

# 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 Phasentübergänge .....	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
<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 $v$ und $\rho$ für reale Fluide .....	27
3.3.3	Ermittlung von $v$ und $\rho$ für ideale Gase .....	27
3.3.4	Ermittlung von $v$ und $\rho$ für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten und Festkörper .....	30
3.3.5	Ermittlung von $v$ 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	Feuchtkugelttemperatur (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 $p = 0,101325$ 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	