

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,ν -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 ν und ρ für reale Fluide	27
3.3.3	Ermittlung von ν und ρ für ideale Gase.....	27
3.3.4	Ermittlung von ν und ρ für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten und Festkörper.....	30
3.3.5	Ermittlung von ν und ρ für Nassdampf	32
3.4	Normzustand.....	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	Masse, Stoffmenge 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 Nutz- 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 Exnergiebilanz.....	104
8.1 Ruhendes geschlossenes System.....	104
8.1.1 Exnergiebilanz zwischen Zustand 1 und 2	104
8.1.2 Exergie der Wärme.....	105
8.1.3 Exnergieverlust.....	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 Anwendungsfälle.....	175
11.5	Wärmedurchgang	177
12	Thermodynamik der feuchten Luft.....	182
12.1	Konstanten zur Berechnung	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	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 $p = 0,101325 \text{ MPa}$	224
A9	Transportgrößen von Feststoffen (Mittelwerte)	225
A10	Gesamtemissionsverhältnisse von Stoffen (Mittelwerte)	226
A11	Heizwerte und Brennwerte	227
A12	Sättigungspartialdruck von Wasser	228
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	