

Günter Cerbe
Gernot Wilhelms

Technische Thermodynamik

Theoretische Grundlagen
und praktische Anwendungen



19., überarbeitete Auflage

HANSER

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 Gastechik

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

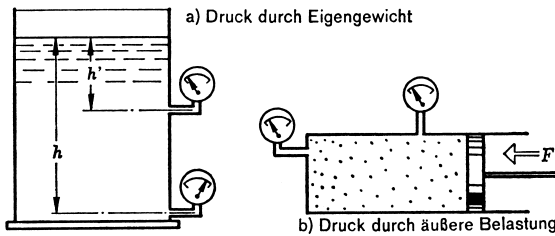
$$p = \frac{F_N}{A}$$

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

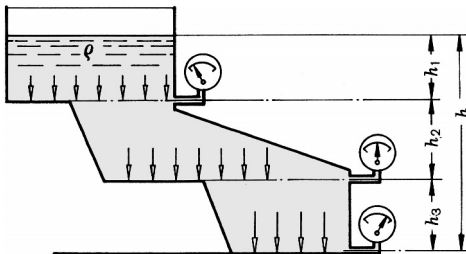
Wir führen Gl 1.2 ein und ersetzen das Volumen durch $V = Ah$

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

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

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-