

HANSER



Leseprobe

zu

Technische Thermodynamik

von Günter Cerbe und Gernot Wilhelms

Print-ISBN: 978-3-446-46519-0
E-Book-ISBN: 978-3-446-46813-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446465190>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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	Grundschtaltung 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

■ 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

$$pV = mR_i T \quad (\text{Gl 1.16})$$

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.

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

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):

$$m_1 = \frac{p_1 V}{R_{\text{O}_2} T}, \quad m_2 = \frac{p_2 V}{R_{\text{O}_2} T}$$

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

$$m_e = m_1 - m_2 = \frac{V}{R_{\text{O}_2} T} (p_1 - p_2) = \frac{0,01 \text{ m}^3 \text{ kg K}}{259,8 \text{ J } 293,15 \text{ K}} (5 - 4) 10^6 \text{ Pa} \frac{\text{N}}{\text{Pa m}^2}$$

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

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/Mayingner [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:

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

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

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).

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{R_1 T_1} = \frac{(700 + 101) 10^3 \text{ Pa } 4 \text{ m}^3 \text{ kg K N}}{287,1 \text{ J } 301,15 \text{ K Pa m}^2} = 37,06 \text{ kg}$$

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_1 T_2} = \frac{(250 + 101) 10^3 \text{ Pa } 4 \text{ m}^3 \text{ kg K N}}{287,1 \text{ J } 301,15 \text{ K Pa m}^2} = 16,24 \text{ kg}$$

$$\dot{m}_v = \frac{p_v \dot{V}_v}{R_1 T_v} = \frac{(200 + 101) 10^3 \text{ Pa } 5 \text{ m}^3 \text{ kg K N}}{\text{h } 287,1 \text{ J } 293,15 \text{ K Pa m}^2} = 17,88 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

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:

$$m = nM \quad \text{(GI 1.19)}$$

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

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

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

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

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

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

Für einen beliebigen Zustand gilt:

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

Die Dichte eines Gases ist (Gl 1.2)

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

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

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

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 Bezugszustände 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	$\sigma = 5,670\,374 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$
	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):

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

Das Normvolumen ist (Gl 1.22):

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

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

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

gilt für den *mittleren Längenausdehnungskoeffizienten*:

$$\alpha_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \alpha \, dT}{t_2 - t_1} \tag{Gl 1.34}$$

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

Mit der Bezugslänge l_0 wird aus Gl 1.33

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

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

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

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 $\alpha_m _{0 \text{ °C}}^t$	
	in $\frac{\text{m}}{\text{K m}} = \frac{1}{\text{K}}$	
	0 °C – 100 °C	0 °C – 200 °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 $\gamma_m _{0 \text{ °C}}^t$	
	in $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{K}} = \frac{1}{\text{K}}$	
	0 °C – 50 °C	0 °C – 100 °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 $\frac{1}{1 + \alpha_m t_1}$ 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_b , 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 °C	Koeffizienten			
		a —	b $\frac{1}{\text{°C}}$	c $\frac{1}{\text{°C}^2}$	d $\frac{1}{\text{°C}^3}$
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

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

S

Sachwortverzeichnis

A

- Abgas 463, 475, 490, 491
 - , Kondensation 491
- Abgas (s. auch Verbrennungsgas) 475–476
 - , Analyse 475–476
 - , -, ASU 476
 - , -, brennbare Rückstände 476
 - , -, Euronorm 475
- Abgasmenge 460, 476
- Abgasrückführung 508
- Abgastaupunkt 495
- Abgasverlust 475, 490, 492
- Abkühlgrad (Rückkühlwerk) 364
- Absorptionskoeffizient (Strahlung) 435
- Ackeret 208
- Ackeret-Keller-Prozess 208
- Aggregatzustandsänderung 247
- Amagat 325–326, 328, 334
 - , Gesetz 325, 328, 334
- Ammoniak 40–41, 308
- Ampere 25
- Änderung der Entropie 107, 111, 116, 123, 129
- Anergie 170–173, 176–179, 181
 - , Definition 171–172
 - , Enthalpie 173
 - , Fluid 172
 - , geschlossenes System 176
 - , innere Energie 176
 - , spezifische 172
 - , Vermehrung 181
 - , Wärme 177–179
- Anlage 191
- Anlagenart 211
 - , Gasturbinenanlage 211
- Anlagenwirkungsgrad (mechanischer) 216
- Anzapfvorwärmung 283–285
 - , Clausius-Rankine-Prozess 284
 - , Dampfkraftanlage 285
 - , Dampfturbinenanlage 284
- Arbeit 23, 61–65, 70–74, 76, 105–106, 139, 141, 154, 156, 195, 197–198, 203, 211, 213, 216–217, 223, 235, 244, 275, 289, 314, 316, 376, 378, 517, 519–521, 526–527
 - , Arbeitsmehraufwand (Verdichter) 213
 - , Arbeitsverlust (Turbine) 213
 - , Ausschubarbeit 71, 235
 - , Brennstoffzelle 526–527
 - , Dissipationsarbeit 63
 - , Einschubarbeit 71, 234
 - , geschlossenes System 61
 - , indizierte 197–198
 - , innere 195, 198
 - , Kältemaschine 156, 316
 - , Kreisprozess 139
 - , Kupplungsarbeit 198, 216, 244
 - , -, Gasturbinenanlage 216
 - , -, Turbine 216
 - , -, Verdichter 216
 - , -, Wärmekraftanlage 198
 - , Nutzarbeit 64, 141, 195, 198, 203, 211, 217, 223, 289
 - , -, Kolbenstange 64
 - , -, Kreisprozess 141, 195, 198, 203, 211, 217, 223, 289
 - , offenes System 72–73
 - , Reaktionsarbeit 517
 - , Reibungsarbeit 63
 - , reversible 62, 70, 74
 - , technische 70–73, 105, 106, 376–378
 - , Verschiebearbeit 64
 - , Volumenänderungsarbeit 61–62
 - , Vorzeichen 62
 - , Wärmekraftmaschine 143, 275
 - , Wärmepumpe 154, 156, 314
 - , Wellenarbeit 65, 76
- Arbeit, Kreisprozess 139–143
- Arbeitsersparnis 235
 - , Zwischenkühlung 235
- Arbeitsfähigkeit (Fluid) 172
- Arbeitsfluid 308

–, organisches 308
 Arbeitsmaschine (Def.) 105
 Arbeitsprinzip 199, 275
 –, Dampfkraftanlage 275
 –, Gasturbinenanlage 199
 –, Heißgasmotor 219
 Arbeitsprozess 105, 375–376
 Arbeitsverhältnis 193, 202, 209, 221, 226, 230, 278
 –, Clausius-Rankine-Prozess 278
 –, Diesel-Prozess 230
 –, Ericsson-Prozess 209
 –, Joule-Prozess 202
 –, Otto-Prozess 226
 –, Stirling-Prozess 221
 Argon 40–41
 Asche 476
 Aufheizgrad 243
 –, Kolbenverdichter 243
 Ausbrennbelastung (Verdampfer) 429
 Ausdehnung, thermische 47–54
 –, fester Körper 47
 –, Flüssigkeit 51
 –, Gas 51
 Ausdehnungskoeffizient 47, 49–51
 –, (Tabelle) 48, 50
 –, Längenausdehnungskoeffizient 47
 –, Volumenausdehnungskoeffizient, thermischer 50
 Ausgleich 164
 –, Prozess 164
 Ausgleichsprozess (Def.) 58
 Ausgleichstemperatur 164
 Ausgleichsvorgang 164
 Ausnutzungsgrad 298
 –, GUD 298
 Ausschubarbeit 71
 Ausstrahlung 431–434
 –, farbige Körper 433
 –, grauer Körper 433
 –, schwarzer Körper 432
 –, spektrale spezifische 432–433
 –, spezifische 432, 434
 Avogadro 44
 Avogadro-Konstante 43, 46, 568

B

Baehr 95
 Barometer 32
 Basiseinheit 24
 Basisgröße 24
 Befeuchten (Luft) 359
 Behälter 162
 –, Füllung 162
 Beladung 324, 340, 346, 462, 470
 –, ideales Gas 340
 –, Wasserbeladung 462
 Berechnung 213
 –, wirklicher Prozess 213
 Berechnungsgleichung 418
 –, Wärmeübergang (Tabelle) 418
 Bernoulli 383
 Bernoulli-Gleichung 383
 Bestrahlung 435
 Bewertung 155–157, 191, 194, 198, 238, 314, 316
 –, Kältemaschine 316
 –, Kolbenverdichter 238
 –, Kreisprozess 155–156, 194
 –, –, linkslaufender 155
 –, –, rechtlaufer 156
 –, Wärmekraftmaschine 156–157, 191
 –, Wärmepumpe 156, 198, 314
 Bewertung (Kreisprozesse) 192, 194, 198
 –, Anlage 198
 –, Bewertungszahl 192
 –, Irreversibilität 194
 –, thermodynamische 192
 Bezugsgröße 46, 569
 Bezugszustand 44–47, 172, 457, 519, 569
 –, Brennwert 457
 –, Exergie (Umgebung) 172, 519
 –, Heizwert 457
 –, Normzustand (physik.) 44, 47
 –, Standardzustand (chemischer) 44
 Bilanzhülle 55
 Bildungsenthalpie 512–513
 Blockheizkraftwerk 282
 Boltzmann 433
 Boltzmann-Konstante 45–46, 569

Boyle 39
 Boyle-Mariotte 114
 BRC-Anlage 287
 Brennstoff (s. auch Verbrennung) 455–458,
 484, 511–512, 519, 522
 –, Brennwert 456–457, 512, 522, 455
 –, Eigenschaft 455
 –, Enthalpie 484, 511
 –, Entropie 511
 –, Exergie 519
 –, Heizwert 456–457, 512, 522
 –, Zusammensetzung (Tabelle) 456
 Brennstoffleistung 216, 504
 Brennstoffstufung 504
 Brennstoffzelle 455, 525–532
 –, Arbeit 526–527
 –, Bauart 530
 –, –, Carbonatschmelze-Brennstoffzelle
 (MCFC) 531
 –, –, oxidkeramische (SOFC) 531
 –, –, Phosphorsäure-Brennstoffzelle
 (PAFC) 531
 –, –, Polymermembran-Brennstoffzelle
 (PEMFC) 530
 –, Entwicklungspotenzial 532
 –, Gesamtwirkungsgrad 530
 –, Inverter 532
 –, Leistung 527
 –, Reformer 532
 –, Spannung 528
 –, Wirkungsgrad 529
 Brennstoffzellenaggregat 531
 Brennstoffzellentyp 530
 Brennwert 456–458, 512, 521
 –, bez. auf Normvolumen 458
 –, molarer 458, 512
 –, spezifischer 458
 Brennwertkessel 458, 492, 493
 British thermal unit 77
 Bunte-Dreieck 480
 burn out 429

C

Candela 25–26
 Carnot 77, 146

Carnot-Faktor 147, 149
 Carnot-Prozess 146–150, 152, 154, 155–156,
 185, 192
 –, Leistungszahl 155
 –, linkslaufender 155–156
 –, Nutzarbeit 147
 –, rechtslaufender 147, 149
 –, reibungsbehafteter 149, 152
 –, Vergleichsprozess 148
 –, Wirkungsgrad 147
 Carrier 354, 356
 –, Diagramm 354
 CCS (Carbon Capture and Storage) 505
 Celsius 24, 37
 chemische Reaktion 511
 Clapeyron 271
 Clausius 36, 77, 95, 271
 Clausius-Rankine-Prozess 276–279, 281,
 284–285
 –, Anzapfvorwärmung 283–284
 –, Arbeitsverhältnis 278
 –, exergetischer Wirkungsgrad 277
 –, Nutzarbeit 277, 279
 –, thermischer Wirkungsgrad 277, 279, 281
 –, Vergleichsprozess der Dampfkraftanlage
 276

D

Dalton 335–336
 –, Gesetz 335–336
 Dampf 247–248, 257, 312
 –, gesättigter 257
 –, linkslaufender Kreisprozess 312
 –, Nassdampf 257
 –, trockengesättigter 248
 –, überhitzter 248
 Dampfdruck (Gemisch) 342
 Dampfdruckkurve 250
 Dampferzeuger 276
 Dampfgehalt 257, 273, 276
 –, Ermittlung 273
 –, Nassdampf 273
 Dampfkessel 276
 Dampfkraftanlage 275, 285, 289, 291,
 296–297

- , Anzapfvorwärmung 285
- , Arbeitsprinzip 275
- , wirklicher Prozess 289
- , Wirkungsgrad 291
- Dampfkraftprozess 291-292
- , irreversibler 291
- , Leistung 292
- , Wirkungsgrad 291
- Dampfkraftwerk (s. Dampfkraftanlage) 275
- Dampfmaschine 314
- Dampfnässe 257
- Dampfturbinenanlage
 - (s. Dampfkraftanlage) 303
- Dampfturbinenanlage 284
- , Anzapfvorwärmung 284
- Davy 77
- DeNOx (Entstickungsanlage) 496
- DeNOx-Verfahren 504
- Desublimieren 250
- Diagramm 356, 486
- , psychometrisches 356
- Dichte 29
- , (Tabelle) 41
- Diesel 229
- Diesel-Motor 228, 230
- Diesel-Prozess 229
- , Arbeitsverhältnis 230
- , Einspritzverhältnis 229
- , exergetischer Wirkungsgrad 223
- , thermischer Wirkungsgrad 229
- , Verdichtungsverhältnis 229
- , Vergleichsprozess 228
- Diffusorströmung 391-392, 397
- Diffusorwirkungsgrad 392
- , isentroper 392
- Dimension 22
- Dissipation 58, 63-66, 97, 135-136, 149,
160-161, 179, 215, 243, 336, 383, 383, 527
- , Brennstoffzelle 527
- , Dissipationsenergie 58, 63, 65, 160-161
- , Dissipationsprozess (Def.) 58
- , Gemischbildung 336
- , Kreisprozess 149
- Dissoziation (Verbrennung) 486
- Drehmoment 389
- Drosselgrad 243

- , Kolbenverdichter 243
- Drosselstelle 160
- , adiabate 160
- Drosselung 158-161, 170, 272
- , adiabate 158, 160, 272
- , -, ideales Gas 160
- , Gas 159
- , ideales Gas 160
- , reales Gas 159-160
- , Veranschaulichung 161
- , Wasserdampf 272
- Druck 29-32, 249, 384, 393
- , Absolutdruck 31
- , Atmosphärendruck (Def.) 32
- , Bezugsdruck 31
- , Differenzdruck 31
- , Druckmessgerät 32
- , Druckmessung 31-32
- , dynamischer 384
- , kinetischer 384
- , kritischer 249, 393
- , Laval-Druck 393
- , Normdruck 32
- , statischer 384
- , Staudruck 384
- , Totaldruck 384
- , Überdruck 31
- , Umgebungsdruck 31
- Druckeinheit 33
- Druckmessung 32
- Druckminderventil 162
- Druckverhältnis 236
- Druckverhältnis (Verdichter) 235
- Durchflussfunktion 395
- Durchlasskoeffizient (Strahlung) 435
- Düsenbeiwert 392
- Düsenströmung 391-392
- Düsenwirkungsgrad 392
- , isotroper 392

E

- Effekt 149
- , dissipativer 149
- Eigenbedarfswirkungsgrad 292
- Eigenschaft 455

- , Brennstoff 455
- Einheit 77
- , Wärme 77
- Einheitensystem 21, 24-27, 33, 35
- , angelsächsisches 33, 35
- , gesetzliches 26
- , Größe 21
- , Internationales 25
- , kohärentes 26
- Einschubarbeit 71
- Einspritzverhältnis 232
- Einstrahlzahl 437
- Eis (H₂O) 81, 250
- , Schmelztemperatur (Tabelle) 250
- , spez. Schmelzenthalpie (Tabelle) 250
- , spez. Wärmekapazität (Tabelle) 81
- elektr. Stromstärke 25
- Emission (Verbrennung) 496, 498, 500, 503-504
- , Grenzwert 498
- , Minderung 496, 500, 503-504
- , -, Primärmaßnahme 496, 504
- , -, Sekundärmaßnahme 496, 500, 504
- Emissionsfaktor 496, 499
- Emissionsfaktor (Schadstoffe) 497
- Emissionsgrenzwert 496
- Emissionshandel 498
- Emissionskoeffizient 434
- Emissionskoeffizient (Strahlung) 433
- Energie 61, 65-66, 72, 104, 258, 376
- , freie 104, 258
- , gespeicherte 61, 66
- , innere 65-66, 77
- , kinetische 72, 376
- , potenzielle 72, 376
- , transportierte 61
- Energiebilanz 61
- Energieeinheit 77
- , Umrechnung 77
- Energieerhaltung 61
- Energieerhaltungssatz 61
- Energie-Flussbild 185
- Energieübertragung 61, 69
- , Formen 69
- Energieumwandlung 146, 191, 275, 376, 455
- , Grenze 146
- Energieverlust 451
- , Wärmeübertrager 451
- Enthalpie 70, 72-73, 78, 103, 173, 258-260, 262, 264, 351, 484, 486, 511, 516-517, 576-578
- , Anergie 173
- , Brennstoff 484
- , Exergie 173
- , Exergiedifferenz 176
- , feuchte Luft 351
- , Flüssigkeit 259
- , freie 103, 511, 516-517
- , Gemisch 351
- , ideales Gas 78
- , spezifische 72, 258-260
- , -, Nassdampf 260
- , -, Sattdampf 259
- , Totalenthalpie 72
- , Verbrennungsgas 484, 486
- , Wasserdampf (Tabelle) 262, 264, 576-578
- Entmischungsarbeit 337
- Entropie 95-97, 101-102, 107, 135, 162, 260-262, 332, 514-515, 576-578
- , absolute 515
- , adiabates System 101
- , Änderung 162
- , Berechnungsgleichung 96
- , Definition 95-96
- , Diagramm 102
- , einfaches System 96
- , ideales Gemisch 332
- , spezifische 96, 260-261
- , -, Nassdampf 261
- , -, Sattdampf 261
- , -, siedende Flüssigkeit 261
- , -, Wasserdampf 260
- , Wasserdampf (Tabelle) 262, 576-578
- Entropieänderung 97-98, 107, 129, 135, 149, 151, 160, 165, 178, 451, 514, 520
- , Drosselung 160
- , ideales Gas 107, 135
- , Kreisprozess 149
- , Reaktionsentropie 514
- , Temperaturausgleich 165
- , Verbrennung 520

-, Wärmeübertragung 451
Entropieerzeugung 97-98
Entropietransport 97-98
Entschwefelung 500
Entstaubung 496
Entstickungsanlage 496, 503-504
Entwicklungsstand 531
Erdbahnradius 46, 569
Erdmasse 46, 569
Erdradius 46, 569
Ericsson 208
Ericsson-Prozess 209-210, 215
-, Arbeitsverhältnis 209
-, Nutzarbeit 209
Ermittlung 273
-, Dampfgehalt 273
Erstarren 249
Erstarrungslinie 255
-, erster Hauptsatz der Thermodynamik 61, 76
Ethan 40-41
Ethen (Ethylen) 40-41
Ethin (Acetylen) 40-41
Eulersche 389
-, Hauptgleichung 389
Exergie 170-171, 173-174, 176-179, 336, 519, 524
-, Brennstoff 519
-, Definition 171-172
-, Enthalpie 173
-, Fluid 172
-, Gemisch 336
-, geschlossenes System 176
-, ideales Gas 173-174
-, innere Energie 176
-, reales Gas 173-174
-, spezifische 172
-, Umgebung 170
-, Verbrennungsgas 524
-, Vorzeichen 179
-, Wärme 177-179
Exergie-Flussbild 185
Exergiebilanz 182, 520
-, strömendes Fluid 182
Exergiedifferenz 176
Exergieverlust 181, 183, 452, 524
-, Verbrennung 524
-, Wärmeübertrager 452

Exergieverlust durch Dissipation 179
Exergieverlustleistung 181
Exergieverluststrom 181, 452
-, Wärmeübertrager 452
Expansionsströmung 391
Exzessvolumen 326

F

Fahrenheit 24, 37
Faraday-Konstante 46, 528, 569
Faraday-Wirkungsgrad 530
FCKW 308
Fernwärmeversorgung 282
Feuchte 346, 356
-, absolute 346
-, relative 356
Feuchtegehalt 345
Feuchtegrad 346-347
Feuchte Luft 342
Feuchtkugeltemperatur 362
Feuerungsatmosphäre 465
-, reduzierende 465
Feuerungswärmeleistung 291
Filmverdampfung 430
Flammenstrahlung 438
Flammentemperatur 486
Fließprozess 70
-, stationärer 70
Fluid 55, 172-173, 252-253, 415
-, Anergie 173
-, Exergie 173
-, reales 252-253
-, -, Zustandsgleichung 252
-, strömendes 172
-, -, Anergie 172
-, -, Exergie 172
Fluorchlorkohlenwasserstoff 308
Fluorkohlenwasserstoff 308
Flüssigkeit 35, 81, 255, 257, 259, 261
-, Enthalpie 259
-, Entropie 261
-, siedende 255, 257, 261
-, -, spezifische Enthalpie 259
-, -, spezifische Entropie 261
-, Stoffwerte 81

Flüssigkeitsthermometer 35
 Formelumsatz (chem. Reaktion) 511
 Formfaktor 437
 Fourier 406
 Fouriersches Gesetz 406
 Füllungsgrad 239, 243
 Füllungsgrad (Kolbenverdichter) 238
 Fundamentalgleichung 103

G

Gas 39–40, 44, 51, 84, 90 105, 107, 160, 252,
 334, 339, 567
 –, Ausdehnung 51
 –, Dichte 44
 –, ideales 39, 84, 90, 105, 107, 160,
 334, 339
 –, –, Gemisch 334, 339
 –, –, kalorische Zustandsgleichung 84
 –, –, thermische Zustandsgleichung 252
 –, reales 39, 252
 –, –, thermische Zustandsgleichung 252
 –, Stoffwerte 40, 567, 571
 Gas-Dampf-Gemisch 342, 344
 Gas-Dampf-Kraftwerk 296, 298, 301–302
 –, Ausnutzungsgrad 298
 –, Brennstoffverhältnis 298
 –, Grundschaltung 297
 –, Kraftwerksnettoleistung 298
 –, Schaltungsbeispiel 301–302
 –, Wirkungsgrad 299
 Gasgemisch 325, 334–335
 –, Partialdruck 335
 Gaskonstante 38, 40, 42, 45, 86, 90,
 335, 569
 –, Gemisch 335
 –, individuelle 28
 –, molare 42, 45, 90
 –, spezielle 38, 40, 45, 335
 –, spezifische 38, 86
 –, universelle (allgemeine) 45
 Gasstrahlung 438
 Gasströme 165
 Gastheorie 90
 –, kinetische 90
 Gasthermometer 37

Gasturbinenanlage 199, 208, 210–214, 216,
 219, 296, 297
 –, Anlagenarten 211
 –, Arbeitsprinzip 199
 –, Ericsson-Prozess 208
 –, geschlossene 212
 –, idealisierter Prozess 213–214
 –, Isex-Prozess 210
 –, Joule-Prozess 199
 –, Kreisprozess 199
 –, offene 212, 216, 219
 –, offener Kreislauf 211, 213
 –, Prozessverlauf 211
 –, wirklicher Prozess 211, 213, 216
 –, –, Berechnung 211
 –, –, Kupplungsarbeit 216
 –, –, Nutzarbeit 213
 Gay-Lussac 84, 110
 –, Überströmversuch 84
 Gefäßbarometer 32
 Gegenstrom (Wärmeübertrager) 442
 Gemisch 321–322, 324–330, 332, 334, 335,
 336, 339–340, 342, 344, 346, 366–368
 –, Amagat (Gesetz) 325, 334
 –, Ammoniak-Wasser 368
 –, Beladung 324
 –, binäres 324, 328, 340, 366
 –, Dalton (Gesetz) 335
 –, Dichte 326–339, 346
 –, Exergie 336
 –, feuchte Luft 344
 –, Gas-Dampf 342
 –, Gaskonstante 335
 –, homogenes 321
 –, ideales 321, 325–326, 328–329, 332
 –, –, Entropie 332
 –, –, Mischungsentropie 332
 –, –, Zustandsgröße 329
 –, ideales Gas 334, 336, 336
 –, Löslichkeit 321
 –, Masse 321
 –, Massenkonzentration 326
 –, Mischungsenthalpie, spez. 367
 –, Mischungsentropie 336
 –, Mischungsregel 367
 –, molare Masse 322

- , Partialdruck 335
- , Raumanteil 328–339
- , -, ideales Gas 339
- , -, ideales Gemisch 328
- , reales 321
- , spezifische Wärmekapazität 330
- , spezifisches Volumen 327
- , Stoffmenge 322
- , Volumen 326–327, 334
- , Volumenkontraktion 321
- , Wasser-Lithiumbromid 368
- , Zusammensetzung 321, 339
- , Zusatzvolumen (Exzessvolumen) 326
- , Zustandsgröße 329
- , Zweistoff 366
- Gemischbildung 325
- Gemischgröße 329
- , extensive 329
- Generatorverlust 216
- Generatorwirkungsgrad 292
- Gesamtdruck 342
- Gesamtwirkungsgrad 198, 216, 244, 299–300
- , GUD-Prozess 300
- , Kraftwerk 216
- Geschwindigkeit (Düse, Diffusor) 391, 396
- , Schallgeschwindigkeit 396
- , Überschallgeschwindigkeit 394
- , Unterschallgeschwindigkeit 391
- Gesetz 39, 325, 328, 334–336
- , Amagat 325, 328, 334
- , Dalton 335–336
- , Gay-Lussac 39
- Gewicht, spezifisches 29
- Gibbs-Funktion 103, 517
- Gleichgewicht 35, 336, 361
- , mechanisches 336
- , stoffliches 361
- , thermisches 35, 336, 361
- Gleichstrom (Wärmeübertrager) 442
- Grädigkeit 444
- Grashof 417
- Grashof-Zahl 417
- Gravitationskonstante 46, 569
- Grenze 146
- , Energieumwandlung 146
- Größe 21–22
- , abgeleitete 27
- , Einheitensystem 21
- , physikalische 21
- Größenart 21–22, 27
- , abgeleitete 22
- Größengleichung 23
- Größenwert 21
- Grundgesetz 385
- , Newton 385
- Grundschtaltung 297
- , Gas-Dampf-Kraftwerk 297
- GUD-Prozess 205, 287, 296, 298–301
- , Ausnutzungsgrad 298
- , Brennstoffleistungsverhältnis 298
- , Gesamtwirkungsgrad 300
- , Grundschtaltung 297
- , Kraftwerksnettoleistung 298
- , Nutzleistung 299
- , Schaltungsbeispiel 301
- , Wirkungsgrad 299
- Gütegrad 198, 315–316
- , Kältemaschine 316
- , Wärmepumpe 315

H

- h, μ_b*-Diagramm (Gemische) 368
- , H₂O-LiBr 368
- , NH₃-H₂O 368
- h, s*-Diagramm 268–269
- , Wasserdampf 268–269
- H, t*-Diagramm 484
- h, x*-Diagramm (feuchte Luft) 353
- Haarhygrometer 346
- Hauptgleichung 389
- , Euler'sche 389
- , Strömungsmaschine 389
- Hauptsatz der Thermodynamik 35, 61, 95, 514
- , dritter 514
- , erster 61
- , nullter 35
- , zweiter 95
- Heißdampf 248
- Heißgasmotor 219, 222

–, Arbeitsprinzip 219
 –, Kreisprozess 219
 –, wirklicher Prozess 222
 Heizflächenbelastung 407
 Heizkraftwerk 282
 Heizwert 456–458, 485, 512, 522
 –, bez. auf Normvolumen 458
 –, molarer 458, 512
 –, spezifischer 458
 –, Temperaturabhängigkeit 457, 485
 Heizzahl (Wärmepumpe) 315
 Hektopascal 32
 Helium 40, 41
 Helmholtz-Funktion 103
 Hess (Satz von; chem. Reaktion) 513
 HGWP-Wert 309
 High-Dust-Verfahren 501, 504
 Hubkolbenmaschine 233

I

ideales Gas 52, 335–337, 339, 393–395, 398
 –, Gemisch 335, 337
 –, –, Exergie 337
 –, –, thermische Zustandsgleichung 335
 –, thermische Zustandsgleichung 38
 –, Volumenausdehnungskoeffizient 51
 IGCC-Verfahren 506
 Impuls 386
 Impulsänderung 386, 389
 Impulskraft 386
 Impulssatz 385–386, 389
 Indikatordiagramm 233, 242
 –, Kolbenverdichter 242
 –, Otto-Motor 233
 Inerte 456
 Innenwirkungsgrad (Kolbenmaschine) 198
 innere Leistung 292
 –, Nutzleistung 292
 irreversibel 57
 Irreversibilität 62, 95, 135, 161, 177, 213, 243,
 291, 336, 340, 451, 524
 –, Dampfkraftanlagen 291
 –, Gemischbildung 336, 340
 –, Kolbenverdichter 243
 –, Kreisprozess 149, 191

–, Verbrennung 524
 –, Wärmeübertragung 451
 Isenthalpe 159
 Isentrope 118, 120–123, 272
 –, Expansion 120, 122–123
 –, Kompression 120, 122
 –, Neigung im p, V -Diagramm 120
 Isentropenexponent 86, 119
 Isobare 109–111, 272
 –, Volumenvergrößerung 110–111
 Isochore 105–108, 272
 –, Drucksteigerung 106, 108
 Isotherme 114–115, 117
 –, Expansion 115, 117
 –, Neigung im p, V -Diagramm 114
 ITS (Temperaturskala) 37

J

Joule 27, 77, 84
 Joule-Prozess 200–202, 204, 213–215
 –, Arbeitsverhältnis 202
 –, Nutzarbeit 200, 204
 –, wirklicher 214
 Joule-Thomson-Effekt 159, 273

K

Kalkwäsche 500
 Kalorimeter 167, 458
 Kaldampfmaschine 313, 316
 Kältemaschine 143, 154, 156–158,
 313, 316
 –, Arbeit 316
 –, exergetischer Wirkungsgrad 316
 –, Gütegrad 316
 –, Kreisprozess 316
 –, Leistungszahl 156, 316
 –, reversible 156
 Kältemittel 308–309, 312–313
 –, Diagramm 308
 Keller 208
 Kelvin 25, 36–37
 Kesselwirkungsgrad 291
 Kilogramm 25
 Kilomol 42, 43

- Kilowattstunde 77
- Kinetische Gastheorie 90
- Kirchhoff 435
- Kirchhoffsches Gesetz 435
- Klemmenleistung 216, 292, 294–295, 303
 - , Kraftwerk 216
- Klemmenspannung (Brennstoffzelle) 527
- Klopfen 225
- Kohlenstoffbilanz 477
- Kohlenstoffdioxid 40–41
- Kohlenstoffmonoxid 40–41
- Kolbenkraftmaschine 197–198, 220, 223
- Kolbenverdichter 233, 235, 238, 241–244
 - , einstufiger 234
 - , Indikator diagramm 242
 - , Irreversibilität 243
 - , mehrstufiger 235
 - , verlustloser 234
 - , volumetrischer Verlust 241
 - , Wirkungsgrad 244
- Kompressionsströmung 391
 - , Diffusor 391
- Kondensatbildung 342
- Kondensation 249, 276, 282, 313, 342, 427–428, 491
 - , Abgas 491
 - , Gas-Dampf-Gemisch, 342
 - , Kältemittel 313
 - , Tropfenkondensation 428
 - , Wärmeübertragung 427
 - , Wasserdampf 249, 282
- Kondensations-Turbine 282
- Kondensationsenthalpie 259
 - , spezifische 259
- Kondensator 276
- Kondensieren 249, 427
 - , Filmkondensation 428
- Kontinuitätsgleichung 375
- Kontrollfläche 386
- Kontrollraum 54
- Konvektion 405, 415, 424, 429
 - , erzwungene 424
 - , freie 424, 429
- Körper (Strahlung) 431
 - , farbiger 433, 435
 - , grauer 433–435
 - , schwarzer 432–433, 435
 - , weißer 435
- Kraft-Wärme-Kopplung 282
- Kraftmaschine 105
- Kraftwerk 216, 292, 300, 302
 - , Eigenbedarf 292
 - , Gesamtwirkungsgrad 216, 300, 302
 - , Nettowirkungsgrad 302
 - , Kraftwerkseigenbedarf 216
 - , Kraftwerksnettoleistung 216, 292
 - , Kraftwerksnettowirkungsgrad 292–293
 - , wärmetechnischer 293
- Kreiskolbenmaschine 233
- Kreiskolbenmotor 233
- Kreisprozess 138, 140–143, 149, 154–157, 191–193, 195, 197, 199, 219, 223, 275, 291, 307, 312, 314, 316
 - , Arbeit (Def.) 139
 - , Arbeitsverhältnis (Def.) 193
 - , Bewertungszahlen 192
 - , Dampfkraftanlage 275
 - , Gasturbinenanlage 199
 - , Heißgasmotor 219
 - , im p, V -Diagramm 138
 - , im T, S -Diagramm 143
 - , innerer Wirkungsgrad 195, 291
 - , irreversibel 151–154
 - , Kältemaschine 156, 316
 - , linkslaufender 140–142, 154–155, 157, 312
 - , –, Dampf 312
 - , Nutzarbeit 141, 195
 - , ORC-Prozess 307
 - , rechtslaufender 140–142, 191, 275
 - , reversibler 140–142, 149
 - , thermischer Wirkungsgrad (Def.) 143
 - , Verbrennungsmotor 223
 - , Wärmepumpe 154, 314
- Kreuzstrom (Wärmeübertrager) 443
- kritischer Punkt 249, 254, 256
 - , (Tabelle) 249
- Kühlgrenztemperatur 361
- Kupplungsarbeit 198
- Kupplungsleistung 216, 292
- Kupplungswirkungsgrad 244
- Kyoto-Protokoll 498

L

Ladungswechsel (Verbrennungsmotor) 232
 Lambert 435
 Lambertsches Richtungsgesetz 435
 Länge 25
 Längeänderung 47-48
 Längenausdehnungskoeffizient 48, 50
 -, mittlerer 49
 -, Tabelle 48, 50
 Längendehnung 47, 49
 Laplace 397, 397
 Laval 394
 Laval-Druck 393
 Laval-Düse 393, 398
 Laval-Geschwindigkeit 394
 Leistung 28, 76, 292, 299, 377, 390
 -, Dampfkraftprozess 292
 -, GUD-Prozess 299
 -, innere (Nutzleistung) 292
 -, Schaufelleistung 390
 -, technische 377
 -, Wellenleistung 76
 Leistung der Brennstoffzelle 527
 Leistungszahl 156-157, 314, 316
 -, Kältemaschine 316
 -, Wärmepumpe 156, 314
 lg p, h -Diagramm (Kältemittel) 310, 311
 Lichtgeschwindigkeit im Vakuum 46, 568
 Lichtstärke 25
 Liefergrad 243
 Liefergrad (Verdichter) 242
 Loschmidt-Konstante 43
 Löslichkeit 321
 Lösung 321, 368
 Low-Dust-Verfahren 501, 505
 Luft 40-41, 87, 253, 344-347, 349, 351, 353, 356, 358, 406, 519, 567, 569, 574, 579, 581
 -, feuchte 344-347, 349, 351, 353, 356, 356, 358, 519, 579
 -, -, absolute 345
 -, -, h, x -Diagramm 344
 -, -, isobare Zustandsänderung 356
 -, -, Mischprozess 356-357
 -, -, Partialdruck (Tabelle) 519
 -, -, relative 345

-, -, Sättigungsdichte 345
 -, -, Sättigungsdruck 345
 -, -, spezifische Enthalpie 351
 -, -, spezifisches Volumen 349
 -, -, Wärmeabfuhr 356
 -, -, Wasserbeladung 346
 -, -, Wasserdampfpartialdichte 345
 -, -, Wasserdampfpartialdruck 345
 -, -, Wasserzusatz 358
 -, -, Zusammensetzung 345
 -, Feuchtegehalt 346
 -, h, x -Diagramm 353
 -, Realgasfaktor 253
 -, Stoffwerte trockener Luft (Tabelle) 40, 87, 406
 -, trockene 346, 567, 574, 581
 -, -, Partialdruck 346
 Luftbedarf 462, 470
 Luftbedarf (Verbrennung) 465
 Luftüberschuss 463
 Luftverhältnis 463, 477-479

M

Mach 397
 Mach-Zahl 397
 Mariotte 39
 Maschine 191
 Masse 25, 40, 43, 321-322
 -, Gemisch 321
 -, molare 40-43, 322
 -, -, Gemisch 322
 Massenanteil 321-322, 324, 326, 328
 Massenkonzentration 326, 339
 Materiemenge 42
 Mayer 77
 Megapascal 32
 Meter 25
 Mindestluftbedarf 462
 Mindestsauerstoffbedarf 462
 Mischtemperatur 164-165
 Mischung 165
 Mischungsentropie 165, 332, 336
 -, ideales Gemisch 332
 -, molare 332
 -, spezifische 332

Mischungsexergieverlust 336
 Mischungsprozess 332
 Mischungsregel 357, 367
 Mischwärmeübertrager 442
 Mitteltemperatur 179
 –, thermodynamische 179
 Mittelwert 80–81
 –, Wärmekapazität, spezifische 80–81
 Mol 25–26, 43
 Molanteil 322, 348
 Molanteil (Gemisch) 339
 Molekülmasse 43
 –, relative 43
 Mollier 269, 271, 353, 355
 –, h,s -Diagramm (Wasserdampf) 269
 –, h,x -Diagramm 353
 –, h,x -Diagramm (feuchte Luft) 355
 Molmasse 322
 –, Gemisch 322
 –, Masse, molare 43
 –, relative 43
 Molmenge 43
 Molvolumen, Volumen, molares 43
 Molwärme, Wärmekapazität, molare 43
 Motor 219–220, 224, 229, 233
 –, Diesel-Motor 229
 –, Heißgasmotor 219
 –, Kreiskolbenmotor 233
 –, Otto-Motor 224
 –, Stirling-Motor 220
 –, Verbrennungsmotor 224
 –, Viertaktmotor 233
 –, Wankelmotor 233

N

Nassdampf 248, 257, 260–261
 –, spezifische Enthalpie 260
 –, spezifische Entropie 261
 –, spezifisches Volumen 257
 Nassdampfgebiet 254
 Nassdampfmasse 257
 Naturkonstante (Tabelle) 46, 569
 Neigung der Isothermen 114
 –, p,V -Diagramm 114
 Nernstsches Wärmetheorem 514

Nettowirkungsgrad 302
 Newton 23, 385, 415
 –, Grundgesetz 385
 Normdichte 44
 Normdruck 32, 44
 Normfallbeschleunigung (Tabelle) 46, 569
 Normtemperatur 44
 Normvolumen 40, 42, 44, 46, 567, 569
 –, molares 44, 46, 567, 569
 –, –, (Tabelle) 40, 567
 –, –, ideales Gas 46
 Normzustand 44, 46, 569
 –, physikalischer 44, 46, 569
 Nullpunkt 36
 –, absoluter 36
 nullter Hauptsatz der Thermodynamik 35
 Nußelt-Zahl 417
 Nutzarbeit 146, 193, 195, 200, 204, 209, 211,
 221, 225, 229, 231, 277, 296
 –, Carnot-Prozess 146
 –, Clausius-Rankine-Prozess 277
 –, Diesel-Prozess 229
 –, Ericsson-Prozess 209
 –, Gasturbinenanlage 211
 –, GUD-Prozess (Leistung) 296
 –, Joule-Prozess 200, 204
 –, –, größtmögliche 204
 –, Kolbenstange 64
 –, Kreisprozess 193, 200, 209, 221,
 225, 229, 231, 277
 –, Otto-Prozess 225
 –, Seiliger-Prozess 231
 –, Stirling-Prozess 221
 Nutzleistung 299
 –, Dampfkraftprozess 291
 –, GUD-Prozess 299
 Nutzwirkungsgrad (Kreisprozess) 198

O

ORC-Prozess 308
 organische Arbeitsfluide 308
 Oswald-Dreieck 481, 482
 Otto-Prozess 224–226, 232
 Oxyfuel-Verfahren 506
 Ozonabbau 308

P

- p,t -Diagramm (H_2O) 251
 p,V -Diagramm 62–63, 74, 114
 p,v,T -Diagramm (realer Stoff) 254
 Partialdichte 325–327, 339, 345, 579
 –, feuchte Luft 343
 –, –, Tabelle 343
 –, ideales Gas 339
 –, ideales Gemisch 325
 Partialdruck 335–337, 342–343, 346–347, 579
 –, feuchte Luft 343, 347
 –, –, Tabelle 343
 –, Gas-Dampf-Gemisch 342
 –, ideales Gas 336
 Pascal 32
 Péclet-Zahl 417
 Phase 55, 247, 321
 –, flüssige 247
 –, gasförmige 247
 Phasenänderung 255
 Phasengebiet 254
 Phasenwechsel 247
 Philips-Stirling-Motor 220
 Phlogiston 77
 Photon 405, 431
 Pinch-Point-Methode 450
 Plancksche Strahlungskonstante 432
 Plancksches Strahlungsgesetz 432
 Plancksches Wirkungsquantum 46, 569
 Polytrope 125–126, 128–129
 Polytropenexponent 126, 130
 Post-Combustion-Verfahren 505
 ppm (parts per million) 498
 Prandtl-Zahl 417
 Pre-Combustion-Verfahren 506
 Primärenergie 191
 Prozess 56–58, 95, 99, 101, 104, 135, 137, 162, 164, 172, 185, 191, 197, 199, 205, 208, 211, 213–214, 220, 222, 224–226, 228, 231–232, 275–276, 287, 289, 296, 307, 375, 381
 –, adiabates System 135
 –, Arbeitsprozess 375
 –, Ausgleich 164
 –, BRC-(Binary Rankine-Cycle-)Anlage 287
 –, Carnot-Prozess 185, 197
 –, Clausius-Rankine-Prozess 276
 –, Diesel-Prozess 228
 –, Ericsson-Prozess 208
 –, Fließprozess (Def.) 58
 –, gemischter Vergleichsprozess (s. Seiliger-Prozess) 231
 –, Gleichdruckprozess (s. Diesel-Prozess) 228
 –, Gleichraumprozess (s. Otto-Prozess) 224
 –, GUD 205
 –, GUD-Prozess 287, 296
 –, instationärer 162
 –, irreversibler 57, 95, 99
 –, Joule-Prozess 199, 214
 –, Kreisprozess 137, 191, 275
 –, natürlicher 95, 172
 –, offenes System 101, 104
 –, ORC-Prozess 307
 –, Otto-Prozess 224–226, 228
 –, reversibler 57
 –, Seiliger-Prozess 231
 –, stationärer 58
 –, Stirling-Prozess 220
 –, Strömungsprozess 375, 381
 –, thermodynamischer 56–57
 –, Verbrennungskraftanlage 191
 –, Vergleichsprozess (Def.) 191
 –, Wärmekraftanlage 191, 275
 –, wirklicher 211, 213, 222, 232, 289
 –, Zweistoff-Prozess 287
 Prozessgröße 56, 63
 Psychrometer 362
 Punkt 249–250
 Punkt, kritischer 249, 250

Q

Quecksilbersäule 32–33

R

Rankine 37
 Rankine-Prozess 307

- Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) 496, 500
 Rauchgasreinigungsanlage (RRA) 496, 501
 Raumanteil 327, 339
 –, ideales Gas 339
 –, ideales Gemisch 327
 Rayleigh-Zahl 417
 Reaktion 511–512
 –, chemische 511
 –, endotherme 512
 –, exotherme 512
 Reaktions-Gibbs-Funktion 517
 Reaktionsarbeit 517, 519, 522
 Reaktionsenthalpie 511–512, 517, 526–527
 –, freie 517, 527
 –, (Tabelle) 527
 Reaktionsentropie 514, 527
 Realgasfaktor 252, 253
 –, Luft 253
 Reflexionskoeffizient (Strahlung) 435
 Regenerator (Wärmeübertrager) 442
 Reibung 57, 95
 Rekuperator (Wärmeübertrager) 442
 relative Feuchte (Luft) 345, 355
 reversibel 57
 Reynolds-Zahl 417
 Rohrleitungswirkungsgrad 291
 Rohrströmung 376
 –, laminar 376
 –, turbulent 376
 Röntgenstrahlung 431
 Rosin und Fehling 486
 –, Luftbedarf und Verbrennungsgasmenge (Tabelle) 474
 –, Verbrennungsgas (Diagramm) 486
 Rotationskolbenmaschine 233
 Rückkühlwerk 363
- S**
- Sankey-Diagramm 185
 Sattdampf 248, 259, 261
 –, Definition 248
 –, spezifische Enthalpie 259
 –, spezifische Entropie 261
 Sättigungsdruck 342
 Sättigungszustand 262, 342, 345, 576
 –, Dichte 345
 –, Druck 342
 –, feuchte Luft (Tabelle) 343
 –, Wasserdampf (Tabelle) 262
 Satz von der Existenz der Temperatur 35
 Sauerstoff (Stoffwerte) 40–41, 80, 87, 567, 569, 571, 573
 –, (Tabelle) 80
 Sauerstoffbedarf (Verbrennung) 461, 470
 Sauerstoffbilanz (Verbrennung) 478
 Schadraum (Verdichter) 238–239
 –, relativer 239
 Schadstoff: s. Emission 238
 Schallgeschwindigkeit 396
 Schaltungsbeispiel 301–302
 –, Gas-Dampf-Kraftwerk 302
 Schaufelleistung (Strömungsmaschine) 390
 Schmelzdruckkurve 250
 Schmelzen 249–250
 Schmelzenthalpie, spezifische (Tabelle) 249
 Schmelzgebiet 249–254
 Schmelzlinie 254
 Schmelztemperatur (Tabelle) 250
 Schmelzwärme, spezifische 249
 Schrägrohrmanometer 33
 Schwarzer Körper 432
 Schwefeldioxid (Stoffwerte) 40–41, 87, 567, 574
 Schwefelsäuretaupunkt 495
 SCR-(Selective Catalytic Reduction)-Verfahren 504
 Seiliger-Motor 231
 Seiliger-Prozess 231–232
 Sekunde (Def.) 25
 Selbstentzündung 225
 Selbstzündung 459
 Sichtfaktor (Strahlung) 437
 Siededruck 248
 Siedelinie 254
 Siedetemperatur 248
 –, (Tabelle) 248
 Siedeverzug 254
 Sonnenmasse 46, 569
 Sonnenoberfläche, Temperatur 46
 Spannungswirkungsgrad (Brennstoffzelle) 529

- Standardbildungsenthalpie 511, 512
 Standardenthalpie 512–513
 Standardentropie 512, 515
 Standardreaktionsentropie 514
 Standardzustand, chemischer 46, 511, 569
 Stefan-Boltzmann 433
 –, Gesetz 433
 –, Konstante 46, 433, 569
 Steinkohleneinheit (SKE) 77
 Stickstoff (Stoffwerte) 40–41, 567, 569, 571, 573
 Stickstoffbilanz (Verbrennung) 465, 477
 Stickstoffoxid (Verbrennung) 465, 503
 Stirling-Motor 220, 222
 Stirling-Prozess 220–222
 Stoff 572, 580
 Stoffbilanz (Verbrennung) 476
 Stoffdurchsatz in einer Feuerung 476
 Stoffmenge 43–44, 25, 322
 Stoffmengenanteil (Gemisch) 322, 324, 326, 328, 339, 348
 Strahlung 431–432, 435–438
 –, Ausstrahlung 431
 –, Bestrahlung 435
 –, erzwungene 435
 –, Flamme 438
 –, freie 435
 –, Gas 438
 –, Konstante 437
 –, –, Planck 437
 –, –, Stefan-Boltzmann 437
 –, –, Strahlungsaustausch 437
 –, Wärmeübertragung 436
 Strömung 158, 375–376, 385, 391, 394, 397–398, 405, 418, 420, 424, 431–433, 437
 –, Diffusor 391, 397
 –, Düse 391
 –, erzwungene 405, 418
 –, freie 405, 420
 –, Konstante 432–433, 437
 –, –, Planck 432
 –, –, Stefan Boltzmann 433
 –, –, Strahlungsaustausch 437
 –, Kraftwirkung 385
 –, laminare 424
 –, Leistung 431
 –, reibungsbehaftete 158
 –, turbulente 376, 424
 –, Überschall 394, 398
 –, Unterschall 391
 –, Wärmeübertragung 405, 418
 Strömungsmaschine 376–377, 389
 –, Arbeitsprozess 376
 –, Eulersche Hauptgleichung 389
 Strömungsprozess 381, 382
 –, adiabater 382
 –, horizontaler 382
 Strömungsvorgang 375
 Stufenbrenner 504
 Sublimationsdruckkurve 250
 Sublimationsenthalpie 249, 250
 Sublimationsgebiet 254
 Sublimationstemperatur 249
 Sublimieren 250
 Substanzmenge 26
 System 101, 135, 182–183, 191, 247, 249, 375, 54, 55, 61–62, 64, 66, 70, 72, 73, 77, 99
 –, abgeschlossenes 55, 61, 77
 –, adiabates 55, 66, 101, 135, 183
 –, –, Expansion 135
 –, –, Kompression 135
 –, Energievorrat 66
 –, geschlossenes 54–55, 61–62, 64, 99, 182, 191
 –, heterogenes 55, 247, 249
 –, homogenes 38, 55, 247–248
 –, isoliertes 55
 –, offenes 54, 55, 70, 72, 73, 100, 182, 191, 375
 –, ruhendes 66
 –, thermisch isoliertes 56
 –, thermodynamisches 54–56
 –, Zustandsgleichung, thermische 38
 Systemgrenze 54–55
 –, adiabate (wärmedichte) 55
 –, nichtadiabate bzw. diatherm (wärmedurchlässige) 55, 68

T

- Taulinie (Sattdampf) 254
 Taupunkt (Gemisch) 344, 495
 Techn. Atmosphäre 33
 Teildichte: s. Partialdichte 326
 Teilvolumen 326

Temperatur 25, 35–37, 149, 179, 362
 –, Celsius 36
 –, Fahrenheit 37
 –, Festpunkt 37
 –, Feuchtkugel 362
 –, Kelvin 149
 –, Kühlgrenztemperatur 362
 –, Messung 35
 –, Mitteltemperatur, thermodynamische 179
 –, Rankine 37
 –, Skalen 36
 –, thermodynamische 25, 36–37, 149
 –, Trockenkugel 362
 Temperatureausgleich 164–165
 Temperaturdifferenz 37, 444
 –, Einheit 37
 –, mittlere logarithmische 444
 Temperatur-Gleit (Kältemittel) 309
 Temperaturmessgerät 35
 Temperaturmessung 35
 Temperaturskala 37
 –, empirische 36
 –, ideales Gas 36
 –, internationale 37
 –, ITS 37
 –, thermodynamische 37
 Temperaturstrahlung 431
 TEWI-Wert (Treibhauseffekt) 309
 Thermometer 35–36
 Thomson 36
 Torricelli 32–33
 Totalenthalpie 159, 382
 Transmissionskoeffizient (Strahlung) 435
 Treibhauseffekt 308, 496–497
 Treibhauspotenzial 308
 Tripellinie 254
 Tripelpunkt 36, 46, 250
 Tropfenkondensation 428
T,S-Diagramm 102, 268
 Turbine 199, 213–214, 216, 275
 –, Wirkungsgrade 214, 216

U

Überschallgeschwindigkeit 394, 397, 399
 Überströmversuch (Gay-Lussac Joule) 84

Umgebung (Exergie) 172
 Unterschallgeschwindigkeit 391, 397
 Unterschallströmung 391
 U-Rohr-Manometer 34

V

van der Waals 253
 Verbrennung 455, 459, 462–463, 465, 468–469, 473, 485–486, 511, 524
 –, Exergie 524
 –, Exergieverlust 524
 –, *H,t*-Diagramm 485–486
 –, Irreversibilität 511
 –, unvollständige 459, 465, 468–469, 473
 –, vollständige 459, 462–463, 468, 470
 Verbrennungsdreieck 480
 Verbrennungsgas 463–464, 466, 470, 484, 486, 524
 –, Enthalpie 484, 486
 –, Exergie 524
 –, Luftgehalt 486
 Verbrennungsgasmenge 464, 470, 474
 –, Näherung 474
 Verbrennungsgaszusammensetzung 465, 469, 473
 Verbrennungskontrolle 475
 Verbrennungskraftanlage (-maschine) 191, 223
 Verbrennungsmotor 223–225, 232
 –, Vergleichsprozess 224
 –, wirklicher Prozess 232
 Verbrennungsmotorantrieb 315
 –, Wärmepumpe 315
 Verbrennungsrechnung 461–462, 469, 470, 474, 477
 –, fester und flüssiger Brennstoff 461
 –, gasförmiger Brennstoff 469
 –, Luftbedarf 462, 470, 474
 –, –, Näherung (Tabelle) 474
 –, Luftüberschuss 463, 470
 –, Luftverhältnis 463, 477
 –, Näherungslösung (Tabelle) 474
 –, Sauerstoffbedarf 461, 470
 Verbrennungstemperatur 484
 –, theoretische 484

- Verdampfen 247, 249, 429–430
 –, Blasenverdampfung 429–430
 –, Filmverdampfung 429
 –, freie Konvektion 429–430
 –, Phasenwechsel 248
 Verdampfungsenthalpie (-wärme) 249, 259–260
 –, spezifische (Tabelle) 260
 Verdichter 211, 213, 233–234
 –, beliebige Bauart 211
 –, Kolbenverdichter 233
 Verdichterbauart 234
 Verdichtewirkungsgrade 214, 216, 244–245
 –, isentroper 214, 244
 –, isentroper indizierter 244
 –, isothermer 244
 –, isothermer indizierter 244
 –, mechanischer 216, 244
 Verdichtungsverhältnis (Kolbenmaschine) 221, 225
 Verdunstungskühlung 361
 Verfahrensoptimierung, Wärmenutzung 449
 Vergleichsarbeit 235
 –, isentrope 235
 –, isotherme 235
 Vergleichsprozess 146, 191, 199, 208, 220, 224, 228, 231, 276, 296
 –, Carnot-Prozess 146
 –, Clausius-Rankine-Prozess 276
 –, Dampfkraftanlage 276
 –, Diesel-Prozess 228
 –, Ericsson-Prozess 208
 –, Gasturbinenanlage 191
 –, GUD-Prozess 296
 –, Joule-Prozess 199
 –, Otto-Prozess 224
 –, Seiliger-Prozess 231
 –, Stirling-Prozess 220
 –, Verbrennungskraftanlage 191
 –, Wärmekraftanlage 191, 276
 Verlust 179, 181, 195, 198, 215, 232–233, 241, 289, 451, 490, 524
 –, Abgasverlust 490
 –, Dampfkraftanlage 289
 –, Exergieverlust allg. 179, 181, 451, 524
 –, –, Dissipation 179
 –, –, Verbrennungsgas 524
 –, –, Wärmeübertragung 451
 –, Kolbenverdichter 241
 –, Verbrennungsmotor 232
 –, Wärmekraftanlage 193
 Verschiebearbeit 71
 Virialkoeffizient 252
 Viskosität 417
 Volumen 28, 44, 257, 327, 349
 –, molares 44
 –, spezifisches 28, 257, 327, 349
 –, –, feuchte Luft 349
 –, –, Gemisch 327
 –, –, Nassdampf 257
 Volumenänderungsarbeit 62–63, 104, 106, 110, 115
 –, spezifische 63
 Volumenausdehnungskoeffizient 51–52
 –, ideales Gas 52
 Volumendehnung 51
 Volumenkontraktion 321
 Vorgang 162
 Vorsatzzeichen 26
 Vorzeichen 69, 458, 512
 –, Arbeit 69
 –, Reaktionsenthalpie 512
 –, Wärme 69
 vpm (volume parts per million) 498

W

- Wankel-Motor 233
 Wärme 68–69, 77, 177–179
 –, Anergie–179
 –, Definition 68
 –, Einheit 77
 –, Exergie 177, 179
 –, Vorzeichen 69
 Wärmedehnung (thermische Ausdehnung) 48
 Wärmekapazität 41, 79–82, 85–86, 90, 330, 406, 571–573
 –, molare 41, 90
 –, spezifische 41, 79–81, 85–86, 330, 406, 571–573
 –, –, Gemisch 330

- , -, homogenes System 79
- , -, ideales Gas 85-86
- , -, isobare 79
- , -, isochore 79
- , -, mittlere 81
- , -, Feststoff (Tabelle) 407
- , -, Flüssigkeit (Tabelle) 408
- , -, Gas (Tabelle) 80
- , -, Temperaturabhängigkeit 80
- , -, wahre 80-81, 86
- , -, Wasser 80
- Wärmekraftanlage 141, 143, 191, 276
- Wärmeleitfähigkeit 416
- Wärmeleitung 405, 413-414
 - , ebene Wand 406
 - , Hohlkugelwand 414
 - , Zylinderwand 413
- Wärmeleitungswiderstand 411
- Wärmepumpe 143, 154, 157, 158, 313-315
 - , exergetischer Wirkungsgrad 314
 - , Gütegrad 315
 - , Heizzahl 315
 - , Leistungszahl 314
 - , mit Verbrennungsmotor 315
- Wärmerückgewinnung 450
- Wärmestrahlung s. Temperaturstrahlung 405, 431
- Wärmestrom 407
 - , Dichte 407
- Wärmethorem (Nernst) 514
- Wärmethorien 77
- Wärmeübergang 415-418, 424, 427
 - , Ähnlichkeitstheorie 416
 - , Berechnungsgleichungen (Tabelle) 418, 424
 - , Kondensieren 427
 - , Verdampfen 427
- Wärmeübergangskoeffizient 416, 425, 437
 - , Anhaltswerte (Tabelle) 425
 - , durch Strahlung 437
- Wärmeübergangswiderstand 416
- Wärmeübertrager 442, 446, 449, 452
 - , Exergieverlust 452
 - , Gegenstrom 442
 - , Gleichstrom 442
 - , Kreuzstrom 442
 - , Mischwärmeübertrager 442
 - , Regenerator 442
 - , Rekuperator 442
 - , Rohrbündel 446
 - , Verfahrensoptimierung 449
- Wärmeübertragung 405, 412, 415, 431, 436
 - , Konvektion 415
 - , Leitung 405
 - , Strahlung 431, 436
 - , Zwischentemperatur 412
- Wärmeübertragungseigenschaften (Stoffwerte) 407-409
 - , Feststoff (Tabelle) 407
 - , Flüssigkeit (Tabelle) 408
 - , Gas (Tabelle) 408-409
 - , Luft (Tabelle) 409
- Wärmewiderstand 411, 416, 439
- Wärmewiderstand (Def.) 409
 - , Durchgangswiderstand 439
 - , Leitwiderstand 411
 - , Übergangswiderstand 416
- Wasser 46, 81-82, 257, 260, 262, 346, 410, 426, 569, 572, 576, 581-582
 - , Enthalpie 257
 - , Entropie 260
 - , Sättigungszustand (Tabelle) 262, 576
 - , spezifische Wärmekapazität 81-82, 410, 582
 - , -, Polynom 82
 - , Tripelpunkt 46, 569
 - , Wärmeübertragungseigenschaften (Tabelle) 426, 581-582
- Wasserbeladung 346, 353
 - , Gemisch 346
- Wasserdampf 256, 258, 260, 262, 268-269, 271-272, 275-276, 296, 344, 463, 495, 577, 579
 - , Clausius-Clapeyron 271
 - , -, Gleichung 271
 - , Clausius-Rankine-Prozess 276
 - , Dampfkraftanlage 275
 - , feuchte Luft 344, 463
 - , feuchtes Verbrennungsgas 463, 495
 - , GUD-Prozess 296
 - , *h,s*-Diagramm 268-269
 - , spezifische Entropie 260
 - , Stoffwerte 262, 579

- , Stoffwerte (Tabelle) 577
- , T,s -Diagramm 268
- , Zustandsänderung 272
- , Zustandsgleichung 256, 272
- Wasserdampfbeladung 325
- Wasserdampfgehalt 346
- Wasserdampfpartialdruck 347
- Wasserdampf tafel 262, 264, 268, 576
 - , Stoffwerte 264
- Wasserdampftaupunkt (Abgas) 495
- Wassersäule 32
- Wasserstoff 40, 567, 569, 571
- Wasserstoff (Stoffwerte) 80, 87, 573
- Wasserwert 167
 - , Kalorimeter 167
- Watt 28
- Welle 431
 - , elektromagnetische (Strahlung) 431
- Wellenarbeit 66, 76
- Wellenleistung 76
- Wichte 29
- Wien 432
- Wiensches Verschiebungsgesetz 432
- Wirkungsgrad 143, 146, 148, 156-157, 184, 192, 194-195, 197-198, 200-202, 209-210, 214, 216, 219, 221, 225-226, 229, 232, 239, 244, 277, 281, 289-292, 299, 300, 302, 312, 314, 316, 392, 490, 493, 525, 529-530
 - , Brennstoffzelle 525
 - , Carnot-Prozess 146
 - , Clausius-Rankine-Prozess 277
 - , Dampfkraftanlage 289-290, 292, 302
 - , Dampfkraft-Prozess 291
 - , Diffusor 392
 - , Düse 392
 - , Eigenbedarf 292
 - , exergetischer 184, 193, 202, 209, 221, 226, 229, 277, 314, 316
 - , Clausius-Rankine-Prozess 277
 - , Definition 193
 - , Diesel-Prozess 229
 - , Ericsson-Prozess 209
 - , Joule-Prozess 202
 - , Kältemaschine 316
 - , Otto-Prozess 226
 - , Stirling-Prozess 221
 - , Wärmepumpe 314
 - , feuerungstechnischer 490, 493
 - , Gas-Dampf-Kraftwerk 299
 - , Gasturbinenanlage 201, 210, 214
 - , Generator 292
 - , GUD-Prozess 299
 - , Heißgasmotor 219
 - , idealer (Brennstoffzelle) 530
 - , indizierter 197-198
 - , indizierter (Kolbenmaschine) 197
 - , innerer 194-195, 291
 - , Kreisprozess 291
 - , isentroper 214, 392
 - , Joule-Prozess 201
 - , Kessel 291
 - , Kolbenverdichter 244
 - , Kraftwerk 291, 302
 - , Kupplung 244
 - , mechanischer 198, 292
 - , Nutzwirkungsgrad (Kreisprozess) 198
 - , ORC-Prozess 312
 - , Rohrleitung 290
 - , Spannung 529
 - , thermischer 148, 156-157, 192, 200, 209-210, 221, 225, 229, 232, 277, 281, 291, 292
 - , Clausius-Rankine-Prozess 277, 281
 - , Diesel-Prozess 229
 - , Ericsson-Prozess 209
 - , Joule-Prozess 200
 - , Otto-Prozess 225
 - , Seiliger-Prozess 232
 - , Stirling-Prozess 221
 - , thermischer (Def.) 143
 - , Turbinenwirkungsgrad 214, 216
 - , Verdichter 244
 - , Verdichtewirkungsgrad 214, 216
 - , volumetrischer (Kolbenverdichter) 239

Z

- Zahlenwertgleichung 24
- Zeit 25
- Zündung 459
 - , Zündgrenze 459

- , Zündtemperatur 459
- Zusammensetzung 321, 344, 456, 519
- , Brennstoff 456
- , feuchter Luft 344, 519
- , Gemisch 321
- Zusatzvolumen 326
- Zustand 38, 342, 519
- , gesättigter 342
- , übersättigter 342
- , ungesättigter 342
- , Zustandsgleichung 38
- , Zustandsgröße 38
- Zustandsänderung 56, 102, 104-105, 109, 114, 118, 125, 135, 158, 183, 272, 356
- , adiabates System 118, 135, 158
- , adiabatisches System 183
- , einfache 104
- , ideales Gas 104
- , isentrope 118
- , isobare 109, 356
- , -, feuchte Luft 356
- , isochore 105
- , isotherme 114
- , polytrope 125
- , quasistatische 56
- , T,S -Diagramm 102
- , Wasserdampf 256, 272
- Zustandsgleichung 78, 84-85, 103, 252, 256, 334, 350
- , Fundamentalgleichung 103
- , kalorische 78, 84-85
- , -, homogenes System 78
- , -, ideales Gas 84-85
- , kanonische 103
- , reales Fluid 252
- , thermische 252, 256, 334, 350
- , -, heterogenes System 38
- , -, homogenes System 38
- , -, ideales Gas 334
- , -, reales Fluid 252
- , -, reales Gas 252
- , -, Wasserdampf 256
- , Wasserdampf 256
- Zustandsgröße 28, 56, 66, 103, 256-257, 329, 356, 511
- , extensive 56
- , feuchte Luft 356
- , freie Energie 103
- , freie Enthalpie 103, 511
- , ideales Gemisch 329
- , intensive 56
- , kalorische 56
- , molare 56
- , spezifische 56, 257
- , stoffmengenbezogene 56
- , thermische 28, 56
- , Wasserdampf 256, 272
- Zweistoff-Gemisch 366
- Zweistoff-Prozess 287
- Zwischenkühlung 235
- , Arbeitersparnis 235
- Zwischenüberhitzen (Dampfkraftanlage) 287
- Zwischenüberhitzung 288
- Zylinderwand 413