

# HANSER



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 Wissenschaftsgebiet 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 Examsvorbereitung 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 Physikstudiierenden 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

<b>Formelzeichen</b>	13
<b>1 Grundlagen der Thermodynamik</b>	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
<b>2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik</b>	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

<b>3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik</b>	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 Temperaturausgleich	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
<b>4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen</b>	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
<b>5</b>	<b>Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen . . . . .</b>	<b>223</b>
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	Grundschaltung 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

---

<b>6 Gemische . . . . .</b>	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
<b>7 Strömungsvorgänge . . . . .</b>	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
<b>8 Wärmeübertragung . . . . .</b>	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 Wärmetransfer . . . . .	377
8.3.1 Wärmeübergangsbeziehungen . . . . .	377
8.3.2 Ähnlichkeitstheorie des Wärmetransfers . . . . .	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
<b>9 Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen</b> . . . . .	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
<b>10</b>	<b>Lösungsergebnisse der Aufgaben</b> . . . . .	494
<b>11</b>	<b>Antworten auf die Kontrollfragen</b> . . . . .	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
<b>Anhang</b>	. . . . .	519
A1	Schrifttum . . . . .	519
A2	Nachweis verwendeteter Unterlagen . . . . .	521
A3	Wiederholung häufig benutzter Tafeln . . . . .	522
<b>Sachwortverzeichnis</b>	. . . . .	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

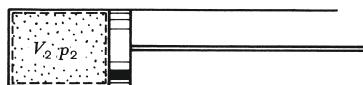
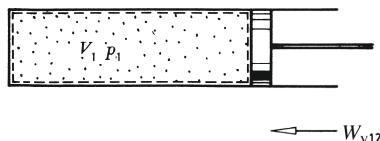
$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$$

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

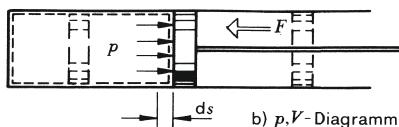
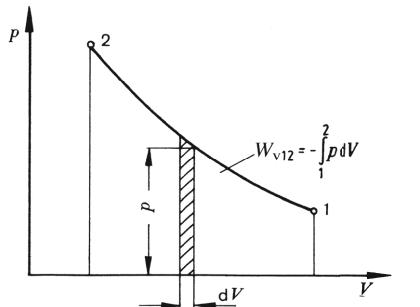
$$dW = F \cdot ds$$

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

$$F = -p \cdot A$$



a) System



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: w v 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  $\int p \, dV$  bei Volumenverringerung negativ wird. Wird die Volumenänderungsarbeit vom <sup>1</sup>System an die Umgebung abgegeben, so sind die Zustandspunkte 1 und 2 gegenüber der Darstellung in **B 2.1b** vertauscht, wodurch  $\int p \, dV$  positiv und damit die Arbeit  $W_{v12}$  negativ werden. Diese Regel, nach der <sup>1</sup>zugeführte Energie positiv, abgeführte Energie negativ ist, gilt für alle Energiearten.

Der Betrag der Volumenänderungsarbeit hängt von dem Wert des Integrals  $\int p \, dV$  ab. Zur Durchführung der Integration muss ein formelmäßiger Zusammenhang zwischen <sup>1</sup> $p$

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 2.4 b) bestehen.

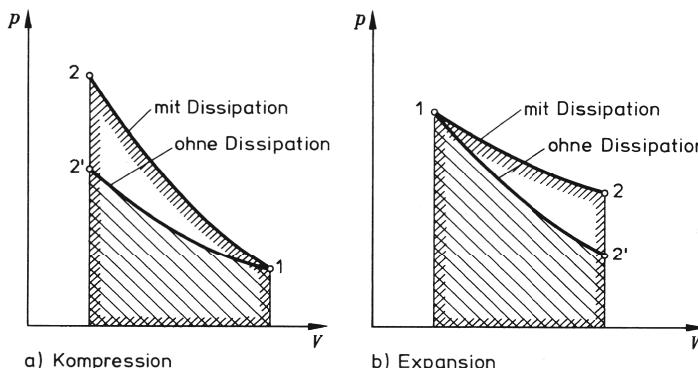
$$W_{g12} = W_{v12} + W_{\text{diss}12} \quad \text{geschlossenes System} \quad (\text{Gl 2.2})$$

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

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

Auf die Masse  $m$  bezogen ergeben sich die spezifischen Größen:

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



$$\begin{aligned} \text{mit Dissipation: } & W_{v12} = - \int_1^2 p \, dV \\ \text{ohne Dissipation: } & W_{v12'} = - \int_1^{2'} p \, dV \end{aligned}$$

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

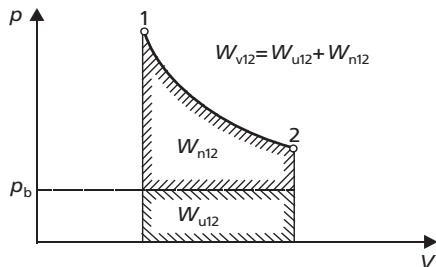
Bei Kompression oder Expansion auftretende Dissipation kann den Verlauf der Zustandsänderung und damit auch die Volumenänderungsarbeit  $W_{v12}$  beeinflussen. So wird z. B. bei adiabater Systemgrenze infolge von Dissipation der Enddruck bei gleicher Volumenänderung größer, sodass auch der Betrag des 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:

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

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

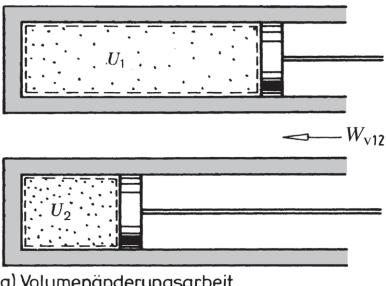
$$W_{n12} = -\int_1^2 (p - p_b) \, dV \quad \text{geschlossenes System} \quad (\text{Gl 2.6})$$

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).

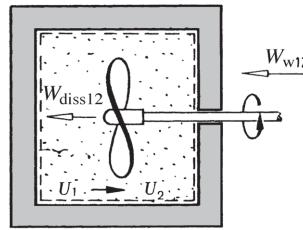
## 2.3 Innere Energie

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  $W_{w12}$ ).<sup>1)</sup> 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:

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

$W_{g12} = U_2 - U_1 \quad \text{adiabates, geschlossenes System} \quad (\text{Gl 2.7})$

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.<sup>2)</sup>

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.

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

<sup>2)</sup> Ferner gehören potentielle und kinetische Energie zur Energie eines Systems. Wir beschränken unsere Beobachtungen aber auf ruhende Systeme, in denen sich kinetische und potentielle 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:

$$U_2 - U_1 = W_{g12} = W_{v12} + W_{diss12} = -200 \text{ kJ} + 0,2 \text{ kW h} \cdot 3,6 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kW h}}$$

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

Zu c): Verschiebearbeit (Gl 2.4)

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

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

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

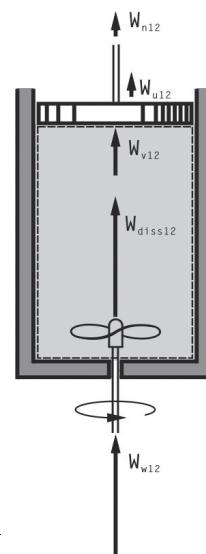
Zu d): Nutzarbeit an der Kolbenstange (Gl 2.5):

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

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

Man erkennt die mehrfache Energieumwandlung: Wellenarbeit ( $W_{w12} = 720 \text{ kJ}$ ) wird in Dissipationsenergie ( $W_{diss12} = 720 \text{ kJ}$ ), 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 ( $W_{diss12} = 720 \text{ kJ}$ ) 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:

$$v_{H_2O} = 1,943 \frac{\text{kmol H}_2\text{O}}{\text{kmol B}} \quad v_f = 11,525 \frac{\text{kmol f A}}{\text{kmol B}}$$

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

$$p_d^* = p_{fa} \frac{v_{H_2O}}{v_{fa}} = 1,01 \text{ bar} \frac{1,943}{11,525} = 0,17 \text{ bar}$$

Für  $p_d^* = p_s$  ist nach T 6.1 (näherungsweise linear interpoliert) die Sättigungstemperatur:

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

**Aufgabe 9.10:** Propan C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (trocken) wird mit feuchter Luft von 25 °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<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>, auch klimawirksame Gase, wie z. B. CO<sub>2</sub>, sowie Schadstoffe, wie z. B. SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und – im Staub – Schwermetalle.

**Schadstoffemissionen.** Schadstoffe können brennstoffabhängig sein, wie z. B. SO<sub>2</sub>, 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:* DeNOx (Entstickungsanlage).

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

Grenzwerte für Anlagen mit  $\dot{Q}_b > 300 \text{ MW}$ . 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  $\text{O}_2$ -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  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$  gehen wir in den Abschnitten 9.7.2 und 9.7.3 näher ein.

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

Schadstoff <sup>**) in <math>\frac{\text{mg}}{\text{m}^3 \text{ tA}}</math></sup>	Staub	Schwefel-oxide $\text{SO}_2$	Stickstoff-oxide $\text{NO}_2$	Kohlenstoff-monoxid CO	$\text{O}_2^a$ -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

<sup>\*)</sup> Nach der Verordnung über Großfeuerungsanlagen (13. BImschV vom 02. 05. 2013). In anderen Industrieländern sind vergleichbare Grenzwerte festgelegt.

<sup>\*\*)</sup>  Die Grenzwerte sind auf trockenes Abgas mit dem jeweils genannten Sauerstoffgehalt bezogen. Messwerte müssen darauf umgerechnet werden. In  $\text{SO}_2$  bzw.  $\text{NO}_2$  sind die als  $\text{SO}_3$  bzw. NO vorliegenden Werte – nach Umrechnung – einzubeziehen.

**Kohlenstoffdioxidemission.** Als *klimawirksamer Abgasbestandteil* verursacht vor allem  $\text{CO}_2$  den *anthropogenen Treibhauseffekt*<sup>1)</sup> (Abschn. 5.5.2). Eine Reduzierung der  $\text{CO}_2$ -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**  $\text{CO}_2$ -Bildung verschiedener Brennstoffe; heizwertbezogene Emissionsfaktoren [27]

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

Auch die Abtrennung von  $\text{CO}_2$  aus dem Abgas (Abschn. 9.7.2) verringert den Treibhauseffekt.  $\text{CO}_2$ -Abtrennung wurde in Pilotanlagen erprobt, großtechnisch aber nicht eingesetzt; Kernenergie wird weltweit vermehrt, in mehreren europäischen Ländern

<sup>1)</sup> Der Treibhauseffekt wird vor allem durch  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre bewirkt. Deren Konzentration hat sich in den vergangenen ca. 150 Jahren beim  $\text{H}_2\text{O}$  mit einer Verweilzeit von ca. 10 Tagen praktisch nicht (1 ... 4 Vol.-%), beim  $\text{CO}_2$  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,  $\text{H}_2\text{O}$  i. Allg. nicht berücksichtigt. Klimaforscher sind allerdings der Auffassung, dass  $\text{H}_2\text{O}$  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 CO<sub>2</sub>- 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 CO<sub>2</sub>-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-Kleinformfeuerungen  $O_{2\text{Bez}}^a = 13 \text{ \%}$ .

In ppm oder in Vol.\% vorliegende Messwerte müssen zur Bewertung in mg/m<sup>3</sup> tA (T 9.4) umgerechnet werden.<sup>1)</sup>

NO ist als NO<sub>2</sub> zu bewerten. Falls NO getrennt gemessen wird, ist es entsprechend umzurechnen. Das Gleiche gilt für SO<sub>3</sub>, das als SO<sub>2</sub> 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

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

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

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

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

sowie  $\lambda$  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

<sup>1)</sup> 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  $r_{CO} = CO^a$ ):

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

Normdichten s. T 1.5; weitere Werte:  $\varrho_{nNO_2} = 2,05 \text{ kg/m}^3$ ,  $\varrho_{nNO} = 1,34 \text{ kg/m}^3$ .

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

*Umrechnung der Massenkonzentration  $\varrho_{NO}^*$  in den zu bewertenden Wert  $\varrho_{NO_2}^*$ .* Die Umrechnung kann mittels der molaren Massen oder der Dichten erfolgen:

$$\varrho_{NO_2}^* = \frac{M_{NO_2}}{M_{NO}} \varrho_{NO}^* = \frac{\varrho_{nNO_2}}{\varrho_{nNO}} \varrho_{NO}^* \quad (\text{Gl 9.54 a})$$

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

$$\varrho_{NO_2}^* = 1,53 \varrho_{NO}^* \quad (\text{Gl 9.54 b})$$

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):

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

Mit der Brennstoffenergie  $Q_B = m_B H_u$  und der Schadstoffmasse  $m_{CO} = m_B v_{tn}^a \varrho_{CO}^*$  erhält man:

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

Emissionsfaktoren werden bevorzugt in mg/(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 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

$$NO_x^a = NO_2^a + NO_{(\text{als } NO_2)}^a = (5 + 153) \text{ ppm} = 158 \text{ ppm}$$

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

Umgerechnet in die Massenkonzentration in mg  $NO_2/\text{m}^3 \text{ t A}$  ergibt sich entspr. Gl 9.53:

$$\varrho_{NO_x}^* = \varrho_{nNO_2} NO_x^a = 2,05 \frac{\text{kg } NO_2}{\text{m}^3 \text{ NO}_2} 158 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3 \text{ NO}_2}{\text{m}^3 \text{ t A}} 10^6 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = 324 \frac{\text{mg } NO_2}{\text{m}^3 \text{ t A}}$$

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

$$\varrho_{NO_x \text{ Bez}}^* = \varrho_{NO_x \text{ gem}}^* \frac{0,21 - O_2^a \text{ Bez}}{0,21 - O_2^a \text{ gem}} = 324 \frac{\text{mg } NO_2}{\text{m}^3 \text{ t A}} \frac{0,21 - 0,06}{0,21 - 0,04} = 286 \frac{\text{mg } NO_2}{\text{m}^3 \text{ t A}}$$

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<sub>2</sub> in mg/m<sup>3</sup> t A und in ppm zulässig?

**Aufgabe 9.12:** Bei der Verbrennung des Heizöls nach Beispiel 9.2 wird im Abgas 100 mg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> t A gemessen. Heizwert des Heizöls 11,5 kW h/kg.

Wie hoch ist der heizwertbezogene Emissionsfaktor in mg NO<sub>2</sub>/(kW h)?

## 9.7.2 Minderung der Schwefeloxidemission

**Minderungsmöglichkeiten.** Der im Brennstoff enthaltene Schwefel verbrennt zu SO<sub>2</sub> (Gl 9.6e), ein geringer Teil auch zu SO<sub>3</sub>. Die entstehende Schwefeloxidmenge ist vom Schwefelgehalt des Brennstoffes abhängig. Übliche bzw. festgelegte Werte:<sup>1)</sup>

Stein- und Braunkohle	ca.	1	Massen-%
Heizöl S	max.	1	Massen-%
Heizöl EL	max.	0,1	Massen-%
Heizöl EL schwefelarm	max.	50 mg/kg = 0,005	Massen-%
Erdgas	max.	30 mg/m <sup>3</sup> (V <sub>n</sub> )	(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<sub>3</sub>) 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<sub>3</sub> (Kalkstein) durchgesetzt, nach dem z. B. in Deutschland ca. 95 % aller Anlagen arbeiten. CaCO<sub>3</sub> 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<sub>2</sub> gelöst, das anschließend nach folgendem vereinfachtem Reaktionsschema zu Calciumsulfit CaSO<sub>3</sub> reagiert:



Das von SO<sub>2</sub> gereinigte Abgas verlässt den Waschturm über einen Tropfenabscheider. Das CaSO<sub>3</sub> wird im unteren Teil des Waschturms durch Einblasen von Luft oxidiert:

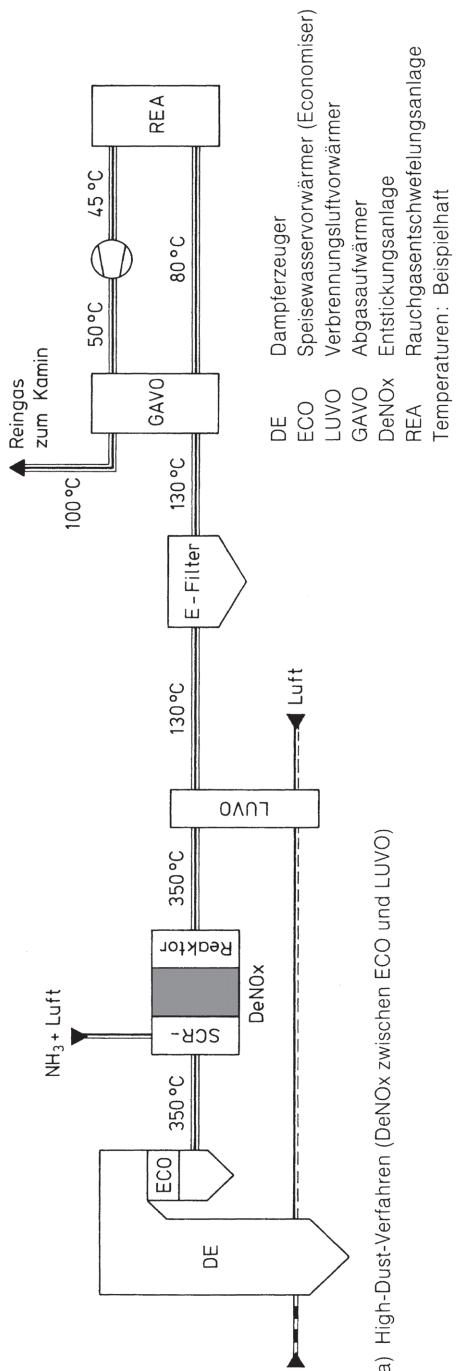


Es entsteht Calciumsulfat-Dihydrat (Gips), das bis auf ca. 10 % Restfeuchte entwässert und rieselfähig oder brikettiert abgegeben wird. Der REA-Gips hat den Naturgips in der Baustoffindustrie fast vollständig ersetzt.

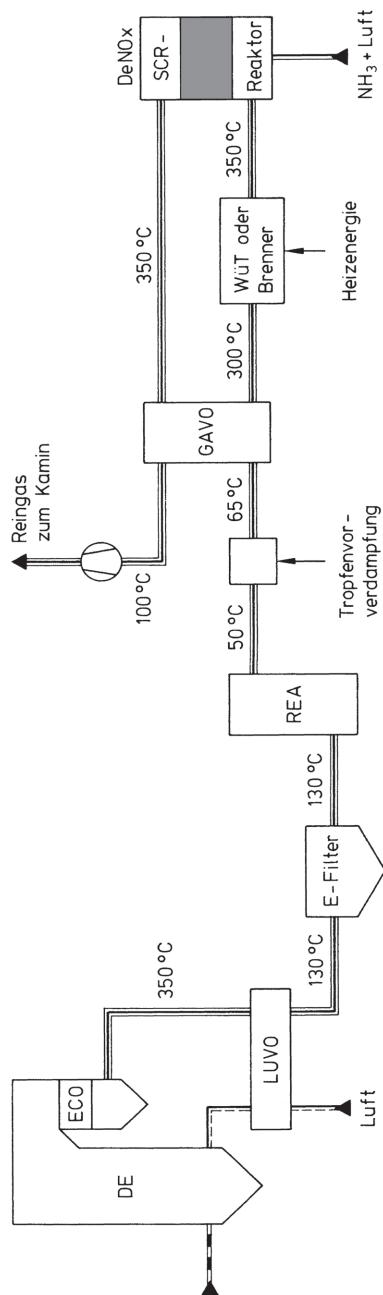
Aus 1 kmol SO<sub>2</sub> (64 kg) wird 1 kmol CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O (172 kg); 1 kg SO<sub>2</sub> wird somit in 2,69 kg CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O (Gips) umgewandelt.

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

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



a) High-Dust-Verfahren (DeNOx zwischen ECO und LUVO)



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* ( $\text{CaCO}_3$ -Einblasen in die Feuerung) werden Entschwefelungsgrade um 50 %, bei dem *Nasswaschverfahren mit Natriumsulfit*  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  (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.-%  $\text{O}_2$  im Abgas. Das Abgas soll durch Nasswäscze 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  $\text{SO}_2$ -Konzentration im trockenen Abgas in  $\text{mg SO}_2/\text{m}^3 \text{ t A}$ ,
- der stündlich zu entfernende  $\text{SO}_2$ -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  $\text{SO}_2$  (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

$$\dot{V}_t = \dot{m}_b v_t = 240000 \frac{\text{kg B}}{\text{h}} 9,0 \frac{\text{m}^3 \text{ t A}}{\text{kg B}} = 2,16 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^3 \text{ t A}}{\text{h}}$$

ergibt sich die  $\text{SO}_2$ -Konzentration im trockenen Abgas:

$$\varrho_{\text{SO}_2}^* = \frac{\dot{m}_{\text{SO}_2}}{\dot{V}_t} = \frac{4,8 \cdot 10^9 \text{ mg SO}_2 \text{ h}}{h 2,16 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ t A}} = 2222 \frac{\text{mg SO}_2}{\text{m}^3 \text{ t A}}$$

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

$$\Delta \varrho_{\text{SO}_2}^* = \varrho_{\text{SO}_2}^* - \varrho_{\text{SO}_2 \text{ zul}}^* = (2222 - 150) \frac{\text{mg SO}_2}{\text{m}^3 \text{ t A}} = 2072 \frac{\text{mg SO}_2}{\text{m}^3 \text{ t A}}$$

Daraus ermitteln wir den zu entfernenden  $\text{SO}_2$ -Massenstrom:

$$\Delta \dot{m}_{\text{SO}_2} = \dot{V}_t \Delta \varrho_{\text{SO}_2}^* = 2,16 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^3 \text{ t A}}{\text{h}} 2072 \frac{\text{mg SO}_2}{\text{m}^3 \text{ t A}} \frac{\text{t}}{10^9 \text{ mg}} = 4,48 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

Zu c): Nach Gl 9.57 wird 1 kg  $\text{SO}_2$  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

### 9.7.3 Minderung der Stickstoffoxidemission

**Entstehung von Stickstoffoxiden.** Stickstoffoxid  $\text{NO}_x$  im Abgas von Feuerungen besteht zu ca. 90...95 % aus Stickstoffmonoxid NO und zu ca. 5...10 % aus Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$ . In der Atmosphäre wandelt sich NO allmählich zu  $\text{NO}_2$  um, das als der eigentliche Schadstoff betrachtet wird. Bei der Emissionsbeurteilung wird daher die NO-Konzen-

## Sachwortverzeichnis

- Abgas 424, 435, 450  
 –, Kondensation 450  
 Abgas (s. auch Verbrennungsgas) 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  
 Anzapfpvorrwärmung 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  
 Arbeitsersparnis 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  
 –, Längenausdehnungskoeffizient 40  
 –, Volumenausdehnungskoeffizient, 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
  - , -, rechtslaufender 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
- BCR-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
  - , Reformer 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  
 -, Bezugsdruk 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 ( $H_2O$ )  
 -, 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  
 Energiedichte 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  
 -, -, Sattdampf 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
- , -, Sattdampf 236
- , -, siedende Flüssigkeit 236
- , -, Wasserdampf 235
- , Wasserdampf (Tafel) 237, 531–533
- Entropieänderung
  - , Drosselung 142
  - , ideales Gas 92, 118
  - , Kreisprozess 132
  - , Reaktionsentropie 472
  - , Temperaturausgleich 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
- Exegieverlust 162–164, 413, 481–482
  - , Verbrennung 481–482
  - , Wärmeübertrager 413
- Exegieverlust durch Dissipation 160
- Exegieverlustleistung 162
- Exegieverluststrom 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
- Feuchtigkeitskugeltemperatur 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
- Fluorchlor Kohlenwasserstoff 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
  - , Grundschaltung 268
  - , Kraftwerkssnettoleistung 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  
Grundschaltung 268  
–, Gas-Dampf-Kraftwerk 268  
GUD-Prozess 183, 258,  
268–272  
–, Ausnutzungsgrad 269  
–, Brennstoffleistungs-  
verhältnis 270  
–, Gesamtwirkungsgrad 271  
–, Grundschaltung 268  
–, Kraftwerksnettoleistung  
270  
–, Nutzleistung 270  
–, Schaltungsbeispiel 272  
–, Wirkungsgrad 270  
Gütegrad 176, 286–287  
–, Kältemaschine 287  
–, Wärmepumpe 286  
*h,μ<sub>b</sub>*-Diagramm (Gemische)  
333  
–, H<sub>2</sub>O–LiBr 335, 338  
–, NH<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O 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  
 Kalt dampfmaschine 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  
 –, Gesamt wirkungsgrad 194,  
   262, 272, 274  
 –, Nettowirkungsgrad 274  
 Kraftwerkseigenbedarf 193  
 Kraftwerks nettoleistung 193,  
   262, 264  
 Kraftwerks netto wirkungsgrad  
   262, 264  
 –, wärmotechnischer 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  
 –, reversibel 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  
**Lambertches Richtungsgesetz** 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 Zustandsänderung 324  
 –, –, Mischprozess 324  
 –, –, Partialdruck (Tafel) 477  
 –, –, relative 314  
 –, –, Sättigungsdichte 314  
 –, –, spezifische Enthalpie 319  
 –, –, spezifisches Volumen 318  
 –, –, Wärmeabfuhr 324  
 –, –, Wasserbeladung 315  
 –, –, Wasserdampfpartialdichte 314  
 –, –, Wasserdampfpartialdruck 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 (Wasserdampf) 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 Wärmethorem 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
- Nutzaistung 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
- Péclét-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  
 Schrägrohrmanometer 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  
 –, Aussstrahlung 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 (wärmee durchlässige) 47, 58
- Taulinie (Sattdampf) 230
- Taupunkt (Gemisch) 313, 454
- Techn. Atmosphäre 27
- Teildichte: s. Partildichte 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
- 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
- Trielpunkt 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
  - , Energieverlust 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
- Verbrennungsgaszusammensetzung 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  
 –, Exnergieverlust 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  
 Volumenausdehnungskoeffizient 43–44  
 –, ideales Gas 44  
 Volumendehnung 43  
 Volumenkontraktion 291  
 Vorgang 144  
 Vorsatzeichen 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
  - Wasser dampfbeladung 294
  - Wasser dampfgehalt 315
  - Wasser dampfpartialdruck 316
  - Wasser dampftafel 237–238, 240, 531
    - , Stoffwerte 238
  - Wasser dampftaupunkt (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
    - , Verdichterwirkungsgrad 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
  - Zusatztvolumen 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
    - , polytropie 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
- ,-, Arbeitsersparnis 212
- Zwischenüberhitzen  
    (Dampfkraftanlage) 259
- Zwischenüberhitzung 260
- Zylinderwand 375