



Günter Cerbe, Gernot Wilhelms

Technische Thermodynamik

Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

ISBN (Buch): 978-3-446-45119-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45119-3>

sowie im Buchhandel.

Vorwort zur achtzehnten Auflage

Die achtzehnte Auflage knüpft im Wesentlichen an die siebzehnte 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 haben wir 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 haben wir in der vorliegenden Auflage mit Abschnitt 6.5 eine Einführung in reale Gemische aufgenommen. 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.

Wir haben das Grundwissen der Thermodynamik 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.

Wir verwenden grundsätzlich Größengleichungen bis auf wenige Ausnahmen, z. B. bei der Verbrennungsrechnung. 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 und runden die thermodynamische Temperatur bei 0 °C auf 273 K ab. 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. Daher wurde die Anzahl von Beispielen mit durchgerechneten Lösungen und Aufgaben mit Lösungsergebnissen auf jetzt 275 weiter erhöht. 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 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 Sommer 2017

*Günter Cerbe
Gernot Wilhelms*

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	13
1 Grundlagen der Thermodynamik	17
1.1 Aufgabe der Thermodynamik	17
1.2 Größen und Einheitensysteme	17
1.2.1 Physikalische Größen und Größenarten	17
1.2.2 Größengleichungen	18
1.2.3 Zahlenwertgleichungen	19
1.2.4 Einheitensysteme	20
1.3 Thermische Zustandsgrößen	23
1.3.1 Volumen	23
1.3.2 Druck	24
1.3.3 Temperatur	29
1.4 Thermische Zustandsgleichung	32
1.4.1 Thermische Zustandsgleichung eines homogenen Systems	32
1.4.2 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	32
1.5 Mengenmaße Kilomol und Normvolumen; molare Gaskonstante	36
1.5.1 Kilomol	36
1.5.2 Normvolumen	37
1.5.3 Molare Gaskonstante	38
1.6 Thermische Ausdehnung	40
1.6.1 Längenänderung	40
1.6.2 Volumenänderung	42
1.7 Thermodynamisches System	46
1.7.1 Systeme und Systemgrenzen	46
1.7.2 Zustandsgrößen und Prozessgrößen	47
1.7.3 Zustandsänderungen und Prozesse	48
Kontrollfragen	51
2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	52
2.1 Energieerhaltung, Energiebilanz	52
2.2 Arbeit am geschlossenen System	52
2.3 Innere Energie	56
2.4 Wärme	58
2.5 Arbeit am offenen System und Enthalpie	60
2.6 Formulierungen des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik	66
2.7 Kalorische Zustandsgleichungen	68
2.7.1 Kalorische Zustandsgleichungen eines homogenen Systems	68
2.7.2 Spezifische Wärmekapazitäten eines homogenen Systems	68
2.7.3 Kalorische Zustandsgleichungen des idealen Gases	72
2.7.4 Spezifische Wärmekapazitäten des idealen Gases	75
2.7.5 Molare Wärmekapazitäten des idealen Gases	78
Kontrollfragen	80

3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	82
3.1 Aussagen des zweiten Hauptsatzes	82
3.2 Entropie	82
3.2.1 Einführung der Entropie	82
3.2.2 Entropiebilanzen	84
3.2.3 T,S -Diagramm	88
3.3 Fundamentalgleichungen	89
3.4 Einfache Zustandsänderungen des idealen Gases	90
3.4.1 Isochore Zustandsänderung	91
3.4.2 Isobare Zustandsänderung	94
3.4.3 Isotherme Zustandsänderung	98
3.4.4 Isentrope Zustandsänderung	103
3.4.5 Polytrope Zustandsänderung	109
3.4.6 Zustandsänderungen in adiabaten Systemen	118
3.5 Kreisprozesse	121
3.5.1 Kontinuierlicher Ablauf in Kreisprozessen	121
3.5.2 Arbeit und Prozessverlauf	122
3.5.3 Wärmekraftmaschine	126
3.5.4 Grenzen der thermischen Energieumwandlung	129
3.5.5 Vergleich reversibler und irreversibler Kreisprozesse	132
3.5.6 Wärmepumpe und Kältemaschine	137
3.6 Adiabate Drosselung	140
3.7 Instationäre Prozesse	144
3.7.1 Füllen eines Behälters	144
3.7.2 Temperatenausgleich	145
3.8 Wärmetransport	149
3.8.1 Entropieerzeugung beim Wärmetransport	149
3.8.2 Thermodynamische Mitteltemperatur	150
3.9 Exergie und Anergie	152
3.9.1 Begrenzte Umwandelbarkeit der inneren Energie und der Wärme	152
3.9.2 Exergie und Anergie eines strömenden Fluids	153
3.9.3 Exergie und Anergie eines geschlossenen Systems	157
3.9.4 Exergie und Anergie der Wärme	158
3.9.5 Exergieverlust	162
3.9.6 Exergetischer Wirkungsgrad	165
3.9.7 Energie- und Exergie-Flussbild	165
Kontrollfragen	167
4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	170
4.1 Kreisprozesse für Wärme- und Verbrennungskraftanlagen	170
4.1.1 Vergleichsprozesse	170
4.1.2 Bewertungszahlen für die Kreisprozesse	171
4.2 Kreisprozesse der Gasturbinenanlagen	177
4.2.1 Arbeitsprinzip der Gasturbinenanlagen	177
4.2.2 Joule-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	178

4.2.3	Ericsson-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	186
4.2.4	Der wirkliche Prozess in der Gasturbinenanlage	189
4.3	Kreisprozess des Heißgasmotors	197
4.3.1	Arbeitsprinzip des Heißgasmotors	197
4.3.2	Stirling-Prozess als Vergleichsprozess des Heißgasmotors	197
4.3.3	Der wirkliche Prozess im Heißgasmotor	199
4.4	Kreisprozesse der Verbrennungsmotoren	201
4.4.1	Übertragung des Arbeitsprinzips der Motoren in einen Kreisprozess	201
4.4.2	Otto-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichraumprozess)	201
4.4.3	Diesel-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichdruckprozess)	205
4.4.4	Seiliger-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gemischter Vergleichsprozess)	207
4.4.5	Der wirkliche Prozess in den Verbrennungsmotoren	209
4.5	Kolbenverdichter	210
4.5.1	Der verlustlose Kolbenverdichter ohne Schadraum	210
4.5.2	Bewertungszahlen für den Kolbenverdichter	215
	Kontrollfragen	222
5	Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	223
5.1	Das reale Verhalten der Stoffe	223
5.1.1	Aggregatzustandsänderungen, Phasenwechsel	223
5.1.2	Thermische Zustandsgleichungen realer Fluide	227
5.1.3	p, v, T -Diagramm	230
5.2	Wasserdampf	231
5.2.1	Zustandsgleichungen des Wasserdampfes	231
5.2.2	Spezifische Zustandsgrößen	232
5.2.3	Gleichung von Clausius und Clapeyron	243
5.2.4	Zustandsänderungen des Wasserdampfes	244
5.3	Dampfkraftanlagen	247
5.3.1	Arbeitsprinzip der Dampfkraftanlagen	247
5.3.2	Clausius-Rankine-Prozess als Vergleichsprozess der Dampfkraftanlage	248
5.3.3	Verfahren zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades	253
5.3.4	Zwischenüberhitzen, Verfahren zur Verringerung des Wassergehaltes im Abdampf	259
5.3.5	Der wirkliche Prozess in Dampfkraftanlagen	261
5.4	Kombiniertes Gas-Dampf-Kraftwerk (GUD-Prozess)	268
5.4.1	Zweck der Kombination	268
5.4.2	Grundsaltung des Gas-Dampf-Kraftwerkes	268
5.4.3	Wirkungsgrade beim Gas-Dampf-Kraftwerk	270
5.4.4	Schaltungsbeispiele	272
5.5	Organische Rankine-Prozesse (ORC)	278
5.5.1	Prozessverlauf	278
5.5.2	Organische Arbeitsfluide	279
5.6	Linkslaufende Kreisprozesse mit Dämpfen	284
	Kontrollfragen	289

6 Gemische	291
6.1 Zusammensetzung von Gemischen	291
6.1.1 Massenanteil	291
6.1.2 Stoffmengenanteil (Molanteil)	292
6.1.3 Molare Masse des Gemisches	292
6.1.4 Beladung	293
6.2 Ideale Gemische	295
6.2.1 Gesetz von Amagat	295
6.2.2 Partialdichte (Massenkonzentration) und Gemischdichte	296
6.2.3 Raumanteil	297
6.2.4 Die extensiven Zustandsgrößen des idealen Gemisches	299
6.3 Gemisch idealer Gase	304
6.3.1 Thermische Zustandsgleichung	304
6.3.2 Partialdruck (Gesetz von Dalton)	304
6.3.3 Mischungsentropie und Exergie eines Gemisches idealer Gase	305
6.3.4 Zusammensetzung von Gemischen idealer Gase	308
6.4 Gas-Dampf-Gemisch; Feuchte Luft	311
6.4.1 Sättigungszustand, Taupunkt	311
6.4.2 Feuchte Luft als Beispiel eines Gas-Dampf-Gemisches	313
6.4.3 Zusammensetzung feuchter Luft	314
6.4.4 Spezifisches Volumen feuchter Luft	318
6.4.5 Spezifische Enthalpie feuchter Luft	319
6.4.6 h,x -Diagramm von Mollier	321
6.4.7 Einfache isobare Zustandsänderungen feuchter Luft im h,x -Diagramm	324
6.5 Reale Gemische	332
Kontrollfragen	339
7 Strömungsvorgänge	341
7.1 Kontinuitätsgleichung	341
7.2 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für Strömungsvorgänge	342
7.2.1 Arbeitsprozesse	342
7.2.2 Strömungsprozesse	347
7.3 Kraftwirkung bei Strömungsvorgängen	351
7.3.1 Impulssatz	351
7.3.2 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	355
7.4 Düsen- und Diffusorströmung	356
7.4.1 Energieumwandlung in Düsen und Diffusoren	356
7.4.2 Reibungsfreie Düsenströmung	358
7.4.3 Schallgeschwindigkeit	362
7.4.4 Reibungsfreie Diffusorströmung	362
7.4.5 Ausbildung einer Laval-Düse oder eines Überschall-Diffusors	363
Kontrollfragen	368
8 Wärmeübertragung	369
8.1 Arten der Wärmeübertragung	369
8.2 Wärmeleitung	369
8.2.1 Ebene Wand	369
8.2.2 Zylindrische Wand	375
8.2.3 Hohlkugelwand	376

8.3	Konvektiver Wärmeübergang	377
8.3.1	Wärmeübergangsbeziehungen	377
8.3.2	Ähnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs	378
8.3.3	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen	389
8.4	Temperaturstrahlung	393
8.4.1	Einführung	393
8.4.2	Wärmeübertragung durch Strahlung	398
8.4.3	Gas- und Flammenstrahlung	399
8.5	Wärmedurchgang	400
8.5.1	Wärmedurchgangsbeziehungen	400
8.5.2	Beeinflussung des Wärmedurchgangs	402
8.5.3	Zwischentemperaturen	403
8.6	Wärmeübertrager	403
8.6.1	Gegen-, Gleich- und Kreuzstrom	404
8.6.2	Berechnungsverfahren	407
8.6.3	Verfahrensoptimierung bei der Wärmenutzung	411
8.6.4	Exergieverlust im Wärmeübertrager	412
	Kontrollfragen	414
9	Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	416
9.1	Umwandlung der Brennstoffenergie durch Verbrennung	416
9.1.1	Verbrennungstechnische Eigenschaften der Brennstoffe	416
9.1.2	Verbrennungsvorgang	419
9.1.3	Reaktionsgleichungen	420
9.2	Verbrennungsrechnung	421
9.2.1	Feste und flüssige Brennstoffe	421
9.2.2	Gasförmige Brennstoffe	430
9.2.3	Näherungslösungen	434
9.3	Verbrennungskontrolle	435
9.3.1	Messmethode	435
9.3.2	Auswertung der Messung	436
9.3.3	Verbrennungsdreiecke	439
9.4	Theoretische Verbrennungstemperatur	443
9.5	Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad	449
9.5.1	Konventionelle Verbrennungsanlagen	449
9.5.2	Verbrennungsanlagen mit Kondensation im Abgas	450
9.6	Abgastaupunkt	454
9.7	Emissionen aus Verbrennungsanlagen	455
9.7.1	Einführung	455
9.7.2	Minderung der Schwefeloxidemission	459
9.7.3	Minderung der Stickstoffoxidemission	461
9.7.4	Minderung der Kohlenstoffdioxidemission	464
9.8	Chemische Reaktionen und Irreversibilität der Verbrennung	469
9.8.1	Enthalpie, Entropie, freie Enthalpie	469
9.8.2	Brennstoffexergie	477
9.8.3	Exergieverlust bei der Verbrennung	481

9.9 Brennstoffzellen	483
9.9.1 Wirkprinzip	483
9.9.2 Energetische Bewertung	484
9.9.3 Bauarten	488
Kontrollfragen	492
10 Lösungsergebnisse der Aufgaben	494
11 Antworten auf die Kontrollfragen	504
11.1 Grundlagen der Thermodynamik	504
11.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	505
11.3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	507
11.4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	510
11.5 Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	511
11.6 Gemische	513
11.7 Strömungsvorgänge	515
11.8 Wärmeübertragung	515
11.9 Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	517
Anhang	519
A1 Schrifttum	519
A2 Nachweis verwendeter Unterlagen	521
A3 Wiederholung häufig benutzter Tafeln	522
Sachwortverzeichnis	539

2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

2.1 Energieerhaltung, Energiebilanz

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

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

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

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

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

Nachfolgend werden die in der Thermodynamik vorkommenden Energieformen näher behandelt.

2.2 Arbeit am geschlossenen System

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

Nach der Arbeitszufuhr hat sich das Zylindervolumen auf V_2 verkleinert, während der Druck auf p_2 gestiegen ist. Den Endpunkt nach einer Zustandsänderung wollen wir normalerweise durch den Index 2 kennzeichnen. Wir tragen den Ausgangs- und Endzustand in ein Koordinatensystem mit den Achsen p und V ein und verbinden diese Punkte durch die dazwischen liegenden Zustandspunkte (**B 2.1b**).

Die aufzuwendende Arbeit ist nach den Gesetzen der Mechanik

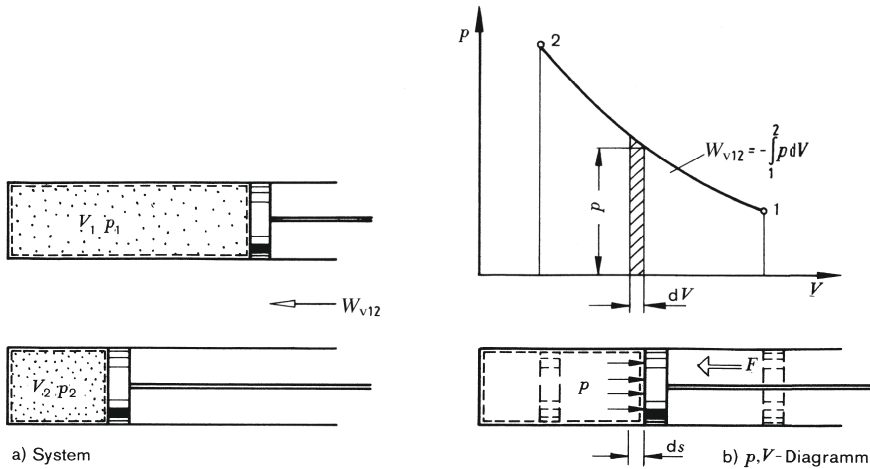
$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$$

Für eine beliebige Zwischenstellung des Kolbens gilt, mit der senkrecht auf den Kolben wirkenden Kraft F und dem Weg ds :

$$dW = F \cdot ds$$

Die Kolbenkraft F hält der entgegengerichteten Kraft des auf die Kolbenfläche A wirkenden Gasdruckes p das Gleichgewicht

$$F = -p \cdot A$$



B 2.1 Volumenänderungsarbeit

Oben eingesetzt ergibt sich

$$dW = -p \cdot A \cdot ds$$

Das Produkt $A \cdot ds$ stellt die Volumenänderung dV dar.

$$dW_v^{\text{rev}} = -p dV$$

Wir legen eine quasistatische Zustandsänderung zugrunde und vernachlässigen damit kleine Ungleichgewichte im Inneren. Dann ist $dW_v^{\text{rev}} = dW_v$, integriert:

$$W_{v12} = - \int_1^2 p dV \quad \text{geschlossenes System} \quad (\text{Gl 2.1})$$

Neben den inneren Irreversibilitäten können von außen verursachte Dissipationseffekte auftreten. Wir definieren *als Volumenänderungsarbeit* W_{v12} (sprich: wv eins zwei) *die einem geschlossenen System reversibel über die Systemgrenze zu- oder abgeführte Arbeit*. Die Systemgrenze kann adiabat oder nichtadiabat sein.

Das Vorzeichen der Volumenänderungsarbeit W_{v12} ist aufgrund des oben gemachten Ansatzes bei zugeführter Arbeit positiv, da $\int_1^2 p dV$ bei Volumenverringerung negativ wird. Wird die Volumenänderungsarbeit vom System an die Umgebung abgegeben, so sind die Zustandspunkte 1 und 2 gegenüber der Darstellung in **B 2.1b** vertauscht, wodurch $\int_1^2 p dV$ positiv und damit die Arbeit W_{v12} negativ werden. Diese Regel, nach der *zugeführte Energie positiv, abgeführte Energie negativ* ist, gilt für alle Energiearten.

Der Betrag der Volumenänderungsarbeit hängt von dem Wert des Integrals $\int_1^2 p dV$ ab. Zur Durchführung der Integration muss ein formelmäßiger Zusammenhang zwischen p

und V , d. h. der Verlauf der Zustandsänderung, bekannt sein. Die Volumenänderungsarbeit ist demnach vom Verlauf der Zustandsänderung abhängig, sie ist eine *Prozessgröße*, keine Zustandsgröße. Das Produkt $p \, dV$ kann im p, V -Diagramm durch den schraffierten Flächenstreifen grafisch dargestellt werden (**B 2.1b**). Das Integral über $p \, dV$ und damit die gesamte Volumenänderungsarbeit sind durch die Fläche unter der Zustandsänderung zur V -Achse darstellbar.

Bezogen auf die Masse ergibt sich die *spezifische Volumenänderungsarbeit*

$$w_{v12} = \frac{W_{v12}}{m} = - \int_1^2 p \, dv$$

Dissipationsenergie. Durch Reibung und andere Vorgänge wird Energie *im System* dissipiert. Diese Energie bezeichnen wir als Dissipationsenergie $W_{\text{diss}12}$.

Die gesamte am geschlossenen System verrichtete Arbeit W_{g12} kann somit aus Volumenänderungsarbeit und Dissipationsenergie (z. B. nach B 2.4b) bestehen.

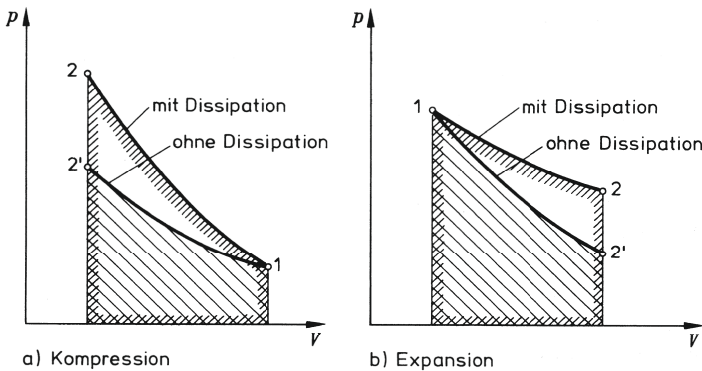
$$W_{g12} = W_{v12} + W_{\text{diss}12} \quad \text{geschlossenes System} \quad (\text{Gl } 2.2)$$

$$W_{g12} = - \int_1^2 p \, dV + W_{\text{diss}12} \quad \text{geschlossenes System} \quad (\text{Gl } 2.3)$$

Die Dissipationsenergie kann dem System nur zugeführt werden, sie ist somit immer positiv.

Auf die Masse m bezogen ergeben sich die spezifischen Größen:

$$w_{g12} = w_{v12} + w_{\text{diss}12} = - \int_1^2 p \, dv + w_{\text{diss}12}$$



$$\begin{aligned} \text{/// } W_{v12} &= - \int_1^2 p \, dV \quad (\text{bei Auftreten von Dissipation}) \\ \text{\\ } W_{v12} &= - \int_1^{2'} p \, dV \quad (\text{ohne Auftreten von Dissipation}) \end{aligned}$$

B 2.2 Zustandsänderung und Volumenänderungsarbeit mit und ohne Dissipation bei adiabatem, geschlossenem System

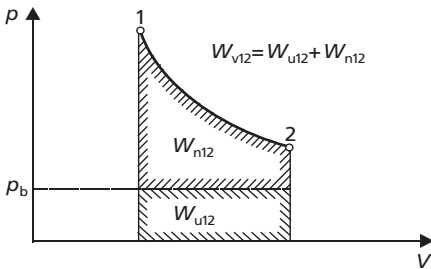
Bei Kompression oder Expansion auftretende Dissipation kann den Verlauf der Zustandsänderung und damit auch die Volumenänderungsarbeit W_{v12} beeinflussen. So wird z. B. bei adiabater Systemgrenze infolge von Dissipation der Enddruck bei gleicher Volumenänderung größer, sodass auch der Betrag des Integrals $-\int_1^2 p \, dV$ und damit die Volumenänderungsarbeit größer werden (**B 2.2**). Obwohl bei der Expansion die Volumenänderungsarbeit größer ist (neg.), ist infolge der im Inneren auftretenden Dissipationsenergie (pos.) die nach außen abgegebene Arbeit W_{g12} (Gl. 2.2) kleiner als bei der Expansion ohne Dissipation.

Nutzarbeit an der Kolbenstange. Die Volumenänderungsarbeit wird zwischen dem System und dem Kolben (**B 2.1**) übertragen. Wird durch die Volumenänderung auch das Volumen einer unter konstantem Druck befindlichen Umgebung (z. B. auf der Erde) geändert, so ist die *Verschiebearbeit* W_{u12} zu berücksichtigen.

$$W_{u12} = -p_b (V_2 - V_1) \quad (\text{Gl 2.4})$$

Die Volumenänderungsarbeit W_{v12} teilt sich auf diese Verschiebearbeit und die an der Kolbenstange übertragenen Nutzarbeit W_{n12} auf (**B 2.3**):

$$W_{v12} = W_{u12} + W_{n12}$$



B 2.3 Nutzarbeit an der Kolbenstange W_{n12} und Verschiebearbeit W_{u12} am geschlossenen System

Die *Nutzarbeit an der Kolbenstange* ist:

$$W_{n12} = W_{v12} - W_{u12} \quad \text{geschlossenes System} \quad (\text{Gl 2.5})$$

$$W_{n12} = -\int_1^2 p \, dV + p_b (V_2 - V_1)$$

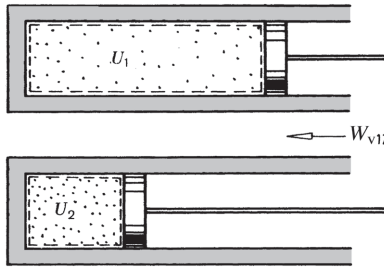
$$W_{n12} = -\int_1^2 (p - p_b) \, dV \quad \text{geschlossenes System} \quad (\text{Gl 2.6})$$

In W_{n12} ist äußere Irreversibilität nicht berücksichtigt. Diese wird durch den mechanischen Wirkungsgrad erfasst, den wir bei den Maschinen einführen (z. B. Abschn. 4.1.3 und 4.5.2).

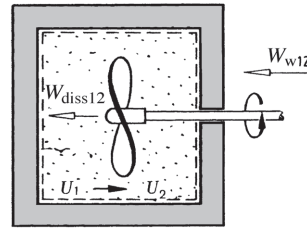
2.3 Innere Energie

Wir führen einem adiabat eingeschlossenen Gas Volumenänderungsarbeit W_{v12} zu (**B 2.4a**). Da Energie nicht verloren gehen kann, muss die als Volumenänderungsarbeit zugeführte Energie im Gas gespeichert werden.

Eine gleich große Energie wird einem ähnlichen System (**B 2.4b**) durch einen Rührer zugeführt (Wellenarbeit W_{w12}).¹⁾ Dieser Prozess ist irreversibel, die Arbeit dissipiert im System, es handelt sich um Dissipationsenergie W_{diss12} . Dann wird die gleiche Energie wie vorher im Gas gespeichert, da vom System keinerlei Energie an die Umgebung abgegeben wird.



a) Volumenänderungsarbeit



b) Dissipation von Wellenarbeit

B 2.4 Arbeitszufuhr an ein adiabates, geschlossenes System

Die in einem System gespeicherte Energie nennen wir *innere Energie* U . Wird einem adiabaten, geschlossenen System Arbeit zugeführt, so muss die innere Energie steigen:

$$\int_1^2 dW_g = \int_1^2 dU$$

$$W_{g12} = U_2 - U_1 \quad \text{adiabates, geschlossenes System}$$

(Gl 2.7)

Wir erkennen: Es tritt trotz verschiedener Arten von zugeführter Arbeit die gleiche Erhöhung der inneren Energie des Systems ein. Auch bei Verteilung der Arbeit auf gleichzeitig auftretende Kompression und Dissipation würde die Erhöhung der inneren Energie gleich groß sein. Wir folgern daraus: Die einem adiabaten, geschlossenen System zugeführte Arbeit erhöht die innere Energie U des Systems. Da diese Erhöhung nur von dem Betrag, nicht von der Art der Arbeit abhängt, ist die *innere Energie eine Zustandsgröße*. Sie gehört zur Gruppe der *kalorischen Zustandsgrößen*.

Die *innere Energie* U stellt den *Energievorrat eines Systems* dar.²⁾

Bezogen auf die Masse ergibt sich die *spezifische innere Energie* $u = \frac{U}{m}$ und die *spezifische Arbeit*

$$w_{g12} = \frac{W_{g12}}{m} = u_2 - u_1 \quad \text{adiabates, geschlossenes System}$$

Der absolute Wert der inneren Energie ist hoch, er umfasst z. B. auch die in den Elektronen und Atomkernen gespeicherte Energie. Dieser Wert ist für technische Berechnungen bedeutungslos, es genügt daher, mit Energiedifferenzen zu rechnen oder einen Nullpunkt zu vereinbaren.

¹⁾ Definition s. Gl 2.23. Die Dissipation von Wellenarbeit ist natürlich nicht sinnvoll. Sie wird hier lediglich zur Veranschaulichung der Begriffe herangezogen.

²⁾ Ferner gehören potenzielle und kinetische Energie zur Energie eines Systems. Wir beschränken unsere Betrachtungen aber auf *ruhende* Systeme, in denen sich kinetische und potenzielle Energie nicht ändern.

Höhere innere Energie wirkt sich als vergrößerte kinetische und potenzielle Energie der Moleküle des Systems aus. Gehen in dem untersuchten System chemische Umwandlungen vor sich, so ist die chemisch gebundene Energie als Teil der inneren Energie zu berücksichtigen.

Beispiel 2.1: In einem adiabaten Zylinder von 500 l (**B 2.5**) befindet sich ein Gas, dessen Druck durch einen konstant belasteten Kolben auf 200 kPa (abs.) gehalten wird. Dem Gas wird die Wellenarbeit $W_{w12} = 0,2 \text{ kWh}$ zugeführt, die im Inneren vollständig dissipiert, wobei sich die Temperatur von 18°C auf 600°C erhöht. Der Umgebungsdruck beträgt 98 kPa. Die Volumenänderung soll quasistatisch verlaufen. Für die Berechnung der Volumenvergrößerung soll näherungsweise ideales Gas zugrunde gelegt werden.

- Wie groß ist die abgeführte Volumenänderungsarbeit?
- Um welchen Wert ändert sich die innere Energie des Systems?
- Wie groß ist die an die Umgebung abgegebene Verschiebearbeit?
- Wie groß ist die an die Kolbenstange abgegebene Nutzarbeit?

Lösung:

Zu a): Volumenänderungsarbeit (Gl 2.1) bei konstantem Druck:

$$W_{v12} = -\int_1^2 p \, dV = -p (V_2 - V_1)$$

Hierin V_2 (Gl 1.18):

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 500 \text{ l} \frac{873,15 \text{ K}}{291,15 \text{ K}} = 1500 \text{ l}$$

$$W_{v12} = -200 \cdot 10^3 \text{ Pa} \frac{\text{N}}{\text{Pa m}^2} (1500 - 500) \text{ l} \frac{\text{m}^3}{10^3 \text{ l}} \frac{\text{kJ}}{10^3 \text{ N m}}$$

$$W_{v12} = \underline{-200 \text{ kJ}} \quad (\text{neg., d. h. abgeführt})$$

Zu b): Für adiabate Systeme gilt Gl 2.7, in die wir Gl 2.2 einführen:

$$U_2 - U_1 = W_{g12} = W_{v12} + W_{\text{diss}12} = -200 \text{ kJ} + 0,2 \text{ kWh} \cdot 3,6 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}$$

$$U_2 - U_1 = \underline{+520 \text{ kJ}} \quad (\text{pos., d. h., die innere Energie steigt})$$

Zu c): Verschiebearbeit (Gl 2.4)

$$W_{u12} = -p_b (V_2 - V_1)$$

$$W_{u12} = -98 \cdot 10^3 \text{ Pa} \frac{\text{N}}{\text{Pa m}^2} (1500 - 500) \text{ l} \frac{\text{m}^3}{10^3 \text{ l}} \frac{\text{kJ}}{10^3 \text{ N m}}$$

$$W_{u12} = \underline{-98 \text{ kJ}} \quad (\text{neg., d. h. abgeführt})$$

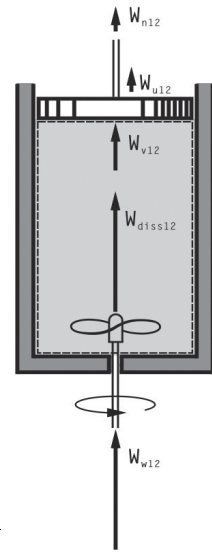
Zu d): Nutzarbeit an der Kolbenstange (Gl 2.5):

$$W_{n12} = W_{v12} - W_{u12} = -200 \text{ kJ} - (-98 \text{ kJ})$$

$$W_{n12} = \underline{-102 \text{ kJ}} \quad (\text{neg., d. h. abgeführt})$$

Man erkennt die mehrfache Energieumwandlung: Wellenarbeit ($W_{w12} = 720 \text{ kJ}$) wird in Dissipationsenergie ($W_{\text{diss}12} = 720 \text{ kJ}$), diese in erhöhte innere Energie ($U_2 - U_1 = 520 \text{ kJ}$) und Volumenänderungsarbeit ($|W_{v12}| = 200 \text{ kJ}$), letztere in Verschiebearbeit ($|W_{u12}| = 98 \text{ kJ}$) und Nutzarbeit an der Kolbenstange ($|W_{n12}| = 102 \text{ kJ}$) umgewandelt.

Man erkennt ferner, dass die im System dissipierte Energie ($W_{\text{diss}12} = 720 \text{ kJ}$) nicht völlig wertlos



B 2.5 Dissipation von Wellenarbeit in einem adiabaten, geschlossenen System

Bei Unterschreitung des Taupunktes kann es an den Heizflächen und Abgasanlagen zur Korrosion kommen, beim Wasserdampftaupunkt durch die Anwesenheit des Kohlenstoffdioxids, beim Schwefelsäuretaupunkt durch die anfallende Schwefelsäure. Wird eine Senkung der Abgastemperatur bis unter den Taupunkt angestrebt, um auch die Kondensationsenthalpie des Wasserdampfes im Abgas zu nutzen, so sind die in Abschn. 9.5.2 erwähnten kondensatbeständigen Konstruktionen erforderlich.

Beispiel 9.10: Welchen Wert hat die Taupunkttemperatur des Abgases bei der Verbrennung des Erdgases unter den Voraussetzungen des Beispiels 9.8? Der Abgasdruck soll gleich dem Luftdruck der Umgebung sein.

Lösung:

Aus Beisp. 9.4 übernehmen wir: $p_{fa} = 1,01 \text{ bar}$

Aus Beisp. 9.8 übernehmen wir:

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = 1,943 \frac{\text{kmol H}_2\text{O}}{\text{kmol B}} \quad v_{\text{f}} = 11,525 \frac{\text{kmol f A}}{\text{kmol B}}$$

Der Partialdruck des Wasserdampfes im Abgas ist (Gl 9.51):

$$p_{\text{d}}^* = p_{fa} \frac{v_{\text{H}_2\text{O}}}{v_{\text{f}}} = 1,01 \text{ bar} \frac{1,943}{11,525} = 0,17 \text{ bar}$$

Für $p_{\text{d}}^* = p_s$ ist nach T 6.1 (näherungsweise linear interpoliert) die Sättigungstemperatur:

$$t_{\tau} = \underline{56,6 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Aufgabe 9.10: Propan C_3H_8 (trocken) wird mit feuchter Luft von $25 \text{ } ^\circ\text{C}$, 990 mbar, 80 % relativer Feuchte bei 40 % Luftüberschuss vollständig verbrannt. Ideales Gasverhalten angenommen; Abgasdruck = Umgebungsdruck.

Welchen Wert hat der Taupunkt, abgerundet auf ganze Zahlen?

9.7 Emissionen aus Verbrennungsanlagen

9.7.1 Einführung

Emissionsbegrenzung. Abgase aus Verbrennungsanlagen enthalten neben umweltneutralen Gasen, wie z. B. N_2 und O_2 , auch klimawirksame Gase, wie z. B. CO_2 , sowie Schadstoffe, wie z. B. SO_2 , NO_x und – im Staub – Schwermetalle.

Schadstoffemissionen. *Schadstoffe* können brennstoffabhängig sein, wie z. B. SO_2 , oder prozessabhängig, wie z. B. CO .

Vorrang bei der Emissionsminderung haben *Primärmaßnahmen*, die die prozessabhängige Schadstoffbildung verringern. Durch *Sekundärmaßnahmen* werden entstandene Schadstoffe reduziert. Bei Großanlagen sind in der Regel *Rauchgasreinigungsanlagen* (RRA) erforderlich zur

Staubabscheidung: Absetzkammern, Zyklonabscheider, Elektrofilter,
Entschwefelung: REA (Rauchgasentschwefelungsanlage),
Entstickung: DeNO_x (Entstickungsanlage).

In vielen Ländern sind für Emissionen aus Verbrennungsanlagen Emissionsgrenzwerte vorgegeben, für Großfeuerungsanlagen in Deutschland z. B. mit der 13. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) vom 02. 05. 2013. **T 9.4** enthält daraus auszugsweise

Grenzwerte für Anlagen mit $\dot{Q}_b > 300$ MW. Die Werte sind als Tagesmittelwerte einzuhalten, Halbstundenmittelwerte dürfen das Doppelte nicht überschreiten. Die Werte sind in $\text{mg/m}^3 \text{ tA}$ (Normzustand) für einen vereinbarten O_2 -Gehalt im trockenen Abgas angegeben.

Staub kann durch geeignete Filter, CO durch geeignete Prozessführung verringert werden. Auf die nach Menge und Wirksamkeit besonders schädlichen Abgaskomponenten SO_2 und NO_x gehen wir in den Abschnitten 9.7.2 und 9.7.3 näher ein.

T 9.4 Emissionsgrenzwerte (Tagesmittelwerte) für Neuanlagen mit $\dot{Q}_b > 300$ MW in Deutschland *)

Schadstoff **) in $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3 \text{ tA}}$	Staub	Schwefel-oxide SO_2	Stickstoff-oxide NO_2	Kohlenstoff-monoxid CO	O_2^a -Bezugs-wert Vol.-%
Fester Brennstoff, außer Biobrennstoff allgemeine Grenzwerte abweichende Grenzwerte – Braunkohlenstaubfeuerung – Wirbelschichtfeuerung	10	150 200	150 200	200	6
Biobrennstoff (fest) allgemeine Grenzwerte abweichende Grenzwerte bei Holz	10	150	150	250 200	6
Flüssiger Brennstoff	10	150	100	80	3
Erdgas	5	35	100	50	3

*) Nach der Verordnung über Großfeuerungsanlagen (13. BImSchV vom 02. 05. 2013). In anderen Industrieländern sind vergleichbare Grenzwerte festgelegt.

**) Die Grenzwerte sind auf trockenes Abgas mit dem jeweils genannten Sauerstoffgehalt bezogen. Messwerte müssen darauf umgerechnet werden. In SO_2 bzw. NO_2 sind die als SO_3 bzw. NO vorliegenden Werte – nach Umrechnung – einzubeziehen.

Kohlenstoffdioxidemission. Als *klimawirksamer Abgasbestandteil* verursacht vor allem CO_2 den *anthropogenen Treibhauseffekt*¹⁾ (Abschn. 5.5.2). Eine Reduzierung der CO_2 -Emissionen kann vor allem durch sparsame Energieverwendung, durch vermehrten Einsatz regenerativer Energie, durch Kernenergie oder auch durch Verwendung von Brennstoffen mit geringem Kohlenstoffanteil – wie z. B. Erdgas – erfolgen, vgl. **T 9.5**.

T 9.5 CO_2 -Bildung verschiedener Brennstoffe; heizwertbezogene Emissionsfaktoren [27]

Emissionsfaktor	Braunkohle	Steinkohle	Heizöl EL	Erdgas
$E_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{Q_b}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{kW h}}$	0,40	0,33	0,26	0,20

Auch die Abtrennung von CO_2 aus dem Abgas (Abschn. 9.7.2) verringert den Treibhauseffekt. CO_2 -Abtrennung wurde in Pilotanlagen erprobt, großtechnisch aber nicht eingesetzt; Kernenergie wird weltweit vermehrt, in mehreren europäischen Ländern

¹⁾ Der Treibhauseffekt wird vor allem durch H_2O und CO_2 in der Atmosphäre bewirkt. Deren Konzentration hat sich in den vergangenen ca. 150 Jahren beim H_2O mit einer Verweilzeit von ca. 10 Tagen praktisch nicht (1 ... 4 Vol.-%), beim CO_2 mit einer Verweilzeit von 50 ... 100 Jahren merklich (von 0,03 auf 0,04 Vol.-%) verändert. Daher wird beim *anthropogenen Treibhauseffekt*, der dem *natürlichen Treibhauseffekt* überlagert ist, H_2O i. Allg. nicht berücksichtigt. Klimaforscher sind allerdings der Auffassung, dass H_2O längerfristig eine größere Bedeutung beim globalen Temperaturanstieg haben wird [vgl. z. B. 11].

jedoch nur noch übergangsweise verwendet, in Deutschland z. B. bis 2022 (Stand 2017).

Unter der Bezeichnung *Kyoto-Protokoll* ist 1997 ein erstes internationales Abkommen zur Reduzierung der CO₂- und weiterer klimawirksamer Emissionen verabschiedet worden. Ein Folgeabkommen wurde 2015 als Pariser Klimaabkommen von über 170 Ländern beschlossen. Es begrenzt die globale Erwärmung der erdnahen Atmosphäre auf deutlich unter 2 K, möglichst 1,5 K, gegenüber der Temperatur vor der Industrialisierung. Das Abkommen ist im November 2016 in Kraft getreten. Es ist rechtlich weniger bindend als das Kyoto-Protokoll.

Als Anreiz zur Minderung der CO₂-Emissionen wurde 2003 die EU-Richtlinie zum *Emissionshandel* verabschiedet, nach der die Industrienationen nicht genutzte Emissionsrechte kaufen oder verkaufen können. In Deutschland wurde der Emissionshandel 2005 eingeführt.

Messwerte und deren Bewertung. Abgasanalysen werden bei unterschiedlichen Betriebsverhältnissen durchgeführt. Die Messwerte müssen daher auf einen einheitlichen Bezugszustand umgerechnet werden. Für Feststoff-Großfeuerungen z. B. ist $O_{2\text{Bez}}^a = 6 \text{ Vol.-%}$ festgelegt (T 9.4). In anderen Fällen gelten andere Bezugszustände, z. B. gilt für Holz-Kleinfeuerungen $O_{2\text{Bez}}^a = 13 \text{ %}$.

In ppm oder in Vol.-% vorliegende Messwerte müssen zur Bewertung in mg/m³ t A (T 9.4) umgerechnet werden.¹⁾

NO ist als NO₂ zu bewerten. Falls NO getrennt gemessen wird, ist es entsprechend umzurechnen. Das Gleiche gilt für SO₃, das als SO₂ zu bewerten ist.

Umrechnung des Messwertes auf den Bezugssauerstoffgehalt. Wir leiten die Umrechnung für CO ab, sie gilt in gleicher Weise auch für andere Emissionen. Der Index „gem“ kennzeichnet den gemessenen, der Index „Bez“ den Bezugs- bzw. zu bewertenden Wert.

Entsprechend Gl 9.16 gilt

$$v_{\text{CO}} = v_{\text{t gem}}^a CO_{\text{gem}}^a = v_{\text{t Bez}}^a CO_{\text{Bez}}^a$$

$$CO_{\text{Bez}}^a = CO_{\text{gem}}^a \frac{v_{\text{t gem}}^a}{v_{\text{t Bez}}^a}$$

Wir führen $v_{\text{t}} = v_{\text{min t}} + (\lambda - 1) l_{\text{min}}$ (Gl 9.15b) und $v_{\text{min t}} \approx l_{\text{min}}$ (wie bei Gl 9.32c und Gl 9.34) ein

$$CO_{\text{Bez}}^a = CO_{\text{gem}}^a \frac{v_{\text{min t}} + \lambda_{\text{gem}} l_{\text{min}} - l_{\text{min}}}{v_{\text{min t}} + \lambda_{\text{Bez}} l_{\text{min}} - l_{\text{min}}} \approx CO_{\text{gem}}^a \frac{\lambda_{\text{gem}}}{\lambda_{\text{Bez}}}$$

sowie λ nach Gl 9.34 und erhalten bei üblichem CO-Gehalt (z. B. nach T 9.4):

$$CO_{\text{Bez}}^a \approx CO_{\text{gem}}^a \frac{0,21 - O_{2\text{Bez}}^a}{0,21 - O_{2\text{gem}}^a} \quad (\text{Gl 9.52})$$

Umrechnung von Raumanteilen in die Massenkonzentration. Aus Gl 6.23b ergibt sich der Zusammenhang zwischen einem Raumanteil r_a und dessen Massenkonzentration

¹⁾ Kleine Stoffmengenanteile werden gern in ppm (parts per million), kleine Raumanteile in vpm (volume parts per million) angegeben. 1 ppm bzw. 1 vpm sind 10⁻⁶ Anteile. Beim idealen Gas ist 1 ppm = 1 vpm.

(Partialdichte): $\varrho_a^* = \varrho_a r_a$. Für CO z. B. gilt (mit $r_{\text{CO}} = CO^a$):

$$\varrho_{\text{CO}}^* = \varrho_{\text{nCO}} CO^a \quad (\text{Gl 9.53})$$

Normdichten s. T 1.5; weitere Werte: $\varrho_{\text{nNO}_2} = 2,05 \text{ kg/m}^3$, $\varrho_{\text{nNO}} = 1,34 \text{ kg/m}^3$.

Für andere Schadstoffe als CO gelten die Gl'n 9.52 und 9.53 entsprechend.

Umrechnung der Massenkonzentration ϱ_{NO}^ in den zu bewertenden Wert $\varrho_{\text{NO}_2}^*$.* Die Umrechnung kann mittels der molaren Massen oder der Dichten erfolgen:

$$\varrho_{\text{NO}_2}^* = \frac{M_{\text{NO}_2}}{M_{\text{NO}}} \varrho_{\text{NO}}^* = \frac{\varrho_{\text{nNO}_2}}{\varrho_{\text{nNO}}} \varrho_{\text{NO}}^* \quad (\text{Gl 9.54 a})$$

Mit den o. g. Werten für die Dichten für NO_2 und NO ergibt sich:

$$\varrho_{\text{NO}_2}^* = 1,53 \varrho_{\text{NO}}^* \quad (\text{Gl 9.54 b})$$

Bei den Raumanteilen (bzw. Vol.-% oder ppm) erübrigt sich die Umrechnung, da 1 NO zu 1 NO_2 wird und sich somit, bei Annahme idealen Gasverhaltens, das Volumen nicht ändert. Die Umrechnung von SO_3 in SO_2 erfolgt entsprechend.

Umrechnung in Emissionsfaktoren. Als Emissionsfaktoren bezeichnet man die auf die Brennstoffenergie bezogene Schadstoffmasse, z. B. für CO (für andere Schadstoffe entsprechend):

$$E_{\text{CO}} = \frac{m_{\text{CO}}}{Q_{\text{B}}} \quad (\text{Gl 9.55 a})$$

Mit der Brennstoffenergie $Q_{\text{B}} = m_{\text{B}} H_{\text{u}}$ und der Schadstoffmasse $m_{\text{CO}} = m_{\text{B}} v_{\text{tn}}^a \varrho_{\text{CO}}^*$ erhält man:

$$E_{\text{CO}} = \varrho_{\text{CO}}^* \frac{v_{\text{tn}}^a}{H_{\text{u}}} \quad \text{heizwertbezogener Emissionsfaktor} \quad (\text{Gl 9.55 b})$$

Emissionsfaktoren werden bevorzugt in $\text{mg}/(\text{kW h})$ angegeben. Sie werden manchmal auch auf die Nutzenergie bezogen. Bei Kraftfahrzeugen werden auch die auf die Fahrstrecke bezogenen Schadstoffmengen (z. B. in g/km) Emissionsfaktoren genannt.

Beispiel 9.11: Bei einer Braunkohlen-Staubfeuerung (trockener Ascheabzug) mit $>300 \text{ MW}$ Brennstoffleistung werden 153 ppm NO und 5 ppm NO_2 bei 4 Vol.-% O_2 im trockenen Abgas gemessen.

Wird der Emissionsgrenzwert nach T 9.4 eingehalten?

Lösung:

Die gesamte Stickstoffoxidmenge ist

$$NO_{\text{x}}^a = NO_2^a + NO_{(\text{als NO}_2)}^a = (5 + 153) \text{ ppm} = 158 \text{ ppm}$$

Als NO_x -Anteil im Abgas ausgedrückt: $NO_{\text{x}}^a = 158 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3 \text{NO}_2}{\text{m}^3 \text{t A}}$

Umgerechnet in die Massenkonzentration in $\text{mg NO}_2/\text{m}^3 \text{t A}$ ergibt sich entspr. Gl 9.53:

$$\varrho_{\text{NO}_x}^* = \varrho_{\text{nNO}_2} NO_{\text{x}}^a = 2,05 \frac{\text{kg NO}_2}{\text{m}^3 \text{NO}_2} 158 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3 \text{NO}_2}{\text{m}^3 \text{t A}} 10^6 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = 324 \frac{\text{mg NO}_2}{\text{m}^3 \text{t A}}$$

Dieser Wert gilt als der gemessene NO_x -Wert. Er muss vom Messzustand mit $O_2^a = 0,04 = 4 \text{ Vol.-%}$ auf den Bezugzustand (T 9.5) mit $O_2^a = 0,06 = 6 \text{ Vol.-%}$ entspr. Gl 9.52 umgerechnet werden:

$$\varrho_{\text{NO}_x \text{ Bez}}^* = \varrho_{\text{NO}_x \text{ gem}}^* \frac{0,21 - O_{2 \text{ Bez}}^a}{0,21 - O_{2 \text{ gem}}^a} = 324 \frac{\text{mg NO}_2}{\text{m}^3 \text{t A}} \frac{0,21 - 0,06}{0,21 - 0,04} = 286 \frac{\text{mg NO}_2}{\text{m}^3 \text{t A}}$$

Der Emissionsgrenzwert $\varrho_{\text{NO}_x, \text{zul}}^* = 200 \text{ mg NO}_2/\text{m}^3 \text{ t A}$ (T 9.4) wird *überschritten*.

Aufgabe 9.11: Welcher Messwert ist bei der Feuerung nach Beispiel 9.11 für SO_2 in $\text{mg}/\text{m}^3 \text{ t A}$ und in ppm zulässig?

Aufgabe 9.12: Bei der Verbrennung des Heizöls nach Beispiel 9.2 wird im Abgas $100 \text{ mg NO}_2/\text{m}^3 \text{ t A}$ gemessen. Heizwert des Heizöls $11,5 \text{ kW h/kg}$.

Wie hoch ist der heizwertbezogene Emissionsfaktor in $\text{mg NO}_2/(\text{kW h})$?

9.7.2 Minderung der Schwefeloxidemission

Minderungsmöglichkeiten. Der im Brennstoff enthaltene Schwefel verbrennt zu SO_2 (Gl 9.6e), ein geringer Teil auch zu SO_3 . Die entstehende Schwefeloxidmenge ist vom Schwefelgehalt des Brennstoffes abhängig. Übliche bzw. festgelegte Werte:¹⁾

Stein- und Braunkohle	ca.	1	Massen-%
Heizöl S	max.	1	Massen-%
Heizöl EL	max.	0,1	Massen-%
Heizöl EL schwefelarm	max.	50	$\text{mg/kg} = 0,005 \text{ Massen-\%}$
Erdgas	max.	30	$\text{mg}/\text{m}^3 (V_n)$ (Jahresmittelwert)

Erdgas, z. T. auch Heizöl, werden *vor der Verbrennung* entschwefelt.

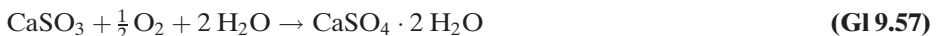
Schwefeleinbindung *während der Verbrennung* ist bei Staub- und Wirbelschichtfeuerungen möglich, indem z. B. Kalkstein (CaCO_3) zugegeben wird, der zu Gips umgesetzt wird.

Bei Großfeuerungsanlagen erfolgt die Entschwefelung in der Regel *nach der Verbrennung* in einer *Rauchgasentschwefelungsanlage* (REA), nach vorheriger Entstaubung (**B 9.9**). Es wurden verschiedene Verfahren entwickelt, Emissionsgrenzwerte s. T 9.4.

Verfahren. Unter den möglichen Verfahren hat sich für große Kohlekraftwerke das *Nasswaschverfahren mit Calciumcarbonat* CaCO_3 (Kalkstein) durchgesetzt, nach dem z. B. in Deutschland ca. 95 % aller Anlagen arbeiten. CaCO_3 wird in Wasser angemischt, teilweise wird auch Calciumoxid CaO (gebrannter Kalk) eingesetzt. Mit dieser Suspension wird in einem Waschturm das Abgas besprüht und das gasförmige SO_2 gelöst, das anschließend nach folgendem vereinfachtem Reaktionsschema zu Calciumsulfat CaSO_3 reagiert:



Das von SO_2 gereinigte Abgas verlässt den Waschturm über einen Tropfenabscheider. Das CaSO_3 wird im unteren Teil des Waschturms durch Einblasen von Luft oxidiert:

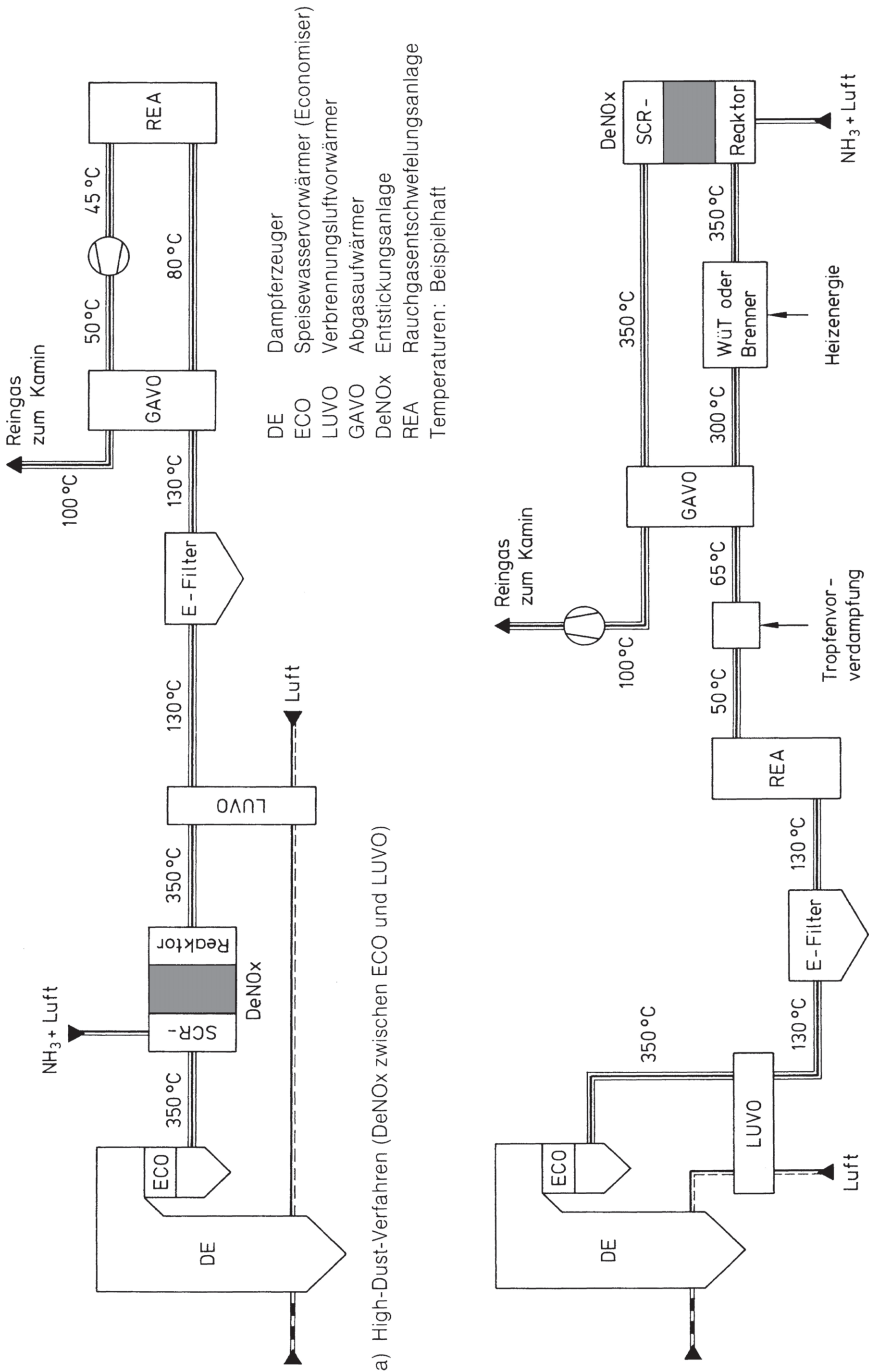


Es entsteht Calciumsulfat-Dihydrat (Gips), das bis auf ca. 10 % Restfeuchte entwässert und rieselfähig oder brikettiert abgegeben wird. Der REA-Gips hat den Naturgips in der Baustoffindustrie fast vollständig ersetzt.

Aus 1 kmol SO_2 (64 kg) wird 1 kmol $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (172 kg); 1 kg SO_2 wird somit in 2,69 kg $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (Gips) umgewandelt.

Das Waschadditiv wird verbraucht, das Verfahren ist somit nicht regenerativ. Es werden Entschwefelungsgrade um 95 % erreicht.

¹⁾ Werte für Kohle [17], für Heizöl nach 3. BImSchV vom 24. 06. 2002, für Erdgas [11].



b) Low-Dust-Verfahren (DeNOx nach REA)

B 9.9 Rauchgasreinigungsanlage (RRA)

Auf andere Verfahren, wie z. B. die *Trockenentschwefelung durch Aktivkoks*, gehen wir nicht näher ein; der erreichte Entschwefelungsgrad beträgt ca. 80 %. Bei dem *Trocken-additiv-Verfahren* (CaCO_3 -Einblasen in die Feuerung) werden Entschwefelungsgrade um 50 %, bei dem *Nasswaschverfahren mit Natriumsulfid* Na_2SO_3 (Wellman-Lord-Verfahren) werden >95 % erreicht.

Beispiel 9.12: In einem Kraftwerk mit 2000 MW Feuerungswärmeleistung werden 240 t/h Steinkohle mit 1 Massen-% Schwefel in einer Schmelzfeuerung eingesetzt. Die Abgasmenge beträgt $9,0 \text{ m}^3 \text{ t A/kg B}$ bei dem Bezugssauerstoffgehalt von 6 Vol.-% O_2 im t Abgas. Das Abgas soll durch Nasswäsche mit Calciumcarbonat bis zu dem nach der 13. BImSchV zulässigen Grenzwert entschwefelt werden. Schwefeleinbindung in der Asche soll vernachlässigt werden.

Es sind zu ermitteln:

- die SO_2 -Konzentration im trockenen Abgas in $\text{mg SO}_2/\text{m}^3 \text{ t A}$,
- der stündlich zu entfernende SO_2 -Massenstrom,
- die stündlich anfallende Gipsmasse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$).

Lösung:

Zu a): Mit dem Brennstoff zugeführter Schwefelmassenstrom:

$$\dot{m}_s = s \dot{m}_b = 0,01 \cdot 240 \frac{\text{t}}{\text{h}} = 2,4 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

Aus 1 kg S entstehen 2 kg SO_2 (Gl 9.6e):

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 2 \dot{m}_s = 2 \cdot 2,4 \frac{\text{t}}{\text{h}} = 4,8 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

Bezogen auf den trockenen Abgasvolumenstrom

$$\dot{V}_t = \dot{m}_b v_t = 240 \, 000 \frac{\text{kg B}}{\text{h}} 9,0 \frac{\text{m}^3 \text{ t A}}{\text{kg B}} = 2,16 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^3 \text{ t A}}{\text{h}}$$

ergibt sich die SO_2 -Konzentration im trockenen Abgas:

$$q_{\text{SO}_2}^* = \frac{\dot{m}_{\text{SO}_2}}{\dot{V}_t} = \frac{4,8 \cdot 10^9 \text{ mg SO}_2 \text{ h}}{2,16 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ t A}} = 2 \, 222 \frac{\text{mg SO}_2}{\text{m}^3 \text{ t A}}$$

Zu b): Mit $q_{\text{SO}_2 \text{ zul}}^* = 150 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3 \text{ t A}$ (T 9.4) ergibt sich die zu entfernende SO_2 -Konzentration:

$$\Delta q_{\text{SO}_2}^* = q_{\text{SO}_2}^* - q_{\text{SO}_2 \text{ zul}}^* = (2 \, 222 - 150) \frac{\text{mg SO}_2}{\text{m}^3 \text{ t A}} = 2 \, 072 \frac{\text{mg SO}_2}{\text{m}^3 \text{ t A}}$$

Daraus ermitteln wir den zu entfernenden SO_2 -Massenstrom:

$$\Delta \dot{m}_{\text{SO}_2} = \dot{V}_t \Delta q_{\text{SO}_2}^* = 2,16 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^3 \text{ t A}}{\text{h}} 2 \, 072 \frac{\text{mg SO}_2}{\text{m}^3 \text{ t A}} \frac{\text{t}}{10^9 \text{ mg}} = 4,48 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

Zu c): Nach Gl 9.57 wird 1 kg SO_2 in 2,69 kg Gips umgewandelt. Somit entsteht stündlich die Gipsmasse (Calciumsulfat-Dihydrat)

$$\dot{m}_{\text{Gips}} = 2,69 \Delta \dot{m}_{\text{SO}_2} = 2,69 \cdot 4,48 \frac{\text{t}}{\text{h}} = 12,0 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

9.7.3 Minderung der Stickstoffoxidemission

Entstehung von Stickstoffoxiden. Stickstoffoxid NO_x im Abgas von Feuerungen besteht zu ca. 90...95 % aus Stickstoffmonoxid NO und zu ca. 5...10 % aus Stickstoffdioxid NO_2 . In der Atmosphäre wandelt sich NO allmählich zu NO_2 um, das als der eigentliche Schadstoff betrachtet wird. Bei der Emissionsbeurteilung wird daher die NO -Konzentration

Sachwortverzeichnis

- Abgas 424, 435, 450
 –, Kondensation 450
 Abgas (s. auch Verbrennungs-
 gas) 435–436
 –, Analyse 435–436
 –, –, ASU 436
 –, –, brennbare Rückstände
 436
 –, –, Euronorm 436
 Abgasmenge 421, 436
 Abgasrückführung 462
 Abgastaupunkt 454
 Abgasverlust 435, 449, 451
 Abkühlgrad (Rückkühlwerk)
 331
 Absorptionskoeffizient
 (Strahlung) 397
 Ackeret 186
 Ackeret-Keller-Prozess 186
 Aggregatzustandsänderung 223
 Amagat 295–296, 298, 304
 –, Gesetz 295, 298, 304
 Ammoniak 34–35, 279
 Ampere 20–21
 Änderung der Entropie 92,
 95, 101, 107, 112
 Anergie 152–154, 157–160,
 162
 –, Definition 153
 –, Enthalpie 154
 –, Fluid 153
 –, geschlossenes System 157
 –, innere Energie 157
 –, spezifische 153
 –, Vermehrung 162
 –, Wärme 158–160
 Anlage 170
 Anlagenart 189
 –, Gasturbinenanlage 189
 Anlagenwirkungsgrad
 (mechanischer) 193
 Anzapfvorwärmung 255–257
 –, Clausius-Rankine-Prozess
 256
 –, Dampfkraftanlage 256
 –, Dampfturbinenanlage 256
 Arbeit 19, 52–56, 287, 475,
 477–479
 –, Arbeitsmehraufwand
 (Verdichter) 191
 –, Arbeitsverlust (Turbine)
 191
 –, Ausschubarbeit 61, 211
 –, Brennstoffzelle 484–485
 –, Dissipationsarbeit 54
 –, Einschubarbeit 61, 211
 –, geschlossenes System 52
 –, indizierte 175–176
 –, innere 173, 176
 –, Kältemaschine 138–139,
 287
 –, Kreisprozess 122
 –, Kupplungsarbeit 176, 193,
 220
 –, –, Gasturbinenanlage 193
 –, –, Turbine 193
 –, –, Verdichter 193
 –, –, Wärmekraftanlage 176
 –, Nutzarbeit 55, 124, 173,
 176, 181, 189, 195, 201, 260
 –, –, Kolbenstange 55
 –, –, Kreisprozess 124, 173,
 176, 181, 189, 195, 201,
 260
 –, offenes System 60–62
 –, Reaktionsarbeit 475
 –, Reibungsarbeit 54
 –, reversible 53, 60, 63
 –, technische 60–62, 90–92,
 342–343
 –, Verschiebearbeit 55
 –, Volumenänderungsarbeit
 52–53
 –, Vorzeichen 53
 –, Wärmekraftmaschine 126,
 247
 –, Wärmepumpe 137, 139, 285
 –, Wellenarbeit 56, 65
 Arbeit, Kreisprozess 122–124
 Arbeitersparnis 212
 –, Zwischenkühlung 212
 Arbeitsfähigkeit (Fluid) 153
 Arbeitsfluid 279
 –, organisches 279
 Arbeitsmaschine (Def.) 90
 Arbeitsprinzip 177, 247
 –, Dampfkraftanlage 247
 –, Gasturbinenanlage 177
 –, Heißgasmotor 197
 Arbeitsprozess 90, 341–342
 Arbeitsverhältnis 172, 180,
 187, 199, 203, 206, 250
 –, Clausius-Rankine-Prozess
 250
 –, Diesel-Prozess 206
 –, Ericsson-Prozess 187
 –, Joule-Prozess 180
 –, Otto-Prozess 203
 –, Stirling-Prozess 199
 Argon 34–35
 Asche 436
 Aufheizgrad 219
 –, Kolbenverdichter 219
 Ausbrennbelastung
 (Verdampfer) 391
 Ausdehnung, thermische 40,
 43–44
 –, fester Körper 40
 –, Flüssigkeit 43
 –, Gas 44
 Ausdehnungskoeffizient
 40–42, 44
 –, (Tafel) 41–42
 –, Längenausdehnungs-
 koeffizient 40
 –, Volumenausdehnungs-
 koeffizient, thermischer 42
 Ausgleich 145
 –, Prozess 145
 Ausgleichsprozess (Def.) 49
 Ausgleichstemperatur 146
 Ausgleichsvorgang 145
 Ausnutzungsgrad 269
 –, GUD 269
 Ausschubarbeit 61
 Ausstrahlung 393–396
 –, farbige Körper 395
 –, grauer Körper 395
 –, schwarzer Körper 394
 –, spektrale spezifische
 394–395
 –, spezifische 394, 396
 Avogadro 37
 Avogadro-Konstante 36, 39,
 524
 Baehr 82
 Barometer 26
 Basiseinheit 20
 Basisgröße 20
 Befeuchten (Luft) 326
 Behälter 144
 –, Füllung 144
 Beladung 293–294, 309, 315,
 423, 430
 –, ideales Gas 309

- , Wasserbeladung 423
- Berechnung 190
- , wirklicher Prozess 190
- Berechnungsgleichung 382
- , Wärmeübergang (Tafel) 382
- Bernoulli 349
- Bernoulli-Gleichung 349
- Bestrahlung 397
- Bewertung
 - , Kältemaschine 139, 287
 - , Kolbenverdichter 215
 - , Kreisprozess 137, 139, 173
 - , –, linkslaufender 137
 - , –, rechtlaufender 139
 - , Wärmekraftmaschine 139, 170
 - , Wärmepumpe 139, 176, 285
- Bewertung (Kreisprozesse) 171, 173, 176
- , Anlage 176
- , Bewertungszahl 171
- , Irreversibilität 173
- , thermodynamische 171
- Bezugsgröße 39, 524
- Bezugszustand 37, 39, 153, 418, 477, 524
- , Brennwert 418
- , Exergie (Umgebung) 153, 477
- , Heizwert 418
- , Normzustand (physik.) 37, 39
- , Standardzustand (chemischer) 37
- Bilanzhülle 47
- Bildungsenthalpie 470–471
- Blockheizkraftwerk 254
- Boltzmann 395
- Boltzmann-Konstante 38–39, 524
- Boyle 33
- Boyle-Mariotte 99
- BRC-Anlage 259
- Brennstoff (s. auch Verbrennung) 416–419, 444, 469–470, 477, 479–480
- , Brennwert 417–418, 470, 479–480
- , Eigenschaft 416
- , Enthalpie 444, 469
- , Entropie 469
- , Exergie 477
- , Heizwert 417–418, 470, 479
- , Zusammensetzung (Tafel) 417
- Brennstoffleistung 194
- Brennstoffstufung 463
- Brennstoffzelle 416, 483–489
- , Arbeit 484–485
- , Bauart 488
- , –, Carbonatschmelze-Brennstoffzelle (MCFC) 489
- , –, oxidkeramische (SOFC) 489
- , –, Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC) 488
- , –, Polymermembran-Brennstoffzelle (PEMFC) 488
- , Entwicklungspotenzial 489
- , Gesamtwirkungsgrad 488
- , Inverter 489
- , Leistung 485
- , Reformier 489
- , Spannung 486
- , Wirkungsgrad 486
- Brennstoffzellenaggregat 489
- Brennstoffzellentyp 488
- Brennwert 417–419, 470, 479
- , bez. auf Normvolumen 418
- , molarer 418–419, 470
- , spezifischer 418–419
- Brennwertkessel 418, 451–452
- British thermal unit 67
- Bunte-Dreieck 440
- burn out 391
- Candela 20–21
- Carnot 66–67, 129
- Carnot-Faktor 130–131
- Carnot-Prozess 129–132, 135, 137–138, 166, 171
- , Leistungszahl 138
- , linkslaufender 137–138
- , Nutzarbeit 129–130
- , rechtslaufender 129, 132
- , reibungsbehafteter 132, 135
- , Vergleichsprozess 130
- , Wirkungsgrad 130
- Carrier 322, 324
- , Diagramm 322
- CCS (Carbon Capture and Storage) 464
- Celsius 19, 31–32
- chemische Reaktion 469
- Clapeyron 243
- Clausius 30, 67, 82, 243
- Clausius-Rankine-Prozess 248–251, 253, 256–257
- , Anzapfvorwärmung 255–256
- , Arbeitsverhältnis 250
- , exergetischer Wirkungsgrad 249
- , Nutzarbeit 249, 251
- , thermischer Wirkungsgrad 249, 251, 253
- , Vergleichsprozess der Dampfkraftanlage 248
- Dalton 304–305
- , Gesetz 304–305
- Dampf 223–224, 232, 284
- , gesättigter 232
- , linkslaufender Kreisprozess 284
- , Nassdampf 232
- , trockengesättigter 223
- , überhitzter 224
- Dampfdruck (Gemisch) 311
- Dampfdruckkurve 226
- Dampferzeuger 248
- Dampfgehalt 232, 245
- , Ermittlung 245
- , Nassdampf 245
- Dampfkessel 248
- Dampfkraftanlage 247, 256, 261, 268
- , Anzapfvorwärmung 256
- , Arbeitsprinzip 247
- , wirklicher Prozess 261
- , Wirkungsgrad 261
- Dampfkraftprozess 261, 263
- , irreversibler 263
- , Leistung 263
- , Wirkungsgrad 261
- Dampfkraftwerk (s. Dampfkraftanlage) 247
- Dampfmaschine 285
- Dampfnässe 232
- (s. Dampfkraftanlage) 247, 256
- , Anzapfvorwärmung 256
- Davy 67
- DeNOx (Entstickungsanlage) 455
- DeNOx-Verfahren 463
- Desublimieren 226
- Diagramm 324, 445
- , psychometrisches 324

- Dichte 24
 –, (Tafel) 35
 Diesel 205
 Diesel-Motor 205–206
 Diesel-Prozess 206
 –, Arbeitsverhältnis 206
 –, Einspritzverhältnis 205
 –, exergetischer Wirkungsgrad 206
 –, thermischer Wirkungsgrad 206
 –, Verdichtungsverhältnis 205
 –, Vergleichsprozess 205
 Diffusorströmung 356–357, 362
 Diffusorwirkungsgrad 357
 –, isentroper 357
 Dimension 18
 Dissipation
 –, Brennstoffzelle 484
 –, Dissipationsenergie 49, 54, 56, 142–143
 –, Dissipationsprozess (Def.) 49
 –, Gemischbildung 305
 –, Kreisprozess 132
 Dissoziation (Verbrennung) 445
 Drehmoment 355
 Drosselgrad 219
 –, Kolbenverdichter 219
 Drosselstelle 142
 –, adiabate 142
 Drosselung 140–143, 152, 244
 –, adiabate 140, 142, 244
 –, –, ideales Gas 142
 –, Gas 141
 –, ideales Gas 142
 –, reales Gas 141–142
 –, Veranschaulichung 143
 –, Wasserdampf 244
 Druck 24–27, 224, 349, 359
 –, Absolutdruck 25–26
 –, Atmosphärendruck (Def.) 26
 –, Bezugsdruck 25
 –, Differenzdruck 25–26
 –, Druckmessgerät 26
 –, Druckmessung 25–26
 –, dynamischer 349
 –, kinetischer 349
 –, kritischer 224, 359
 –, Laval-Druck 359
 –, Normdruck 27
 –, statischer 349
 –, Staudruck 349
 –, Totaldruck 349
 –, Überdruck 26
 –, Umgebungsdruck 25
 Druckeinheit 27
 Druckmessung 27
 Druckminderventil 143
 Druckverhältnis 213
 Druckverhältnis (Verdichter) 212
 Durchflussfunktion 360–361
 Durchlasskoeffizient (Strahlung) 397
 Düsenbeiwert 358
 Düsenströmung 356–358
 Düsenwirkungsgrad 357
 –, isotroper 357
 Effekt 132
 –, dissipativer 132
 Eigenbedarfswirkungsgrad 262, 264
 Eigenschaft 416
 –, Brennstoff 416
 Einheit 66
 –, Wärme 66
 Einheitensystem 17, 20–22, 27, 29
 –, angelsächsisches 27, 29
 –, gesetzliches 21
 –, Größe 17
 –, Internationales 20
 –, kohärentes 21
 Einschubarbeit 61
 Einspritzverhältnis 209
 Einstrahlzahl 399
 Eis (H₂O)
 –, Schmelztemperatur (Tafel) 225
 –, spez. Schmelzenthalpie (Tafel) 225
 –, spez. Wärmekapazität (Tafel) 70
 elektr. Stromstärke 20
 Emission (Verbrennung) 455, 457, 459, 461–463
 –, Grenzwert 457
 –, Minderung 455, 459, 461–463
 –, –, Primärmaßnahme 455, 462
 –, –, Sekundärmaßnahme 455, 459, 463
 Emissionsfaktor 455, 458
 Emissionsfaktor (Schadstoffe) 456
 Emissionsgrenzwert 455
 Emissionshandel 457
 Emissionskoeffizient 396
 Emissionskoeffizient (Strahlung) 395
 Energie 52, 56, 62, 89, 233, 342
 –, freie 89, 233
 –, gespeicherte 52, 56
 –, innere 56, 66
 –, kinetische 62, 342
 –, potenzielle 62, 342
 –, transportierte 52
 Energiebilanz 52
 Energieeinheit 66–67
 –, Umrechnung 66–67
 Energieerhaltung 52
 Energieerhaltungssatz 52
 Energie-Flussbild 165
 Energieübertragung 52, 59
 –, Formen 59
 Energieumwandlung 129, 170, 247, 342, 416
 –, Grenze 129
 Energieverlust 412
 –, Wärmeübertrager 412
 Enthalpie 60–62
 –, Anergie 154
 –, Brennstoff 444
 –, Exergie 154
 –, Exergiedifferenz 154
 –, feuchte Luft 319
 –, Flüssigkeit 234
 –, freie 89, 469, 474–475
 –, Gemisch 319
 –, ideales Gas 68
 –, spezifische 61, 233–235
 –, –, Nassdampf 235
 –, –, Sattedampf 234
 –, Totalenthalpie 62
 –, Verbrennungsgas 444–445
 –, Wasserdampf (Tafel) 237–239, 531–533
 Entmischungsarbeit 306
 Entropie
 –, absolute 473
 –, adiabates System 87
 –, Änderung 143
 –, Berechnungsgleichung 83
 –, Definition 82–83
 –, Diagramm 88
 –, einfaches System 83
 –, ideales Gemisch 301

- , spezifische 83, 235–236
- , –, Nassdampf 236
- , –, Sattedampf 236
- , –, siedende Flüssigkeit 236
- , –, Wasserdampf 235
- , Wasserdampf (Tafel) 237, 531–533
- Entropieänderung
 - , Drosselung 142
 - , ideales Gas 92, 118
 - , Kreisprozess 132
 - , Reaktionsentropie 472
 - , Temperatursausgleich 146
 - , Verbrennung 478
 - , Wärmeübertragung 413
- Entropieerzeugung 84–85
- Entropietransport 84–85
- Entschwefelung 459
- Entstaubung 455
- Entstickungsanlage 455, 462–463
- Entwicklungsstand 489
- Erdbahnradius 39, 524
- Erdmasse 39, 524
- Erdradius 39, 524
- Ericsson 186
- Ericsson-Prozess 187–188, 193
- , Arbeitsverhältnis 187
- , Nutzarbeit 187
- Ermittlung 245
- , Dampfgehalt 245
- Erstarren 225
- Erstarrungslinie 230
- Erster Hauptsatz der Thermodynamik 52, 66
- Ethan 34–35
- Ethen (Ethylen) 34–35
- Ethin (Acetylen) 34–35
- Eulersche 355
- , Hauptgleichung 355
- Exergie 152–155, 157–160, 305, 477, 481
- , Brennstoff 477
- , Definition 153
- , Enthalpie 154
- , Fluid 153
- , Gemisch 305
- , geschlossenes System 157
- , ideales Gas 154–155
- , innere Energie 157
- , reales Gas 154–155
- , spezifische 153
- , Umgebung 152
- , Verbrennungsgas 481
- , Vorzeichen 160
- , Wärme 158–160
- Exergie-Flussbild 165
- Exergiebilanz 162, 477
- , strömendes Fluid 162
- Exergiedifferenz 157
- Exergieverlust 162–164, 413, 481–482
- , Verbrennung 481–482
- , Wärmeübertrager 413
- Exergieverlust durch Dissipation 160
- Exergieverlustleistung 162
- Exergieverluststrom 162, 414
- , Wärmeübertrager 414
- Expansionsströmung 356
- Exzessvolumen 295
- Fahrenheit 19, 31
- Faraday-Konstante 39, 485, 524
- Faraday-Wirkungsgrad 487–488
- FCKW 279
- Fernwärmeversorgung 254
- Feuchte 312, 315, 324
- , absolute 312, 315
- , relative 324
- Feuchtegehalt 314
- Feuchtegrad 315
- Feuchte Luft 311
- Feuchtkugelmperatur 329
- Feuerungsatmosphäre 425
- , reduzierende 425
- Feuerungswärmeleistung 261
- Filmverdampfung 392
- Flammenstrahlung 399–400
- Flammentemperatur 446
- Fließprozess 60
- , stationärer 60
- Fluid 47, 153–154, 227–228, 377
- , Anergie 154
- , Exergie 154
- , reales 227–228
- , –, Zustandsgleichung 227
- , strömendes 153
- , –, Anergie 153
- , –, Exergie 153
- Fluorchlorkohlenwasserstoff 279
- Fluorkohlenwasserstoff 279
- Flüssigkeit 30, 70, 231–232, 234, 236
- , Enthalpie 234
- , Entropie 236
- , siedende 231–232, 236
- , –, spezifische Entropie 236
- , spezifische 234
- , Stoffwerte 70
- , Thermometer 30
- Formelumsatz (chem. Reaktion) 470
- Formfaktor 399
- Fourier 369
- Fouriersches Gesetz 369
- Füllungsgrad (Kolbenverdichter) 215–216, 219
- Fundamentalgleichung 89
- Gas
 - , Ausdehnung 44
 - , Dichte 37
 - , ideales 33, 72, 79, 91–92, 142, 304, 308
 - , –, Gemisch 304, 308
 - , –, kalorische Zustandsgleichung 72
 - , –, thermische Zustandsgleichung 33
 - , reales 33, 228
 - , –, thermische Zustandsgleichung 228
 - , Stoffwerte 34, 522, 526
- Gas-Dampf-Gemisch 311, 313
- Gas-Dampf-Kraftwerk 268–270, 272–273
- , Ausnutzungsgrad 269
- , Brennstoffverhältnis 270
- , Grundschtaltung 268
- , Kraftwerksnettleistung 270
- , Schaltungsbeispiel 272–273
- , Wirkungsgrad 270
- Gasgemisch 295, 304–305
- , Partialdruck 305
- Gaskonstante 32, 34, 36, 38, 75, 78, 304, 524
- , Gemisch 304
- , individuelle 32
- , molare 36, 38, 78
- , spezielle 32, 34, 38, 304
- , spezifische 32, 75
- , universelle (allgemeine) 38
- Gasstrahlung 399
- Gasströme 147
- Gastheorie 79
- , kinetische 79
- Gasthermometer 31

- Gasturbinenanlage 177–178,
 186, 188–191, 193–194,
 196, 268–269
 –, Anlagenarten 189
 –, Arbeitsprinzip 177
 –, Ericsson-Prozess 186
 –, geschlossene 190
 –, idealisierter Prozess 191
 –, Isex-Prozess 188
 –, Joule-Prozess 178
 –, Kreisprozess 177
 –, offene 190, 194, 196
 –, offener Kreislauf 189, 191
 –, Prozessverlauf 189
 –, wirklicher Prozess
 189–191, 193
 –, –, Berechnung 190
 –, –, Kupplungsarbeit 193
 –, –, Nutzarbeit 191
 Gay-Lussac 73, 95
 –, Überströmversuch 73
 Gefäßbarometer 26
 Gegenstrom
 (Wärmeübertrager) 404
 Gemisch
 –, Amagat (Gesetz) 295, 304
 –, Ammoniak-Wasser 335
 –, Beladung 293
 –, binäres 294, 298, 309, 332
 –, Dalton (Gesetz) 304
 –, Dichte 296–298, 308, 315
 –, Exergie 305
 –, feuchte Luft 313
 –, Gas-Dampf 311
 –, Gaskonstante 304
 –, homogenes 291
 –, ideales 291, 295–296,
 298–299, 301–302
 –, –, Entropie 301
 –, –, Mischungsentropie 302
 –, –, Zustandsgröße 299
 –, ideales Gas 304–306
 –, Löslichkeit 291
 –, Masse 291
 –, Massenkonzentration 296
 –, Mischungsenthalpie, spez.
 334
 –, Mischungsentropie 305
 –, Mischungsregel 333
 –, molare Masse 292
 –, Partialdruck 304
 –, Raumanteil 297, 308
 –, –, ideales Gas 308
 –, –, ideales Gemisch 297
 –, reales 291, 332
 –, spezifische Wärmekapazität
 299
 –, spezifisches Volumen 297
 –, Stoffmenge 292
 –, Volumen 295–297, 304
 –, Volumenkontraktion 291
 –, Wasser-Lithiumbromid 335
 –, Zusammensetzung 291, 308
 –, Zusatzvolumen
 (Exzessvolumen) 295
 –, Zustandsgröße 299
 –, Zweistoff 332
 Gemischbildung 295
 Gemischgröße 299
 –, extensive 299
 Generatorverlust 193
 Generatorwirkungsgrad 264
 Gesamtdruck 311
 Gesamtwirkungsgrad 177,
 194, 220, 270–272
 –, GUD-Prozess 271
 –, Kraftwerk 194, 272
 Geschwindigkeit (Düse,
 Diffusor) 356–357, 362
 –, Schallgeschwindigkeit 362
 –, Überschallgeschwindigkeit
 360
 –, Unterschallgeschwindigkeit
 357
 Gesetz 33, 295, 298, 304–305
 –, Amagat 295, 298, 304
 –, Dalton 304–305
 –, Gay-Lussac 33
 Gewicht, spezifisches 24
 Gibbs-Funktion 89, 474
 Gleichgewicht 29, 306, 328
 –, mechanisches 306
 –, stoffliches 328
 –, thermisches 29, 306, 328
 Gleichstrom
 (Wärmeübertrager) 404
 Grädigkeit 405
 Grashof 379
 Grashof-Zahl 379
 Gravitationskonstante 39, 524
 Grenze 129
 –, Energieumwandlung 129
 Größenart 22
 –, abgeleitete 22
 Größe 17–18
 –, abgeleitete 22
 –, Einheitensystem 17
 –, physikalische 17
 Größenart 17–18
 –, abgeleitete 18
 Größengleichung 18
 Grundgesetz 351
 –, Newton 351
 Grundschtaltung 268
 –, Gas-Dampf-Kraftwerk 268
 GUD-Prozess 183, 258,
 268–272
 –, Ausnutzungsgrad 269
 –, Brennstoffleistungs-
 verhältnis 270
 –, Gesamtwirkungsgrad 271
 –, Grundschtaltung 268
 –, Kraftwerksnettoleistung
 270
 –, Nutzleistung 270
 –, Schaltungsbeispiel 272
 –, Wirkungsgrad 270
 Gütegrad 176, 286–287
 –, Kältemaschine 287
 –, Wärmepumpe 286
 h, μ_v -Diagramm (Gemische)
 333
 –, H_2O –LiBr 335, 338
 –, NH_3 – H_2O 335, 337
 h, s -Diagramm 241–242
 –, Wasserdampf 241–242
 H, t -Diagramm 444
 h, x -Diagramm (feuchte Luft)
 321
 Haarhygrometer 314
 Hauptgleichung 355
 –, Euler'sche 355
 –, Strömungsmaschine 355
 Hauptsatz der Thermo-
 dynamik 29, 52, 82, 472
 –, dritter 472
 –, erster 52
 –, nullter 29
 –, zweiter 82
 Heißdampf 224
 Heißgasmotor 197, 199
 –, Arbeitsprinzip 197
 –, Kreisprozess 197
 –, wirklicher Prozess 199
 Heizflächenbelastung 372
 Heizkraftwerk 254
 Heizwert 417–419, 444, 470,
 479
 –, bez. auf Normvolumen 418
 –, molarer 418–419, 470
 –, spezifischer 418–419
 –, Temperaturabhängigkeit
 418, 444
 Heizzahl (Wärmepumpe) 286

- Hektopascal 26
 Helium 34–35
 Helmholtz-Funktion 89
 Hess (Satz von;
 chem. Reaktion) 471
 HGWP-Wert 280
 High-Dust-Verfahren 460, 463
 Hubkolbenmaschine 209

 ideales Gas 32, 44, 304–306,
 308, 358–361, 363
 –, Gemisch 304, 306
 –, –, Exergie 306
 –, –, thermische Zustands-
 gleichung 304
 –, thermische Zustands-
 gleichung 32
 –, Volumenausdehnungs-
 koeffizient 44
 IGCC-Verfahren 464
 Impuls 351
 Impulsänderung 352, 355
 Impulskraft 351
 Impulssatz 351, 355
 Indikatordiagramm 210, 218
 –, Kolbenverdichter 218
 –, Otto-Motor 210
 Inerte 416
 Innenwirkungsgrad
 (Kolbenmaschine) 176
 innere Leistung 263
 –, Nutzleistung 263
 Irreversibilität 53, 82, 118,
 142, 158, 191, 219, 263, 305,
 309, 412, 482
 –, Dampfkraftanlagen 263
 –, Gemischbildung 305, 309
 –, Kolbenverdichter 219
 –, Kreisprozess 132, 170
 –, Verbrennung 482
 –, Wärmeübertragung 412
 Isenthalpe 141
 Isentrope 103–107, 244
 –, Expansion 104, 106–107
 –, Kompression 104, 106
 –, Neigung im
 p, V -Diagramm 104
 Isentropenexponent 75, 103
 Isobare 94–96, 244
 –, Volumenvergrößerung
 95–96
 Isochore 91–93, 244
 –, Drucksteigerung 92–93
 Isotherme 98–101
 –, Expansion 100–101
 –, Neigung im
 p, V -Diagramm 99
 ITS (Temperaturskala) 31

 Joule 22, 66, 73
 Joule-Prozess 178–180, 182,
 191–193
 –, Arbeitsverhältnis 180
 –, Nutzarbeit 178, 182
 –, wirklicher 191
 Joule-Thomson-Effekt 142,
 245

 Kalkwäsche 459
 Kalorimeter 148, 419
 Kaltdampfmaschine 284, 287
 Kältemaschine 126, 137–140,
 280, 283–284, 287
 –, Arbeit 287
 –, Diagramm 281–282
 –, exergetischer Wirkungsgrad
 287
 –, Gütegrad 287
 –, Kreisprozess 287
 –, Leistungszahl 138, 287
 –, reversible 138
 Kältemaschine 281–282
 –, Diagramm 281–282
 Kältemittel 279, 281
 –, Diagramm 279, 281
 Keller 186
 Kelvin 20–21, 30–31
 Kesselwirkungsgrad 261
 Kilogramm 20–21
 Kilomol 36
 Kilowattstunde 67
 Kinetische Gastheorie 79
 Kirchhoff 397
 Kirchhoffsches Gesetz 397
 Klemmenleistung 193,
 264–266, 274
 –, Kraftwerk 193
 Klemmenspannung
 (Brennstoffzelle) 485
 Klopfen 203
 Kohlenstoffbilanz 437
 Kohlenstoffdioxid 34–35
 Kohlenstoffmonoxid 34–35
 Kolbenkraftmaschine
 175–176, 197, 201
 Kolbenverdichter 210–212,
 215, 218–220
 –, einstufiger 210
 –, Indikatordiagramm 218
 –, Irreversibilität 219
 –, mehrstufiger 212
 –, verlustloser 210
 –, volumetrischer Verlust 218
 –, Wirkungsgrad 220
 Kompressionsströmung 356
 –, Diffusor 356
 Kondensatbildung 311
 Kondensation 224, 248, 253,
 285, 311, 389–390, 450
 –, Abgas 450
 –, Gas-Dampf-Gemisch, 311
 –, Kältemittel 285
 –, Tropfenkondensation 390
 –, Wärmeübertragung 389
 –, Wasserdampf 224, 253
 Kondensations-Turbine 253
 Kondensationsenthalpie 234
 –, spezifische 234
 Kondensator 248
 Kondensieren 224, 389
 –, Filmkondensation 389
 Kontinuitätsgleichung 341
 Kontrollfläche 351
 Kontrollraum 46
 Konvektion 369, 377,
 382–387, 391
 –, erzwungene 382–383
 –, freie 384–385, 391
 Körper (Strahlung) 393–397
 –, farbiger 395, 397
 –, grauer 395–397
 –, schwarzer 394–395, 397
 –, weißer 397
 Kraft-Wärme-Kopplung 254
 Kraftmaschine 90
 Kraftwerk 193–194, 262, 264,
 272, 274
 –, Eigenbedarf 262, 264
 –, Gesamtwirkungsgrad 194,
 262, 272, 274
 –, Nettowirkungsgrad 274
 Kraftwerkseigenbedarf 193
 Kraftwerksnettoleistung 193,
 262, 264
 Kraftwerksnettowirkungsgrad
 262, 264
 –, wärmetechnischer 264
 Kreiskolbenmaschine 209
 Kreiskolbenmotor 210
 Kreisprozess
 –, Arbeit (Def.) 122
 –, Arbeitsverhältnis
 (Def.) 172
 –, Bewertungszahlen 171
 –, Dampfkraftanlage 247

- , Gasturbinenanlage 177
- , Heißgasmotor 197
- , im p , V -Diagramm 122
- , im T , S -Diagramm 126
- , innerer Wirkungsgrad 174, 263
- , irreversibel 132, 175
- , Kältemaschine 138, 287
- , linkslaufender 123–125, 137, 139, 284
- , –, Dampf 284
- , Nutzarbeit 124, 173
- , ORC-Prozess 278
- , rechtslaufender 123–125, 170, 247
- , reversibler 123–125, 132
- , thermischer Wirkungsgrad (Def.) 126
- , Verbrennungsmotor 201
- , Wärmepumpe 137, 285
- Kreuzstrom
(Wärmeübertrager) 405
- kritischer Punkt 224, 230–231
- , (Tafel) 224
- Kühlgrenztemperatur 328
- Kupplungsarbeit 176
- Kupplungsleistung 193, 263
- Kupplungswirkungsgrad 220
- Kyoto-Protokoll 457

- Ladungswechsel
(Verbrennungsmotor) 209
- Lambert 397
- Lambertsches Richtungs-
gesetz 397
- Länge 20
- Längenänderung 40, 42
- Längenausdehnungskoeffizient
41–42
- , mittlerer 42
- , Tafel 41–42
- Längendehnung 42
- Laplace 362
- Laval 359
- Laval-Druck 359
- Laval-Düse 359, 363
- Laval-Geschwindigkeit 360
- Leistung 23, 65, 263, 270, 343, 355
- , Dampfkraftprozess 263
- , GUD-Prozess 270
- , innere (Nutzleistung) 263
- , Schaufelleistung 355
- , technische 343
- , Wellenleistung 65

- Leistung der Brennstoffzelle
485
- Leistungszahl 139, 285, 287
- , Kältemaschine 287
- , Wärmepumpe 139, 285
- lg p , h -Diagramm
(Kältemittel) 281–282
- Lichtgeschwindigkeit im
Vakuum 39, 524
- Lichtstärke 20
- Liefergrad 219
- Liefergrad (Verdichter) 218
- Loschmidt-Konstante 36
- Löslichkeit 291
- Lösung 291, 335, 338
- Low-Dust-Verfahren 460, 463
- Luft
- , feuchte 313–315, 318–319, 321, 324, 326, 477, 534
- , –, absolute 314
- , –, h , x -Diagramm 313
- , –, isobare Zustands-
änderung 324
- , –, Mischprozess 324
- , –, Partialdruck (Tafel) 477
- , –, relative 314
- , –, Sättigungsdichte 314
- , –, spezifische Enthalpie
319
- , –, spezifisches Volumen
318
- , –, Wärmeabfuhr 324
- , –, Wasserbeladung 315
- , –, Wasserdampfpartial-
dichte 314
- , –, Wasserdampfpar-
tialdruck 314
- , –, Wasserzusatz 326
- , –, Zusammensetzung 314
- , Feuchtegehalt 315
- , h , x -Diagramm 321
- , Realgasfaktor 228
- , Stoffwerte trockener Luft
(Tafel) 34, 77, 372
- , trockene 315, 522, 529, 536
- , –, Partialdruck 315
- Luftbedarf 423, 430
- Luftbedarf (Verbrennung)
425
- Luftüberschuss 424
- Luftverhältnis 424, 437–439

- Mach 362
- Mach-Zahl 362
- Mariotte 33

- Maschine 170
- Masse 20–21, 34, 37, 291–292
- , Gemisch 291
- , molare 34, 37, 292
- , –, Gemisch 292
- Massenanteil 291, 294, 296–297
- Massenkonzentration 296, 308
- Materiemenge 36
- Mayer 67
- Megapascal 26
- Meter 20
- Mindestluftbedarf 423
- Mindestsauerstoffbedarf 423
- Mischtemperatur 146–147
- Mischung 147
- Mischungsentropie 146, 301–302, 305
- , ideales Gemisch 302
- , molare 302
- , spezifische 302
- Mischungsexergieverlust 306
- Mischungsprozess 301
- Mischungsregel 324, 333
- Mischwärmeübertrager 404
- Mitteltemperatur 160
- , thermodynamische 160
- Mittelwert 69–70
- , Wärmekapazität,
spezifische 69–70
- Mol 20–21, 36
- Molanteil 292, 316
- Molanteil (Gemisch) 308
- Molekülmasse 36–37
- , relative 37
- Mollier 241–243, 321, 323
- , h , s -Diagramm (Wasser-
dampf) 241
- , h , x -Diagramm 321
- , h , x -Diagramm
(feuchte Luft) 323
- Molmasse 292
- , Gemisch 292
- , Masse, molare 36
- , relative 36
- Molmenge 36
- Molvolumen, Volumen,
molares 36
- Molwärme, Wärmekapazität,
molare 36
- Motor 197, 201, 205, 209
- , Diesel-Motor 205
- , Heißgasmotor 197
- , Kreiskolbenmotor 209

- , Otto-Motor 201
- , Stirling-Motor 197
- , Verbrennungsmotor 201
- , Viertaktmotor 209
- , Wankelmotor 209
- Nassdampf 223, 232, 235–236
 - , spezifische Enthalpie 235
 - , spezifische Entropie 236
 - , spezifisches Volumen 232
- Nassdampfgebiet 230
- Nassdampfmasse 232
- Naturkonstante (Tafel) 39, 524
- Neigung der Isothermen 99
 - , p, V -Diagramm 99
- Nernstsches Wärmetheorem 472
- Nettowirkungsgrad 274
- Newton 19, 351, 377
 - , Grundgesetz 351
- Normdichte 38
- Normdruck 27, 37
- Normfallbeschleunigung (Tafel) 39, 524
- Normtemperatur 37
- Normvolumen 34, 36–37, 39, 522, 524
 - , molares 37, 39, 522, 524
 - , –, (Tafel) 34, 522
 - , –, ideales Gas 39
- Normzustand 37, 39, 524
 - , physikalischer 37, 39, 524
- Nullpunkt 30
 - , absoluter 30
- nullter Hauptsatz der Thermodynamik 29
- Nußelt-Zahl 378
- Nutzarbeit 129, 171, 173, 178, 182, 187, 189, 198, 202, 205, 208, 249, 268
 - , Carnot-Prozess 129
 - , Clausius-Rankine-Prozess 249
 - , Diesel-Prozess 205
 - , Ericsson-Prozess 187
 - , Gasturbinenanlage 189
 - , GUD-Prozess (Leistung) 268
 - , Joule-Prozess 178, 182
 - , –, größtmögliche 182
 - , Kolbenstange 55
 - , Kreisprozess 171, 178, 182, 187, 198, 202, 205, 208, 249
 - , Otto-Prozess 202
 - , Seiliger-Prozess 208
 - , Stirling-Prozess 198
- Nutzleistung 270
 - , Dampfkraftprozess 261
 - , GUD-Prozess 270
- Nutzwirkungsgrad (Kreisprozess) 177
- ORC-Prozess 279
- organische Arbeitsfluide 279
- Oswald-Dreieck 440–442
- Otto-Prozess 201–203, 209
- Oxyfuel-Verfahren 465
- Ozonabbau 279
- p, t -Diagramm (H_2O) 226
- p, V -Diagramm 53–54, 64, 99
- p, v, T -Diagramm (realer Stoff) 230
- Partialdichte 295–297, 308, 312, 314, 534
 - , feuchte Luft 312
 - , –, Tafel 312
 - , ideales Gas 308
 - , ideales Gemisch 295
- Partialdruck 304–306, 311–312, 315–316, 534
 - , feuchte Luft 312, 316
 - , –, Tafel 312
 - , Gas-Dampf-Gemisch 311
 - , ideales Gas 305
- Pascal 26
- Péclet-Zahl 379
- Phase 47, 223, 291
 - , flüssige 223
 - , gasförmige 223
- Phasenänderung 230
- Phasengebiet 230
- Phasenwechsel 223
- Philips-Stirling-Motor 198
- Phlogiston 67
- Photon 369, 393
- Pinch-Point-Methode 411
- Plancksche Strahlungskonstante 394
- Plancksches Strahlungsgesetz 394
- Plancksches Wirkungsquantum 39, 524
- Polytrope 109–110, 112–113
- Polytropenexponent 110, 114
- Post-Combustion-Verfahren 464
- ppm (parts per million) 457
- Prandtl-Zahl 379
- Pre-Combustion-Verfahren 464
- Primärenergie 170
- Prozess 48–50
 - , adiabates System 119
 - , Arbeitsprozess 341
 - , Ausgleich 145
 - , BRC-(Binary Rankine-Cycle-)Anlage 259
 - , Carnot-Prozess 165, 175
 - , Clausius-Rankine-Prozess 248
 - , Diesel-Prozess 205
 - , Ericsson-Prozess 186
 - , Fließprozess (Def.) 50
 - , gemischter Vergleichsprozess (s. Seiliger-Prozess) 207
 - , Gleichdruckprozess (s. Diesel-Prozess) 205
 - , Gleichraumprozess (s. Otto-Prozess) 201
 - , GUD 183
 - , GUD-Prozess 258, 268
 - , instationärer 144
 - , irreversibler 49, 82, 85
 - , Joule-Prozess 178, 192
 - , Kreisprozess 121, 170, 247
 - , natürlicher 82, 153
 - , offenes System 87, 90
 - , ORC-Prozess 278
 - , Otto-Prozess 201–205
 - , reversibler 48–49
 - , Seiliger-Prozess 207
 - , stationärer 50
 - , Stirling-Prozess 197
 - , Strömungsprozess 341, 347
 - , thermodynamischer 48–49
 - , Verbrennungskraftanlage 170
 - , Vergleichsprozess (Def.) 170
 - , Wärmekraftanlage 170, 247
 - , wirklicher 189–190, 199, 209, 261
 - , Zweistoff-Prozess 258
- Prozessgröße 48, 54
- Psychrometer 329
- Punkt, kritischer 224, 226
- Quecksilbersäule 27
- Rankine 31
- Rankine-Prozess 278

- Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) 455, 459
 Rauchgasreinigungsanlage (RRA) 455, 460
 Raumanteil 297, 308
 –, ideales Gas 308
 –, ideales Gemisch 297
 Rayleigh-Zahl 379
 Reaktion 469–470
 –, chemische 469
 –, endotherme 470
 –, exotherme 470
 Reaktions-Gibbs-Funktion 474
 Reaktionsarbeit 475, 477, 479–480
 Reaktionsenthalpie 469–470, 474–475, 484–485
 –, freie 474–475, 484
 –, (Tafel) 485
 Reaktionsentropie 472, 484
 Realgasfaktor 227–228
 –, Luft 228
 Reflexionskoeffizient (Strahlung) 397
 Regenerator (Wärmeübertrager) 403
 Reibung 49, 82
 Rekuperator (Wärmeübertrager) 403
 relative Feuchte (Luft) 314, 323
 Reynolds-Zahl 379
 Rohrleitungswirkungsgrad 261–262
 Rohrströmung 341
 –, laminar 341
 –, turbulent 341
 Röntgenstrahlung 393
 Rosin und Fehling 445–446
 –, Luftbedarf und Verbrennungsgasmenge (Tafel) 434
 –, Verbrennungsgas (Diagramm) 446
 Rotationskolbenmaschine 209
 Rückkühlwerk 330–331

 Sankey-Diagramm 165
 Sattdampf 223, 234, 236
 –, Definition 223
 –, spezifische Enthalpie 234
 –, spezifische Entropie 236
 Sättigungszustand 237, 311–312, 314, 531
 –, Dichte 314
 –, Druck 311
 –, feuchte Luft (Tafel) 312
 –, Wasserdampf (Tafel) 237
 Satz von der Existenz der Temperatur 29
 Sauerstoff (Stoffwerte) 34–35, 69, 76, 522–523, 526, 528
 –, (Tafel) 69
 Sauerstoffbedarf (Verbrennung) 422, 430
 Sauerstoffbilanz (Verbrennung) 438
 Schadraum (Verdichter) 215
 –, relativer 215
 Schadstoff: s. Emission 215
 Schallgeschwindigkeit 362
 Schaltungsbeispiel 272–273
 –, Gas-Dampf-Kraftwerk 273
 Schaufelleistung (Strömungsmaschine) 355
 Schmelzdruckkurve 226
 Schmelzen 225–226
 Schmelzenthalpie, spezifische (Tafel) 225
 Schmelzgebiet 225, 230
 Schmelzlinie 230
 Schmelztemperatur (Tafel) 225
 Schmelzwärme, spezifische 225
 Schräghrohrmanometer 28
 Schwarzer Körper 394
 Schwefeldioxid (Stoffwerte) 34–35, 77, 522, 529
 Schwefelsäuretaupunkt 454
 SCR-(Selective Catalytic Reduction-)Verfahren 463
 Seiliger-Motor 207
 Seiliger-Prozess 207–208
 Sekunde (Def.) 20–21
 Selbstentzündung 203
 Selbstzündung 420
 Sichtfaktor (Strahlung) 399
 Siededruck 224
 Siedelinie 230
 Siedetemperatur 223–224
 –, (Tafel) 223–224
 Siedeverzug 230
 Sonnenmasse 39, 524
 Sonnenoberfläche, Temperatur 39
 Spannungswirkungsgrad (Brennstoffzelle) 486
 Standardbildungsenthalpie 470, 472
 Standardenthalpie 472, 474
 Standardentropie 472, 473
 Standardreaktionsentropie 472
 Standardzustand, chemischer 39, 469, 524
 Stefan-Boltzmann 395
 –, Gesetz 395
 –, Konstante 39, 395, 524
 Steinkohleneinheit (SKE) 67
 Stickstoff (Stoffwerte) 34–35, 522–523, 526, 528
 Stickstoffbilanz (Verbrennung) 426, 437
 Stickstoffoxid (Verbrennung) 426, 461–462
 Stirling-Motor 197, 199
 Stirling-Prozess 197–199
 Stoff 527, 535
 Stoffbilanz (Verbrennung) 436
 Stoffdurchsatz in einer Feuerung 436
 Stoffmenge 20, 36–37, 292
 Stoffmengenanteil (Gemisch) 292, 294, 296–297, 308, 316
 Strahlung
 –, Ausstrahlung 393
 –, Bestrahlung 397
 –, erzwungene 397
 –, Flamme 399–400
 –, freie 397
 –, Gas 399
 –, Konstante 399
 –, –, Planck 399
 –, –, Stefan-Boltzmann 399
 –, –, Strahlungsaustausch 399
 –, Wärmeübertragung 398
 Strömung 341
 –, Diffusor 356, 362
 –, Düse 356
 –, erzwungene 369, 382
 –, freie 369, 384
 –, Konstante 394–395, 399
 –, –, Planck 394
 –, –, Stefan Boltzmann 395
 –, –, Strahlungsaustausch 399
 –, Kraftwirkung 351
 –, laminare 381
 –, Leistung 393
 –, reibungsbehaftete 140
 –, turbulente 341, 381
 –, Überschall 360, 363

- , Unterschall 357
- , Wärmeübertragung 369
- Strömungsmaschine 342, 355
- , Arbeitsprozess 342
- , Eulersche Hauptgleichung 355
- Strömungsprozess 347–348
- , adiabater 347–348
- , horizontaler 347–348
- Stufenbrenner 462
- Sublimationsdruckkurve 226
- Sublimationsenthalpie 224, 226
- Sublimationsgebiet 230
- Sublimationstemperatur 224
- Sublimieren 226
- Substanzmenge 21
- System
 - , abgeschlossenes 47, 52, 67
 - , adiabates 47, 56, 87, 118–119, 163
 - , –, Expansion 119
 - , –, Kompression 119
 - , Energievorrat 56
 - , geschlossenes 46–47, 52–54, 86, 163, 170
 - , heterogenes 47, 223, 225
 - , homogenes 32, 47, 223
 - , isoliertes 47
 - , offenes 46–47, 60–62, 86, 162, 170, 341
 - , ruhendes 56
 - , thermisch isoliertes 47
 - , thermodynamisches 46–48
 - , Zustandsgleichung, t hermische 32
- Systemgrenze 46–47
- , adiabate (wärmedichte) 47
- , nichtadiabate bzw. diatherm (wärme-durchlässige) 47, 58
- Taulinie (Satteldampf) 230
- Taupunkt (Gemisch) 313, 454
- Techn. Atmosphäre 27
- Teildichte: s. Partialdichte 296
- Teilvolumen 295
- Temperatur 20–21, 29–31, 131, 160, 329–330
 - , Celsius 30
 - , Fahrenheit 31
 - , Festpunkt 31
 - , Feuchtkugel 330
 - , Kelvin 131
 - , Kühlgrenztemperatur 329
 - , Messung 29
 - , Mitteltemperatur, thermodynamische 160
 - , Rankine 31
 - , Skalen 30
 - , thermodynamische 20–21, 30–31, 131
 - , Trockenkugel 329
- Temperaturausgleich 145–147
- Temperaturdifferenz 31, 405
- , Einheit 31
- , mittlere logarithmische 405
- Temperatur-Gleit (Kältemittel) 280
- Temperaturmessgerät 29
- Temperaturmessung 29
- Temperaturskala 31
 - , empirische 30
 - , ideales Gas 30
 - , internationale 31
 - , ITS 31
 - , thermodynamische 31
- Temperaturstrahlung 393
- TEWI-Wert (Treibhauseffekt) 280
- Thermometer 29–30
- Thomson 30
- Torricelli 27
- Totalenthalpie 141, 347
- Transmissionskoeffizient (Strahlung) 397
- Treibhauseffekt 279, 455–456
- Treibhauspotenzial 279–280
- Tripellinie 230
- Tripelpunkt 30, 39, 226
- Tropfenkondensation 390
- T,S -Diagramm 88, 240
- Turbine 177, 191–193, 247
- , Wirkungsgrade 192–193
- Überschallgeschwindigkeit 360, 362, 364
- Überströmversuch (Gay-Lussac Joule) 73
- Umgebung (Exergie) 153
- Unterschallgeschwindigkeit 357, 362
- Unterschallströmung 357
- U-Rohr-Manometer 28
- van der Waals 228
- Verbrennung
 - , Exergie 481
 - , Exergieverlust 481
 - , H,t -Diagramm 444–445
 - , Irreversibilität 469
 - , unvollständige 420, 425, 428–429, 433
 - , vollständige 419, 422–424, 428, 430
- Verbrennungsdreieck 439
- Verbrennungsgas 424–426, 430, 444–445, 481
- , Enthalpie 444–445
- , Exergie 481
- , Luftgehalt 445
- Verbrennungsgasmenge 425, 430, 434
- , Näherung 434
- Verbrennungsgaszusammen-setzung 426, 429, 434
- Verbrennungskontrolle 435
- Verbrennungskraftanlage (-maschine) 170, 201
- Verbrennungsmotor 201–202, 209
- , Vergleichsprozess 201
- , wirklicher Prozess 209
- Verbrennungsmotorantrieb 286
- , Wärmepumpe 286
- Verbrennungsrechnung 421–423, 430, 434, 437
- , fester und flüssiger Brennstoff 421
- , gasförmiger Brennstoff 430
- , Luftbedarf 423, 430, 434
- , –, Näherung (Tafel) 434
- , Luftüberschuss 423, 430
- , Luftverhältnis 423, 437
- , Näherungslösung (Tafel) 434
- , Sauerstoffbedarf 422, 430
- Verbrennungstemperatur 443
- , theoretische 443
- Verdampfen 223–224, 391–392
- , Blasenverdampfung 391–392
- , Filmverdampfung 391
- , freie Konvektion 391–392
- , Phasenwechsel 223
- Verdampfungsenthalpie (-wärme) 224, 234–235
- , spezifische (Tafel) 235
- Verdichter 189–191, 210
- , beliebige Bauart 189
- , Kolbenverdichter 210
- Verdichterbauart 210

- Verdichterwirkungsgrade 191, 193, 220–221
 –, isentroper 191, 220
 –, isentroper indizierter 220
 –, isothermer 220
 –, isothermer indizierter 220
 –, mechanischer 193, 220
 Verdichtungsverhältnis (Kolbenmaschine) 198, 202
 Verdunstungskühlung 328–329
 Verfahrensoptimierung, Wärmenutzung 411
 Vergleichsarbeit 211
 –, isentrope 211
 –, isotherme 211
 Vergleichsprozess 129, 170, 178, 186, 197, 201, 205, 207, 248, 268
 –, Carnot-Prozess 129
 –, Clausius-Rankine-Prozess 248
 –, Dampfkraftanlage 248
 –, Diesel-Prozess 205
 –, Ericsson-Prozess 186
 –, Gasturbinenanlage 170
 –, GUD-Prozess 268
 –, Joule-Prozess 178
 –, Otto-Prozess 201
 –, Seiliger-Prozess 207
 –, Stirling-Prozess 197
 –, Verbrennungskraftanlage 170
 –, Wärmekraftanlage 170, 248
 Verlust
 –, Abgasverlust 449
 –, Dampfkraftanlage 261
 –, Exergieverlust allg. 160, 162, 412, 481
 –, –, Dissipation 160
 –, –, Verbrennungsgas 481
 –, –, Wärmeübertragung 412
 –, Kolbenverdichter 218
 –, Verbrennungsmotor 209
 –, Wärmekraftanlage 172
 Verschiebearbeit 61
 Virialkoeffizient 228
 Viskosität 379
 Volumen
 –, molares 37–38
 –, spezifisches 23, 232, 297, 318
 –, –, feuchte Luft 318
 –, –, Gemisch 297
 –, –, Nassdampf 232
 Volumenänderungsarbeit 53–54, 90–91, 95, 99
 –, spezifische 54
 Volumenausdehnungs-koeffizient 43–44
 –, ideales Gas 44
 Volumendehnung 43
 Volumenkontraktion 291
 Vorgang 144
 Vorsatzzeichen 21
 Vorzeichen 59, 418, 470
 –, Arbeit 59
 –, Brennwert 418, 470
 –, –, Heizwert 418, 470
 –, Reaktionsenthalpie 470
 –, Wärme 59
 vpm (volume parts per million) 457
 Wankel-Motor 209
 Wärme 58–59, 66, 158–160
 –, Anergie 158–160
 –, Definition 58
 –, Einheit 66
 –, Exergie 158, 160
 –, Vorzeichen 59
 Wärmedehnung (thermische Ausdehnung) 40
 Wärmekapazität 35, 68–71, 73–75, 78, 299, 370–371, 526–528
 –, molare 35, 78
 –, spezifische 35, 68–70, 73–75, 299, 370–371, 526–528
 –, –, Gemisch 299
 –, –, homogenes System 68
 –, –, ideales Gas 73, 75
 –, –, isobare 68
 –, –, isochore 68
 –, –, mittlere 70
 –, –, Tafel: Feststoff 370
 –, –, Tafel: Flüssigkeit 371
 –, –, Tafel: Gas 69, 371
 –, –, Temperaturabhängigkeit 69
 –, –, wahre 69–70, 75
 –, –, Wasser 69
 Wärmekraftanlage 125–126, 170, 248
 Wärmeleitfähigkeit 378
 Wärmeleitung 369, 375–376
 –, ebene Wand 369
 –, Hohlkugelwand 376
 –, Zylinderwand 375
 Wärmeleitungswiderstand 373
 Wärmepumpe 126, 137, 139–140, 284–286
 –, exergetischer Wirkungsgrad 286
 –, Gütegrad 286
 –, Heizzahl 140
 –, Leistungszahl 285
 –, mit Verbrennungsmotor 286
 Wärmerückgewinnung 412
 Wärmestrahlung s. Temperaturstrahlung
 Wärmestrom 372
 –, Dichte 372
 Wärmetheorem (Nernst) 472
 Wärmetheorien 66
 Wärmeübergang 377–392
 –, Ähnlichkeitstheorie 378
 –, Berechnungsgleichungen (Tafel) 382
 –, Kondensieren 389
 –, Verdampfen 389
 Wärmeübergangskoeffizient 377, 381, 399
 –, durch Strahlung 399
 –, Tafel: Anhaltswerte 381
 Wärmeübergangswiderstand 378
 Wärmeübertrager
 –, Exergieverlust 413
 –, Gegenstrom 404
 –, Gleichstrom 404
 –, Kreuzstrom 404
 –, Mischwärmeübertrager 404
 –, Regenerator 403
 –, Rekuperator 403
 –, Rohrbündel 407
 –, Verfahrensoptimierung 411
 Wärmeübertragung 369, 374, 377, 393, 398, 403
 –, Konvektion 377
 –, Leitung 369
 –, Strahlung 393, 398
 –, Zwischentemperatur 374
 Wärmeübertragungseigenschaften (Stoffwerte)
 –, Feststoff (Tafel) 370
 –, Flüssigkeit (Tafel) 371
 –, Gas (Tafel) 371
 –, Luft (Tafel) 372
 Wärmewiderstand (Def.) 373, 378, 401
 –, Durchgangswiderstand 401

- , Leitwiderstand 373
- , Übergangswiderstand 378
- Wasser
- , Enthalpie 233
- , Entropie 235
- , Sättigungszustand (Tafel) 237, 531
- , spezifische Wärmekapazität 70–71, 371, 537
- , –, Polynom 71
- , Tripelpunkt 31, 39, 524
- , Wärmeübertragungseigenschaften (Tafel) 371, 381, 536–537
- Wasserbeladung 315, 321
- , Gemisch 315
- Wasserdampf 231, 233, 235, 237, 240–244, 247–248, 268, 312–313, 371, 423–424, 454, 532, 534, 537
- , Clausius-Clapeyron 243
- , –, Gleichung 243
- , Clausius-Rankine-Prozess 248
- , Dampfkraftanlage 247
- , feuchte Luft 313, 423
- , feuchtes Verbrennungsgas 424, 454
- , GUD-Prozess 268
- , h,s -Diagramm 241–242
- , spezifische Entropie 235
- , Stoffwerte 237, 312, 371, 534, 537
- , Stoffwerte (Tafel) 532
- , T,s -Diagramm 240
- , Zustandsänderung 244
- , Zustandsgleichung 231
- Wasserdampfbeladung 294
- Wasserdampfgehalt 315
- Wasserdampfpartialdruck 316
- Wasserdampftafel 237–238, 240, 531
- , Stoffwerte 238
- Wasserdampftaupunkt (Abgas) 454
- Wassersäule 27
- Wasserstoff 34, 522–523, 526
- Wasserstoff (Stoffwerte) 69, 76, 528
- Wasserwert 148
- , Kalorimeter 148
- Watt 23
- Welle 393
- , elektromagnetische (Strahlung) 393
- Wellenarbeit 57, 65
- Wellenleistung 65
- Wichte 24
- Wien 394
- Wiensches Verschiebungsgesetz 394
- Wirkungsgrad
- , Brennstoffzelle 483
- , Carnot-Prozess 129
- , Clausius-Rankine-Prozess 249, 262
- , Dampfkraftanlage 261–262, 264, 274
- , Dampfkraft-Prozess 261
- , Diffusor 357
- , Düse 357
- , Eigenbedarf 262, 264
- , exergetischer 165, 171, 180–181, 187, 198, 203, 206, 249, 286–287
- , –, Clausius-Rankine-Prozess 249
- , –, Definition 171
- , –, Diesel-Prozess 206
- , –, Ericsson-Prozess 187
- , –, Joule-Prozess 180
- , –, Kältemaschine 287
- , –, Otto-Prozess 203
- , –, Stirling-Prozess 198
- , –, Wärmepumpe 286
- , feuerungstechnischer 449–450, 452
- , Gas-Dampf-Kraftwerk 270
- , Gasturbinenanlage 179, 188, 192
- , Generator 262, 264
- , GUD-Prozess 270
- , Heißgasmotor 197
- , idealer (Brennstoffzelle) 487
- , indizierter 175–176
- , indizierter (Kolbenmaschine) 175
- , innerer 173–174, 262–263
- , –, Kreisprozess 262–263
- , isentroper 191, 357
- , Joule-Prozess 179
- , Kessel 261
- , Kolbenverdichter 220
- , Kraftwerk 261, 274
- , Kupplung 220
- , mechanischer 176, 263
- , Nutzwirkungsgrad (Kreisprozess) 177
- , ORC-Prozess 283
- , Rohrleitung 262
- , Spannung 486
- , thermischer 131, 139, 171, 179, 187–188, 198, 202–203, 206, 208, 249, 253, 262–263
- , –, Clausius-Rankine-Prozess 249, 253
- , –, Diesel-Prozess 206
- , –, Ericsson-Prozess 187
- , –, Joule-Prozess 179
- , –, Otto-Prozess 202–203
- , –, Seiliger-Prozess 208
- , –, Stirling-Prozess 198
- , thermischer (Def.) 126
- , Turbinenwirkungsgrad 192–193
- , Verdichter 220
- , Verdichtervirkungsgrad 191, 193
- , volumetrischer (Kolbenverdichter) 216
- Zahlenwertgleichung 19
- Zeit 20
- Zündung 420
- , Zündgrenze 420
- , Zündtemperatur 420
- Zusammensetzung 291, 313, 417, 477
- , Brennstoff 417
- , feuchter Luft 313, 477
- , Gemisch 291
- Zusatzvolumen 295
- Zustand 32, 311, 477
- , gesättigter 311
- , übersättigter 311
- , ungesättigter 311
- , Zustandsgleichung 32
- , Zustandsgröße 32
- Zustandsänderung 48, 88, 90–91, 94, 98, 103, 109, 118, 140, 163, 244, 324
- , adiabates System 103, 118, 140
- , adiabatisches System 163
- , einfache 90
- , ideales Gas 90
- , isentrope 103
- , isobare 94, 324
- , –, feuchte Luft 324
- , isochore 91
- , isotherme 98
- , polytrope 109
- , quasistatische 48

- , T,S -Diagramm 88
- , Wasserdampf 244
- Zustandsgleichung 32, 68,
72–73, 89, 227–228, 231,
304, 319
- , Fundamentalgleichung 89
- , kalorische 68, 72–73
- , –, homogenes System 68
- , –, ideales Gas 72–73
- , kanonische 89
- , reales Fluid 227
- , thermische 32, 227–228,
231, 304, 319
- , –, heterogenes System 32
- , –, homogenes System 32
- , –, ideales Gas 32, 304
- , –, reales Fluid 227
- , –, reales Gas 227–228
- , –, Wasserdampf 231
- , Wasserdampf 231
- Zustandsgröße 23, 48, 56, 89,
232, 299, 324, 469
- , extensive 48
- , feuchte Luft 324
- , freie Energie 89
- , freie Enthalpie 89, 469
- , ideales Gemisch 299
- , intensive 48
- , kalorische 48, 56
- , molare 48
- , spezifische 48, 232
- , stoffmengenbezogene 48
- , thermische 23, 48
- , Wasserdampf 232
- Zweistoff-Gemisch 332
- Zweistoff-Prozess 258
- Zwischenkühlung 212
- , Arbeitersparnis 212
- Zwischenüberhitzen
(Dampfkraftanlage) 259
- Zwischenüberhitzung 260
- Zylinderwand 375