

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
Formelzeichen .....	IX
Indizes .....	XIII
<b>1 Grundbegriffe</b>	<b>1</b>
1.1 Energie .....	2
1.2 Thermodynamische Systeme .....	3
1.3 Thermodynamischer Zustand .....	5
1.3.1 Zustandsgrößen einfacher Systeme .....	6
1.3.2 Intensive und extensive Zustandsgrößen .....	6
1.3.3 Spezifische und molare Zustandsgrößen .....	7
1.3.4 Thermische und kalorische Zustandsgrößen .....	10
1.4 Zustandsgleichungen .....	11
1.4.1 Festlegung des thermodynamischen Zustands .....	11
1.4.2 Thermische Zustandsgleichung .....	12
1.4.3 Kalorische Zustandsgleichungen .....	12
1.5 Zustandsänderungen .....	13
1.5.1 Quasistatische und nichtstatische Zustandsänderungen .....	13
1.5.2 Reversible und irreversible Zustandsänderungen .....	16
1.5.3 Thermodynamischer Prozess und Kreisprozess .....	18
1.6 Temperatur .....	19
1.6.1 Gesetzliche Festlegung .....	19
1.6.2 Thermisches Gleichgewicht .....	21
1.6.3 Nullter Hauptsatz .....	22
1.6.4 Die Zustandsgröße Temperatur $\vartheta$ .....	23
1.6.5 Temperaturskalen .....	23
1.6.6 Thermometer .....	26
1.6.6.1 Flüssigkeitsthermometer .....	26
1.6.6.2 Thermoelemente .....	28
1.6.6.3 Widerstandsthermometer .....	30

1.6.6.4	Strahlungsthermometer .....	31
1.7	Thermodynamisches Gleichgewicht .....	31
1.8	Wärme .....	32
1.9	Arbeit .....	34
1.9.1	Volumenarbeit .....	37
1.9.2	Verschiebearbeit .....	38
1.9.3	Mechanische Arbeit .....	38
1.9.4	Technische Arbeit .....	39
1.10	Dissipationsenergie .....	39
1.11	Innere Energie, Gesamtenergie eines Systems .....	40
1.12	Enthalpie .....	41
1.13	Entropie .....	41
1.14	Exergie, Anergie .....	42
1.15	Idealisierungen .....	43
1.15.1	Reversible Zustandsänderung .....	43
1.15.2	Ideales Gas .....	43
1.16	Erfahrungssätze .....	43
1.17	Diagramme .....	44
1.17.1	Aufbau der Diagramme .....	44
1.17.2	Darstellung bei reversiblen und irreversiblen Zustandsänderungen .....	45
1.17.3	Volumenarbeit im $p, v$ -Diagramm .....	46
1.17.4	Darstellung von Kreisprozessen im $p, v$ -Diagramm .....	49
1.18	Mathematische Beziehungen .....	51
1.18.1	Unterschied zwischen Zustandsgrößen und Prozessgrößen .....	51
1.18.2	Das vollständige Differential .....	54
1.18.3	Integrierender Faktor .....	57
<b>2</b>	<b>Der 1. Hauptsatz</b>	<b>61</b>
2.1	Der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme .....	61
2.1.1	Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit .....	61
2.1.2	Innere Energie .....	63
2.1.3	Mathematische Form des 1. Hauptsatzes für geschlossene Systeme .....	64
2.1.4	Der 1. Hauptsatz für Kreisprozesse .....	65
2.1.5	Formulierungen und Folgerungen .....	67
2.1.6	Bewegtes geschlossenes System .....	69
2.1.7	Enthalpie .....	70

2.2	Der 1. Hauptsatz für offene Systeme .....	72
2.2.1	Stationäre Strömung; instationäre Strömung .....	72
2.2.2	Technische Arbeit, Leistung .....	73
2.2.3	Modell und Energiebilanz für das offene System .....	74
2.2.4	Mathematische Form des 1. Hauptsatzes für offene Systeme .....	77
2.2.5	Technische Arbeit im $p, v$ -Diagramm .....	78
2.3	Thermischer Wirkungsgrad und Leistungszahl .....	80
2.3.1	Thermischer Wirkungsgrad von Wärmekraftprozessen .....	80
2.3.2	Leistungszahl für Kälte- und Wärmepumpenprozesse .....	82
2.4	Wärmekapazität .....	83
2.4.1	Spezifische Wärmekapazität, molare Wärmekapazität .....	83
2.4.2	Mittlere spezifische Wärmekapazität .....	85
2.5	Zusammenstellung der mathematischen Formen des 1. Hauptsatzes .....	88
2.5.1	Geschlossenes System .....	88
2.5.1.1	Ruhendes geschlossenes System .....	88
2.5.1.2	Bewegtes geschlossenes System .....	88
2.5.2	Offenes System, stationäre Durchströmung .....	89
2.5.3	Kreisprozess .....	89
<b>3</b>	<b>Ideale Gase</b>	<b>93</b>
3.1	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase .....	93
3.2	Kalorische Zustandsgleichungen idealer Gase .....	97
3.3	Theoretische Bestimmung von Zustandsgrößen .....	99
3.3.1	Kinetische Gastheorie .....	99
3.3.2	Molare innere Energie und molare Wärmekapazität .....	102
3.4	Entropie idealer Gase .....	104
3.5	Das $T, s$ -Diagramm .....	105
3.6	Kriterien und Beziehungen für ideale Gase .....	108
3.7	Einfache Zustandsänderungen idealer Gase .....	110
3.7.1	Isochore Zustandsänderung .....	111
3.7.2	Isobare Zustandsänderung .....	113
3.7.3	Isotherme Zustandsänderung .....	114
3.7.4	Adiabate Zustandsänderung .....	116
3.7.5	Polytrope Zustandsänderung .....	118
3.8	Zustandsänderungen bei instationären Vorgängen .....	123
3.8.1	Füllen eines Behälters mit idealem Gas .....	123
3.8.2	Ausströmen eines idealen Gases aus einem Behälter .....	125

3.9	Der Carnot-Prozess für ideale Gase .....	128
3.9.1	Der rechtsgängige Prozess: Wärmekraftprozess .....	128
3.9.2	Der linksgängige Prozess: Kälteprozess bzw. Wärmepumpenprozess.....	132
<b>4</b>	<b>Der 2. Hauptsatz</b>	<b>139</b>
4.1	Formulierungen des 2. Hauptsatzes .....	139
4.2	Folgesätze des 2. Hauptsatzes.....	141
4.2.1	Erster Folgesatz .....	141
4.2.2	Zweiter und Dritter Folgesatz .....	142
4.2.3	Vierter Folgesatz .....	143
4.2.4	Fünfter Folgesatz .....	144
4.2.5	Sechster Folgesatz .....	147
4.3	Die Entropie .....	149
4.3.1	Definition der Entropie .....	149
4.3.2	Hauptgleichung der Thermodynamik .....	152
4.3.3	Allgemeine thermodynamische Beziehungen .....	152
4.3.4	Anwendungen der thermodynamischen Beziehungen .....	155
4.3.4.1	Spezifische Wärmekapazität .....	155
4.3.4.2	Kompressibilität, Ausdehnungskoeffizient, Spannungskoeffizient .....	156
4.3.4.3	Drosselkoeffizienten .....	158
4.3.4.4	Bestimmung der Entropie .....	161
4.3.4.5	Nachweis für $(\partial u / \partial v)_T = 0$ bei idealen Gasen.....	162
4.3.5	Entropiezunahme bei irreversiblen Prozessen .....	164
4.3.5.1	Strömung mit Reibung .....	164
4.3.5.2	Drosselung .....	169
4.3.5.3	Vermischung und Diffusion .....	170
4.3.5.4	Überströmversuch von Joule .....	172
4.3.5.5	Wärmeübertragung .....	172
4.4	Wirkungsgrade von arbeitsabgebenden und arbeitsaufnehmenden Maschinen ..	174
4.5	Die Exergie .....	175
4.5.1	Exergie der Wärme bei $T = \text{const.}$ .....	179
4.5.2	Exergie geschlossener Systeme .....	180
4.5.2.1	Isochore Zustandsänderung, $v = \text{const.}$ .....	182
4.5.2.2	Isobare Zustandsänderung, $p = \text{const.}$ .....	184
4.5.2.3	Exergie für Reaktionen mit gleicher Anfangs- und Endtemperatur .....	185
4.5.3	Exergie offener stationärer Systeme .....	186
4.5.4	Exergieverlust bei irreversiblen Prozessen .....	188
4.5.5	Exergetischer Wirkungsgrad .....	190
4.5.6	Exergie-Anergie-Flussbilder .....	193

<b>5</b>	<b>Mehrphasige Systeme reiner Stoffe</b>	<b>203</b>
5.1	Grundlagen .....	203
5.2	Zustandsgrößen im Zweiphasengebiet .....	206
5.2.1	Dampfgehalt .....	206
5.2.2	Spezifisches Volumen .....	207
5.2.3	Spezifische innere Energie, Enthalpie und Entropie .....	208
5.3	Diagramme im Zweiphasengebiet .....	209
5.3.1	Temperatur, Volumen-Diagramm; $T, v$ -Diagramm .....	209
5.3.2	Druck, Volumen-Diagramm; $p, v$ -Diagramm .....	210
5.3.3	Druck, Temperatur-Diagramm; $p, T$ -Diagramm .....	211
5.3.4	Zustandsfläche im $p, v, T$ -Raum .....	211
5.3.5	Temperatur, Entropie-Diagramm; $T, s$ -Diagramm .....	212
5.3.6	Enthalpie, Entropie-Diagramm; $h, s$ -Diagramm .....	213
5.3.7	Druck, Enthalpie-Diagramm; $\log p, h$ -Diagramm .....	214
5.4	Zustandsgleichungen und Zahlentafeln .....	214
5.5	Einfache Zustandsänderungen im Zweiphasengebiet .....	217
5.5.1	Isobare, isotherme Zustandsänderung .....	217
5.5.2	Isochore Zustandsänderung .....	218
5.5.3	Adiabate Zustandsänderung .....	219
5.5.4	Isenthalpe Zustandsänderung (irreversibel adiabat) .....	220
5.6	Die Clausius-Clapeyron-Gleichung .....	221
5.7	Kreisprozesse mit Dämpfen .....	222
5.7.1	Dampfkraftprozesse (Rechtsgängige Prozesse) .....	222
5.7.1.1	Der Carnot-Prozess .....	225
5.7.1.2	Der Clausius-Rankine-Prozess .....	226
5.7.2	Kaltdampfprozesse (Linksgängige Prozesse) .....	229
5.7.2.1	Linksgänger Carnot-Prozess .....	231
5.7.2.2	Der Kaltdampfprozess als Kälteprozess .....	231
5.7.2.3	Der Wärmepumpenprozess .....	233
5.8	Dreiphasengebiet .....	235
5.8.1	Zustandsdiagramme .....	235
5.8.2	Die Clausius-Clapeyron-Gleichung .....	238
<b>6</b>	<b>Gemische von Gasen</b>	<b>245</b>
6.1	Zusammensetzung, Konzentration .....	245
6.2	Gemische idealer Gase .....	248
6.2.1	Zustandsgleichung, Gaskonstante .....	248

6.2.2	Innere Energie, Enthalpie, Wärmekapazitäten.....	250
6.2.3	Entropie .....	251
6.2.4	Exergie .....	252
6.2.5	Zusammenstellung der Konzentrationsmaße; Zusammenstellung von Größen ..	253
6.3	Luft-Wasserdampf-Gemische (Feuchte Luft) .....	255
6.3.1	Konzentrationsmaße .....	255
6.3.2	Zustandsgrößen .....	259
6.3.2.1	Dichte des Gemisches .....	259
6.3.2.2	Enthalpie des Gemisches .....	260
6.3.3	Das $h, x$ -Diagramm .....	262
6.3.4	Anwendungen des $h, x$ -Diagrammes .....	265
6.3.4.1	Erwärmung und Kühlung bei konstantem Dampfgehalt ( $x = \text{const.}$ ).....	265
6.3.4.2	Trocknung feuchter Luft ( $x \neq \text{const.}$ ).....	267
6.3.4.3	Adiabate Vermischung zweier feuchter Luftströme.....	268
6.3.4.4	Zugabe von Flüssigkeit oder Dampf.....	270
6.3.4.5	Verdunstungskühlung (Nasskühlung).....	272
6.3.4.6	Das Psychrometer-Prinzip .....	274
6.4	Binäre zweiphasige Systeme (Zweistoff-Zweiphasen-Gemisch).....	277
6.4.1	Darstellung des Siedens und Kondensierens im Phasendiagramm .....	277
6.4.1.1	Das $T, x$ -Diagramm .....	277
6.4.1.2	Das $p, x$ -Diagramm .....	279
6.4.1.3	Gemische mit azeotropem Punkt .....	280
6.4.2	Das Enthalpie-, Konzentrations-Diagramm ( $h, w$ ) .....	281
<b>7</b>	<b>Vergleichsprozesse mit idealem Gas</b>	<b>287</b>
7.1	Allgemeines .....	287
7.1.1	Arbeit, Leistung, Mitteldruck .....	288
7.1.2	Arbeitsmitteldurchsatz .....	289
7.2	Rechtsgängige Prozesse .....	290
7.2.1	Wirkungsgrade.....	290
7.2.2	Carnot-Prozess .....	291
7.2.3	Vergleichsprozesse für Otto-Motor und Diesel-Motor .....	292
7.2.3.1	Annahmen für den Vergleichsprozess .....	294
7.2.3.2	Definitionen .....	294
7.2.3.3	Wirkungsgrade.....	296
7.2.3.4	Mitteldruck .....	298
7.2.3.5	Vergleich des realen Otto-Prozesses mit dem Vergleichsprozess .....	299
7.2.4	Stirlingmotor .....	300
7.2.4.1	Stirling-Prozess .....	300
7.2.4.2	Thermischer Wirkungsgrad .....	302

7.2.4.3	Mitteldruck .....	302
7.2.5	Heißgasmotor .....	303
7.2.5.1	Ericson-Prozess .....	303
7.2.5.2	Thermischer Wirkungsgrad .....	304
7.2.5.3	Mitteldruck .....	304
7.2.6	Gasturbinenanlagen, Strahltriebwerke .....	305
7.2.6.1	Offene und geschlossene Gasturbinenanlagen ohne Wärmerückführung .....	305
7.2.6.2	Joule-Prozess .....	305
7.2.6.3	Offene und geschlossene Gasturbinenanlagen mit Wärmerückführung .....	308
7.2.6.4	Strahltriebwerke .....	310
7.2.6.5	Raketen .....	314
7.2.6.6	Äußerer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad von Strahltriebwerken und Raketen .....	315
7.2.7	Vergleich der Vergleichsprozesse .....	316
7.3	Linksgängige Prozesse .....	318
7.3.1	Verdichter (Kompressoren) .....	318
7.3.1.1	Vergleichsprozess .....	319
7.3.1.2	Arbeit, Leistung .....	320
7.3.1.3	Wirkungsgrade .....	321
7.3.1.4	Definitionen .....	321
7.3.2	Mehrstufige Verdichter .....	323
7.3.3	Gaskältemaschinen .....	325
7.3.3.1	Stirling-Prozess .....	326
7.3.3.2	Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung .....	328
<b>8</b>	<b>Vergleichsprozesse mit Dämpfen</b>	<b>337</b>
8.1	Dampfkraftanlagen .....	337
8.1.1	Thermodynamische Mitteltemperatur und Wirkungsgrade .....	338
8.1.2	Exergetische Wirkungsgrade .....	339
8.1.3	Clausius-Rankine-Prozess .....	341
8.1.3.1	Clausius-Rankine-Prozess mit Zwischenüberhitzung .....	342
8.1.3.2	Regenerative Speisewasservorwärmung .....	343
8.1.4	Gas-Dampf-Kraftprozesse (GD-Prozesse) .....	346
8.2	Kaltdampfprozesse .....	348
8.2.1	Exergetische Behandlung von Kälteprozessen .....	349
8.2.2	Irreversibel ablaufende Kälteprozesse .....	351
<b>9</b>	<b>Strömungsvorgänge</b>	<b>357</b>
9.1	Allgemeines .....	357
9.2	Grundlagen .....	357

9.3	Strömung kompressibler Medien in Düsen und Diffusoren .....	360
9.3.1	Düsen und Diffusoren .....	360
9.3.2	Ausströmung aus Behältern durch sich verengende Düsen .....	361
9.3.2.1	Ausströmgeschwindigkeit .....	361
9.3.2.2	Ausströmende Masse, Durchflussfunktion .....	363
9.3.2.3	Schallgeschwindigkeit.....	367
9.3.2.4	Schallgeschwindigkeit bei Ausströmung aus einer sich verengenden Düse .....	367
9.3.3	Strömung durch konvergente Düsen .....	371
9.3.4	Laval-Düse .....	372
9.3.4.1	Grundlagen .....	372
9.3.4.2	Zusammenstellung der Gleichungen .....	375
9.3.4.3	Druck- und Geschwindigkeitsverlauf in einer Laval-Düse und in Diffusoren wenn $c_0 = 0$ und $c_0 \neq 0$ .....	376
9.3.5	Verdichtungsstöße.....	381
9.3.5.1	Grundgleichungen .....	382
9.3.5.2	Darstellung des Verdichtungsstoßes im Diagramm .....	387
9.3.6	Bewertungsgrößen von Düsen und Diffusoren .....	389
<b>10</b>	<b>Verbrennungsprozesse</b>	<b>397</b>
10.1	Allgemeines .....	397
10.1.1	Größen und Symbole .....	399
10.2	Brennwert, Heizwert .....	400
10.2.1	Brennwert .....	400
10.2.1.1	Messung des Brennwertes .....	402
10.2.1.2	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsenthalpie .....	404
10.2.2	Heizwert .....	404
10.2.3	Berechnung von Brennwert und Heizwert .....	406
10.2.3.1	Brennstoffgemische .....	407
10.2.3.2	Chemische Verbindungen.....	407
10.2.3.3	Verbandsformeln .....	408
10.3	Sauerstoff- und Luftbedarf .....	410
10.3.1	Mindestbedarf an Sauerstoff für feste und flüssige Brennstoffe .....	410
10.3.2	Mindestbedarf an Sauerstoff für gasförmige Brennstoffe .....	411
10.3.3	Luftbedarf und Luftüberschuss.....	412
10.4	Brennstoffkennzahlen .....	415
10.4.1	Kennzahl für den Sauerstoffbedarf, $\sigma$ .....	415
10.4.2	Kennzahl für den Stickstoffgehalt, $\nu$ .....	417
10.5	Rauchgase .....	417
10.5.1	Feuchte Rauchgase fester und flüssiger Brennstoffe .....	417
10.5.2	Feuchte Rauchgase gasförmiger Brennstoffe .....	419

10.5.3	Näherungsgleichungen .....	421
10.5.4	Trockene Rauchgase .....	421
10.5.5	Anwendung für die Rauchgasanalyse .....	422
10.6	Verbrennungstemperatur .....	423
10.6.1	Rauchgasenthalpie und Rauchgastemperatur .....	423
10.6.2	Maximale Verbrennungstemperatur .....	425
10.6.3	Schornsteinverluste .....	427
10.6.4	Wärmekapazität der Rauchgase .....	428
10.6.5	Das $h, \vartheta$ -Diagramm .....	429
10.7	Feuerungswirkungsgrad .....	432
10.8	Irreversibilität der Verbrennung .....	433
10.8.1	Reaktionsarbeit und Reaktionsentropie .....	433
10.8.2	Absolute Entropie, Dritter Hauptsatz, Standardentropie .....	435
10.8.3	Brennstoffexergie .....	438
10.8.4	Exergieverluste bei der Verbrennung .....	441
10.8.5	Exergetischer Wirkungsgrad .....	443
<b>Anhang</b>		<b>451</b>
Anhang	1: Lösungen der Aufgaben .....	451
Anhang	2: Thermodynamische Größen einiger Stoffe .....	460
Anhang	3: Berechnung der Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf .....	460
Anhang	4: $h, x$ -Diagramm .....	475
Anhang	5: Wirkungsgrade von Energiewandlungsanlagen in der Technik .....	476
Anhang	6: Beispiele für Energien und Leistungen .....	477
Anhang	7: Beispiele für Leistungsdichten .....	477
Anhang	8: Tripelpunkte und kritische Daten einiger Stoffe .....	478
Anhang	9: Literatur .....	479
Anhang	10: Sachverzeichnis .....	482