome in einer perfekt runden Kugel.

Die Einheit Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso viel Einzelteilchen besteht, wie Atome in 12 g des Kohlenstoffnuklids ^{12}C enthalten sind. Die Einzelteilchen können Atome, Moleküle, Elektronen o. a. Teilchen sein.¹⁾

Die Einheit Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle bei festgelegter Frequenz und Strahlstärke.

Tritt in allen Einheitengleichungen nur der Umrechnungsfaktor 1 auf, so bezeichnet man das System als *kohärentes Einheitensystem*. In nichtkohärenten Einheitensystemen treten von 1 verschiedene Umrechnungsfaktoren auf.

In kohärenten Einheitensystemen treten oft bei den abgeleiteten Größenarten ziemlich große oder kleine Stellenzahlen auf. Wegen der besseren Übersicht werden in solchen Fällen die Zahlenwerte um eine oder mehrere Zehnerpotenzen vergrößert oder verkleinert, was durch Vorsatzzeichen zu den Einheiten gekennzeichnet wird. Diese Vorsatzzeichen sind genormt, ein Auszug ist in **T 1.2** aufgeführt.

T 1.2 Genormte Vorsatzzeichen für dezimale Vielfache und Teile von Einheiten [41; Tabelle 5]

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Bedeutung des Vorsatzzeichens
Peta	P	das 10^{15} fache der Einheit
Tera	T	„ 10^{12} „ „ „
Giga	G	„ 10^9 „ „ „
Mega	M	„ 10^6 „ „ „
Kilo	k	„ 10^3 „ „ „
Hekto	h	„ 10^2 „ „ „
Deka	da	„ 10^1 „ „ „
Dezi	d	„ 10^{-1} „ „ „
Zenti	c	„ 10^{-2} „ „ „
Milli	m	„ 10^{-3} „ „ „
Mikro	μ	„ 10^{-6} „ „ „
Nano	n	„ 10^{-9} „ „ „
Piko	p	„ 10^{-12} „ „ „

Über die SI-Einheiten hinaus umfasst dieses *Gesetzliche Einheitensystem* die nicht kohärenten Teile und Vielfache der SI-Einheiten, die atomphysikalischen Einheiten und einige zum SI nicht kohärente Einheiten, wie z. B. die Zeit in h, das Volumen in l oder den Druck in bar.

¹⁾ Der Begriff *Substanzmenge* anstelle von Stoffmenge (entspr. „amount of substance“) hat sich im deutschsprachigen Schrifttum nicht durchgesetzt.

Als Beispiel einer abgeleiteten Größenart wollen wir die Kraft betrachten (**T 1.3**). Für sie gilt das Gesetz:

Kraft = Masse · Beschleunigung

$$F = m \cdot a$$

Mit der Masse $m = 1 \text{ kg}$ als Basisgröße und der Beschleunigung $a = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ als bereits abgeleitete Größenart ergibt sich

$$F = m a = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} = 1 \text{ N}$$

Die abgeleitete Einheit $\frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$ hat die neue Bezeichnung Newton mit dem Einheitenzeichen N erhalten.

1 N ist demnach die Kraft, die der Masse $m = 1 \text{ kg}$ die Beschleunigung $a = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ erteilt.

T 1.3 Einige abgeleitete Größenarten und Einheiten des Internationalen Einheitensystems

Größenart	Einheit	physikalische Gleichung	Einheitengleichung
Kraft	N (Newton)	$F = m \cdot a$	$\text{N} = \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$
Energie	J (Joule)	$W = F \cdot s$	$\text{J} = \text{N m} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$
Leistung	W (Watt)	$P = \frac{W}{\tau}$	$\text{W} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$

Beispiel 1.1: Ein Fahrzeug legt in 40 s einen Weg von 350 m zurück.

- Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich das Fahrzeug? Die Geschwindigkeit ist in der Einheit des Internationalen Einheitensystems anzugeben.
- Wie lautet die zugeschnittene Größengleichung, in der der Weg in m und die Zeit in s eingesetzt werden kann und die Geschwindigkeit in Kilometer pro Stunde ausgerechnet wird?
- Wie groß ist die Geschwindigkeit in Kilometer pro Stunde?

Lösung:

Zu a): Über das Gesetz Geschwindigkeit = Weg/Zeit ergibt sich:

$$c = \frac{l}{\tau} = \frac{350 \text{ m}}{40 \text{ s}} = \underline{8,75 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

Zu b):

$$c = \frac{l}{\tau} = \frac{l}{\tau} \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \frac{\text{km}}{1000 \text{ m}} = \underline{3,6 \frac{l/\text{m km}}{\tau/\text{s h}}}$$

Zu c):

$$c = 3,6 \frac{\frac{350 \text{ m}}{40 \text{ s}}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \frac{\text{km}}{\text{h}} = \underline{31,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}}$$

Beispiel 1.2: Welche abgeleitete Einheit ergibt sich im Internationalen Einheitensystem für die Leistung aus den Basiseinheiten?

Lösung:

Leistung = $\frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}$; Arbeit = Kraft · Weg; Kraft = Masse · Beschleunigung

$$[P] = \left[\frac{W}{\tau} \right] = \left[\frac{F s}{\tau} \right] = \left[\frac{m a s}{\tau} \right] = \frac{\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$$

Die Einheit der Leistung im Internationalen Einheitensystem ist $\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$. Sie erhält die neue Bezeichnung Watt¹⁾ W.

Aufgabe 1.1: In einem Kraftwerk ist eine Turbinenleistung von 100 MW installiert. Welche Arbeit verrichten die Turbinen in 10 Minuten? Die Arbeit ist

- a) in der Einheit des Internationalen Einheitensystems,
- b) in der Einheit kWh anzugeben.

Aufgabe 1.2: Welchen Druck übt ein auf der Erde befindlicher Körper mit der Masse 3000 kg bei einer Auflagerfläche von 5000 mm² auf seine Unterlage aus? $\left(\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \right)$.

Der Druck ist anzugeben in den Einheiten des Internationalen Einheitensystems.

■ 1.3 Thermische Zustandsgrößen

Die Eigenschaften eines Stoffes²⁾ werden durch physikalische Größen beschrieben. Diese Größen heißen *Zustandsgrößen*. Sie haben für einen bestimmten Zustand des Stoffes feste Werte. Zwei Gruppen, die thermischen und die kalorischen Zustandsgrößen, werden wir eingehend behandeln. Die *thermischen Zustandsgrößen* sind Volumen V , Druck p und Temperatur T . Sie sind durch die thermische Zustandsgleichung (s. Abschn. 1.4) miteinander verknüpft.

1.3.1 Volumen

Das *Volumen* V ist der Raum, den der Stoff mit der Masse m ausfüllt. Bei konstanten physikalischen Bedingungen ist das Volumen eines Stoffes von der Menge des Stoffes abhängig.

Das *spezifische Volumen* v ist das *auf die Masse bezogene* Volumen.

$$v = \frac{V}{m} \quad (\text{Gl 1.1})$$

¹⁾ James Watt (sprich wot) (1736–1819), Mechaniker an der Universität Glasgow, verbesserte die von Thomas Newcomen erfundene Dampfmaschine und ließ dies 1769 patentieren.

²⁾ Anstelle des Begriffes *Stoff* führen wir später das *thermodynamische System* ein (Abschn. 1.7.1). Weitere thermodynamische Zustandsgrößen sind in Abschn. 1.7.2 zusammengestellt.

Solche auf die in einem System enthaltene Menge eines Stoffes *bezogenen* Größen sind von der Größe des Systems unabhängig.¹⁾

Beispiel 1.3: Ein Gasbehälter ist mit 250 000 kg Erdgas gefüllt, das einen Raum von 300 000 m³ einnimmt. Bei konstanter Temperatur werden 100 000 kg Gas entnommen, wobei die auf dem Gasinhalt schwimmende obere Begrenzungsscheibe entsprechend absinkt.

Wie verhalten sich Volumen und spezifisches Volumen?

Lösung:

Das Volumen verringert sich durch Absinken der oberen Scheibe bei konstanten Werten für Druck und Temperatur um das Verhältnis der Massen im Behälter:

$$V_2 = V_1 \frac{m_2}{m_1} = 300\,000 \text{ m}^3 \frac{150\,000 \text{ kg}}{250\,000 \text{ kg}} = \underline{180\,000 \text{ m}^3}$$

Das spezifische Volumen ist

$$v_1 = \frac{V_1}{m_1} = \frac{300\,000 \text{ m}^3}{250\,000 \text{ kg}} = \underline{1,2 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \quad \text{oder} \quad v_2 = \frac{V_2}{m_2} = \frac{180\,000 \text{ m}^3}{150\,000 \text{ kg}} = \underline{1,2 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}$$

d. h., v ist von der Masse unabhängig.

Andere physikalische Bedingungen, wie z. B. höhere Temperatur oder höherer Druck, können jedoch das Volumen und das spezifische Volumen verändern. In einer verschlossenen gehaltenen Fahrradpumpe z. B. verringern sich mit dem Hereindrücken des Kolbens bei konstanter Luftmasse sowohl das Volumen V als auch das spezifische Volumen v .

Der Kehrwert des spezifischen Volumens ist die *Dichte* des Stoffes

$$\varrho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad (\text{Gl 1.2})$$

Eine für thermodynamische Betrachtungen weniger wichtige Größe ist die *Wichte*:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \varrho g \quad (\text{Gl 1.3})$$

Die Bezeichnung spezifisches Gewicht für γ soll nicht mehr benutzt werden.

1.3.2 Druck

Als Druck p bezeichnet man die senkrecht auf eine Fläche A wirkende und darauf bezogene Kraft F_N (Normalkraft).

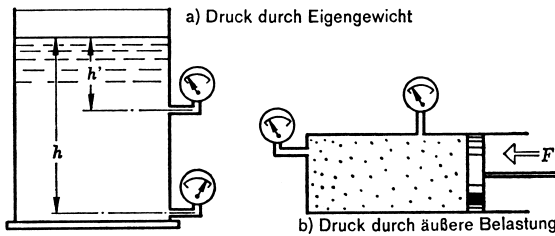
$$p = \frac{F_N}{A}$$

¹⁾ *Spezifische* Zustandsgrößen: Sie sind auf die Masse m bezogen, z. B. v .

Bei Flüssigkeiten und Gasen ist der Druck an den Begrenzungsflächen und im Inneren des Systems wirksam. Die Kraft F kann durch das Eigengewicht des Stoffes oder durch äußere Belastung hervorgerufen werden.

Der durch die Gewichtskraft G der Flüssigkeits- oder Gassäule auf die Bodenfläche A eines Zylinders verursachte Druck ist (**B 1.1 a**):

$$p = \frac{G}{A} = \frac{mg}{A}$$



B 1.1 Druck in Flüssigkeiten und Gasen

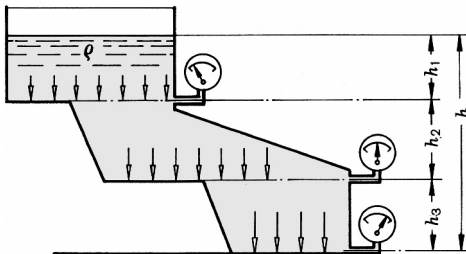
Wir führen Gl 1.2 ein und ersetzen das Volumen durch $V = Ah$

$$p = \frac{\rho V g}{A} = \frac{\rho A h g}{A}$$

$$p = \rho h g \quad (\text{Gl 1.4})$$

Der Druck durch Eigengewicht ist von der Höhe h der Flüssigkeits- oder Gassäule abhängig. Gl 1.4 gilt, solange ρ und g von der Höhe h unabhängig sind.

In beliebigen Gefäßen gilt Gl 1.4 ebenfalls, da sich der Druck in Flüssigkeiten und Gasen nach allen Richtungen gleichmäßig fortpflanzt (**B 1.2**).

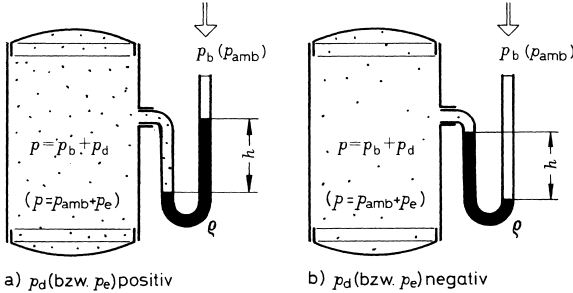


B 1.2 Druck durch Gewicht in beliebigem Gefäß

Oft ist die äußere Belastung so groß, dass der Druck infolge des Eigengewichtes vernachlässigt werden kann. Dann wird an beliebiger Stelle des Systems annähernd der gleiche Druck gemessen (B 1.1 b).

In den in der Thermodynamik behandelten Systemen ist bei Gasen die Veränderung des Gasdruckes mit der Höhe in der Regel vernachlässigbar und nur die äußere Be-

lastung maßgebend, bei Flüssigkeiten ist dagegen oft die Höhe der Flüssigkeitssäule zu beachten. Die Flüssigkeitssäule kann zur Absolutdruckmessung (B 1.4 c) und zur Differenzdruckmessung zwischen dem System und der Umgebung herangezogen werden (**B 1.3**).



B 1.3 Druckmessung durch Flüssigkeitssäule

Der Umgebungsdruck heißt Bezugsdruck p_b , er ist meist, aber nicht immer, der jeweilige Atmosphärendruck, der dann mit p_{amb} bezeichnet wird.¹⁾ Ist der Absolutdruck p (Druck gegenüber dem Druck null im leeren Raum, auch als p_{abs} bezeichnet) im Behälter größer als der Bezugsdruck, so misst das Manometer einen positiven *Differenzdruck* p_d (B 1.3 a), ist der Absolutdruck im Behälter kleiner als der Bezugsdruck, so misst das Manometer einen negativen Differenzdruck p_d (B 1.3 b). Für den Absolutdruck gilt:

$$p = p_b + p_d \quad (\text{Gl 1.5})$$

Die Druckdifferenz gegenüber atmosphärischem Bezugsdruck p_{amb} wird *Überdruck* p_e genannt.²⁾ Dann kann statt Gl 1.5 geschrieben werden:

$$p = p_{amb} + p_e \quad (\text{Gl 1.6})$$

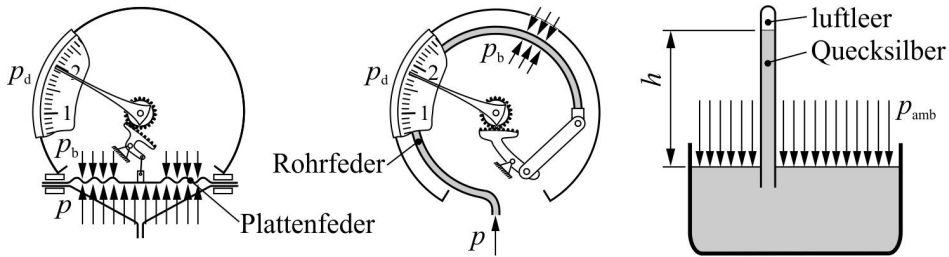
Der Zustand eines Stoffes wird immer durch den Absolutdruck p (p_{abs}) beschrieben.

Die meisten Messgeräte (**B 1.4**) erfassen nicht den Absolutdruck, sondern wie das U-Rohrmanometer (B 1.3) den Differenzdruck zum Bezugsdruck, der zusätzlich gemessen werden muss. Zur Differenzdruckbestimmung ist in Gl 1.4 p_d (bzw. p_e) statt p einzuführen:

$$p = p_b + g h \rho \quad (\text{Gl 1.7})$$

¹⁾ ambiens (lat.) = umgebend.

²⁾ excedens (lat.) = überschreitend.



a) Plattenfedermanometer zur Über- und Unterdruckmessung b) Rohrfedermanometer zur Überdruckmessung c) Gefäßbarometer zur Messung des Atmosphärendruckes

B 1.4 Beispiele von Druckmessgeräten

Die SI-Einheit des Druckes ist das Pascal¹⁾ (Pa), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Das Pascal ist für viele Anwendungen unanschaulich klein. Daher wird oft das dezimale Vielfache angegeben, z. B. Megapascal ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$) in den Internationalen Wasserdampfatafeln oder Hektopascal ($1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$) in der Meteorologie. In der technischen Praxis wird das Bar²⁾ (bar) bevorzugt, da der Atmosphärendruck etwa 1 bar beträgt; kleine Drücke werden auch in mbar angegeben.

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa} \quad (\text{Gl 1.8})$$

Der Druck, den das Gewicht der Luftsäule der Erde auf die Erdoberfläche ausübt, wird *Atmosphärendruck* p_{amb} genannt. Er schwankt in engen Grenzen mit den meteorologischen Bedingungen. Gl 1.4 ist nicht anwendbar, da sich infolge großer Höhe ρ und g mit der Höhe ändern. Als *Normdruck* p_n ist der Luftdruck vereinbart, der einer 760 mm hohen Quecksilbersäule von 0°C bei Normfallbeschleunigung das Gleichgewicht hält.³⁾

$$p_n = 101\,325 \text{ Pa} = 101,325 \text{ kPa} = 1,013\,25 \text{ bar} \quad (\text{Gl 1.9})$$

Die Druckmessung durch Flüssigkeitssäulen führte dazu, statt des Druckes die Höhe der Flüssigkeitssäule anzugeben, die diesem Druck das Gleichgewicht hält, und als Druckeinheit ihre Höhe zu verwenden, wie mmWS (Wassersäule) oder mmHg (Quecksilbersäule). Solche Einheitenzeichen müssen jedoch vermieden werden, da der durch eine Flüssigkeitssäule verursachte Druck von deren Wichte abhängt, die sich mit der Temperatur und der örtlich unterschiedlichen Fallbeschleunigung ändert.⁴⁾

¹⁾ *Pascal* (1623–1662), franz. Mathematiker und Philosoph, entdeckte das Gesetz der Druckfortpflanzung in Flüssigkeiten.

²⁾ Bar von baros (griech.) = Gewicht, Schwere.

³⁾ Diese Festlegung geht auf *Torricelli* (1608–1647, ital. Math. u. Phys.) zurück, der als Erster mit einer Anlage nach B 1.4c den Luftdruck nachgewiesen hat. Eine fettgedruckte letzte Ziffer kennzeichnet einen genauen Zahlenwert [DIN 1333:1992-02; Nr. 2.2]

⁴⁾ mmHg ist in der Medizin noch gesetzlich zulässig.

Die Umrechnung einiger Druckeinheiten außerhalb des SI in die SI-Einheit Pa zeigt **T 1.4**.

T 1.4 Umrechnung von Druckeinheiten*)

Einheit außerhalb des SI		Umrechnung in SI-Einheit
Name	Anwendung	
Bar	Technik	1 bar = 10^5 Pa
Quecksilbersäule	Medizin	1 mmHg = 133,3224 Pa
Techn. Atmosphäre	älteres Schrifttum	1 at = 98 066,5 Pa
pound/square inch (psi)	angelsächsisches System	1 lbf/in ² = 6 894,76 Pa

*) at ist seit 1978 nicht mehr zulässig, mmHg nur noch in der Medizin.

Beispiel 1.4: In einem Vakuumkondensator hat sich Wasser angestaut. An der Messstelle A, die sich oberhalb des Wasserspiegels befindet, wird ein Absolutdruck von 6 kPa, an der unterhalb des Wasserspiegels liegenden Messstelle B wird eine Druckdifferenz von -88 kPa gegenüber Atmosphärendruck gemessen. Der augenblickliche Atmosphärendruck beträgt 101 kPa, die Dichte des Wassers 994 kg/m^3 .

Wie hoch liegt der Wasserspiegel über der Messstelle B?

Lösung:

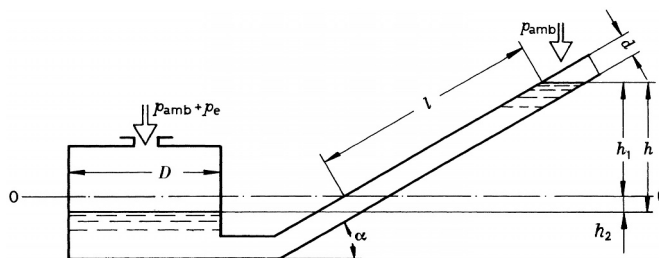
Der Absolutdruck an der Messstelle B ist (Gl 1.6)

$$p_B = p_{\text{amb}} + p_{eB} = (101 - 88) \text{ kPa} = 13 \text{ kPa}$$

Die Druckdifferenz zwischen den beiden Messstellen wird durch die Wassersäule mit der Höhe h verursacht (Gl 1.4).

$$p_B - p_A = \rho h g$$

$$h = \frac{p_B - p_A}{\rho g} = \frac{(13 - 6) \text{ kPa} \cdot 10^3 \frac{\text{Pa}}{\text{kPa}}}{994 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2 \text{ Pa}} \cdot \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2 \text{ N}} = 0,718 \text{ m}$$



B 1.5 Schräghrohrmanometer

Beispiel 1.5: Der Druck in einem Gasbehälter wird durch ein Schräghrohrmanometer (**B 1.5**) gemessen, das gegenüber dem nichtbelasteten Zustand einen Ausschlag von $l = 4,9 \text{ cm}$ anzeigt.

$D = 50 \text{ mm}$, $d = 5 \text{ mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ (Dichte der Füllflüssigkeit).

Wie hoch ist der Überdruck in dem Gasbehälter in Pa und in mbar bzw. hPa?

Lösung:

Der Überdruck im Behälter ist gleich dem Druck der Flüssigkeitssäule im Schräghohrmanometer entsprechend Gl 1.4

$$p_e = \rho g h$$

Die Flüssigkeitssäule h setzt sich aus der Teilhöhe h_1 und der Spiegelabsenkung h_2 zusammen:

$$h_1 = l \sin \alpha, \quad \frac{\pi D^2}{4} h_2 = \frac{\pi d^2}{4} l$$

$$h_2 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 l$$

Die Gesamthöhe h ist:

$$h = h_1 + h_2 = l \left[\sin \alpha + \left(\frac{d}{D}\right)^2 \right] = 4,9 \text{ cm} \left[0,5 + \left(\frac{5 \text{ mm}}{50 \text{ mm}}\right)^2 \right]$$

$$h = 4,9 \text{ cm} \cdot 0,51 = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

Damit ergibt sich der Überdruck:

$$p_e = \rho g h = 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,025 \text{ m} \frac{\text{N}}{\text{kg m s}^2}$$

$$p_e = 208 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \underline{208 \text{ Pa}}$$

$$p_e = 208 \text{ Pa} \cdot 10^{-5} \frac{\text{bar}}{\text{Pa}} \cdot 10^3 \frac{\text{mbar}}{\text{bar}} = \underline{2,08 \text{ mbar}} = \underline{2,08 \text{ hPa}}$$

Aufgabe 1.3: Mit einem U-Rohr-Manometer wird der statische Druck in einer Dampfleitung gemessen. Bei von der Messstelle abgetrenntem und kondensatfreiem Manometer befindet sich die Druckentnahme in der Dampfleitung 2,0 m über dem Quecksilberspiegel des U-Rohres. Bei einer solchen Messanordnung kondensiert in der heruntergeführten Druckentnahmeleitung der Dampf. Durch eine sogenannte Vorlage (Kondensgefäß) wird dafür gesorgt, dass die Druckentnahmeleitung vollständig mit kondensiertem Wasser gefüllt ist. Der Barometerstand beträgt 0,99 bar (= 990 hPa). Die Dichten des Wassers und Quecksilbers sind für 20 °C und etwa 1 bar mit

$$\rho_w = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{und} \quad \rho_{\text{Hg}} = 13\,550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

anzusetzen.

- Wie hoch ist der Absolutdruck des Dampfes in Pa und in bar, wenn die Quecksilbersäule 500 mm hoch ist und sich der höhere Stand in dem freien Schenkel einstellt?
- Welche Höhe hätte die Quecksilbersäule, wenn die Messung an einer Gasleitung mit dem gleichen Absolutdruck wie in der Dampfleitung durchgeführt würde?

Aufgabe 1.4: Der in einer älteren Veröffentlichung angegebene Druck 1,5 at ist in den Einheiten des Internationalen und des angelsächsischen Einheitensystems sowie in der Einheit bar anzugeben.

Aufgabe 1.5: In einer Brennkammer mit 23 kPa Überdruck wird ein Gasbrenner betrieben. Das Brenngas wird einer im Freien aufgestellten Druckgasflasche entnommen. Der Druckverlust in der Zuleitung beträgt 0,5 kPa, der Atmosphärendruck 1020 hPa.

- Auf welchen Überdruck in kPa und in mbar muss das Druckminderventil an der Druckgasflasche eingestellt werden, damit der Gasdruck am Brenner 2 kPa höher als in der Brennkammer ist?
- Welche Höhendifferenz stellt sich bei einem mit Quecksilber gefüllten U-Rohrmanometer ein, das hinter dem Druckminderventil den Gasdruck misst ($\rho_{\text{Hg}} = 13\,550 \text{ kg/m}^3$)?

1.3.3 Temperatur

Temperaturbegriff. Die *Temperatur* ist eine aus der Erfahrung bekannte physikalische Größenart, mit der wir die Begriffe „warm“ und „kalt“ verbinden. Sie ist eine der wenigen Basisgrößen der Physik, die nicht aus anderen Größenarten abgeleitet werden können.

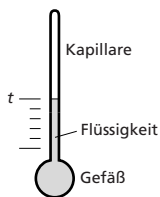
Bringt man zwei Stoffe mit verschiedenen Temperaturen miteinander in Berührung, so wird der Stoff mit der höheren Temperatur kälter, der mit der niedrigeren Temperatur wärmer. Erfahrungsgemäß stellt sich eine gemeinsame Temperatur ein, die sich nicht mehr ändert. Diesen Beharrungszustand nennt man *thermisches Gleichgewicht*.

Die Thermodynamik postuliert als „nullten Hauptsatz der Thermodynamik“:

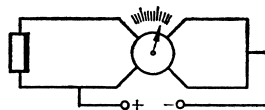
Systeme im thermischen Gleichgewicht haben die gleiche Temperatur.

Den nullten Hauptsatz nennt man auch „Satz von der Existenz der Temperatur“. Welcher Temperaturwert einem thermischen Gleichgewicht zugeordnet wird, ist völlig willkürlich und muss vereinbart werden. Systeme, die nicht im thermischen Gleichgewicht sind, haben unterschiedliche Temperaturen.

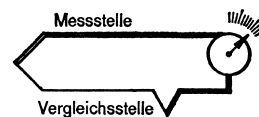
Temperaturmessung. Die Temperatur wird durch Thermometer gemessen. Thermometer ermitteln leicht erfassbare physikalische Größen, die sich mit der Temperatur ändern. Die bekanntesten Thermometer sind *Flüssigkeitsthermometer*, in denen die durch die Temperaturerhöhung verursachte Ausdehnung der Flüssigkeit gemessen wird. Daneben gibt es verschiedene andere Temperaturmessgeräte (**B 1.6**), die nur erwähnt werden sollen, wie Flüssigkeitsfederthermometer, Dampfdruckfederthermometer, Metallausdehnungsthermometer, Widerstandsthermometer (auf Metall- oder Halbleiterbasis), Thermoelemente, Strahlungsthermometer.



a) Flüssigkeitsthermometer



b) Widerstandsthermometer mit Kreuzspulmesswerk



c) Thermoelement mit Drehspulmesswerk

B 1.6 Beispiele von Temperaturmessgeräten

Temperaturskalen. Man erhält eine *empirische Temperaturskala*, wenn man reproduzierbare Temperaturfestpunkte vereinbart, z. B. bei einem Druck von 101,325 kPa den Schmelzpunkt des Eises mit 0°C und den Verdampfungspunkt des Wassers mit 100°C (Celsius, 1742¹⁾).

Erwärmt man ein Thermometer, beispielsweise ein Quecksilber-Glasthermometer (B 1.6 a), von 0°C auf 100°C , teilt die eingetretene Verlängerung des Quecksilberfadens in 100 gleiche Teile und vergleicht diese Skala mit der in gleicher Weise gewonnenen Skala eines Alkoholthermometers, so stellt man Differenzen fest, die durch die unterschiedliche Temperaturabhängigkeit der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Quecksilber und Alkohol verursacht werden.

Der einzige Stoff, dessen thermische Ausdehnung nicht mit der Temperatur veränderlich ist, ist das ideale Gas. Es dehnt sich bei konstantem Druck je $^\circ\text{C}$ Temperaturerhöhung um $\frac{1}{273,15}$ des Volumens aus, das es bei 0°C ausfüllt. Das Volumen des idealen Gases ändert sich daher linear mit der Temperatur, sodass die mit dem idealen Gas gewonnene Temperaturskala die einzige exakt unterteilte ist. Sie heißt *Temperaturskala des idealen Gases*. Das Gasthermometer arbeitet im Prinzip nach B 1.3, statt der Volumenänderung wird demnach die Druckänderung als leichter zu handhabende Messgröße verwendet.

Mithilfe des 2. Hauptsatzes konnte Kelvin nachweisen, dass unabhängig von der Wahl eines Thermometers eine universelle Temperatur, die *thermodynamische Temperatur*, mit einem *absoluten Nullpunkt* existiert.²⁾ Diese Temperatur lässt sich theoretisch exakt durch ein ideales Gasthermometer darstellen.

Zur Definition der Einheit der thermodynamischen Temperatur wählte man 1954 als einzigen Festpunkt den *Tripelpunkt des Wassers*, bei dem unter 611 Pa Eis, Wasser und Wasserdampf gleichzeitig vorkommen. Diesem Festpunkt ordnete man die Temperatur

$$T_{\text{tr}} = 273,16 \text{ K}$$

zu. Damit ist die Einheit der thermodynamischen Temperatur

$$1 \text{ K} = \frac{T_{\text{tr}}}{273,16} \quad (\text{Gl 1.10})$$

Der Zahlenwert 273,16 wurde gewählt, damit das Kelvin möglichst genau mit dem zuvor gebräuchlichen Grad Celsius übereinstimmte. Heute ist die Celsius-Temperaturskala über die Kelvin-Temperaturskala durch folgende Gleichung definiert

$$t = T - T_0; \quad T_0 = 273,15 \text{ K} \quad (\text{Gl 1.11})$$

Die Celsius-Temperaturskala ist also eine Kelvin-Temperaturskala, bei der der Nullpunkt auf 273,15 K verschoben ist.

¹⁾ Im Gegensatz zur heutigen Celsius-Temperaturskala ordnete Celsius dem Schmelzpunkt des Eises 100°C und dem Verdampfungspunkt des Wasser 0°C zu.

²⁾ *Lord Kelvin* (sprich k'Elvin) (*Sir William Thomson*), lebte 1824–1907 in England als Physiker, erkannte gleichzeitig mit Clausius den 2. Hauptsatz der Thermodynamik. $T = 0 \text{ K}$ ist nicht erreichbar, erzielt wurde bisher $T \approx 0,2 \text{ mK}$. Zur Benennung s. Abschn. 3.5.4.

Im Internationalen Einheitensystem ist die thermodynamische Temperatur T Basisgröße mit der Basiseinheit Kelvin (Einheitenzeichen K). Für die Celsius-Temperatur wird das Formelzeichen t verwendet, ihr Einheitenname ist das Grad Celsius (Einheitenzeichen $^{\circ}\text{C}$), ein besonderer Name für das Kelvin.

Bei Temperaturdifferenzen ergeben sich für thermodynamische und Celsius-Temperaturen gleiche Werte; als Einheit ist K zu benutzen, bei Differenzen aus Celsius-Temperaturen ist aber auch $^{\circ}\text{C}$ zulässig.

Da das Gasthermometer, das die thermodynamische Temperatur exakt wiedergibt, schwierig zu handhaben ist, sind international eine Reihe weiterer Temperaturfestpunkte vereinbart, wie beispielsweise der Erstarrungspunkt des Silbers mit 1234,93 K, der des Goldes mit 1337,33 K.¹⁾ Auf diese Weise entstand die *Internationale Temperaturskala (ITS)*, die 1927 als Internationale Praktische Temperaturskala (IPST) geschaffen, 1990 zuletzt verbessert wurde (ITS-90). Sie beginnt bei 0,65 K und gibt die thermodynamische Temperaturskala möglichst genau wieder. Sie ist in vielen Ländern gesetzlich eingeführt.

Durch den Index 90 am Formelzeichen kann im Bedarfsfall auf die Anwendung der ITS-90 aufmerksam gemacht werden (T_{90} , t_{90}).

Abweichungen der ITS-90 gegenüber der Temperaturskala des idealen Gases liegen innerhalb der heute erreichbaren kleinsten Messunsicherheit.

In englisch sprechenden Ländern werden zusätzlich die *Fahrenheit-* und *Rankine-Skala*²⁾ mit den Einheiten $^{\circ}\text{F}$ und $^{\circ}\text{R}$ verwendet. Es gilt: $1^{\circ}\text{F} = 1^{\circ}\text{R}$. In das SI wird umgerechnet nach den Zahlenwertgleichungen:

$$\{T\} = \frac{5}{9} \{T_{\text{R}}\} \quad (\text{Gl 1.12})$$

$$\{t\} = \frac{5}{9} (\{t_{\text{F}}\} - 32) \quad (\text{Gl 1.13})$$

0°C entsprechen danach 32°F .

Beispiel 1.6: Die Celsius-Temperatur $t = 40^{\circ}\text{C}$ ist in K, $^{\circ}\text{F}$ und $^{\circ}\text{R}$ auszudrücken.

Lösung:

$$T = t + T_0 = 40^{\circ}\text{C} + 273,15\text{ K} = \underline{313,15\text{ K}}$$

$$\{T_{\text{R}}\} = \frac{9}{5} \{T\} = \frac{9}{5} 313,15 = 564; \quad T_{\text{R}} = \underline{564^{\circ}\text{R}}$$

$$\{t_{\text{F}}\} = \frac{9}{5} \{t\} + 32 = \frac{9}{5} 40 + 32 = 104; \quad t_{\text{F}} = \underline{104^{\circ}\text{F}}$$

Aufgabe 1.6: Welchen Zahlenwerten in $^{\circ}\text{C}$, K und $^{\circ}\text{R}$ entspricht die Temperatur $t_{\text{F}} = 100^{\circ}\text{F}$?

¹⁾ Messunsicherheit ca. 10 mK beim Silbererstarrungspunkt.

²⁾ *William J. M. Rankine* (sprich r'ænkɪn) (1802–1872), Ingenieur und Physiker in England, lieferte die erste Theorie der Dampfmaschine.

■ 1.4 Thermische Zustandsgleichung

1.4.1 Thermische Zustandsgleichung eines homogenen Systems¹⁾

Zwischen den thermischen Zustandsgrößen Druck p , spezifisches Volumen v und Temperatur T besteht bei allen homogenen Stoffen ein Zusammenhang, der ausgedrückt werden kann durch die Beziehungen $f(p, v, T) = 0$ oder

$$p = p(v, T) \quad v = v(p, T) \quad T = T(p, v) \quad (\text{Gl 1.14})$$

Demnach ist durch zwei thermische Zustandsgrößen eines homogenen Systems auch die dritte festgelegt. Die mathematische Verknüpfung der drei Zustandsgrößen heißt *thermische Zustandsgleichung*. Auch sämtliche übrigen Zustandsgrößen werden durch jeweils zwei bekannte Zustandsgrößen bestimmt, sodass ein homogenes System durch zwei beliebige Zustandsgrößen eindeutig beschrieben ist.

Bei heterogenen Systemen sind weitere Angaben notwendig. So kennzeichnen z. B. bei der Verdampfung eines Stoffes die Zustandsgrößen p und T den Zustand nicht eindeutig. Die thermische Zustandsgleichung ist für Systeme, in denen Aggregatzustandsänderungen auftreten, kompliziert. Es wurden aber Zustandsgleichungen für eine Reihe von Stoffen entwickelt, die sehr genaue Ergebnisse liefern z. B. für H_2O (Abschn. 5.2.1).

1.4.2 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases

Für Gase nimmt die thermische Zustandsgleichung eine einfache Form an. Für sehr niedrige Drücke ($p \rightarrow 0$) wurde durch Messungen gezeigt, dass der Ausdruck $\frac{pv}{T}$ für verschiedene Messwerte von p , v und T immer den gleichen konstanten Wert annimmt, der als *individuelle, spezielle oder spezifische Gaskonstante* R_i eines bestimmten Gases bezeichnet wird.²⁾

$$\frac{pv}{T} = R_i \quad \text{für } p \rightarrow 0$$

Der Zahlenwert von R_i ist für verschiedene Gase unterschiedlich, für ein und dasselbe Gas jedoch unabhängig vom Zustand des Gases (**T 1.5**). Streng genommen gilt die Gleichung nur für den Grenzfall, dass der Druck des Gases den Wert null annimmt.

Meist wird die Gleichung umgestellt und in der Form

$$pv = R_i T \quad (\text{Gl 1.15})$$

¹⁾ Def. siehe Abschn. 1.7.1.

²⁾ Nach der kinetischen Gastheorie sind in diesem Zustand das Eigenvolumen der Moleküle und die zwischen den Molekülen wirkenden Kräfte vernachlässigbar klein.

angegeben. Ein Gas, das Gl 1.15 bei allen Drücken exakt befolgen würde, heißt *ideales Gas*. Gl 1.15 ist demnach die *thermische Zustandsgleichung des idealen Gases*. Ein solches Gas gibt es in Wirklichkeit nicht, viele Gase können aber bei nicht zu hohen Drücken rechnerisch wie das ideale Gas behandelt werden.

In Zustandsbereichen eines Gases, in denen Gl 1.15 nicht anwendbar ist, ist für dieses Gas auch die Bezeichnung *nichtideales (reales) Gas* gebräuchlich. Die Ausdrücke ideales oder nichtideales Gas bezeichnen also nicht die Stoffeigenschaften des Gases, sondern kennzeichnen lediglich den zu betrachtenden Zustandsbereich ein und desselben Gases.

Für die Gasmasse m hat die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases die Form

$$p V = m R_i T \quad (\text{Gl 1.16})$$

In der thermischen Zustandsgleichung für das ideale Gas sind zwei schon früher gefundene physikalische Gesetze enthalten. *Boyle*¹⁾ und *Mariotte*²⁾ erkannten, dass für Gase bei konstanter Temperatur das Produkt aus Druck und Volumen konstant bleibt.

$$p V = \text{const} \quad \text{bei} \quad T = \text{konstant} \quad (\text{Gl 1.17})$$

Ebenso ist in der thermischen Zustandsgleichung des idealen Gases das von *Gay-Lussac*³⁾ für konstanten Druck entdeckte und nach ihm benannte Gesetz enthalten:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad \text{bei} \quad p = \text{konstant} \quad (\text{Gl 1.18})$$

Beispiel 1.7: In einer Stahlflasche von 10 l Inhalt befindet sich Sauerstoff von 20 °C und 5 MPa. Für einen physikalischen Versuch wird Sauerstoff entnommen, wodurch der Flaschendruck auf 4 MPa bei konstanter Temperatur fällt. Der Druck des entnommenen Sauerstoffs wird über ein Ventil auf 104 kPa reduziert, die Temperatur wird durch Beheizung auf 60 °C erhöht. Es soll näherungsweise ideales Gasverhalten angenommen werden.

- Welche Sauerstoffmasse wurde entnommen?
- Welches Volumen nimmt der entnommene Sauerstoff ein?

Lösung:

Zu a): Die Sauerstoffmassen in der Flasche vor und nach der Entnahme sind (Gl 1.16):

$$m_1 = \frac{p_1 V}{R_{O_2} T}, \quad m_2 = \frac{p_2 V}{R_{O_2} T}$$

Die Differenz dieser Massen wurde entnommen (Stoffwerte T 1.5):

$$m_e = m_1 - m_2 = \frac{V}{R_{O_2} T} (p_1 - p_2) = \frac{0,01 \text{ m}^3 \text{ kg K}}{259,8 \text{ J 293,15 K}} (5 - 4) 10^6 \text{ Pa} \frac{\text{N}}{\text{Pa m}^2}$$

$$m_e = \underline{0,131 \text{ kg}}$$

¹⁾ *Robert Boyle* (sprich boyl) (1627–1691), engl. Physiker und Chemiker, entdeckte 1662 das nach beiden Wissenschaftlern benannte Gesetz.

²⁾ *Edme Mariotte* (sprich mariot) (1620–1684), franz. Physiker, befasste sich besonders mit der Optik, entdeckte 1676 das Gesetz von Boyle wahrscheinlich neu.

³⁾ *Joseph Louis Gay-Lussac* (sprich ge lysak) (1778–1850), französischer Naturwissenschaftler, fand 1802 das Ausdehnungsgesetz für das ideale Gas.

T 1.5 Stoffwerte von Gasen*

Gas	Chemisches Symbol	Molares Normvolumen bei 0 °C, 101,325 kPa	Molare Masse	Spezielle Gaskonstante
		V_{mn} $\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$	M $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$	R_i $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
Helium	He	22,425	4,0026	2077,3
Argon	Ar	22,392	39,948	208,1
Wasserstoff	H ₂	22,428	2,0159	4 124,5
Stickstoff	N ₂	22,403	28,0134	296,8
Sauerstoff	O ₂	22,392	31,9988	259,8
Luft (trocken)	–	22,401	28,9655	287,1
Kohlenstoffmonoxid	CO	22,398	28,0101	296,8
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	22,264	44,0095	188,9
Schwefeldioxid	SO ₂	21,876	64,0638	129,8
Ammoniak	NH ₃	22,078	17,0305	488,2
Methan	CH ₄	22,360	16,0425	518,3
Ethin (Acetylen)	C ₂ H ₂	22,212	26,0373	319,3
Ethen (Ethylen)	C ₂ H ₄	22,246	28,0532	296,4
Ethan	C ₂ H ₆	22,190	30,0690	276,5

* R_i , C_{mp} und c_p nach Stephan/Schaber/Stephan/Mayinger [6a; Tabelle 6.2], für Helium nach Baehr/Kabelac [1; Tabelle 10.6].

M nach [40; Tabelle 1], V_{mn} und ϱ_n nach [53; Tabelle 2]. c_v , κ und C_{mv} nach Gln 2.46/2.47 und Gl 2.54 berechnet.

Zu b): Volumen des entnommenen Sauerstoffs:

$$V_e = \frac{m_e R_{O_2} T_e}{p_e} = \frac{0,131 \text{ kg } 259,8 \text{ J } 333,15 \text{ K}}{\text{kg K } 104 \cdot 10^3 \text{ Pa}} \frac{\text{Pa m}^2}{\text{N}}$$

$$V_e = 0,109 \text{ m}^3$$

Beispiel 1.8: Ein Kompressor mit nachgeschaltetem Kühler fördert 25 kg/h Pressluft von 28 °C in einen Windkessel von 4 m³. Im Windkessel bleibt die Temperatur konstant bei 28 °C. Der Windkessel versorgt einen Verbraucher, der 5 m³/h Luft von 20 °C mit einem Überdruck von 200 kPa benötigt. Die Abkühlung der Luft von 28 °C auf 20 °C tritt in der Zuleitung ein. Der Kompressor wird in Abhängigkeit vom Windkesseldruck ein- bzw. ausgeschaltet. Die Einschaltung erfolgt bei einem Überdruck von 250 kPa, die Aus-

Dichte im Normzustand bei 0 °C, 101,325 kPa ϱ_n $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Molare und spezifische Wärmekapazität bei 0 °C und idealem Gaszustand				$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ bei 0 °C und idealem Gaszustand	Gas
	C_{mp} $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$	c_p $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	C_{mv} $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$	c_v $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$		
0,1785	20,7863	5,1932	12,4718	3,1159	1,667	Helium
1,7841	20,7858	0,5203	12,4713	0,3122	1,667	Argon
0,0899	28,6228	14,2003	20,3083	10,0758	1,409	Wasserstoff
1,2504	29,0967	1,0389	20,7822	0,7421	1,400	Stickstoff
1,4290	29,2722	0,9150	20,9577	0,6552	1,397	Sauerstoff
1,2929	29,0743	1,0043	20,7598	0,7172	1,400	Luft (trocken)
1,2506	29,1242	1,0403	20,8097	0,7435	1,399	Kohlenstoffmonoxid
1,9767	35,9336	0,8169	27,6191	0,6280	1,301	Kohlenstoffdioxid
2,9285	38,9666	0,6092	30,6521	0,4794	1,271	Schwefeldioxid
0,7714	35,0018	2,0557	26,6873	1,5675	1,311	Ammoniak
0,7175	34,5667	2,1562	26,2522	1,6379	1,316	Methan
1,1772	39,3536	1,5127	31,0391	1,1934	1,268	Ethin (Acetylen)
1,2611	45,1842	1,6119	36,8697	1,3155	1,225	Ethen (Ethylen)
1,3551	51,9556	1,7291	43,6411	1,4526	1,190	Ethan

schaltung bei einem Überdruck von 700 kPa. Der Barometerstand beträgt 101 kPa. Es soll näherungsweise ideales Gasverhalten angenommen werden.

Wie groß sind:

- die Stillstandszeit,
- die Laufzeit des Kompressors?

Lösung:

Zu a): Nach Abschalten des Kompressors befindet sich die Luftmasse m_1 im Windkessel, bei Einschalten die Luftmasse m_2 . Die Differenz m_v wird vom Verbraucher mit dem stündlichen Bedarf $\dot{m}_v$ während der Stillstandszeit τ_s des Kompressors entnommen.

$$\tau_s = \frac{m_v}{\dot{m}_v} = \frac{m_1 - m_2}{\dot{m}_v}$$

Die einzelnen Massen berechnen wir nach der thermischen Zustandsgleichung (Gl 1.16).

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{R_l T_1} = \frac{(700 + 101) 10^3 \text{ Pa } 4 \text{ m}^3 \text{ kg K N}}{287,1 \text{ J } 301,15 \text{ K Pa m}^2} = 37,06 \text{ kg}$$

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_l T_2} = \frac{(250 + 101) 10^3 \text{ Pa } 4 \text{ m}^3 \text{ kg K N}}{287,1 \text{ J } 301,15 \text{ K Pa m}^2} = 16,24 \text{ kg}$$

$$\dot{m}_v = \frac{p_v \dot{V}_v}{R_l T_v} = \frac{(200 + 101) 10^3 \text{ Pa } 5 \text{ m}^3 \text{ kg K N}}{\text{h } 287,1 \text{ J } 293,15 \text{ K Pa m}^2} = 17,88 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Die Stillstandszeit ist:

$$\tau_s = \frac{(37,06 - 16,24) \text{ kg h}}{17,88 \text{ kg}} = 1,16 \text{ h}$$

Zu b): Der Kompressor liefert stündlich die Luftmasse $\dot{m}_k$. Davon wird während der Lieferung vom Verbraucher stündlich die Masse $\dot{m}_v$ entnommen, die Differenz $\dot{m}_k - \dot{m}_v$ füllt den Windkessel, der bis zum Ausschalten des Kompressors die Luftmasse $m_v = m_1 - m_2$ aufnimmt. Die Auffüllzeit ist:

$$\tau_a = \frac{m_v}{\dot{m}_k - \dot{m}_v} = \frac{20,8 \text{ kg}}{25 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 17,88 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 2,92 \text{ h}$$

Aufgabe 1.7: Wie groß sind Volumen, spezifisches Volumen und Dichte von 5 kg Luft (näherungsweise als ideales Gas anzunehmen) bei dem Druck 400 kPa und der Temperatur 82 °C?

Aufgabe 1.8: In einer Unterdruckkammer von 2 m³ soll gegenüber dem Umgebungszustand eine Druckdifferenz von –30 kPa bei konstanter Temperatur von 26 °C erzeugt werden. Es soll näherungsweise ideales Gasverhalten angenommen werden.

Welche Luftmasse ist abzusaugen?

Aufgabe 1.9: Ein Gasbehälter ist mit 250 000 kg Erdgas gefüllt, das einen Raum von 300 000 m³ einnimmt. Es soll näherungsweise ideales Gasverhalten angenommen werden.

Welche Temperatur hat das Erdgas, wenn die Gaskonstante 450 J/(kg K) und der Überdruck 3,58 kPa bei einem Atmosphärendruck von 102,6 kPa betragen?

Aufgabe 1.10: Ein Behälter mit 100 m³ Inhalt ist vollständig mit Stickstoff (näherungsweise als ideales Gas anzunehmen) gefüllt. Die Temperatur des Stickstoffs beträgt 15 °C. Im Behälter herrscht ein Überdruck von 900 kPa bei einem Atmosphärendruck von 100 kPa.

Welche Stickstoffmasse befindet sich im Behälter?

■ 1.5 Mengenmaße Kilomol und Normvolumen; molare Gaskonstante

1.5.1 Kilomol

Bisher hatten wir zur Angabe von Materiemengen die Masse benutzt, die im Internationalen Einheitensystem eine Basisgröße ist. Die Masse wird als Mengenmaß in der Ther-

modynamik bevorzugt. Neben der Masse können aber auch andere Größen zur Beschreibung von Materiemengen verwendet werden. Denkbar wäre es beispielsweise, die Zahl der Moleküle anzugeben. Diese Art der Mengenangabe hätte jedoch den Nachteil, dass die außerordentlich hohen Zahlenwerte den menschlichen Denkgewohnheiten fremd sind. Statt die Zahl der Moleküle selbst als Größe zu verwenden, wurde deshalb eine ganz bestimmte Molekülzahl als neue SI-Basiseinheit mit der Bezeichnung *Mol* (Einheitenzeichen: mol) eingeführt. Damit wurde die *Stoffmenge* n (auch *Molmenge* genannt) zu einer zusätzlichen SI-Basisgröße. Die Zahl der Moleküle eines Kilomols ist die *Avogadro-Konstante* (T 1.6):¹⁾

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{kmol}} \quad \text{Avogadro-Konstante}^{2)}$$

Ursache für gerade diese Molekülzahl war die Festlegung der molaren Masse³⁾ des Wasserstoffs mit $M_{\text{H}_2} \approx 2 \text{ kg/kmol}$, also mit soviel kg, wie die relative Molekülmasse angibt. In der Wasserstoffmasse von 2 kg sind nämlich $6,022 \cdot 10^{26}$ Moleküle enthalten. Ein Kilomol eines anderen Stoffes muss – bei den vereinbarten $6,022 \cdot 10^{26}$ Molekülen – eine andere Masse haben, da die Masse des einzelnen Moleküls eine andere ist. Für Sauerstoff ergibt sich beispielsweise mit der relativen Molekülmasse 32 die molare Masse zu $M_{\text{O}_2} = 32 \text{ kg/kmol}$.

Alle relativen Molekülmassen waren ursprünglich auf das Wasserstoffatom mit der Masse 1 bezogene Relativzahlen, daher ist durch die relative Molekülmasse eines jeden Stoffes der Zahlenwert der molaren Masse M bestimmt.

Die Stoffmenge n und die Masse m lassen sich mittels der molaren Masse ineinander umrechnen:

$$m = nM$$

(GI 1.19)

Statt der relativen Molekülmasse vom Wasserstoff wird seit 1962 das eindeutiger darstellbare Kohlenstoffisotop ^{12}C mit der relativen Molekülmasse 12 als Bezugsgröße verwendet. Werte für M s. T 1.5.

Die Stoffmenge als Materiemaß ist nicht auf die Erfassung der Anzahl der Moleküle beschränkt. Sie wird ganz allgemein für jeweils zu benennende Teilchen (Atome, Elektronen, Ionen u. a.) verwendet (Abschn. 1.2.4).

¹⁾ *Amedeo Avogadro* (1776–1856), italienischer Physiker, veröffentlichte 1811 das nach ihm benannte Gesetz. *Loschmidt* (1821–1895), Prof. in Wien, lieferte Beiträge zur kinetischen Gastheorie, berechnete die Avogadro-Konstante. Die Anzahl der Moleküle je m^3 Normvolumen heißt *Loschmidt-Konstante*.

²⁾ Genauer Wert s. T 1.6.

³⁾ Statt der Bezeichnungen molare Masse, molares Volumen und molare Wärmekapazität findet man auch Molmasse, Molvolumen und Molwärme.

1.5.2 Normvolumen

Nach dem Gesetz von *Avogadro* ist bei allen idealen Gasen in gleichem Volumen bei gleichen Drücken und Temperaturen dieselbe Anzahl Moleküle enthalten. Das bedeutet, dass ein Kilomol eines jeden idealen Gases mit der Molekülzahl $\{N_A\} = 6,022 \cdot 10^{26}$ bei gleichen physikalischen Bedingungen das gleiche Volumen, molares Volumen V_m genannt, einnimmt. Bei *physikalischem Normzustand*, worunter

$$t_n = 0^\circ\text{C} \quad \text{und} \quad p_n = 101,325 \text{ kPa} \quad \textit{physikalischer Normzustand} \quad (\text{Gl 1.20})$$

verstanden werden¹⁾, ist dieses molare Volumen $V_{mn} = 22,414 \text{ m}^3/\text{kmol}$ (T 1.6), abgerundet²⁾

$$V_{mn} = 22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} \quad \textit{molares Normvolumen, bei idealem Gas} \quad (\text{Gl 1.21})$$

V_{mn} wird molares Normvolumen genannt. Bei nichtidealen Gasen weicht das molare Normvolumen V_{mn} etwas von $22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$ ab (T 1.5).

Der Index n kennzeichnet den physikalischen Normzustand mit der Normtemperatur t_n und dem Normdruck p_n . Das von einer bestimmten Gasmenge hierbei ausgefüllte Volumen heißt *Normvolumen* V_n .

Das Normvolumen V_n kann aus der Stoffmenge n und dem molaren Normvolumen V_{mn} berechnet werden nach

$$V_n = n V_{mn} \quad (\text{Gl 1.22})$$

Für einen beliebigen Zustand gilt:

$$V = n V_m \quad (\text{Gl 1.23})$$

Die Dichte eines Gases ist (Gl 1.2)

$$\varrho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} = \frac{M}{V_m} \quad (\text{Gl 1.24})$$

mit dem molaren Volumen $V_m = M v$, das von 1 kmol eingenommen wird. Im physikalischen Normzustand ist

$$\varrho_n = \frac{M}{V_{mn}} \quad (\text{Gl 1.25})$$

Normvolumen und Masse sind durch die Dichte im physikalischen Normzustand (*Normdichte*) miteinander verknüpft:

¹⁾ Physikalischer Normzustand nach DIN 1343 [54; Nr. 2]. Als „chemischer Standardzustand“ sind $t_0 = 25^\circ\text{C}$, $p_0 = 100 \text{ kPa}$ bei neueren Tabellierungen üblich, daneben wird auch $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$ verwendet (vgl. Abschn. 9.8.1).

²⁾ Genauer Wert s. T 1.6.

$$m = \varrho_n V_n \quad (\text{Gl 1.26})$$

Werte für ϱ_n (T 1.5), sonst nach Gl 1.25.

1.5.3 Molare Gaskonstante

Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases (Gl 1.15) nimmt für die Stoffmenge 1 kmol, d. h. für die molare Masse M , die Form an

$$p M v = M R_i T$$

Hierin wird Gl 1.24 eingeführt:

$$p V_m = M R_i T \quad (\text{Gl 1.27})$$

Da das molare Volumen V_m für alle idealen Gase unter gleichen physikalischen Bedingungen gleich groß ist, wird der Ausdruck $\frac{p V_m}{T}$ ein für alle idealen Gase gleich großer konstanter Wert mit der Bezeichnung *molare* oder *universelle (allgemeine) Gaskonstante* R_m .¹⁾ Damit ergibt sich die thermische Zustandsgleichung für 1 kmol:

$$p V_m = R_m T \quad (\text{Gl 1.28})$$

Mit der Stoffmenge n gilt:

$$p V = n R_m T \quad (\text{Gl 1.29})$$

Der Zahlenwert der molaren Gaskonstanten kann durch Einsetzen des physikalischen Normzustandes aus Gl 1.28 berechnet werden:²⁾

$$R_m = \frac{p V_m}{T} = \frac{101\,325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 22,414 \text{ m}^3}{\text{kmol} \cdot 273,15 \text{ K}}$$

$$R_m = 8\,314,46 \frac{\text{J}}{\text{kmol K}} \quad \text{molare Gaskonstante} \quad (\text{Gl 1.30})$$

Aus der molaren Gaskonstanten R_m wird die spezielle Gaskonstante eines bestimmten Gases R_i ermittelt nach

$$R_i = \frac{R_m}{M} \quad (\text{Gl 1.31})$$

In T 1.6 sind Naturkonstanten und vereinbarte Bezugzustände sowie einige weitere physikalische Größen zusammengestellt.

¹⁾ Statt der Schreibweise R_m verwenden DIN 1304-1:1994-03 und DIN 1345 [55] R . Die auf 1 Molekül bezogene molare Gaskonstante heißt *Boltzmann-Konstante*: $k = \frac{R_m}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ (genauer Wert T 1.6).

²⁾ Genauer Wert s. T 1.6.

T 1.6 Naturkonstanten, Bezugsgröße und -zustände sowie weitere Größen

	Name	Größe
Naturkonstanten [21]	Avogadro-Konstante	$N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{26} \text{ 1/kmol}$
	Boltzmann-Konstante	$k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
	Faraday-Konstante	$F = 96\,485,332\,12 \text{ C/mol}$
	Planck'sches Wirkungsquantum	$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma = 5,670\,374 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4\text{)}$
	Wien'sche Verschiebungskonstante	$w = 2897,771\,96 \text{ }\mu\text{m K}$
	Molare Gaskonstante	$R_m = 8\,314,462\,6 \text{ J/(kmol K)}$
	Molares Normvolumen des idealen Gases	$V_{mn} = 22,413\,969\,54 \text{ m}^3/\text{kmol}$
	Gravitationskonstante	$\Gamma = 6,674\,30 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2)$
	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$
	Masse des Elektrons	$m_e = 9,109\,383\,702 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
	Masse des Protons	$m_p = 1,672\,621\,924 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
	Masse des Neutrons	$m_n = 1,674\,927\,498 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Bezugsgrößen und -zustände	Normfallbeschleunigung [21]	$g_n = 9,806\,65 \text{ m/s}^2$
	Physikalischer Normzustand ¹⁾ : Normtemperatur Normdruck	$t_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_n = 273,15 \text{ K}$ $p_n = 101,325 \text{ kPa}$
	Chemischer Standardzustand [36; S. 57]	$t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_0 = 298,15 \text{ K}$ $p_0 = 100 \text{ kPa}$ (auch $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$)
	Tripelpunkt des Wassers [32]	$t_{tr} = 0,01 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_{tr} = 273,16 \text{ K}$ $p_{tr} = 611,657 \text{ Pa}$
Weitere Größen	Erdmasse ²⁾	$m_E = 5,973 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
	Mittlerer Erdradius ²⁾	$r_E = 6\,371,009 \text{ km}$
	Mittlerer Erdbahnradius ³⁾	$d_{S,E} = 149\,598\,000 \text{ km}$
	Sonnenmasse ³⁾	$m_S = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
	Mittlerer Sonnenradius ³⁾	$r_S = 696\,260 \text{ km}$
	Mittlere Temperatur der Sonnenoberfläche ³⁾	$T_S = 5\,780 \text{ K}$

¹⁾ DIN 1343 [54; Nr. 2]²⁾ [37; S. 74]³⁾ [37; S. 62]

Beispiel 1.9: Für die Sauerstoffmenge 0,131 kg sind die Stoffmenge in kmol und das Normvolumen anzugeben.

Lösung:

Die Stoffmenge n ist (Gl 1.19):

$$n = \frac{m}{M} = \frac{0,131 \text{ kg}}{31,999 \text{ kg}} = 0,0041 \text{ kmol}$$

Das Normvolumen ist (Gl 1.22):

$$V_n = nV_{mn} = 0,0041 \text{ kmol} \cdot 22,392 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} = 0,0917 \text{ m}^3$$

Aufgabe 1.11: Für CO sind mithilfe der molaren Masse die Dichte im physikalischen Normzustand und die spezielle Gaskonstante zu berechnen.

1.6 Thermische Ausdehnung

Unter konstantem Druck stehende Körper dehnen sich mit steigender Temperatur aus. Der Vorgang wird als *thermische Ausdehnung* bezeichnet. Ausnahmen von diesem Verhalten sind selten, wie beispielsweise beim Wasser, das bei +4 °C sein geringstes Volumen erreicht.

1.6.1 Längenänderung

Die *Längenänderung* Δl fester Körper ist von der Länge l des Körpers, seiner Temperaturänderung und einem Stoffwert, dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten α , abhängig.

Als *thermischen Längenausdehnungskoeffizienten* definiert man:

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} \quad \text{bei } p = \text{konstant, bezogen auf Ausgangslänge} \quad (\text{Gl 1.32})$$

α kann man sich anschaulich vorstellen als Längenänderung eines Stabes, bezogen auf die Ausgangslänge, bei 1 K Temperaturänderung.

α ist temperaturabhängig. Bei der Berechnung des Mittelwertes des Längenausdehnungskoeffizienten bezieht man die Längenänderung nicht auf die Ausgangslänge, sondern auf die Länge l_b bei einer Bezugstemperatur t_b .

Dann kann die Bezugslänge l bei der Integration der Gl 1.32 als konstante Größe behandelt werden.

$$\int_{t_1}^{t_2} \alpha dT = \frac{1}{l_b} \int_{l_1}^{l_2} dl = \frac{1}{l_b} (l_2 - l_1)$$

Mit der Längenänderung bei Temperaturänderung von t_1 auf t_2

$$\Delta l = l_2 - l_1 = l_b \alpha_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \quad (\text{Gl 1.33})$$

gilt für den *mittleren Längenausdehnungskoeffizienten*:

$$\alpha_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \alpha \, dT}{t_2 - t_1} \quad (\text{Gl 1.34})$$

In Tabellen werden die Mittelwerte zwischen der Bezugstemperatur t_b und der Endtemperatur t angegeben. In **T 1.7** ist als Bezugstemperatur $t_0 = 0^\circ\text{C}$ gewählt.¹⁾

Mit der Bezugslänge l_0 wird aus Gl 1.33

$$\Delta l = l_2 - l_1 = l_0 \alpha_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \quad (\text{Gl 1.35})$$

Für die Längenänderung bei Temperaturänderung von 0°C auf t_1 gilt

$$l_1 - l_0 = l_0 \alpha_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_1} (t_1 - 0^\circ\text{C}) \quad (\text{Gl 1.36})$$

und für eine Temperaturänderung von 0°C auf t_2

T 1.7 Mittlere Längen- und Volumenausdehnungskoeffizienten, geltend für die Länge l_0 bzw. das Volumen V_0 des Körpers bei 0°C [15]

Temperaturbereich	Längenausdehnungskoeffizient $\alpha_m _{0^\circ\text{C}}^t$	
	in $\frac{\text{m}}{\text{K m}} = \frac{1}{\text{K}}$	
	$0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$
Aluminium (99,5%)	$23,8 \cdot 10^{-6}$	$24,5 \cdot 10^{-6}$
Gusseisen	$10,4 \cdot 10^{-6}$	$11,1 \cdot 10^{-6}$
Glas (technisch)	$(3,5 - 8,1) \cdot 10^{-6}$	$(3,6 - 8,4) \cdot 10^{-6}$
Quarzglas	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$16,5 \cdot 10^{-6}$	$16,9 \cdot 10^{-6}$
Messing (mit 62% Cu)	$18,4 \cdot 10^{-6}$	$19,3 \cdot 10^{-6}$
Stahl (mit 0,2–0,6% C)	$11,0 \cdot 10^{-6}$	$12,0 \cdot 10^{-6}$
Temperaturbereich	Volumenausdehnungskoeffizient $\gamma_m _{0^\circ\text{C}}^t$	
	in $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{K}} = \frac{1}{\text{K}}$	
	$0^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$
Quecksilber	$182,2 \cdot 10^{-6}$	$182,6 \cdot 10^{-6}$
Glycerin	$520 \cdot 10^{-6}$	—

¹⁾ In DIN 51045-1:1989-09; Nr. 3.1.2.2 „Bestimmung der Längenänderung fester Körper“ wird als Regelfall 20°C vorausgesetzt.

$$l_2 - l_0 = l_0 \alpha_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_2} (t_2 - 0^\circ\text{C}) \quad (\text{Gl 1.37})$$

Subtrahiert man diese beiden Gleichungen,¹⁾ erhält man durch Vergleich mit Gl 1.35 für den Mittelwert des Längenausdehnungskoeffizienten zwischen t_1 und t_2 :

$$\alpha_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{\alpha_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_2} t_2 - \alpha_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{Gl 1.38})$$

Der nach Gl 1.38 gebildete Mittelwert $\alpha_m|_{t_1}^{t_2}$ ist auf diejenige Länge bezogen, die den tabellierten Werten zugrunde liegt, hier also auf l_0 bei 0°C . In der Regel ist aber die Länge l_1 bei t_1 bekannt; l_1 hängt mit l_0 zusammen nach Gl 1.36:

$$l_1 = l_0(1 + \alpha_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_1} t_1) \quad (\text{Gl 1.39})$$

Wir ersetzen in Gl 1.35 l_0 durch Gl 1.39:

$$\Delta l = l_1 \alpha_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \frac{1}{1 + \alpha_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_1} t_1}$$

Der Term $\frac{1}{1 + \alpha_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_1} t_1}$ nimmt wegen des kleinen Zahlenwertes des Produktes $\alpha_m t_1$ (s. T 1.7) etwa den Wert 1 an, sodass mit guter Näherung auch bei Einsetzen des auf l_0 bezogenen Mittelwertes für $\alpha_m|_{t_1}^{t_2}$ gilt:

$$\Delta l \approx l_1 \alpha_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \quad (\text{Gl 1.40})$$

Das Verhältnis der Längenänderung zur Ausgangslänge heißt relative Längenänderung oder *Längendehnung* $\left(\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_1}\right)$.

Der Längenausdehnungskoeffizient bei einer bestimmten Temperatur lässt sich näherungsweise durch Polynome berechnen, z. B.:

$$\alpha = (a + b t + c t^2 + d t^3) \frac{1}{\text{K}} \quad (\text{Gl 1.41})$$

Werte für die Koeffizienten $a \dots d$ für einige Stoffe s. **T 1.8**. Nach Gl 1.34 berechnet sich der mittlere Längenausdehnungskoeffizient, bezogen auf die Länge l_0 , zu

$$\alpha_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{a(t_2 - t_1) + \frac{b}{2}(t_2^2 - t_1^2) + \frac{c}{3}(t_2^3 - t_1^3) + \frac{d}{4}(t_2^4 - t_1^4)}{t_2 - t_1} \frac{1}{\text{K}} \quad (\text{Gl 1.42})$$

¹⁾ Zur Vereinfachung der Gleichungen wird der Ausdruck 0°C z. T. weggelassen, da bei der Produktbildung das Glied ohnehin wegfällt. Die Einheit $^\circ\text{C}$ für t_1 (statt exakt $t_1 - 0^\circ\text{C}$) steht dann für eine Temperatur *differenz* und kann z. B. gegen die Einheit K gekürzt werden.

T 1.8 Temperaturabhängigkeit des Längenausdehnungskoeffizienten; Koeffizienten für Gl 1.41 und Gl 1.42 [22; S. 361f, Tab. 3.19b]

Stoff	Temperaturbereich t_1 bis t_2 $^{\circ}\text{C}$	Koeffizienten			
		a —	b $\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$	c $\frac{1}{^{\circ}\text{C}^2}$	d $\frac{1}{^{\circ}\text{C}^3}$
Aluminium	–250 bis 600	$22,69 \cdot 10^{-6}$	$39,02 \cdot 10^{-9}$	$-118,56 \cdot 10^{-12}$	$154,84 \cdot 10^{-15}$
Baustahl	–250 bis 700	$11,26 \cdot 10^{-6}$	$21,88 \cdot 10^{-9}$	$-52,56 \cdot 10^{-12}$	$55 \cdot 10^{-15}$
Bronze	0 bis 500	$17,04 \cdot 10^{-6}$	$8,68 \cdot 10^{-9}$		
Gold	–250 bis 900	$14,13 \cdot 10^{-6}$	$11,578 \cdot 10^{-9}$	$-35,07 \cdot 10^{-12}$	$36,936 \cdot 10^{-15}$
Kupfer	–250 bis 600	$15,95 \cdot 10^{-6}$	$19,758 \cdot 10^{-9}$	$-64,92 \cdot 10^{-12}$	$83,6 \cdot 10^{-15}$
Silber	–250 bis 800	$18,74 \cdot 10^{-6}$	$19,918 \cdot 10^{-9}$	$-51,72 \cdot 10^{-12}$	$50,72 \cdot 10^{-15}$
Thermometer- glas	–250 bis 480	$7,457 \cdot 10^{-6}$	$16,174 \cdot 10^{-9}$	$-57,72 \cdot 10^{-12}$	$85,04 \cdot 10^{-15}$
Titan	–123 bis 883	$8,13 \cdot 10^{-6}$	$9,39 \cdot 10^{-9}$	$-6,609 \cdot 10^{-12}$	

1.6.2 Volumenänderung

Beliebige Stoffe. Die *Volumenänderung* ΔV eines Körpers ist bei konstantem Druck von dem Volumen V des Körpers, seiner Temperaturänderung und einem Stoffwert, dem thermischen Volumenausdehnungskoeffizienten γ , abhängig.

Als *thermischen Volumenausdehnungskoeffizienten* definiert man:

$$\gamma = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad \text{bei } p = \text{konstant, bezogen auf Ausgangsvolumen} \quad (\text{Gl 1.43})$$

γ kann man sich anschaulich vorstellen als Volumenänderung, bezogen auf das Ausgangsvolumen, bei 1 K Temperaturänderung.

γ ist temperaturabhängig. In T 1.7 ist der Mittelwert γ_m für den Temperaturbereich zwischen 0°C und t , bezogen auf das Volumen V_0 bei 0°C , tabelliert. Ähnlich den Ableitungen bei der Längenänderung gilt somit:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = V_0 \gamma_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \quad (\text{Gl 1.44})$$

Hierin ist

$$\gamma_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{\gamma_m|_{0^{\circ}\text{C}}^{t_2} t_2 - \gamma_m|_{0^{\circ}\text{C}}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{Gl 1.45})$$

Der nach Gl 1.45 gebildete Mittelwert $\gamma_m|_{t_1}^{t_2}$ ist auf das Volumen bezogen, das den tabellierten Werten zugrunde liegt, hier also auf V_0 bei 0°C . In der Regel ist aber das Volumen V_1 bei t_1 bekannt. Ähnlich der Ableitung zu Gl 1.38 bei der Längenänderung gilt

$$V_1 = V_0 (1 + \gamma_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_1} t_1) \quad (\text{Gl 1.46})$$

Eingesetzt in Gl 1.44 erhält man:

$$\Delta V = V_1 \gamma_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \frac{1}{1 + \gamma_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_1} t_1}$$

Feste Körper und Flüssigkeiten. Bei festen Körpern und in der Regel auch bei Flüssigkeiten nimmt das Glied $\frac{1}{1 + \gamma_m t_1}$ wegen des kleinen Zahlenwertes des Produktes $\gamma_m t_1$ etwa den Wert 1 an, sodass sich auch bei Einsetzen des auf V_0 bezogenen Mittelwertes für $\gamma_m|_{t_1}^{t_2}$ mit guter Näherung ergibt:

$$\Delta V \approx V_1 \gamma_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \quad (\text{Gl 1.47})$$

Das Verhältnis der Volumenänderung zum Ausgangsvolumen heißt relative Volumenänderung oder *Volumendehnung* $\left(\frac{\Delta V}{V_1}\right)$.

Thermischer Längen- und Volumenausdehnungskoeffizient sind einander proportional. Wird ein Würfel mit dem Volumen V_0 und der Kantenlänge l_0 von 0°C auf t_1 erwärmt, so wachsen seine Kantenlänge und damit sein Volumen:

$$V_1 = l_1^3 = l_0^3 (1 + \alpha_m t_1)^3 = l_0^3 (1 + 3\alpha_m t_1 + 3\alpha_m^2 t_1^2 + \alpha_m^3 t_1^3)$$

Wegen des kleinen Zahlenwertes von $\alpha_m t_1$ werden die 2. und 3. Potenzen von $\alpha_m t_1$ vernachlässigbar klein, sodass mit $V_0 = l_0^3$ gilt

$$V_1 \approx V_0 (1 + 3\alpha_m|_{0^\circ\text{C}}^{t_1} t_1)$$

Durch Vergleich mit Gl 1.46 ergibt sich angenähert

$$\gamma_m \approx 3\alpha_m \quad (\text{Gl 1.48})$$

Gase. Bei Gasen ist der Ausdehnungskoeffizient γ wesentlich größer als bei festen und flüssigen Stoffen, sodass das Glied $\frac{1}{1 + \gamma_m t_1}$ nicht angenähert gleich 1 gesetzt werden darf; Gl 1.47 ist dann nicht verwendbar.

Für das *ideale Gas* sind die Zusammenhänge einfach: Ersetzt man in Gl 1.43 V und dV durch die thermische Zustandsgleichung ($dV = mR_i dT/p$ für $p = \text{const}$), so erhält man

$$\gamma = \frac{1}{T} \quad \text{bei } p = \text{konstant, ideales Gas} \quad (\text{Gl 1.49})$$

Bezogen auf das Volumen V_0 bei $t_0 = 0^\circ\text{C}$ bzw. $T_0 = 273,15\text{ K}$ gilt

$$\gamma_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{T_0} \quad \text{bei } p = \text{konstant, bez. auf } V_0, \text{ ideales Gas} \quad (\text{Gl 1.50})$$

Statt mit γ berechnet man die Volumenänderung bei Gasen i. Allg. mittels der thermischen Zustandsgleichung, bei idealem Gas nach Gl 1.18:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{bei } p = \text{konstant, ideales Gas}$$

Beispiel 1.10: In die 200 m lange Heißwasserleitung in einem Heizkraftwerk sind, jeweils 50 m von den Leitungsenden entfernt, zwei Kompensatoren zur Aufnahme der thermischen Ausdehnung eingebaut. Leitungsmaterial: Stahl mit 0,3% Kohlenstoff. Die Leitung wird bei 20°C (Bezugstemperatur) verlegt, die maximale Leitungstemperatur beträgt 120°C , die niedrigste 10°C . Die Änderung der Einbaulänge der Ausdehnungsstücke selbst infolge Temperatureinfluss ist zu vernachlässigen. Der Längenausdehnungskoeffizient ist mit konstantem Wert für den Temperaturbereich 0°C – 100°C einzusetzen.

- Für welche Längenänderung muss jeder Kompensator ausgelegt werden?
- Um welche Länge müssen die Kompensatoren vorgestreckt werden, damit ihre Belastung bei den Extremwerten der Temperatur gleich groß ist?
- Welche Druckspannung würde in der Leitung maximal auftreten, wenn sie ohne Kompensatoren verlegt worden wäre?

Lösung:

Zu a): Je Kompensator ist die Längenänderung von 100 m Stahlleitung aufzunehmen. Sie ist (Gl 1.33):

$$\Delta l = l_b \alpha_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \approx 100 \text{ m} \cdot 11 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{K m}} (120 - 10) \text{ K}$$

$$\Delta l \approx \underline{0,121 \text{ m}}$$

Zu b): Die Kompensatoren müssen bei vernachlässigter Temperaturabhängigkeit des Längenausdehnungskoeffizienten bei der mittleren Temperatur von $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = 65^\circ\text{C}$ ihre Normallänge haben, damit sie bei den Grenztemperaturen gleiche Längenänderungen aufnehmen. Beim Verlegen bei $t_b = 20^\circ\text{C}$ müssen sie daher gestreckt werden um (Gl 1.33):

$$\Delta l_r = l_b \alpha_m (t_m - t_b) \approx 100 \text{ m} \cdot 11 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{K m}} (65 - 20) \text{ K}$$

$$\Delta l_r \approx \underline{0,050 \text{ m}}$$

Zu c): Ändert sich die Temperatur eines Körpers und greifen gleichzeitig Kräfte an, so berechnet sich die Dehnung als Summe der einzelnen Dehnungen:

$$\varepsilon = \alpha_m \Delta t + \frac{\sigma}{E}$$

E ist der Elastizitätsmodul. Der Zusammenhang gilt im Proportionalbereich des Hooke'schen Gesetzes, auf das wir hier nicht eingehen.

Durch die feste Einspannung der Leitung soll die Dehnung völlig unterbunden sein ($\varepsilon = 0$). Dann ist die Druckspannung σ , mit $E = 202\,000 \text{ N/mm}^2$ für Stahl mit 0,3% Kohlenstoff:

$$\sigma = -\alpha_m \Delta t E = -\alpha_m (t_2 - t_b) E$$

$$\sigma = -11 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} (120 - 20) \text{ K } 202\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = -222 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Beispiel 1.11: Ein Quecksilberbarometer (entsprechend B 1.4c) mit Messingskala wurde bei 20 °C in der Einheit bar geeicht. Bei 32 °C wird ein Messwert von 1,0200 bar abgelesen. Welches ist der wirkliche Barometerstand?

a) Bei Beachtung der Quecksilberausdehnung und Vernachlässigung der Längenänderung der Messingskala.

b) Unter Berücksichtigung der Ausdehnung des Quecksilbers und der Messingskala.

Die Temperaturabhängigkeit der Ausdehnungskoeffizienten ist zu vernachlässigen.

Lösung:

Zu a): Bei der Eichtemperatur $t_1 = 20^\circ\text{C}$ wird der Druck von $p_1 = 1,0200$ bar durch eine Quecksilbersäule der Höhe h_1 verursacht. Hier wird daher die Marke 1,0200 bar angebracht.

$$p_1 = h_1 \varrho_1 g \quad \text{mit} \quad \varrho_1 = \text{Dichte des Quecksilbers bei } t_1 = 20^\circ\text{C}$$

In dieser Höhe h_1 befindet sich bei der Ablesung die Quecksilbersäule, jedoch bei der Temperatur von $t_2 = 32^\circ\text{C}$. Infolge veränderter Dichte ϱ_2 hält aber das Quecksilber nicht dem Druck 1,0200 bar, sondern dem Luftdruck p_2 das Gleichgewicht.

$$p_2 = h_1 \varrho_2 g \quad \text{mit} \quad \varrho_2 = \text{Dichte des Quecksilbers bei } t_2 = 32^\circ\text{C}$$

Aus den beiden Gleichungen ergibt sich:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Wir setzen Gl 1.46 mit $v = v_0 (1 - \gamma_m t)$ ein:

$$p_2 = p_1 \frac{v_1}{v_2} = p_1 \frac{1 + \gamma_m t_1}{1 + \gamma_m t_2} = 1,0200 \text{ bar} \frac{1 + 182,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{K}} 20^\circ\text{C}}{1 + 182,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{K}} 32^\circ\text{C}}$$

$$p_2 = \underline{1,0178 \text{ bar}}$$

Der wirkliche Barometerstand ist kleiner als der Messwert, da die Dichte des Quecksilbers infolge der Erwärmung gefallen ist.

Zu b): Bei der Eichung bei $t_1 = 20^\circ\text{C}$ hatte die Messingskala die Länge (Gl 1.39):

$$h_1 = h_0 (1 + \alpha_m t_1)$$

Hier wurde die Marke 1,0200 bar angebracht. Durch Erwärmung auf $t_2 = 32^\circ\text{C}$ hat sich die Skala verlängert und die Marke 1,0200 bar verschoben auf

$$h_2 = h_0 (1 + \alpha_m t_2)$$

In der Höhe h_2 befindet sich die Quecksilbersäule bei der Messung, sie steht daher im Gleichgewicht mit dem Druck

$$p'_2 = h_2 \varrho_2 g$$

Durch Verbindung mit $p_1 = h_1 \varrho_1 g$, d. h. mit den Werten bei Eichtemperatur, ergibt sich

$$\frac{p'_2}{p_1} = \frac{h_2 v_2}{h_1 v_1} = \frac{h_2 v_1}{h_1 v_2}$$

Wir führen für h_1 und h_2 (Gl 1.39) und für $\frac{v_1}{v_2}$ die unter a) ermittelte Beziehung ein:

$$p'_2 = p_1 \frac{(1 + \alpha_m t_2) (1 + \gamma_m t_1)}{(1 + \alpha_m t_1) (1 + \gamma_m t_2)}$$

$$p'_2 = 1,0200 \text{ bar} \frac{\left(1 + 18,4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} 32^\circ \text{C}\right) \left(1 + 182,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} 20^\circ \text{C}\right)}{\left(1 + 18,4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} 20^\circ \text{C}\right) \left(1 + 182,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} 32^\circ \text{C}\right)}$$

$$p'_2 = \underline{1,0180 \text{ bar}}$$

Die Längenänderung der Messingskala beeinflusst die Messung günstig. Der Einfluss ist jedoch gering, er liegt außerhalb der Ablesegenauigkeit des Barometers.

Aufgabe 1.12: Ein gebrochener Stahlträger wird mit Stahllaschen repariert, die mit Gewindebolzen angeschraubt werden. Die Bolzen bestehen aus Stahl mit 0,3% Kohlenstoff. Sie haben einen Durchmesser von 50 mm und werden in vorgewärmtem Zustand spannungsfrei eingezogen. Nach dem Abkühlen der Bolzen auf 20°C soll die Zugkraft je Bolzen 343 kN betragen.

Träger und Laschen sind starr anzunehmen. Für den Längenausdehnungskoeffizienten kann der Wert zwischen 0°C und 100°C eingesetzt werden. Die Durchmesseränderung der Bolzen infolge der Abkühlung ist zu vernachlässigen. Zur Lösung vergleiche Bsp. 1.10 c.

a) Auf welche Temperatur müssen die Bolzen vorgewärmt werden?

b) Wie groß ist die Zugkraft je Bolzen, wenn die Außentemperatur $+5^\circ \text{C}$ beträgt?

Aufgabe 1.13: Ein im Freien stehender Stickstoffbehälter von 100 m^3 Inhalt ist durch ein Sicherheitsventil gegen unzulässig hohen Druck geschützt. Der Behälter wurde bei 15°C vollständig gefüllt. Durch Sonnenbestrahlung steigt die Behältertemperatur auf 32°C , wobei der Druck infolge des Sicherheitsventils konstant bleibt. Stickstoff soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden.

Wie viel % der ursprünglichen Stickstoffmenge entweichen durch das Sicherheitsventil?

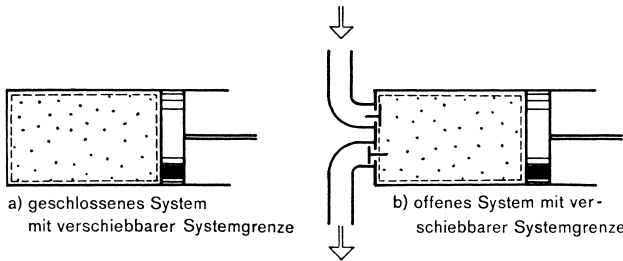
■ 1.7 Thermodynamisches System

1.7.1 Systeme und Systemgrenzen

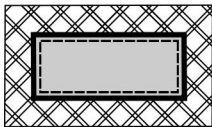
Als *thermodynamisches System* bezeichnet man einen abgegrenzten Bereich (auch Kontrollraum genannt), der untersucht werden soll. Er ist von seiner *Umgebung* durch *Systemgrenzen* getrennt. Zwischen dem System und seiner Umgebung können Wechselwirkungen auftreten, indem Materie, Arbeit oder Wärme die Systemgrenze überschreiten.

Ein System, über dessen Grenze keine Materie tritt, heißt *geschlossenes System*. Es enthält eine abgemessene, unverändert große Stoffmenge. Ein System, über dessen Grenze Materie tritt, heißt *offenes System*. Es wird von Stoff durchströmt.

Zum Beispiel ist als geschlossenes System ein Gas anzusehen, das in einem Zylinder eingeschlossen ist (B 1.7 a), als offenes System ein Zylinder mit ein- und ausströmendem Gas (B 1.7 b).



B 1.7 Thermodynamische Systeme



a) adiabate, starre Systemgrenze



b) nichtadiabate, starre Systemgrenze

B 1.8 Systemgrenzen¹⁾

Systemgrenzen können wirkliche oder gedachte Wände sein. Sie sind entweder verschiebbar (**B 1.7**) oder auch starr (**B 1.8**). Systemgrenzen heißen auch *Bilanzhüllen*, weil Energie- und Stoffströme, die die Systemgrenzen überschreiten, erfasst und bilanziert werden.

Ein wichtiges Merkmal der Systemgrenzen ist ihre Eigenschaft, *adiabat*²⁾ (*wärmedicht*) (B 1.8 a) oder *nichtadiabat* bzw. *diatherm* (*wärmedurchlässig*) (B 1.8 b) zu sein. Bei unterschiedlichen Temperaturen des Systems und der Umgebung gleichen sich bei nicht-adiabater Systemgrenze die Temperaturen aus. Bei adiabater Systemgrenze treten Veränderungen im System aufgrund eines Temperaturunterschiedes zwischen System und Umgebung nicht auf. Ein System mit adiabater Systemgrenze heißt *adiabates System*.

Ein System, bei dem jede Wechselwirkung mit seiner Umgebung ausgeschlossen ist, bei dem also weder Stoff noch Energie die Systemgrenze überschreiten können, heißt *isoliertes* oder *abgeschlossenes System*.³⁾

Wir betrachten zunächst *homogene* Systeme, das sind Systeme mit einem einheitlichen Stoff oder Stoffgemisch, wie z. B. Stickstoff oder Luft in Gasphase. Jeder homogene Teil eines Systems heißt *Phase*. Systeme mit mehreren Phasen, z. B. ein Gemisch aus Wasser und Wasserdampf, heißen *heterogene* Systeme. Die Stoffeigenschaften verschiedener Phasen unterscheiden sich in der Regel erheblich. Für Gase und Flüssigkeiten ist die gemeinsame Bezeichnung *Fluid* gebräuchlich.

¹⁾Die Schraffur für Dämmung [DIN ISO 128-50:2002-05; SN 55] (sich kreuzende Doppellinien) kennzeichnet adiabate Systeme.

²⁾ *ἀδιάβατος* (griech.) = unpassierbar. Adiabate Systemgrenzen verhindern den Übergang von Wärme. Definition der Wärme s. Abschn. 2.4.

³⁾ Ein System ohne Stoff- und Wärmezufuhr oder -abfuhr heißt *thermisch isoliert* [55; Nr. 1.6].

1.7.2 Zustandsgrößen und Prozessgrößen

Die hier zusammengestellten Größen werden z. T. erst in späteren Abschnitten definiert. Die Zusammenstellung ist als Hilfestellung beim Nachschlagen zu verstehen.

Zustandsgrößen: Physikalische Größen, die den Zustand eines thermodynamischen Systems beschreiben, nennt man thermodynamische Zustandsgrößen. Man unterscheidet:

Thermische Zustandsgrößen: Volumen V , Druck p , Temperatur T (Abschn. 1.3).

Kalorische Zustandsgrößen: z. B. innere Energie U (Abschn. 2.3), Enthalpie H (Abschn. 2.5) und weitere.

Spezifische Zustandsgrößen: Auf die Masse m bezogene Zustandsgrößen. Sie werden mit Kleinbuchstaben bezeichnet (Ausnahmen: Masse m und Stoffmenge n , für die ebenfalls kleine Buchstaben verwendet werden.) Beispiel: $v = \frac{V}{m}$ (Abschn. 1.3.1).

Molare Zustandsgrößen: Auf die Stoffmenge n (Molmenge) bezogene Zustandsgrößen, auch stoffmengenbezogene Zustandsgrößen genannt. Sie werden durch Großbuchstaben mit dem Index m gekennzeichnet, z. B. $V_m = \frac{V}{n}$ (Abschn. 1.5.2).

Intensive Zustandsgrößen: Sie sind von der Größe des Systems unabhängig, z. B. Druck p , Temperatur T . Spezifische und molare Größen gehören zu den intensiven Zustandsgrößen.

Extensive Zustandsgrößen: Sie sind proportional zur Größe des Systems; bei dessen Teilung teilen sie sich, beim Zusammenfügen addieren sie sich, z. B. Volumen V , Masse m , Stoffmenge n .

Zur Beschreibung des *Zustandes eines Systems* mit einem homogenen Fluid, z. B. Luft, sind nur zwei intensive Zustandsgrößen erforderlich, z. B. p und T . Soll auch die *Größe des Systems* angegeben werden, so benötigt man zusätzlich eine extensive Zustandsgröße, z. B. die Masse m oder die Stoffmenge n .

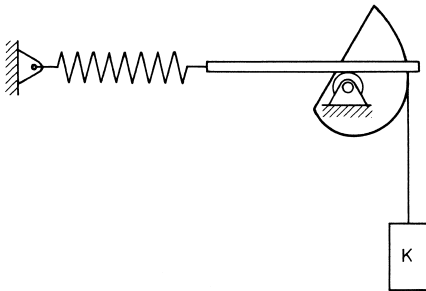
Prozessgrößen: Prozessgrößen – wie Arbeit oder Wärme – treten an der Systemgrenze auf. Sie sind vom Verlauf der Zustandsänderung abhängig.

1.7.3 Zustandsänderungen und Prozesse

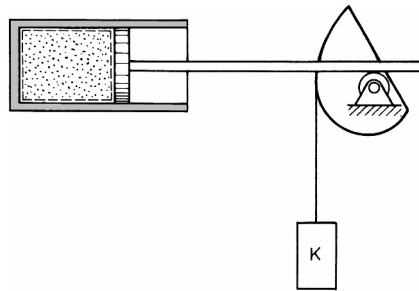
Zustandsänderungen. Thermodynamische Prozesse verändern den Zustand eines thermodynamischen Systems und damit dessen Zustandsgrößen. Wird z. B. Gas in einem adiabaten Zylinder komprimiert (B 1.7a, jedoch wärmedicht), so steigt der Gasdruck. Das Gas durchläuft eine *Zustandsänderung*. Hierbei baut sich in Kolbennähe vorübergehend ein etwas höherer Druck als im Inneren auf, es entsteht also vorübergehend ein Ungleichgewicht. Der Ausgleich erfolgt jedoch mit weit höherer Geschwindigkeit als der mittleren Kolbengeschwindigkeit, sodass man bei diesem und vielen anderen thermodynamischen Prozessen mit einer Folge von Gleichgewichtszuständen während einer Zustandsänderung rechnen kann, man spricht dann von einer *quasistatischen Zustandsänderung*.

Prozesse. Prozesse (Vorgänge) verursachen Zustandsänderungen in den beteiligten Systemen. Gleiche Zustandsänderungen können durch unterschiedliche Prozesse bewirkt werden, z. B. kann die Temperatur in einem Zylinder durch Kompression oder Wärmezufuhr erhöht werden.

Reversible Prozesse. Ein Prozess ist *reversibel* oder *umkehrbar*, wenn der ursprüngliche Zustand des Systems wieder erreicht werden kann, ohne dass Änderungen in der Umgebung zurückbleiben. Als Beispiel für solche reversiblen Prozesse denken wir aus dem Bereich der Mechanik an die Schwingung eines Pendels. Wenn keinerlei Luft- oder Lagerreibung vorhanden ist, stellt sich periodisch der Ausgangszustand wieder ein: Diese Schwingung ist reversibel. Als einen anderen reversiblen mechanischen Vorgang können wir uns die Dehnung einer Feder vorstellen (**B 1.9**), bei der durch eine reibungsfreie Hebelübersetzung eine Zugfeder dauernd mit der Gewichtskraft des Körpers K im Gleichgewicht steht. Der Körper K kann durch beliebig kleine Kräfte auf- oder abwärts bewegt und so der Ausgangszustand wieder hergestellt werden.



B 1.9 Dehnung einer gespannten Feder



B 1.10 Verdichtung und Entspannung eines Gases

Auch thermodynamische Prozesse können wir uns reversibel denken. Als Beispiel betrachten wir eine Vorrichtung zur Verdichtung und Entspannung eines Gases in einem adiabaten Zylinder (**B 1.10**). Durch Entspannung des Gases wird der Körper K gehoben und die vom Gas abgegebene Arbeit als potenzielle Energie in dem Körper K gespeichert. Wenn keinerlei Reibung vorhanden ist und keine Ungleichgewichte im System auftreten (wie z. B. die oben beschriebene Druckdifferenz zwischen Kolbennähe und dem Inneren), d. h. der Prozess als Folge von Gleichgewichtszuständen abläuft, ist der Prozess reversibel. Ein reversibler Prozess verläuft daher quasistatisch.

Die Erfahrung lehrt, dass alle in der Natur und Technik ablaufenden Prozesse irreversibel sind. Reversible Prozesse sind somit nur gedanklich durchführbar. Sie sind aber als idealisierte Prozesse zur Bewertung der wirklichen Prozesse von besonderer Bedeutung.

Irreversible Prozesse. Ein Prozess ist *irreversibel* oder *nichtumkehrbar*, wenn er nicht vollständig wieder rückgängig gemacht werden kann. Das System kann zwar seinen Anfangszustand wieder erreichen, es bleiben aber Veränderungen in der Umgebung zurück. So kann z. B. Sauerstoff aus einem Druckbehälter ausströmen und sich mit Umgebungsluft mischen, die Sauerstoffmoleküle kehren aber nicht von allein wieder in den Druckbehälter zurück. Beim Ausströmen hätte der Sauerstoff Arbeit verrichten können,

stattdessen wurde durch Reibung und anschließende Mischung mit der Umgebungsluft Energie dissipiert¹⁾ (Dissipationsenergie) und dadurch entwertet. Durch Trennen des Sauerstoffs von der Luft und durch Verdichten könnte der Ausgangszustand im Druckbehälter wieder hergestellt werden. Dann muss aber von außen Arbeit aufgebracht werden, wodurch sich der Zustand eines anderen Systems ändert.

Beispiele für irreversible Prozesse sind: reibungsbehaftete Strömungen, plastische Verformungen, elektrische Vorgänge, Verbrennung und Ausgleichsvorgänge, wie z. B. Temperatur-, Druck- oder Konzentrationsausgleich.

Stationäre Prozesse. Prozesse, in deren zeitlichem Verlauf der Zustand des Systems unverändert bleibt oder periodisch wieder hergestellt wird (B 1.7 b), nennt man *stationäre Prozesse*. In offenen Systemen spricht man auch von *stationären Fließprozessen* (B 1.8 b). In ihnen bleiben die Zustandsgrößen beim Zu- und Abfluss, die zu- und abströmenden Stoffmengen, die im System befindliche Stoffmenge und die Energieübertragung über die Systemgrenze zeitlich konstant, der Prozess verläuft unter *Beharrung*.

Kontrollfragen (Antworten Abschnitt 11.1)

- 1.2 1. Welches sind die Basisgrößen und Basiseinheiten des SI?
- 1.3 2. Definieren Sie Absolutdruck und Überdruck. Welche Druckeinheit verwendet das SI?
3. Was versteht man unter a) einer empirischen, b) der thermodynamischen, c) der internationalen Temperaturskala?
4. Was wird als Nullter Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet?
- 1.4 5. a) Was ist ein ideales Gas?
b) Geben Sie die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases an.
c) Wie ist die spezielle Gaskonstante definiert?
6. Wie lauten und wann gelten die Gesetze von
a) Boyle-Mariotte,
b) Gay-Lussac?
- 1.5 7. Wie ist der physikalische Normzustand festgelegt?
8. a) Was besagt das Gesetz von Avogadro?
b) Was versteht man unter Avogadro-Konstante?
9. Erläutern Sie die Begriffe
a) Kilomol, b) molare Masse, c) molares Volumen, d) Normvolumen.
10. Wie kann
a) die Masse aus der Stoffmenge in kmol,
b) das molare Normvolumen aus dem Normvolumen,
c) die Dichte im physikalischen Normzustand aus der molaren Masse berechnet werden?

¹⁾ dissipieren (lat.) = zerstreuen.

11. a) Wie ist die molare Gaskonstante definiert?
 - b) Weisen Sie nach, dass sie für alle idealen Gase den gleichen Wert hat.
 - c) Wie hängen molare und spezielle Gaskonstante zusammen?
12. a) Wie werden durch Temperaturänderung verursachte Längen- und Volumenänderung berechnet; Gleichung?
 - b) Was versteht man unter Längendehnung?
 - c) Bei welchem Stoff ist der thermische Ausdehnungskoeffizient temperaturunabhängig?
Gibt es Stoffe, die sich bei Abkühlung ausdehnen?
13. Was versteht man unter geschlossenen bzw. offenen Systemen?
14. Was versteht man unter Zustandsgrößen; welche Gruppen von Zustandsgrößen unterscheidet man in der Thermodynamik, welche können Sie benennen?
15. Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen Prozess und Zustandsänderung.
16. Welche thermodynamischen Prozesse verlaufen irreversibel?

2

Erster Hauptsatz der Thermodynamik

■ 2.1 Energieerhaltung, Energiebilanz

Der erste Hauptsatz verallgemeinert den Energiebegriff und postuliert das Naturgesetz von der *Erhaltung der Energie*. Er ist Grundlage für die *Bilanzierung von Energien*.

Für ein System und seine Grenzen lassen sich gespeicherte Energie und transportierte Energie unterscheiden.

Die in einem System *gespeicherte Energie* ist eine wichtige Zustandsgröße des Systems. Sie ist eine extensive Zustandsgröße, d. h., beim Zusammenfügen von mehreren Systemen addieren sich deren Energien. Man unterscheidet verschiedene Formen von gespeicherter Energie, z. B. potenzielle Energie, kinetische Energie, innere Energie.

Steht das System in Wechselwirkung mit einem anderen System oder mit seiner Umgebung, wird z. B. das Volumen des Systems verändert, so überschreitet Energie die Systemgrenze. Formen solcher *transportierter Energie* sind Arbeit und Wärme. Wird Energie in Form von Arbeit über die Systemgrenze transportiert, sagt man, dass Arbeit *verrichtet* wird. Wird Energie in Form von Wärme über die Systemgrenze transportiert, sagt man, dass Wärme *übertragen* wird. Bei offenen Systemen überschreitet mit dem Stoff auch die darin gespeicherte Energie die Systemgrenze.

Wird keine Energie über die Systemgrenze transportiert (abgeschlossenes System), so bleibt die im System gespeicherte Energie erhalten (*Energieerhaltungssatz*). Wird Energie über die Systemgrenze transportiert, so ändert sich die gespeicherte Energie um den gleichen Betrag (*Energiebilanz*).

Nachfolgend werden die in der Thermodynamik vorkommenden Energieformen näher behandelt.

■ 2.2 Arbeit am geschlossenen System

Volumenänderungsarbeit. Wir führen einem Gas in einem geschlossenen System durch einen Kolben Arbeit zu, indem wir das Gas *reversibel* verdichten (**B 2.1 a**). Das Gas nimmt im Ausgangszustand, den wir in der Regel durch den Index 1 kennzeichnen wollen, das Zylindervolumen V_1 ein und befindet sich unter dem Druck p_1 .