

# Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik

Bearbeitet von  
Hans-Joachim Kretzschmar, Ingo Kraft

5., aktualisierte Auflage 2016. Buch. 240 S. Hardcover

ISBN 978 3 446 44668 7

Format (B x L): 11,8 x 16,7 cm

Gewicht: 229 g

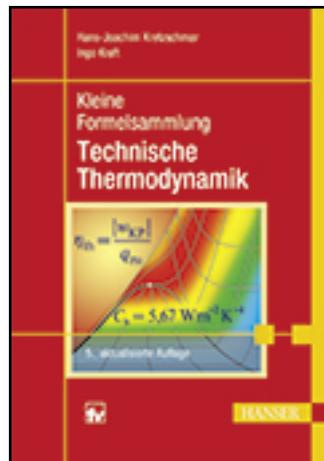
[Weitere Fachgebiete > Technik > Werkstoffkunde, Mechanische Technologie >](#)  
[Technische Thermodynamik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei



Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# HANSER



## Leseprobe

Hans-Joachim Kretzschmar, Ingo Kraft

Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik

ISBN (Buch): 978-3-446-44668-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-44857-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44668-7>

sowie im Buchhandel.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Thermodynamische Größen .....</b>	<b>11</b>
1.1	Größenarten .....	11
1.2	Größen und Einheiten .....	12
1.3	Umrechnung von Einheiten .....	14
<b>2</b>	<b>Zustandsverhalten reiner Stoffe .....</b>	<b>15</b>
2.1	Einphasengebiete und Phasenübergänge .....	15
2.2	Zweiphasengebiet flüssig – gasförmig.....	16
2.3	Bereiche für Zustandsberechnung .....	19
2.3.1	Bereiche für Zustandsberechnung im $p,T$ -Diagramm...	20
2.3.2	Bereiche für Zustandsberechnung im $p,\nu$ -Diagramm...	21
2.3.3	Bereiche für Zustandsberechnung im $T,s$ -Diagramm ...	22
2.3.4	Bereiche für Zustandsberechnung im $h,s$ -Diagramm ...	23
<b>3</b>	<b>Thermische Zustandsgrößen.....</b>	<b>24</b>
3.1	Temperatur .....	24
3.2	Druck .....	25
3.3	Dichte und spezifisches Volumen .....	26
3.3.1	Definitionen .....	26
3.3.2	Ermittlung von $\nu$ und $\rho$ für reale Fluide .....	27
3.3.3	Ermittlung von $\nu$ und $\rho$ für ideale Gase.....	27
3.3.4	Ermittlung von $\nu$ und $\rho$ für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten und Festkörper .....	30
3.3.5	Ermittlung von $\nu$ und $\rho$ für Nassdampf .....	32
3.4	Normzustand und Normvolumen.....	33
<b>4</b>	<b>Energetische Zustandsgrößen.....</b>	<b>34</b>
4.1	Wärmekapazitäten .....	34
4.1.1	Definitionen .....	34
4.1.2	Ermittlung von $c_p$ und $c_v$ für reale Fluide.....	34
4.1.3	Ermittlung von $c_p$ und $c_v$ für ideale Gase .....	35
4.1.4	Ermittlung von $c_p$ und $c_v$ für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten und Festkörper .....	36
4.1.5	$c_p$ und $c_v$ für Nassdampf .....	37
4.2	Isentropenexponent und isentrope Schallgeschwindigkeit .....	37

4.2.1	Definitionen .....	37
4.2.2	Ermittlung von $\kappa$ und $w$ für reale Fluide .....	38
4.2.3	Ermittlung von $\kappa$ und $w$ für ideale Gase .....	38
4.2.4	$\kappa$ und $w$ für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten .....	39
4.2.5	$\kappa$ und $w$ für Nassdampf.....	39
4.3	Enthalpie und innere Energie .....	40
4.3.1	Definitionen .....	40
4.3.2	Ermittlung von $h$ und $u$ für reale Fluide.....	42
4.3.3	Ermittlung von $h$ und $u$ für ideale Gase .....	42
4.3.4	Ermittlung von $h$ und $u$ für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten und Festkörper .....	47
4.3.5	Ermittlung von $h$ und $u$ für Nassdampf.....	51
4.4	Entropie.....	53
4.4.1	Definition.....	53
4.4.2	Ermittlung von $s$ für reale Fluide .....	54
4.4.3	Ermittlung von $s$ für ideale Gase.....	55
4.4.4	Ermittlung der spezifischen Entropie $s$ für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten .....	58
4.4.5	Ermittlung von $s$ für Nassdampf.....	58
4.5	Exergie .....	59
4.5.1	Exergie (der Enthalpie) .....	59
4.5.2	Exergie der inneren Energie.....	60
<b>5</b>	<b>Massebilanz.....</b>	<b>62</b>
5.1	Stoffmenge, Masse und Volumen .....	62
5.2	Massestrom und Volumenstrom.....	63
5.3	Massebilanz bei geschlossenen Systemen.....	63
5.4	Massebilanz bei offenen stationären Systemen .....	64
5.5	Massebilanz bei offenen instationären Systemen .....	66
<b>6</b>	<b>Energiebilanz – 1. Hauptsatz der Thermodynamik.....</b>	<b>67</b>
6.1	Ruhendes geschlossenes System .....	67
6.1.1	Energiebilanz zwischen Zustand 1 und 2 .....	67
6.1.2	Volumenänderungsarbeit.....	68
6.1.3	Äußere Nutzarbeit und Kolbenarbeit .....	70
6.1.4	Dissipierte Arbeiten .....	71
6.1.5	Wärme .....	73
6.1.6	Instationäre Energiebilanz .....	75

6.2 Ruhendes offenes System .....	76
6.2.1 Stationäre Energiebilanz .....	76
6.2.2 Technische Arbeit .....	79
6.2.3 Allgemeine instationäre Energiebilanz.....	81
6.3 Berechnung der Differenzen von spezifischer Enthalpie und spezifischer innerer Energie .....	82
6.3.1 Reale Fluide .....	82
6.3.2 Ideale Gase .....	82
6.3.3 Inkompressible (ideale) Flüssigkeiten.....	86
6.3.4 Nassdampf.....	90
<b>7 Entropiebilanz – 2. Hauptsatz der Thermodynamik .....</b>	<b>91</b>
7.1 Ruhendes geschlossenes System .....	91
7.1.1 Entropiebilanz zwischen Zustand 1 und 2.....	91
7.1.2 Entropie der Wärme .....	92
7.1.3 Entropieproduktion .....	93
7.1.4 Dissipationsenergie .....	95
7.2 Ruhendes offenes System .....	96
7.3 Berechnung der Differenzen der spezifischen Entropie.....	98
7.3.1 Reale Fluide .....	98
7.3.2 Ideale Gase .....	98
7.3.3 Inkompressible (ideale) Flüssigkeiten.....	101
7.3.4 Nassdampf.....	103
<b>8 Exergiebilanz.....</b>	<b>104</b>
8.1 Ruhendes geschlossenes System .....	104
8.1.1 Exergiebilanz zwischen Zustand 1 und 2 .....	104
8.1.2 Exergie der Wärme .....	105
8.1.3 Exergieverlust .....	106
8.2 Ruhendes offenes System .....	107
8.3 Berechnung der Differenzen der spezifischen Exergie .....	110
<b>9 Einfache Prozesse.....</b>	<b>111</b>
9.1 Grundlagen der thermodynamischen Modellierung technischer Prozesse .....	111
9.2 Technische Anwendungen.....	117
9.2.1 Fluide in Behältern mit starren Wänden.....	117
9.2.2 Fluide unter konstantem Druck .....	118
9.2.3 Mischen von Fluidströmen.....	120

9.2.4	Verdichten und Pumpen.....	121
9.2.5	Entspannung in Turbinen.....	125
9.2.6	Drosselentspannung.....	128
<b>10</b>	<b>Kreisprozesse .....</b>	<b>130</b>
10.1	Grundlagen .....	130
10.2	Gasturbinenanlagen-JOULE-Prozess.....	136
10.3	Dampfturbinenanlagen-CLAUSIUS-RANKINE-Prozess ....	139
10.4	Kältemaschinen- und Wärmepumpen-Prozess .....	143
<b>11</b>	<b>Wärmeübertragung.....</b>	<b>146</b>
11.1	Transporteigenschaften der Stoffe.....	146
11.2	Stationäre Wärmeleitung .....	147
11.2.1	Grundlagen.....	147
11.2.2	Ebene Wand .....	150
11.2.3	Zylinderwand (Rohrwand) .....	151
11.2.4	Kugelwand .....	153
11.3	Konvektiver Wärmeübergang.....	154
11.3.1	Temperaturfeld.....	155
11.3.2	Wärmestrom und Wärmeübergangskoeffizient.....	156
11.3.3	Ähnlichkeitskennzahlen .....	158
11.3.4	Freie Konvektion .....	160
11.3.5	Erzwungene Konvektion.....	165
11.4	Wärmestrahlung .....	170
11.4.1	Energiebilanz .....	170
11.4.2	Zweiflächenstrahlungsaustausch.....	172
11.4.3	Strahlungsaustauschkoeffizient (resultierender Strahlungskoeffizient) für ausgewählte Anwendungsfälle .....	175
11.5	Wärmedurchgang .....	177
<b>12</b>	<b>Thermodynamik der feuchten Luft .....</b>	<b>182</b>
12.1	Konstanten für die Zustandsberechnung .....	182
12.2	Arten der feuchten Luft.....	184
12.3	Zusammensetzung der feuchten Luft .....	186
12.3.1	Allgemeine Zusammensetzung der feuchten Luft – Wassergehalt .....	186
12.3.2	Ungesättigte feuchte Luft – Relative Feuchte.....	189
12.3.3	Gesättigte feuchte Luft .....	192

12.3.4	Übersättigte feuchte Luft (Nebel) .....	194
12.4	Luftspezifisches Volumen und Dichte.....	194
12.5	Spezifische Wärmekapazitäten.....	197
12.6	Isentropenexponent und isentrope Schallgeschwindigkeit	198
12.7	Luftspezifische Enthalpie und luftspezifische innere Energie .....	199
12.8	Taupunkttemperatur .....	202
12.9	Feuchtkugeltemperatur (Kühlgrenztemperatur).....	203
12.10	Das $h_{1+x,x_W}$ -Diagramm .....	205
12.11	Bilanzierung von Prozessen mit feuchter Luft .....	206
12.12	Anwendung der Zustandsberechnung von feuchter Luft auf feuchte Gase .....	210
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>211</b>
	<b>Anhang</b>	
<b>A</b>	<b>Stoffwertsammlung.....</b>	<b>213</b>
A1	Stoffunabhängige Konstanten.....	213
A2	Stoffspezifische Konstanten .....	213
A3	Stoffwerte von Gasen im Idealgaszustand .....	215
A4	Stoffwerte von siedendem Wasser und gesättigtem Wasserdampf .....	220
A5	Stoffwerte von Wasser (reales Fluid).....	221
A6	Stoffwerte von Wasserflüssigkeit (ideal).....	222
A7	Stoffwerte von Luft (reales Fluid) .....	223
A8	Stoffwerte von Luft bei $p = 0,101325 \text{ MPa}$ .....	224
A9	Transportgrößen von Feststoffen (Mittelwerte) .....	225
A10	Gesamtemissionsverhältnisse von Stoffen (Mittelwerte).....	226
A11	Heizwerte und Brennwerte .....	227
A12	Sättigungspartialdruck von Wasser .....	228
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>229</b>
<b>B</b>	<b>Zustandsdiagramme (als Beilage)</b>	
B1	Mollier $h,s$ -Diagramm von Wasserdampf	
B2	$T,s$ -Diagramm von Wasser und Wasserdampf	
B3	$\lg p,h$ -Diagramm von Ammoniak	
B4	$h_{1+x,x_W}$ -Diagramm von feuchter Luft	

# Vorwort zur fünften Auflage

Die „Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik“ ist inzwischen etabliert. Die vorliegende fünfte Auflage wurde überarbeitet und ergänzt. Sie enthält die wichtigsten Formeln und Berechnungsalgorithmen der Technischen Thermodynamik einschließlich Wärmeübertragung für die Studiengänge und Studienrichtungen

- Maschinenbau
- Energie-, Verfahrens- und Umwelttechnik
- Technische Gebäudeausrüstung und Versorgungstechnik
- Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik
- Kälte- und Wärmepumpentechnik
- Wirtschaftsingenieurwesen

an Universitäten, Fachhochschulen, Berufsakademien und Fachschulen. Erfasst werden die folgenden Gebiete der Technischen Thermodynamik

- Energielehre und thermodynamische Stoffeigenschaften,
- einfache Prozesse und Kreisprozesse,
- Wärmeübertragung und
- Thermodynamik der feuchten Luft.

Diese Formelsammlung kann somit als Grundlage für die Berechnung von Maschinen, Apparaten und Anlagen dienen.

Die Darstellung der Energielehre orientiert sich am Lehrkonzept von Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. e. h. *W. Wagner*, Lehrstuhl für Thermodynamik der Ruhr-Universität Bochum.

Beibehalten wurde die anwendungsorientierte Darstellung. Zur schnellen Nutzung sind die Formelzeichen unmittelbar unter der betreffenden Formel erläutert. Eine ausführliche Stoffwert- und Diagrammsammlung im Anhang ermöglicht die sofortige Anwendung Gleichungen.

Das Kapitel "Ideale Gasgemische", weitere Abschnitte sowie Stoffwert-Bibliotheken und ergänzende Software für Excel®, MATLAB® Mathcad® und verschiedene Taschenrechner stehen auf der Website [www.thermodynamik-formelsammlung.de](http://www.thermodynamik-formelsammlung.de) zum Download bereit. Des Weiteren können hier Stoffwerte online berechnet werden.

Die Autoren danken Frau Dr.-Ing. *I. Stöcker* † sowie Herrn Dr.-Ing. *S. Herrmann* und Herrn Dipl.-Ing. (FH) *M. Kunick* für die Erstellung der Bilder, Diagramme und Tabellen.

*Hans-Joachim Kretzschmar und Ingo Kraft*

# 6 Energiebilanz – 1. Hauptsatz der Thermodynamik

## 6.1 Ruhendes geschlossenes System

### 6.1.1 Energiebilanz zwischen Zustand 1 und 2

#### 1. Hauptsatz bei geschlossenen Systemen

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1$$

$Q_{12}$  Summe der Wärmen, zu- ( $> 0$ ) oder abgeführt ( $< 0$ ) zwischen Anfangszustand 1 und Endzustand 2

$W_{12}$  Summe der Arbeiten, zu- ( $> 0$ ) oder abgeführt ( $< 0$ )

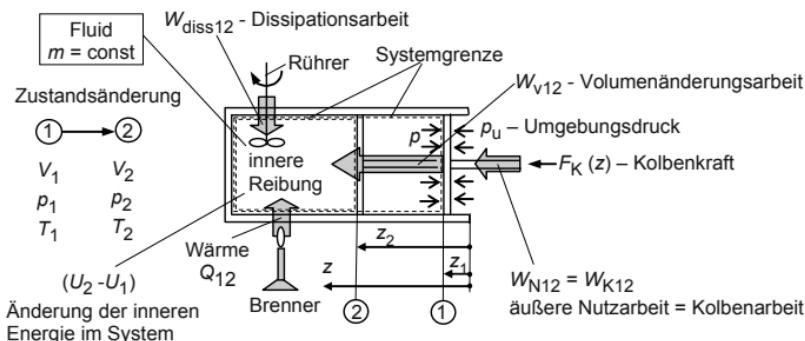
$U_2 - U_1$  Differenz der inneren Energie des Systems zwischen Endzustand 2 und Anfangszustand 1

$$U_2 - U_1 = m \cdot (u_2 - u_1)$$

$m$  Masse des Systems

$u_2 - u_1$  Differenz der spezifischen inneren Energie des Systems zwischen 2 und 1 ↗ Berechnung in 6.3

#### Beispiel eines geschlossenen Systems mit energetischen Bilanzgrößen



## Zu- oder abgeführte Arbeiten

$$W_{12} = W_{v12} + W_{\text{diss}12} \quad [W] = 1 \text{ kJ}$$

$W_{12}$  Summe der Arbeiten, zu- oder abgeführt

$W_{v12}$  Volumenänderungsarbeit, zu- ( $> 0$ ) oder abgeführt ( $< 0$ ) ↗ 6.1.2

$W_{\text{diss}12}$  dissipierte Arbeiten ( $> 0$ , da zugeführt) ↗ 6.1.4

### Sonderfall: $p = \text{const}$

$$Q_{12} + W_{\text{diss}12} = H_2 - H_1$$

$Q_{12}$  Summe der Wärmen, zu- ( $> 0$ ) oder abgeführt ( $< 0$ ) zwischen Anfangszustand 1 und Endzustand 2

$W_{\text{diss}12}$  Summe der dissipierten Arbeiten ( $> 0$ , da zugeführt) ↗ 6.1.4

$H_2 - H_1$  Differenz der Enthalpie des Systems zwischen 2 und 1

$$H_2 - H_1 = m \cdot (h_2 - h_1)$$

$m$  Masse des Systems

$h_2 - h_1$  Differenz der spezifischen Enthalpie des Systems zwischen 2 und 1 ↗ Berechnung in 6.3

## 6.1.2 Volumenänderungsarbeit

### Volumenänderungsarbeit zwischen Zustand 1 und 2

$$W_{v12} = - \int_{V_1}^{V_2} p(V) \cdot dV + W_{r12} \quad [W_v] = 1 \text{ kJ}$$

$W_{v12}$  Volumenänderungsarbeit, zu- oder abgeführt zwischen Anfangszustand 1 und Endzustand 2 ↗ Bild in 6.1.1

$p(V)$  Gleichung der Zustandsänderung für den Druck  $p$  als Funktion des Volumens  $V$

- $W_{r12}$  Reibungsarbeit aufgrund innerer Reibung im Fluid, z. B. durch Verwirbelung ( $> 0$ , da dissipiert)

### Spezifische Volumenänderungsarbeit zwischen Zustand 1 und 2

$$w_{v12} = \frac{W_{v12}}{m} = - \int_{v_1}^{v_2} p(v) \cdot dv + w_{r12} \quad [w_v] = 1 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$w_{v12}$  spezifische Volumenänderungsarbeit, zu- oder abgeführt zwischen Anfangszustand 1 und Endzustand 2

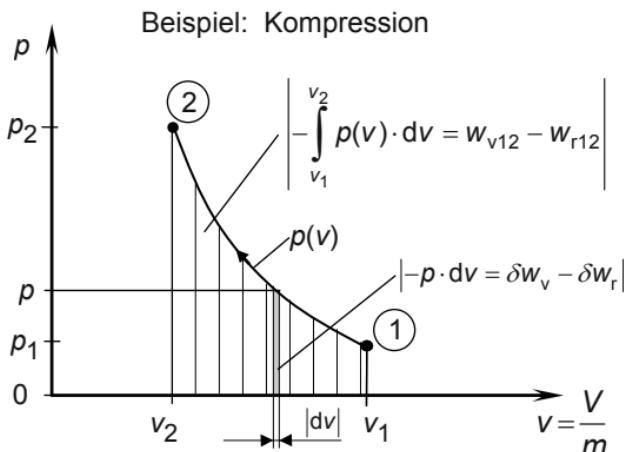
$W_{v12}$  Volumenänderungsarbeit, zu- oder abgeführt

$m$  Masse

$p(v)$  Gleichung der Zustandsänderung für den Druck  $p$  als Funktion des spezifischen Volumens  $v$

$w_{r12}$  spezifische Reibungsarbeit ( $> 0$ , da dissipiert)

### Spezifische Volumenänderungsarbeit im $p,v$ -Diagramm



## Differenzielle Volumenänderungsarbeit

$$\delta W_v = -p \cdot dV + \delta W_r$$

- $\delta W_v$  differenzielle Volumenänderungsarbeit, zu- oder abgeführt  
 (Das Differenzial  $\delta W_v$  steht für  $dW_v$ . Mit  $\delta$  werden die Differenziale von Prozessgrößen gekennzeichnet.)
- $p$  Druck
- $dV$  differenzielle Änderung des Volumens  $V$
- $\delta W_r$  differenzielle Reibungsarbeit ( $> 0$ , da dissipiert)

### 6.1.3 Äußere Nutzarbeit und Kolbenarbeit

#### Äußere Nutzarbeit zwischen Zustand 1 und 2

$$W_{N12} = W_{v12} + p_u \cdot (V_2 - V_1) = W_{K12} \quad [W_N] = 1 \text{ kJ}$$

- $W_{N12}$  äußere Nutzarbeit, zu- oder abgeführt zwischen Anfangszustand 1 und Endzustand 2 ↗ Bild in 6.1.1
- $W_{v12}$  Volumenänderungsarbeit, zu- ( $> 0$ ) oder abgeführt ( $< 0$ ) ↗ 6.1.2
- $p_u \cdot (V_2 - V_1)$  Verschiebearbeit des Umgebungsdruckes
- $p_u$  barometrischer Druck in der Umgebung des Systems ↗ 3.2
- $V_1, V_2$  Volumina des Systems in den Zuständen 1 und 2
- $W_{K12}$  Kolbenarbeit, zu- oder abgeführt zwischen Anfangszustand 1 und Endzustand 2 ↗ Bild in 6.1.1

#### Kolbenarbeit zwischen Zustand 1 und 2

$$W_{K12} = \int_{z_1}^{z_2} F_K(z) \cdot dz \quad [W_K] = 1 \text{ kJ}$$

- $W_{K12}$  Kolbenarbeit, zu- oder abgeführt zwischen Anfangszustand 1 und Endzustand 2 ↗ Bild in 6.1.1

# Sachwortverzeichnis

1. Hauptsatz, siehe Energiebilanz
2. Hauptsatz, siehe Entropiebilanz

Absolute Feuchte von feuchter Luft .....	186, 191 ff., 196 ff., 203 f.
Absorptionsgrad, Absorptionsverhältnis.....	170
Adiabater Prozess .....	111, 120, 122, 125, 128
Ähnlichkeitskennzahlen.....	158 ff.
Arbeit, Arbeitsleistung	
dissipierte Arbeiten (Dissipationsarbeiten).....	71 ff.
elektrische Arbeit und Leistung.....	72
Kolbenarbeit (äußere).....	70
Kreisprozessarbeit, allgemein.....	131
Nutzarbeit (äußere).....	70
Reibungsarbeit.....	68 f., 71, 80
technische Arbeit und Arbeitsleistung.....	79
am Fluidstrom .....	79
innere technische Arbeit.....	80
Darstellung im $p,v$ -Diagramm .....	80
reversible Prozesse .....	112 ff.
Volumenänderungsarbeit .....	68 ff.
Darstellung im $p,v$ -Diagramm.....	69
bei konstantem Druck, reversibel .....	119
reversible Prozesse .....	112 ff.
Wellenarbeit und Wellenarbeitsleistung.....	71
Arbeitsmaschine .....	132 ff.
AVOGADRO-Konstante .....	62, 213
Behälter (mit starren Wänden).....	117
Bernoulli-Gleichung .....	79
Brennwerte .....	227
CARNOT-Prozess .....	135 ff.
CLAUSIUS-RANKINE-Prozess .....	140 ff.
Dampfanteil (Dampfmasseanteil) .....	18
Dampfturbinenanlagen-Prozess .....	140 ff.
Diathermanes (strahlungsdurchlässiges) Medium .....	170

Diagramme mit Zustandsgrößen .....	20 ff., 205, B1 bis B4
Dichte siehe Volumen, spezifisches .....	26 ff.
Dissipationsenergie .....	73 f., 95
Dissipierte Arbeiten, Dissipationsarbeiten .....	71 ff., 94
Drosselentspannung .....	128 ff.
Druck .....	25 ff.
barometrischer Druck der Umgebung .....	25
Dampfdruck, Sättigungsdruck .....	16, 18, 220, 228
Gesamtdruck der feuchten Luft .....	185, 190
Partialdruck des Wasserdampfes in feuchter Luft .....	185, 190 ff., B4
Sättigungspartialdruck von Wasserdampf .....	190, 192 f., 228
statischer Druck einer Flüssigkeitssäule .....	26
Unterdruck, Überdruck .....	25
Durchlasskoeffizient .....	170
Durchmesser, gleichwertiger (hydraulischer) .....	167
Einheiten und deren Umrechnungen .....	12, 14
Einstrahlzahl .....	173
Eisnebel .....	184f., 194, 197, 201
Emissionsverhältnis, Emissionsgrad .....	171, 226
Energiebilanz, 1. Hauptsatz .....	67 ff.
bei ruhenden geschlossenen Systemen .....	67 ff.
instationäre Energiebilanz .....	75
zwischen Zustand 1 und 2 .....	67 ff.
bei ruhenden offenen Systemen .....	76 ff.
instationäre Energiebilanz .....	81
stationäre Energiebilanz .....	76 ff.
mit feuchter Luft .....	208 f.
stationärer Fließprozess .....	77
Enthalpie und innere Energie .....	40 ff.
Enthalpiestrom .....	41
von feuchter Luft .....	200
Gesamtenthalpie im Fluidstrom .....	77 f.
Gesamtenthalpiestrom .....	77
spezifische Gesamtenthalpie .....	77
luftspezifische Enthalpie und innere Energie .....	199 ff.
von Eisnebel .....	201
von feuchter Luft, Definition .....	199
von Flüssigkeitsnebel .....	200

von ungesättigter und gesättigter feuchter Luft .....	200
molare Enthalpie und molare innere Energie.....	40 f.
spezifische Enthalpie und spezifische innere Energie .....	40 f.
von Festkörpern.....	48, 50
von inkompressiblen (idealen) Flüssigkeiten .....	47 ff., 222
Differenzen für Zustandsänderungen .....	86 ff.
von idealen Gasen .....	42 ff., 215 ff.
Differenzen für Zustandsänderungen .....	90 ff., 116
von Nassdampf.....	51 ff.
Differenzen für Zustandsänderungen .....	90
von realen Fluiden.....	41, 221, 223 f.
Differenzen für Zustandsänderungen .....	82
von siedender Flüssigkeit .....	51, 220
von gesättigtem Dampf .....	52, 220
Entropie .....	53 ff.
Definition .....	53
Entropiestrom .....	54
molare Entropie .....	54
spezifische Entropie .....	54
von idealen Gasen .....	55
Differenzen für Zustandsänderungen .....	98 ff., 116
temperaturabhängiger Anteil.....	55, 215 ff.
von inkompressiblen (idealen) Flüssigkeiten .....	57
Differenzen für Zustandsänderungen .....	101 ff.
temperaturabhängiger Anteil.....	55, 222
von Nassdampf.....	58
Differenzen für Zustandsänderungen .....	103
von realen Fluiden.....	54, 221, 223
Differenzen für Zustandsänderungen .....	98
von siedender Flüssigkeit .....	58, 220
von gesättigtem Dampf .....	58, 220
Entropie der Wärme.....	92
Entropiebilanz, 2. Hauptsatz .....	91 ff.
bei ruhenden geschlossenen Systemen .....	91 ff.
bei ruhenden offenen Systemen.....	96 ff.
stationäre Entropiebilanz.....	96 ff.
stationärer Fließprozess.....	97
Entropieproduktion, Entropieproduktionsstrom .....	93 ff.

in Entropiebilanzen .....	91, 96 ff.
durch Dissipation von Arbeit .....	94
durch Stoffübertragung (adiabate Mischung) .....	94, 121
durch Wärmeübertragung .....	95
Entspannung in Turbinen .....	125 ff.
Ethan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> .....	219
Exergie .....	59 ff.
Exergie (der Enthalpie) und spezifische ~ .....	59
Differenzen für Zustandsänderungen .....	110
Exergie der inneren Energie und spezifische ~ .....	60
Differenzen für Zustandsänderungen .....	110
Exergiestrom .....	60
Gesamtexergie im Fluidstrom .....	107 f.
Gesamtexergiestrom .....	107
spezifische Gesamtexergie .....	108
Exergie der Wärme .....	105
Exegiebilanz .....	104 ff.
bei ruhenden geschlossenen Systemen .....	104 ff.
bei ruhenden offenen Systemen .....	107 ff.
stationäre Exegiebilanz .....	107 ff.
stationärer Fließprozess .....	108
Exegieverlust, Exegieverluststrom .....	106
in Exegiebilanzen .....	104, 107 f.
beim Mischen von Fluidströmen .....	121
Feuchte Gase, Zustandsberechnung .....	210
Feuchte Luft .....	182 ff.
Arten in Übersicht und im $h_{1+x}, x_W$ -Diagramm .....	184 f.
Bilanzierung von Prozessen .....	206 ff.
Energiebilanz .....	208
Massebilanz .....	207
Richtung der Zustandsänderung $\Delta h_{1+x}/\Delta x_W$ .....	209, 210
Dichte .....	195
Eisnebel .....	184 f., 194, 197, 201
Feuchtkugeltemperatur .....	203 f., 205
Flüssigkeitsnebel (Nebel) .....	184 f., 194, 196, 200
gesättigte feuchte Luft .....	184 f., 192 ff., 196 ff., 200
Gesamtdruck der feuchten Luft .....	185, 190
$h_{1+x}, x_W$ -Diagramm von feuchter Luft .....	184, 205, 210, B4

Isentropenexponent .....	198
Konstanten zur Berechnung .....	182 f.
Kühlgrenztemperatur .....	203 f., 205
luftspezifische Enthalpie und innere Energie .....	199 ff.
luftspezifisches Volumen .....	194 ff.
molare Masse .....	188
Partialdruck des Wasserdampfes in feuchter Luft .....	185, 190 ff., B4
relative Feuchte .....	189, 192, 204
Sättigungspartialdruck von Wasserdampf .....	190, 192 f., 228
Sättigungswassergehalt von feuchter Luft .....	193
Schallgeschwindigkeit .....	198
spezifische Gaskonstante .....	188
spezifische Wärmekapazitäten .....	197 f.
Taupunkttemperatur .....	202, 205
übersättigte feuchte Luft (Flüssigkeits- oder Eisnebel) .....	184 f., 194
ungesättigte feuchte Luft .....	184 f., 189 ff., 196 ff., 200
Wassergehalt (absolute Feuchte) .....	186, 191 ff., 196 ff., 203 f.
Zusammensetzung der feuchten Luft .....	186 ff.
Fallbeschleunigung auf der Erde .....	213
Feuchtkugeltemperatur .....	203 f., 205
Fläche, mittlere bei Wärmeleitung .....	149
Flüssigkeit .....	17
inkompressible (ideale) .....	19 ff.
siedende .....	17
unterkühlte .....	17
FOURIERsche Differenzialgleichung .....	147
FOURIERsches Gesetz der Wärmeleitung .....	147
Gaskonstante	
spezifische Gaskonstante .....	28, 213 f.
der feuchten Luft .....	188
universelle (molare) Gaskonstante .....	28, 213
Gasturbinenanlagen-Prozess .....	136 ff.
Gegenstrom von Fluiden .....	181
Gesamtemissionsverhältnis, Gesamtemissionsgrad .....	171, 226
Gleichstrom von Fluiden .....	181
Größen und Einheiten .....	11 ff.
Grashof-Zahl .....	158
Grauer Strahler .....	171

## Gütegrad

- des Verdichters bzw. Kompressors, der Pumpe ..... 122
- thermischer, des Kreisprozesses ..... 135
- der Turbine ..... 125

- $h_{1+x_w}$ -Diagramm von feuchter Luft ..... 184, 205, 210, B4
- $h,s$ -Diagramm von Wasser ..... 22, B1
- Heizwert (unterer und oberer) ..... 74, 227

- Innere Energie, siehe Enthalpie ..... 40 ff.

- Ideales Gas ..... 19 ff., 27 ff.

- Isenthalpe Zustandsänderung ..... 111, 128 f.

- Isentrope Zustandsänderung ..... 111 ff., 122, 125

- Isentropenexponent und Schallgeschwindigkeit ..... 37 ff.

- von feuchter Luft ..... 198

- von idealen Gasen ..... 38

- Festwerte, temperaturunabhängige ..... 39

- von inkompressiblen (idealen) Flüssigkeiten ..... 39

- von Nassdampf ..... 39

- von realen Fluiden ..... 38

- Isentroper Wirkungsgrad, Gütegrad ..... 122, 125

- Isobare Zustandsänderung ..... 111 ff., 118, 120

- Isochore Zustandsänderung ..... 111 ff., 117

- Isotherme Zustandsänderung ..... 111 ff.

- JOULE-Prozess ..... 136 ff.

- Kältemaschinenprozess ..... 133, 143 ff.

- Kohlendioxid CO<sub>2</sub> ..... 216

- Kohlenmonoxid CO ..... 216

- Kolbenarbeit, äußere ..... 70 ff.

- Kompressibilität ..... 29

- Kompressor, siehe Verdichter ..... 121 ff.

- Kontinuitätsgleichung des stationären Massestroms ..... 65

- Konvektion

- erzwungene Konvektion ..... 165 ff.

- freie Konvektion ..... 160 ff.

- Konvektiver Wärmeübergang, siehe Wärmeübergang ..... 154 ff.

- Kraftmaschine ..... 132 f.

- Kreisprozesse ..... 130 f.

Darstellungen, allgemeine .....	132 f.
Energiebilanz für gesamten Kreisprozess .....	130 f.
Kreisprozessarbeit, allgemeine .....	131
Kühlgrenztemperatur .....	203 f., 205
lg $p,h$ -Diagramm von Ammoniak .....	B3
Längenänderung bei Festkörpern (thermisch) .....	31
Leistungszahl	
Kältemaschine .....	134, 145
Wärmepumpe .....	134, 145
Linksprozesse .....	133, 143
Luft	
feucht .....	182 ff.
trocken .....	215, 223
Maßeinheiten und deren Umrechnungen .....	12, 14
Masse .....	62
Masseanteile der Komponenten in feuchter Luft .....	187
Massebilanz .....	62 ff.
bei geschlossenen Systemen .....	63
bei offenen stationären Systemen .....	64
Mischung von Fluidströmen .....	120
mit feuchter Luft .....	207 f.
bei offenen instationären Systemen .....	65
mit zeitlich konstanten Masseströmen .....	66
Massenstrom .....	62
der im Gemisch feuchter Luft enthaltenen trockenen Luft .....	208
Methan CH <sub>4</sub> .....	219
Mischen von Fluidströmen .....	94, 120
Mitteltemperatur, thermodynamische .....	131 f.
Modellierungsbedingungen, thermodynamische .....	111
Molanteile der Komponenten in feuchter Luft .....	187
Molare Masse (Molmasse) .....	28, 213 f.
der feuchten Luft .....	188
Molmenge (Stoffmenge) .....	28, 62
Nassdampf .....	17, 19, 21 ff.
Nebel (Flüssigkeitsnebel) .....	184f., 194, 196, 200
NEWTONsches Wärmeübergangsgesetz .....	156

Normzustand, Normvolumen, Normkubikmeter.....	33
Nußelt-Gleichungen, siehe Wärmeübergang	
Nußelt-Zahl, Definition.....	158
Nutzarbeit, äußere .....	70
Partialdruck des Wasserdampfes in feuchter Luft.....	185, 190 ff., B4
$p,T$ -Diagramm .....	15, 20
$p,\nu$ -Diagramm .....	16, 21
Péclet-Zahl .....	159
Phasenübergänge.....	15
Polytrophe Zustandsänderung.....	111, 114 ff.
Prandtl-Zahl .....	158
Pumpen .....	121 ff.
isentroper Wirkungsgrad.....	122
Rayleigh-Zahl .....	122
Reales Fluid .....	19 ff.
Realgasfaktor .....	29
Rechtsprozesse .....	132, 136, 140
Reibungsarbeit .....	68 f., 71, 80
Relative Feuchte der feuchten Luft .....	189, 192, 204
Reynolds-Zahl.....	158
Reflexionsgrad, Reflexionskoeffizient.....	170
Sättigungspartialdruck von Wasserdampf.....	190, 192 f.
Sättigungswassergehalt von feuchter Luft .....	193
Sättigungszustand von feuchter Luft.....	184 f., 192 ff., 196 ff., 200
Sauerstoff .....	217
Schallgeschwindigkeit, siehe unter Isentropenexponent .....	37 ff.
Schwarzer Strahler .....	170
STEFAN-BOLTZMANNsches Gesetz.....	171
Strahlungskoeffizient .....	171, 213
Schwefeldioxid $\text{SO}_2$ .....	217
Stationärer Fließprozess .....	64, 77, 97, 108
Stickstoff .....	218
Strahlung, siehe Wärmestrahlung .....	170
Strahlungsaustauschkoeffizient .....	172
Anwendungsfälle .....	175 ff.
eingeschlossener Körper .....	175

parallele Flächen .....	175
Strahlungsschirm .....	176
Strahlungskoeffizient	
des Grauen Strahlers.....	171
des Schwarzen Strahlers.....	171, 213
resultierender.....	172, 175 ff.
Strahlungsschirm .....	176
STEFAN-BOLTZMANNsches Gesetz, Konstante.....	171
Stoffmenge (Molmenge).....	28, 62
System	
geschlossenes .....	64, 67 ff., 75
offenes stationäres .....	64, 76 ff.
offenes instationäres .....	65, 80
Taupunktemperatur.....	202, 205
$T_s$ -Diagramm .....	22, B2
Technische Arbeit, siehe Arbeit.....	79
Temperatur .....	24
Siedetemperatur, Sättigungstemperatur .....	17, 18
Temperaturdifferenz, mittlere	
bei Wärmeübergang .....	157
bei Wärmedurchgang .....	181
Temperaturfeld	
bei Wärmeleitung .....	147, 150 f., 153
bei Wärmetübergang .....	155
Temperaturleitkoeffizient .....	147
Transmissionsgrad .....	170
Transporteigenschaften (-größen) der Stoffe .....	146, 222, 224 f.
Trielpunkt .....	16
Turbinen .....	125 ff.
isentroper Wirkungsgrad, Gütegrad.....	125
Viskosität, dynamische/kinematische .....	146, 222, 224
Verbrennung .....	74
Verdichter .....	121 ff.
isentroper Wirkungsgrad, Gütegrad.....	122
Volumen, Dichte.....	62 ff.
luftspezifisches Volumen .....	194 ff.
von Eisnebel.....	197

von feuchter Luft, Definition .....	194
von Flüssigkeitsnebel .....	196
von ungesättigter und gesättigter feuchter Luft .....	196
molares Volumen .....	26
spezifisches Volumen, Dichte .....	26 ff.
von Festkörpern .....	30 ff., 225
von feuchter Luft .....	195
von idealen Gasen .....	27 f.
von inkompressiblen (idealen) Flüssigkeiten .....	30, 222
von Nassdampf .....	32
von realen Fluiden .....	27, 221, 223 f.
von siedender Flüssigkeit .....	32, 220
von gesättigtem Dampf .....	32, 220
Volumenänderungsarbeit siehe Arbeit .....	68 ff.
Volumenausdehnung .....	31
Volumenausdehnungskoeffizient, isobarer .....	31, 222, 224
Volumenstrom .....	62
der feuchten Luft .....	195
Wärme, Wärmestrom .....	72 ff.
Darstellung im $T,s$ -Diagramm .....	74
reversible Prozesse .....	112 ff.
Wärmestrom .....	74
bei Wärmedurchgang .....	177
bei Wärmeleitung .....	147 ff.
durch ebene Wand .....	150
durch Kugelwand .....	153
durch Verbrennung .....	74
durch Wand, allgemein .....	148
durch Zylinderwand .....	152
bei Wärmestrahlung .....	172
bei Wärmeübergang .....	156
Wärmestromdichte .....	149, 156
Wärmedurchgang .....	177 ff.
Kontinuitätsgleichung .....	179
Wärmedurchgangskoeffizient .....	178
Wärmedurchgangswiderstand .....	178 f.
Wärmestrom .....	177
zwischen aneinander vorbeiströmenden Fluiden .....	180 ff.

Wärmekapazität, isobare und isochore .....	34 ff.
von Festkörpern .....	37, 225
von feuchter Luft .....	197 f.
von idealen Gasen .....	35, 215 ff.
mittlere zwischen $T_0$ und $T$ .....	45, 57
mittlere zwischen $T_1$ und $T_2$ .....	84, 100
von inkompressiblen (idealen) Flüssigkeiten .....	36, 222
mittlere zwischen $T_0$ und $T$ .....	49, 57
mittlere zwischen $T_1$ und $T_2$ .....	88, 102
von Nassdampf .....	37
von realen Fluiden .....	34, 224
Wärmeleitkoeffizient, Wärmeleitfähigkeit .....	146, 222, 224 f.
Wärmeleitung .....	147ff
ebene Wand .....	150 ff.
Kugelwand .....	153
Zylinderwand .....	151
Wärmeleitwiderstand .....	
allgemein .....	148
ebene Wand .....	151
Kugelwand .....	154
Zylinderwand .....	152
mehrschichtige Wand .....	179 ff.
Wärmepumpenprozess .....	134, 143 ff.
Wärmestrahlung .....	170
Strahlungsenergiebilanz .....	170
Wärmestrom .....	172
Wärmeübergang, konvektiver .....	154 ff.
erzwungene Konvektion, Nußelt-Gleichungen .....	165 ff.
Platte längs angeströmt .....	168 f.
Strömung durch Rohre und Kanäle .....	165 ff.
Zylinder quer angeströmt .....	168 f.
freie Konvektion, Nußelt-Gleichungen .....	160 ff.
horizontale ebene Fläche .....	161 ff.
horizontaler Zylinder .....	164
vertikale Platte .....	160
vertikaler Zylinder .....	161
Wärmeübergangskoeffizient .....	157 ff.
durch Strahlung .....	174

Wärmeübergangswiderstand .....	178
Wärmewiderstand (thermischer Widerstand)	
Wärmedurchgangswiderstand .....	178
Wärmeleitwiderstand .....	148
Wärmeübergangswiderstand .....	178
Wasser, Wasserdampf .....	215, 220 ff.
Arbeitsdiagramme .....	B1, B2
Wasserdampfpartialdruck in feuchter Luft .....	185, 190 ff., B4
Wassergehalt von feuchter Luft .....	186, 191 ff., 196 ff., 203 f.
Wasserstoff .....	218
Wirkungsgrad	
der Verbrennung .....	74
isentroper Wirkungsgrad .....	122, 125
thermischer Wirkungsgrad	
allgemein, des Rechtsprozesses .....	133
CARNOT-Prozess .....	135
CLAUSIUS-RANKINE-Prozess .....	142
JOULE-Prozess .....	139
Zähigkeit siehe Viskosität	
Zustandsberechnung .....	19 ff.
Zustandsänderung	
isenthalpe .....	111, 128 f.
isentrope .....	111 ff., 122, 125
isobare .....	111 ff., 118, 120
isochore .....	111 ff., 117
isotherme .....	111 ff.
mit feuchter Luft, Richtung $\Delta h_{l+x}/\Delta x_w$ .....	209, 210
polytropie .....	111, 114 ff.
Zustandsdiagramme .....	20 ff., 205, B1 bis B4
Zustandsgleichung	
des idealen Gases .....	27 f.
des strömenden idealen Gases .....	29
Zustandsgrößen	
siehe Enthalpie und innere Energie, Entropie, Isentropenexponent und Schallgeschwindigkeit, spezifisches Volumen und Dichte, Wärmekapazität, isobare und isochore	
Zweiflächenstrahlungsaustausch .....	172 ff.
Zweiphasengebiet, -gemisch .....	16, 19