

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

1	Thermodynamische Größen	11
1.1	Größenarten	11
1.2	Größen und Einheiten	12
1.3	Umrechnung von Einheiten	14
2	Zustandsverhalten reiner Stoffe	15
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,v -Diagramm	21
2.3.3	Bereiche für Zustandsberechnung im T,s -Diagramm	22
2.3.4	Bereiche für Zustandsberechnung im h,s -Diagramm	23
3	Thermische Zustandsgrößen	24
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 v und ρ für reale Fluide	27
3.3.3	Ermittlung von v und ρ für ideale Gase	27
3.3.4	Ermittlung von v und ρ für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten und Festkörper	30
3.3.5	Ermittlung von v und ρ für Nassdampf	32
3.4	Normzustand und Normvolumen	33
4	Energetische Zustandsgrößen	34
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 κ und w für reale Fluide	38
4.2.3	Ermittlung von κ und w für ideale Gase	38
4.2.4	κ und w für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten	39
4.2.5	κ 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
5	Massebilanz	62
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
6	Energiebilanz – 1. Hauptsatz der Thermodynamik	67
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
7 Entropiebilanz – 2. Hauptsatz der Thermodynamik	91
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
8 Exergiebilanz.....	104
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
9 Einfache Prozesse.....	111
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
10	Kreisprozesse	130
10.1	Grundlagen	130
10.2	Gasturbinenanlagen-JOULE-Prozess.....	136
10.3	Dampfturbinenanlagen-CLAUSIUS-RANKINE-Prozess	139
10.4	Kältemaschinen- und Wärmepumpen-Prozess	143
11	Wärmeübertragung.....	146
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 Anwen- dungsfälle	175
11.5	Wärmedurchgang	177
12	Thermodynamik der feuchten Luft	182
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
Literaturverzeichnis.....		211
Anhang		
A	Stoffwertsammlung.....	213
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 $p = 0,101325$ MPa	224
A9	Transportgrößen von Feststoffen (Mittelwerte).....	225
A10	Gesamtemissionsverhältnisse von Stoffen (Mittelwerte).....	226
A11	Heizwerte und Brennwerte	227
A12	Sättigungspartialdruck von Wasser	228
Sachwortverzeichnis		229
B	Zustandsdiagramme (als Beilage)	
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 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)

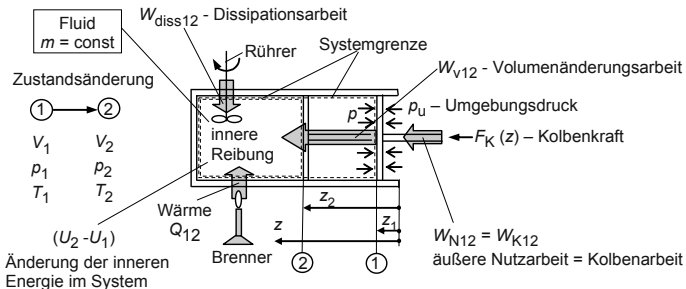
$U_2 - U_1$ Differenz der inneren Energie des Systems zwischen Endzustand 2 und Anfangszustand 1

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

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

$$W_{12} = W_{v12} + W_{diss12} \quad [W] = 1 \text{ kJ}$$

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

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

W_{diss12} dissipierte Arbeiten (> 0 , da zugeführt) ↗ 6.1.4

Sonderfall: $p = \text{const}$

$$Q_{12} + W_{diss12} = H_2 - H_1$$

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

W_{diss12} 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 Verwirblung (> 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

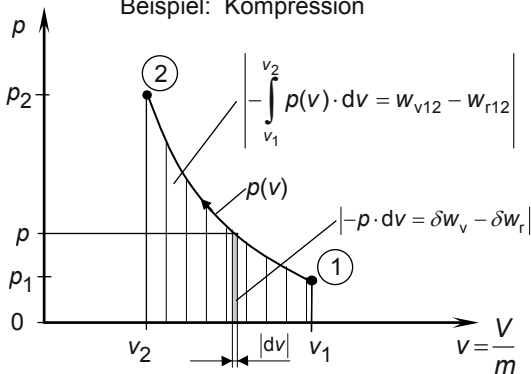
m Masse

$p(v)$ 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

Beispiel: Kompression



Differenzielle Volumenänderungsarbeit

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

δW_v differenzielle Volumenänderungsarbeit, zu- oder abgeführt
(Das Differenzial δW_v steht für dW_v . Mit δ werden die Differenziale von Prozessgrößen gekennzeichnet.)

p Druck

dV differenzielle Änderung des Volumens V

δW_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, ν -Diagramm	80
reversible Prozesse	112 ff.
Volumenänderungsarbeit	68 ff.
Darstellung im p, ν -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_2H_6	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
Exergiebilanz	104 ff.
bei ruhenden geschlossenen Systemen	104 ff.
bei ruhenden offenen Systemen	107 ff.
stationäre Exergiebilanz	107 ff.
stationärer Fließprozess	108
Exergieverlust, Exergieverluststrom	106
in Exergiebilanzen	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}, 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 ₂	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
Massestrom	62
der im Gemisch feuchter Luft enthaltenen trockenen Luft	208
Methan CH_4	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 Wärmetübergang	
Nußelt-Zahl, Definition	158
Nutzarbeit, äußere	70
Partialdruck des Wasserdampfes in feuchter Luft	185, 190 ff., B4
p, T -Diagramm	15, 20
p, v -Diagramm	16, 21
Péclet-Zahl	159
Phasenübergänge	15
Polytrope Zustandsänderung	111, 114 ff.
Prandtl-Zahl	158
Pumpen	121 ff.
isentropen 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 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
Taupunkttemperatur.....	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 Wärmeübergang	155
Temperaturleitkoeffizient	147
Transmissionsgrad.....	170
Transporteigenschaften (-größen) der Stoffe	146, 222, 224 f.
Tripelpunkt	16
Turbinen	125 ff.
isentropen Wirkungsgrad, Gütegrad.....	125
Viskosität, dynamische/kinematische	146, 222, 224
Verbrennung.....	74
Verdichter	121 ff.
isentropen 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
isentropen 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.
isentropen	111 ff., 122, 125
isobare	111 ff., 118, 120
isochore	111 ff., 117
isotherme	111 ff.
mit feuchter Luft, Richtung $\Delta h_{1+x}/\Delta x_w$	209, 210
polytrope	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