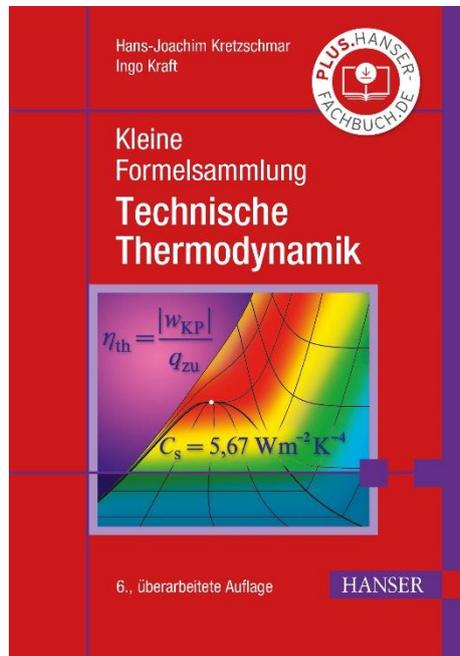


HANSER



Leseprobe

zu

Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik

von Hans-Joachim Kretzschmar und Ingo Kraft

Print-ISBN: 978-3-446-47028-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-47321-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446470286>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur sechsten Auflage

Die „Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik“ ist inzwischen etabliert. Die vorliegende sechste 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, Hochschulen für Angewandte Wissenschaften, Berufsakademien und Fachschulen.

Erfasst werden die folgenden Gebiete der Technischen Thermodynamik

- Energielehre und thermodynamische Stoffeigenschaften
- einfache Prozesse und Kreisprozesse
- Wärmeübertragung
- 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. *Wolfgang Wagner*, Lehrstuhl für Thermodynamik der Ruhr-Universität Bochum.

Beibehalten wurde die anwendungsorientierte Darstellung. Zur schnellen Nutzung sind die Formelzeichen unmittelbar unter den betreffenden Formeln erläutert. Eine ausführliche Stoffwertsammlung im Anhang und Zustandsdiagramme auf der Webseite plus.hanser-fachbuch.de ermöglichen die sofortige Anwendung der Gleichungen.

Das Kapitel "Ideale Gasgemische" und ergänzende Software für Excel, MATLAB, Mathcad, IOS, Android und 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 Prof. Dr.-Ing. *M. Kunick* für die Mitwirkung bei der Erstellung der Bilder, Diagramme und Tabellen.

Hans-Joachim Kretzschmar und Ingo Kraft

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	Ermittlung von 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	Ermittlung von κ und w für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten.....	39
4.2.5	Ermittlung von 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 von 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 der spezifischen Enthalpie und der spezifischen inneren 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 von Fluidströmen.....	121
9.2.5	Entspannung von Fluidströmen 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	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	Wärmeübergang bei freier Konvektion.....	160
11.3.5	Wärmeübergang bei erzwungener 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 innere Energie.....	199
12.8	Luftspezifische Entropie.....	202
12.9	Taupunkttemperatur.....	202
12.10	Feuchtkugeltemperatur (Kühlgrenztemperatur).....	203
12.11	Das h_{1+x},x_w -Diagramm.....	205
12.12	Bilanzierung von Prozessen mit feuchter Luft.....	206
12.13	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.....	215
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

B Zustandsdiagramme auf plus.hanser-fachbuch.de

Mollier h,s -Diagramm von Wasserdampf
 T,s -Diagramm von Wasser und Wasserdampf
 lg p,h -Diagramme von Ammoniak und Propan
 h_{1+x},x_w -Diagramme von feuchter Luft

Sachwortverzeichnis.....	229
---------------------------------	------------

1 Thermodynamische Größen

1.1 Größenarten

Für eine allgemeine Größe Z gilt:

Größenart	Definition	Umrechnung	Beispiele
Spezifische Größen - auf Masse m bezogen: → Kleinbuchstabe	$z = \frac{Z}{m}$		$v, h, s,$ q, w
Molare Größen - auf Stoffmenge n (Molmenge) bezogen: → Kleinbuchstabe quer überstrichen	$\bar{z} = Z_m = \frac{Z}{n}$	$\bar{z} = M \cdot z$ $M \nearrow A2$	$\bar{v}, \bar{h}, \bar{s},$ \bar{q}, \bar{w}
Volumenbezogene Größen - auf Volumen V bezogen: → Kleinbuchstabe mit Schlangenlinie (Tilde)	$\tilde{z} = \frac{Z}{V}$	$\tilde{z} = \rho \cdot z$ $\rho \nearrow 3.3$	ρ, \tilde{q}
Flächenbezogene Größen - auf Fläche A bezogen: → Kleinbuchstabe mit Dach	$\hat{z} = \frac{Z}{A}$		\hat{q}
Zeitbezogene Größen (Ströme, Leistungen) - auf Zeit t bezogen : → Großbuchstabe mit Punkt	$\dot{z} = \frac{Z}{t}$	$\dot{Z} = \dot{m} \cdot z$ $\dot{m} \nearrow 5.2$	$\dot{V}, \dot{H},$ $\dot{Q},$ $\dot{W} = P,$ \dot{m}, \dot{n}
Zeit- und flächenbezogene Größen (Stromdichten) - auf Zeit und Fläche A bezogen : → Kleinbuchstabe mit Punkt und Dach	$\hat{\dot{z}} = \frac{\dot{Z}}{A}$		$\hat{\dot{m}}, \hat{\dot{q}}$

1.2 Größen und Einheiten

Größe	SI-Einheit	Empfohlene Einheit
Länge z	1 m	1 m
Fläche A	1 m ²	1 m ²
Volumen V	1 m ³	1 m ³
Zeit t	1 s	1 s
Geschwindigkeit c	1 m s ⁻¹	1 m s ⁻¹
Masse m	1 kg	1 kg
Stoffmenge n (Molmenge)	1 mol	1 kmol = 1000 mol
Molare Masse M	1 kg mol ⁻¹	1 kg kmol ⁻¹ = 0,001 kg mol ⁻¹
Kelvin-(thermodynamische) Temperatur T	1 K	1 K
Celsius-Temperatur ϑ	1 °C	1 °C
Kraft F	1 N = 1 kg m s ⁻²	1 kN = 1000 N
Druck p	1 Pa = 1 N m ⁻²	1 kPa = 1000 Pa
	1 bar = 10 ⁵ Pa = 0,1 MPa	1 kPa = 0,01 bar
Enthalpie H		
innere Energie U		
freie Energie F		
freie Enthalpie G	1 J = 1 Nm = 1 Ws	1 kJ = 1000 J
Exergie E		
Wärme Q		
Arbeit W		

Größe	SI-Einheit	Empfohlene Einheit
spezifische Enthalpie h		
spezifische innere Energie u		
spezifische freie Energie f	1 J kg^{-1}	1 kJ kg^{-1}
spezifische freie Enthalpie g	$= 1 \text{ Nm kg}^{-1}$ $= 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$	$= 1000 \text{ J kg}^{-1}$ $= 1000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$
spezifische Exergie e		
spezifische Wärme q		
spezifische Arbeit w		
spezifische Wärmekapazitäten c_p, c_v	$1 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
spezifische Entropie s	$= 1 \text{ Nm kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$= 1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
spezifische Gaskonstante R		
Enthalpiestrom \dot{H}		
Exergiestrom \dot{E}		
Wärmestrom bzw. Wärmeleistung \dot{Q}	$1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$ $= 1 \text{ Nm s}^{-1}$	$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$ $= 1000 \text{ J s}^{-1}$
Arbeitsleistung $P = \dot{W}$		
Entropiestrom \dot{S}	1 W K^{-1}	1 kW K^{-1}
Wärmekapazitätsstrom \dot{C}	$= 1 \text{ Nm s}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$= 1000 \text{ J s}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Wärmeleitkoeffizient λ	$1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Wärmeübergangskoeffizient α		
Wärmedurchgangskoeffizient k	$1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	$1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

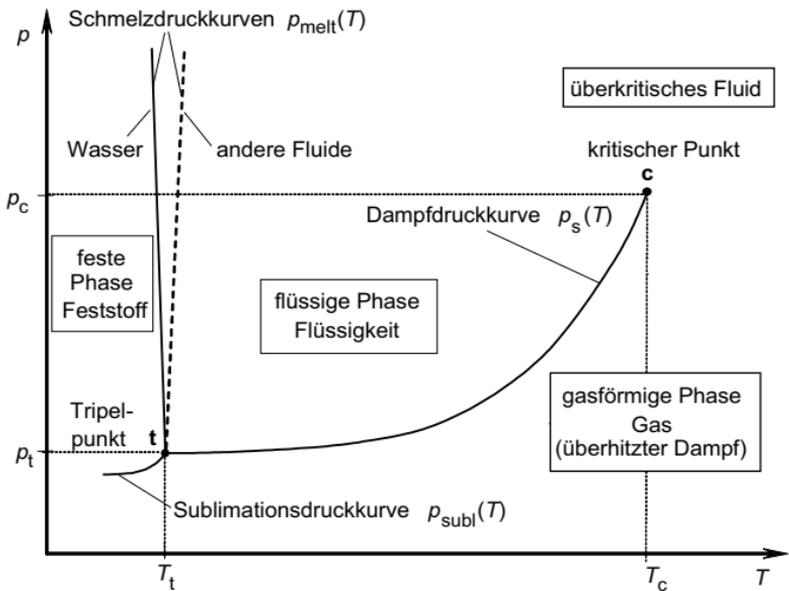
1.3 Umrechnung von Einheiten

Einheit	Umrechnung in SI-Einheit	
Inch	1 in (")	= 0,0254 m
Foot (12 in)	1 ft	= 0,3048 m
Yard (3 ft)	1 yd	= 0,9144 m
Gallon (U.S.)	1 gal	= 0,0037854 m ³
Gallon (U.K.)	1 gal	= 0,0045461 m ³
Barrel Petrol (U.S.)	1 barrel Petrol	= 0,1589873 m ³
Foot per minute	1 ft min ⁻¹	= 0,00508 m s ⁻¹
Yard per second	1 yd s ⁻¹	= 0,9144 m s ⁻¹
Mile per hour	1 mile h ⁻¹	= 1,6093 km h ⁻¹
Square foot per second	1 ft ² s ⁻¹	= 0,092903 m ² s ⁻¹
Pound	1 lb	= 0,4535924 kg
Cubic foot per pound	1 ft ³ lb ⁻¹	= 0,0624280 m ³ kg ⁻¹
Pound per cubic foot	1 lb ft ⁻³	= 16,0185 kg m ⁻³
Pound-force per square inch	1 psi (1 lbf in ⁻²)	= 6,894757 kPa
Pound per foot and second	1 lb ft ⁻¹ s ⁻¹	= 1,48816 Pa s
Horsepower	1 hp	= 0,74570 kW
British thermal unit	1 Btu	= 1,055056 kJ
Btu per hour	1 Btu h ⁻¹	= 0,2930711 W
Btu per pound	1 Btu lb ⁻¹	= 2,326 kJ kg ⁻¹
Btu per pound and Rankine	1 Btu lb ⁻¹ °R ⁻¹	= 4,1868 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Btu per hour, foot, and Rankine	1 Btu h ⁻¹ ft ⁻¹ °R ⁻¹	= 1,73073 W m ⁻¹ K ⁻¹
Btu per hour, square foot, and Rankine	1 Btu h ⁻¹ ft ⁻² °R ⁻¹	= 5,678263 W m ⁻² K ⁻¹

2 Zustandsverhalten reiner Stoffe

2.1 Einphasengebiete und Phasenübergänge

Einphasengebiete im p, T -Diagramm



Phasenübergänge

Übergang	Bezeichnung	Druckbereich
flüssig \rightarrow gasförmig	Verdampfen	$p_t \leq p \leq p_c$
gasförmig \rightarrow flüssig	Kondensieren	$p_t \leq p \leq p_c$
fest \rightarrow flüssig	Schmelzen	$p \geq p_t$
flüssig \rightarrow fest	Erstarren (Gefrieren)	$p \geq p_t$
fest \rightarrow gasförmig	Sublimieren	$p \leq p_t$
gasförmig \rightarrow fest	Desublimieren	$p \leq p_t$

p_t Tripelpunktdruck, p_c kritischer Druck

Tripelpunkt eines Stoffes

Am Tripelpunkt liegt ein reiner Stoff gleichzeitig in allen drei Phasen (Feststoff, Flüssigkeit und Dampf) im Sättigungszustand vor. Er ist für jeden Stoff durch einen bestimmten Druck p_t und eine bestimmte Temperatur T_t naturgesetzlich gegeben.

Zustandsgrößen im Einphasengebiet

$$z = f(p, T)$$

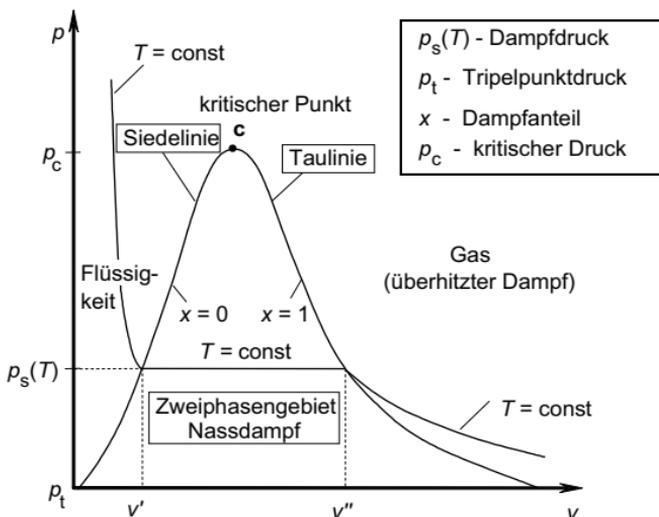
z Zustandsgröße

p Druck

T Temperatur

2.2 Zweiphasengebiet flüssig – gasförmig

Fluides Zweiphasengebiet im p, v -Diagramm



Fluidbezeichnungen

Zustand	Temperatur	Bezeichnung
Flüssigkeit	$T < T_s(p)$	(unterkühlte) Flüssigkeit
	$T = T_s(p)$	siedende Flüssigkeit
Zweiphasengemisch	$T = T_s(p)$	Nassdampf
Dampf (Gas)	$T = T_s(p)$	(trocken) gesättigter Dampf, auch Sattdampf genannt
	$T > T_s(p)$	überhitzter Dampf, auch Heißdampf genannt

T Temperatur

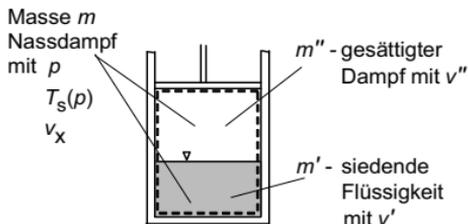
$T_s(p)$ Siedetemperatur beim Druck p ↗ A4, [S6] Werte für Wasser

Zweiphasengemisch Nassdampf

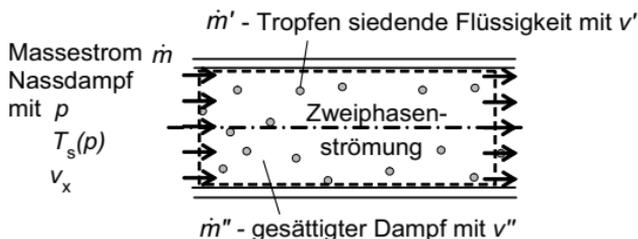
Nassdampf ist das Zweiphasengemisch bestehend aus siedender Flüssigkeit und (trocken) gesättigtem Dampf

Zustand	Bezeichnung
Siedende Flüssigkeit:	Zeiger: '
Gesättigter Dampf:	Zeiger: "
Nassdampf (spezifische Zustandsgrößen):	Index: x

Nassdampf im geschlossenen System



Nassdampf im offenen System



Nassdampfmasse und Nassdampfmassestrom

$$m = m' + m''$$

$$\dot{m} = \dot{m}' + \dot{m}''$$

Dampfanteil

$$x = \frac{m''}{m} = \frac{m''}{m' + m''}$$

$$x = \frac{\dot{m}''}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}''}{\dot{m}' + \dot{m}''}$$

x Dampfanteil (Dampfmasseanteil)

m, \dot{m} Nassdampfmasse bzw. -massestrom

m', \dot{m}' Masse bzw. Massestrom der enthaltenen siedenden Flüssigkeit

m'', \dot{m}'' Masse bzw. Massestrom des enthaltenen gesättigten Dampfes

Definitionsbereich des Dampfanteils x

$$0 \leq x \leq 1$$

$x = 0$ bei siedender Flüssigkeit (Siedelinie)

$0 < x < 1$ bei Nassdampf

$x = 1$ bei gesättigtem Dampf (Taulinie)

Siedetemperatur und Dampfdruck

$T_s(p)$ Siedetemperatur beim Druck p ↗ A4, [S6] Werte für Wasser

$p_s(T)$ Dampfdruck bei Temperatur T ↗ A4, [S6] Werte für Wasser

Spezifische Zustandsgrößen des Zweiphasengemisches Nassdampf (Sättigungszustand)

Für $z = v, h, u, s, e$ gilt

$$z_x = z' + x \cdot (z'' - z')$$

z_x spezifische Zustandsgröße des Nassdampfes

x Dampfanteil (Dampfmasseanteil)

z' spezifische Zustandsgröße der siedenden Flüssigkeit

$$z' = f(T) \text{ oder } = f(p)$$

z'' spezifische Zustandsgröße des gesättigten Dampfes

$$z'' = f(T) \text{ oder } = f(p)$$

2.3 Bereiche für Zustandsberechnung

Unterteilung des fluiden Zustandsbereiches für Berechnung der Zustandsgrößen

Reales Fluid

gesamtes fluides Einphasengebiet (Flüssigkeit und Gas)

Sonderfall: ideales Gas

Zustandsbereich, in dem die Zustandsgrößen eines Gases mit guter Näherung wie die eines idealen Gases berechnet werden können

Sonderfall: inkompressible (ideale) Flüssigkeit

Zustandsbereich, in dem eine Flüssigkeit mit guter Näherung als inkompressibel (ideal) berechnet werden kann

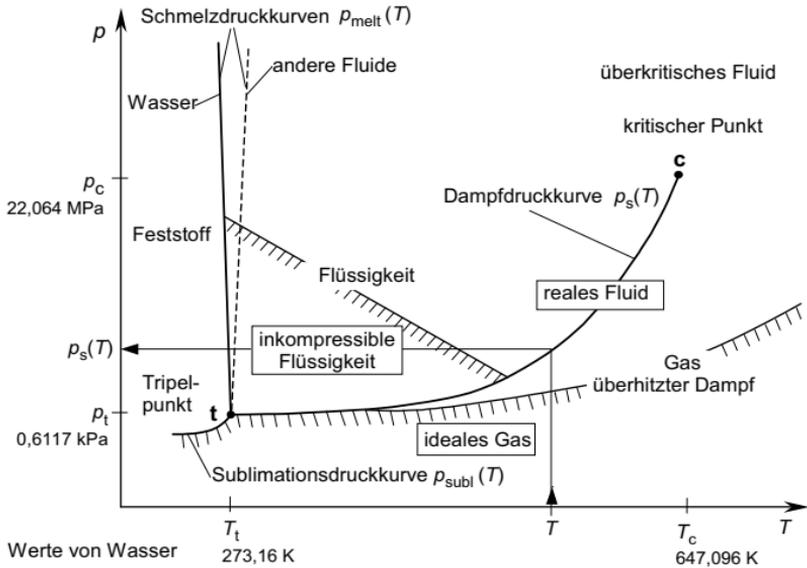
Nassdampf einschl. siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampfes

Zweiphasengemisch aus siedender Flüssigkeit und gesättigtem Dampf

Die Diagramme der folgenden Abschnitte zeigen die Bereiche für die Zustandsberechnung.

2.3.1 Bereiche für Zustandsberechnung im p, T -Diagramm

p, T -Diagramm mit Bereichen für die Zustandsberechnung



Bereiche für Zustandsberechnung

reales Fluid

↗ Berechnung in 3.3.2, 4.1.2, 4.2.2, 4.3.2, 4.4.2, 4.5

ideales Gas

↗ Berechnung in 3.3.3, 4.1.3, 4.2.3, 4.3.3, 4.4.3, 4.5

inkompressible (ideale) Flüssigkeit

↗ Berechnung in 3.3.4, 4.1.4, 4.2.4, 4.3.4, 4.4.4, 4.5

Nassdampf einschl. siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampfes

↗ Berechnung in 3.3.5, 4.1.5, 4.2.5, 4.3.5, 4.4.5, 4.5

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 Flüssigkeits- und Eisnebel	200 f.
von feuchter Luft, Definition.....	199
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
luftspezifische Entropie der feuchten Luft.....	202
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
Längenänderung bei Festkörpern (thermisch)	31
Leistungszahl	
Kältemaschine	134, 145
Wärmepumpe	134, 145
lg p, h -Diagramm von Ammoniak	B3
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 Wärmetransportgesetz	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, ν -Diagramm.....	16, 21
Péclet-Zahl.....	159
Phasenübergänge.....	15
Polytrope Zustandsänderung.....	111, 114 ff.
Prandtl-Zahl.....	158
Pumpen.....	121 ff.
isentropen Wirkungsgrad.....	122
Rayleigh-Zahl.....	159
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
STEFAN-BOLTZMANNsches Gesetz, Konstante.....	171
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
Stoffmenge (Molmenge).....	28, 62
System	
geschlossenes	64, 67 ff., 75
offenes stationäres	64, 76 ff.
offenes instationäres	65, 80
Taupunkttemperatur.....	202, 205
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
T,s -Diagramm.....	22, B2
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 gesättigtem Dampf.....	32, 220
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
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 Reichtprozesses	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 $\Delta h_{1+x}/\Delta x_w$	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