

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Einheiten physikalischer Größen</b> .....	<b>3</b>
<b>3 Systeme</b> .....	<b>6</b>
3.1 Definition von Systemen .....	6
3.2 Systemarten .....	7
3.2.1 Geschlossenes System .....	7
3.2.2 Offenes System .....	8
3.2.3 Adiabates System.....	9
3.2.4 Abgeschlossenes System .....	10
3.2.5 Einphasensystem .....	10
3.2.6 Mehrphasensystem .....	11
<b>4 Zustandsgrößen</b> .....	<b>12</b>
4.1 Materiemenge als Zustandsgröße .....	12
4.2 Thermische Zustandsgrößen.....	14
4.2.1 Volumen .....	14
4.2.2 Druck .....	14
4.2.3 Temperatur.....	19
4.3 Klassifizierung.....	23
4.3.1 Extensive Zustandsgrößen .....	23
4.3.2 Intensive Zustandsgrößen .....	23
4.3.3 Spezifische Zustandsgrößen .....	23
4.3.4 Molare Zustandsgrößen .....	24
<b>5 Gleichgewichtszustände</b> .....	<b>25</b>
5.1 Mechanisches Gleichgewicht .....	25
5.2 Thermisches Gleichgewicht .....	26
5.3 Chemisches Gleichgewicht .....	27
5.4 Thermodynamisches Gleichgewicht .....	27
5.5 Lokales thermodynamisches Gleichgewicht .....	27
<b>6. Zustandsänderung und Prozeß</b> .....	<b>28</b>
6.1 Definitionen.....	28
6.1.1 Isochore Zustandsänderung .....	28

6.1.2 Isobare Zustandsänderung .....	28
6.1.3 Isotherme Zustandsänderung .....	29
6.2 Nichtstatische Zustandsänderung .....	29
6.3 Quasistatische Zustandsänderung.....	30
6.4 Ausgleichsprozesse .....	31
6.5 Reversible und irreversible Prozesse.....	31
<b>7 Zustandsgleichungen.....</b>	<b>33</b>
7.1 Festkörper.....	37
7.2 Flüssigkeiten.....	40
7.3 Ideale Gase .....	41
7.3.1 Gesetz von Gay-Lussac .....	42
7.3.2 Gesetz von Boyle-Mariotte.....	43
7.3.3 Thermische Zustandsgleichung idealer Gase .....	44
7.3.4 Gesetz von Avogadro .....	48
7.3.5 Die universelle Gaskonstante .....	48
7.3.6 Normzustand.....	50
7.3.7 Mischungen idealer Gase.....	51
7.4 Reale Gase.....	57
7.5 Dämpfe.....	59
7.5.1 Dampfarten .....	59
7.5.2 Dampfdruckkurven .....	61
7.5.3 Grenzkurven .....	61
7.5.4 Thermische Zustandsgleichung des Dampfes .....	63
<b>8 Kinetische Gastheorie .....</b>	<b>66</b>
8.1 Druck als Summe von Stoßvorgängen .....	66
8.2 Die absolute Temperatur und die kinetische Energie.....	70
<b>9 Arbeit.....</b>	<b>72</b>
9.1 Definition der Arbeit .....	72
9.2 Arbeit und Energieübertragung.....	73
9.3 Arbeit an fluiden Systemen .....	77
9.3.1 Volumenänderungsarbeit.....	77
9.3.2 Wellenarbeit.....	81
9.4 Arbeit und Dissipationsenergie .....	83
<b>10 Innere Energie und Enthalpie.....</b>	<b>85</b>
10.1 Innere Energie .....	85
10.2 Enthalpie.....	86
10.3 Kalorische Zustandsgleichungen der inneren Energie und der Enthalpie.....	87
10.3.1 Innere Energie und Enthalpie fester und flüssiger Phasen.....	88
10.3.2 Innere Energie und Enthalpie idealer Gase.....	91
10.3.3 Innere Energie und Enthalpie der Dämpfe.....	93
10.4 Spezifische Wärmekapazitäten.....	95

10.4.1 Wahre spezifische Wärmekapazitäten .....	95
10.4.2 Mittlere spezifische Wärmekapazitäten .....	97
<b>11 Äquivalenz von Wärme und Arbeit.....</b>	<b>100</b>
<b>12 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme ....</b>	<b>103</b>
12.1 Der erste Hauptsatz für geschlossene ruhende Systeme.....	103
12.2 Der erste Hauptsatz für geschlossene bewegte Systeme .....	106
<b>13 Wärme.....</b>	<b>108</b>
13.1 Einheit der Wärme.....	108
13.2 Wärmemengenberechnung .....	109
13.2.1 Wärmemenge bei isochorer Zustandsänderung .....	109
13.2.2 Wärmemenge bei isothermer Zustandsänderung .....	110
13.2.3 Wärmemenge bei isobarer Zustandsänderung .....	110
13.3 Wärmebilanzen.....	111
13.3.1 Mischungstemperatur.....	111
13.3.2 Messung der spezifischen Wärmekapazität .....	112
13.4 Wärmeübertragung .....	113
<b>14 Wärme und Arbeit bei reversiblen Zustandsänderungen idealer Gase</b>	<b>119</b>
14.1 Isochore Zustandsänderung .....	119
14.2 Isobare Zustandsänderung .....	121
14.3 Isotherme Zustandsänderung .....	122
14.4 Adiabate Zustandsänderung .....	124
<b>15 Wärme und Arbeit bei polytroper Zustandsänderung.....</b>	<b>128</b>
<b>16 Die Entropie.....</b>	<b>134</b>
16.1 Entropie als Zustandsgröße .....	134
16.1.1 Entropie fester und flüssiger Phasen.....	137
16.1.2 Entropie idealer Gase .....	137
16.1.3 Entropie der Dämpfe.....	139
16.1.4 Die absolute Temperatur als integrierender Faktor.....	139
16.2 Entropiebilanz geschlossener Systeme .....	140
<b>17 Der erste Hauptsatz für offene Systeme.....</b>	<b>143</b>
17.1 Strömungsmechanische Grundlagen .....	143
17.1.1 Volumenstrom.....	143
17.1.2 Massenstrom .....	145
17.1.3 Energiestrom .....	146
17.1.4 Zeitverhalten von Strömungen.....	146
17.1.5 Massenstrombilanz.....	147
17.2 Energie und Arbeit bei Fließprozessen offener Systeme .....	149
17.2.1 Energiebilanz instationärer Fließprozesse .....	149
17.2.2 Energiebilanz stationärer Fließprozesse.....	154

17.2.3 Technische Arbeit und Dissipation bei stationären Fließprozessen .....	156
17.3 Entropiebilanz offener Systeme .....	161
<b>18 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik .....</b>	<b>164</b>
<b>19 Der zweite Hauptsatz und die Entropie .....</b>	<b>167</b>
19.1 Dissipation in adiabaten Systemen .....	167
19.2 Wärmeübertragung bei endlicher Temperaturdifferenz .....	169
<b>20 Darstellung von Wärme und Arbeit in Entropiediagrammen .....</b>	<b>171</b>
20.1 $T,s$ -Diagramme .....	171
20.1.1 $T,s$ -Diagramme für spezielle Zustandsänderungen idealer Gase .....	175
20.1.2 Adiabate Systeme .....	182
20.1.3 $T,s$ -Diagramme realer Gase .....	185
20.2 $h,s$ -Diagramme .....	185
<b>21 Kalorische Zustandsgleichungen idealer Gasgemische .....</b>	<b>188</b>
21.1 Kalorische Zustandsgleichung idealer Gasgemische .....	188
21.1.1 Innere Energie .....	188
21.1.2 Enthalpie .....	189
21.1.3 Entropie .....	189
21.2 Ideale Gas-Dampf-Gemische .....	190
21.3 Kalorische Zustandsgleichungen der feuchten Luft .....	191
21.3.1 Kennzahlen der feuchten Luft .....	191
21.3.2 Thermische Variable der feuchten Luft .....	194
21.3.3 Spezielle Zustandsänderungen ungesättigter feuchter Luft .....	195
21.3.4 Enthalpie der feuchten Luft .....	197
21.3.5 Entropie der feuchten Luft .....	201
21.3.6 Mollier-Diagramm der feuchten Luft .....	204
<b>22 Reversible Kreisprozesse .....</b>	<b>208</b>
22.1 Kreisprozesse geschlossener Systeme .....	209
22.2 Kreisprozesse in offenen Systemen .....	211
22.3 Bewertungskennzahlen für Kreisprozesse .....	213
22.3.1 Thermischer Wirkungsgrad .....	213
22.3.2 Leistungsziffer .....	214
<b>23 Reversible Kreisprozesse thermischer Maschinen .....</b>	<b>216</b>
23.1 Vergleichsprozesse für Kolbenkraftmaschinen .....	216
23.1.1 Otto-Prozeß .....	216
23.1.2 Diesel-Prozeß .....	221
23.1.3 Seiliger-Prozeß .....	225
23.2 Vergleichsprozesse für Turbomaschinen .....	227
23.2.1 Joule-Prozeß der einfachen Gasturbinenanlage .....	227
23.2.3 Ericson-Prozeß .....	230

23.2.3 Dampfturbinen-Prozeß.....	232
23.3 Carnot-Prozeß.....	236
<b>24 Irreversible Fließprozesse .....</b>	<b>241</b>
24.1 Das Polytropenverhältnis.....	241
24.2 Wirkungsgrade .....	246
24.2.1 Innerer Wirkungsgrad .....	246
24.2.2 Statischer Wirkungsgrad .....	248
24.2.3 Polytroper Wirkungsgrad.....	249
24.2.4 Polytrope und isentrope Wirkungsgrade adiabater Maschinen.....	250
24.2.5 Mechanischer Wirkungsgrad .....	253
<b>25 Irreversible Prozesse in thermischen Maschinen.....</b>	<b>255</b>
25.1 Die einfache Gasturbine .....	255
25.2 Die Fahrzeuggasturbine.....	260
25.3 Prozeß der Zweiwellengasturbine mit Wärmetauscher .....	266
<b>26 Strömungsprozesse in Düsen und Diffusoren.....</b>	<b>269</b>
26.1 Funktion von Düsen und Diffusoren .....	270
26.2 Schallgeschwindigkeit und Machzahl .....	270
26.3 Ausströmgeschwindigkeit und Stromdichte.....	271
26.4 Druckverlauf und Querschnittsverlauf.....	275
26.5 Die Lavaldüse.....	277
26.6 Wirkungsgrade von Düse und Diffusor.....	279
<b>27 Exergie und Anergie .....</b>	<b>281</b>
27.1 Exergie und Anergie der Wärme.....	282
27.2 Exergie und Anergie der Enthalpie .....	284
27.3 Exergie und Anergie der inneren Energie .....	286
27.4 Exergieverlust.....	287
27.5 Exergetischer Wirkungsgrad .....	289
<b>28 Wärmeerzeugung durch Verbrennung.....</b>	<b>294</b>
28.1 Brennstoffe .....	294
28.1.1 Feste Brennstoffe .....	295
28.1.2 Flüssige Brennstoffe .....	296
28.1.3 Gasförmige Brennstoffe.....	297
28.2 Verbrennungsprozeß.....	297
28.3 Reaktionsgleichungen.....	298
28.3.1 Sauerstoffbedarf.....	299
28.3.2 Luftbedarf.....	302
28.3.3 Verbrennungsgas.....	303
28.4 Heizwert und Brennwert.....	310
28.5 Enthalpie-Temperatur-Diagramm der Verbrennungsgase .....	316
<b>Repetitorium.....</b>	<b>320</b>

Fragen und Aufgaben .....	320
Antworten und Lösungen .....	334
<b>Anhang A Einheiten</b> .....	<b>365</b>
Tabelle A1 Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems .....	365
Tabelle A2 Einheitenvorsätze (Präfixe) .....	366
Tabelle A3 Angelsächsische Einheiten und Einheitengleichungen .....	367
<b>Anhang B Stoffdaten</b> .....	<b>368</b>
Tabelle B1 Stoffdaten idealer Gase bei 0 °C .....	368
Tabelle B2 Sättigungsdampf­tafel für Wasser (Drucktafel) .....	369
Tabelle B3 Sättigungsdampf­tafel für Wasser (Temperaturtafel) .....	372
Tabelle B4 Sättigungsdampf­tafel für Ammoniak .....	375
Tabelle B5 Mittlere spezifische isobare Wärmekapazität idealer Gase .....	377
Tabelle B6 Logarithmisch gemittelte spezifische isobare Wärmekapazitäten von Luft und Verbrennungsgas .....	379
Tabelle B7 Thermophysikalische Stoffgrößen verschiedener Materialien .....	380
<b>Literatur</b> .....	<b>382</b>
<b>Sachverzeichnis</b> .....	<b>384</b>