

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>Formelzeichen und Einheiten</b> .....	11
<b>Einleitung</b> .....	13
<b>1 Physikalisch-wärmetechnische Grundlagen</b> .....	15
1.1 Wärmedehnung fester, flüssiger, gasförmiger Stoffe .....	15
1.1.1 Wärmedehnung fester Stoffe .....	15
1.1.2 Wärmeausdehnung bei Flüssigkeiten .....	17
1.1.3 Wärmeausdehnung der Gase .....	17
1.2 Zustandsgrößen der Gase .....	18
1.2.1 Volumen $V$ , spez. Volumen $v$ , Dichte $\rho$ .....	18
1.2.2 Druck und Druckmessung .....	19
1.2.3 Temperatur, Temperaturmessung .....	23
1.3 Spezifische Wärmekapazität, Anwendungen .....	26
1.3.1 Wahre und mittlere spez. Wärmekapazität .....	27
1.3.2 Spezifische Wärmekapazitäten von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen .....	28
1.3.3 Anwendung: Mischungstemperatur .....	28
1.3.4 Schmelzen und Verdampfen .....	29
1.4 Gasgesetze; Zustandsgleichung der Gase .....	31
1.4.1 Gasgesetz von BOYLE-MARIOTTE .....	31
1.4.2 Gasgesetz von GAY-LUSSAC .....	32
1.4.3 Allgemeine Zustandsgleichung der Gase .....	33
1.4.4 Avogadro-Konstante, Masse-Begriff Mol, (molare Masse $M$ ) Molvolumen $V_{Mn}$ , universelle Gaskonstante $R$ .....	36
1.5 Wärme und Arbeit .....	38
1.5.1 1. Hauptsatz der Wärmelehre .....	38
1.5.2 Mechanische und elektrische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt .....	39
1.5.3 Gase und Dämpfe; Umwandlung von Wärme in Arbeit .....	41
1.5.4 Raumänderungsarbeit $W_r$ , Innere Energie $U$ , Wärme $Q$ .....	43
1.5.5 Technische Arbeit $W_t$ , ROBERT MAYER, Enthalpie $H$ .....	48
1.5.6 Spez. Wärmekapazitäten $c_p$ , $c_v$ , Molwärmern $C_{mp}$ , $C_{mv}$ ; $\kappa = c_p/c_v$ .....	54
<b>2 Zustandsänderungen der Gase und ihre Darstellung im <math>p</math>-<math>v</math>- und <math>T</math>-<math>s</math>-Diagramm</b> .....	59
2.1 Isochore ZÄ (gleichbleibendes Volumen), Isovolum .....	59
2.2 Isobare ZÄ (gleichbleibender Druck) .....	61
2.3 Isotherme ZÄ (gleichbleibende Temperatur) .....	63
2.4 Adiabate (isentropen) ZÄ (ohne Wärmeeinwirkung) .....	65
2.5 Polytropische ZÄ .....	68
2.6 Entropie und das $T$ - $s$ -Diagramm (Wärmediagramm) .....	72
2.6.1 Entropie-Diagramme, allgemeine Grundlage .....	73
2.7 $T$ - $s$ -Diagramme der besprochenen ZÄ .....	75
2.7.1 Isochore ( $v = \text{konst.}$ ) im $T$ - $s$ -Diagramm .....	75
2.7.2 Isobare ( $p = \text{konst.}$ ) im $T$ - $s$ -Diagramm .....	76
2.7.3 Isotherme ( $T = \text{konst.}$ ) im $T$ - $s$ -Diagramm .....	77
2.7.4 Isentrope (adiabatische) ZÄ im $T$ - $s$ -Diagramm .....	77
2.7.5 Polytropische ZÄ im $T$ - $s$ -Diagramm .....	78
2.8 $T$ - $s$ -Diagramm für Luft .....	80
2.8.1 Zusammenfassung zu einem $T$ - $s$ -Diagramm für Luft (Bild 2.26) .....	82
2.8.2 Beispiele zur Anwendung des $T$ - $s$ -Diagramms (Bild 2.28) .....	85

<b>3</b>	<b>Kreisprozesse mit Maschinen</b>	87
3.1	Kreisprozess mit einer Brennkraft-Kolbenmaschine; Beispiel	87
3.2	Vom 1. zum 2. Hauptsatz der Wärmelehre	90
3.2.1	2. Hauptsatz der Wärmelehre und der Carnotprozess	92
3.3	Abwärme und Frischwärme beim Kreisprozess; Bedeutung des Carnotprozesses; Kälteprozess	94
3.4	Ausgeführte Kraftmaschinen-Kreisprozesse	96
3.4.1	Ottoprozess für den Benzin-Kolbenmotor	96
3.4.2	Dieselpsprozess im $p$ - $v$ - und $T$ - $s$ -Diagramm	99
3.4.3	Seiligerprozess	101
3.4.4	«Einfacher offener» Gasturbinen-Kreisprozess (Jouleprozess)	102
3.5	Ausgeführte Arbeitsmaschinenprozesse	107
3.5.1	Kolbenverdichter	108
3.5.2	Mehrstufige Verdichtung	111
3.5.3	Kolbenverdichter im $T$ - $s$ -Diagramm	115
3.6	Linkslaufender Carnotprozess, Kältemaschine, Wärmepumpe	117
3.6.1	Linkslaufender Carnotprozess, Leistungsziffer $\epsilon$	117
3.6.2	Kältemaschinenprozess	119
3.6.3	Wärmepumpe	122
3.7	Wirkliche Maschinen. Verluste, die über $\eta_{th}$ zu $\eta_e$ führen. Kolben- und Strömungsmaschinen	123
3.7.1	Umkehrbare und nicht umkehrbare (reversible und irreversible) Vorgänge	123
3.7.2	Verluste durch Reibung, Wärmeleitung, Drosselung	124
3.7.3	Zusätzliche Verluste bei der Energieumwandlung in Kolben- und Strömungsmaschinen	125
3.7.4	Kolbenmaschinen	126
3.7.5	Strömungsmaschinen	129
<b>4</b>	<b>Wasserdampf</b>	135
4.1	Zustandsgrößen $p$ , $t$ , $v$ – von Wasser bis Heißdampf	136
4.2	$h$ - $p$ -Diagramm von Wasser bis Heißdampf	139
4.3	$T$ - $s$ - und $h$ - $s$ -Diagramm von Wasserdampf	142
4.4	ZÄ des Wasserdampfes; Beispiele	146
4.4.1	Isovolume (Isochore) ZÄ	146
4.4.2	Isobare ZÄ	147
4.4.3	Isothermische ZÄ	149
4.4.4	Isentrope und polytrope ZÄ; Zwischenüberhitzung	149
4.4.5	Drosselung	153
4.5	Clausius-Rankine-Dampfkraftprozess	154
4.5.1	Darstellung im $T$ - $s$ - und im $h$ - $s$ -Diagramm	154
4.5.2	Vorteile des Hochdruck-Hochtemperatur-Kreisprozesses	157
4.5.3	Dampfkraftprozess im Kernkraftwerk	157
4.6	Dampfturbinen, Dampfkraftprozess, Kopplung von Kraft und Wärme	161
<b>5</b>	<b>Wirkungsgradverbesserungen durch Kreislaufkombinationen</b>	165
5.1	Vergleich verschiedener Prozesse	165
5.1.1	Gasturbinenprozess (Jouleprozess)	165
5.1.2	Dampfturbinenprozess (Rankineprozess)	166
5.2	Gas- u. Dampfturbinenprozess (GuD-Prozess) (Kombination von Joule- und Rankineprozess)	167
5.3	Joule-Ericsson-Rankineprozess	170
5.4	2-fach-Dampfprozess (2-fach-Rankineprozess)	173
5.5	Organic-Rankine-Prozess (ORC-Prozess)	173
<b>6</b>	<b>Verbrennung</b>	177
6.1	Verbrennungsreaktionen	177
6.2	Feste Brennstoffe und Heizöl	179
6.2.1	Brennwert und Heizwert	179
6.2.2	Sauerstoffbedarf bzw. Luftbedarf für die Brennstoffoxidation	179
6.2.3	Verbrennungsgasprodukte	182
6.3	Brenngase	183

6.3.1	Heizwert bei Gasen .....	183
6.3.2	Verbrennung von Brenngasen .....	184
6.3.3	Verbrennungsluftgehalte- und Rauchgasgehalte eines Brenngases .....	185
6.4	Rauchgasdaten .....	185
6.4.1	Partialdruck bzw. Volumenanteile von Rauchgaskomponenten .....	185
6.4.2	Stoffdaten von Rauchgasen .....	186
6.5	Verbrennungstemperatur .....	186
7	Grundlagen der Wärmeübertragung .....	193
7.1	Wärmeleitung .....	193
7.2	Konvektion .....	194
7.3	Wärmestrahlung .....	197
7.4	Strahlungsaustausch .....	198
7.5	Wärmedurchgang .....	199
7.6	Wärmetauscher .....	120
7.6.1	Basisgleichung .....	120
7.6.2	Nachrechnung der Austrittstemperaturen bei vorhandenem Wärmetauscher .....	202
7.6.3	Wärmetauscher Wirkungsgrad $\eta_{WT}$ .....	202
Anhang	.....	205
Tabelle A1	Umrechnung für Druckeinheiten .....	205
Tabelle A2	$\alpha_m _t$ : Werte metallischer Werkstoffe in $K^{-1}$ .....	205
Tabelle A3	Mittlere spez. Wärmekapazität $c_m$ metallischer Werkstoffe in $kJ/kg\ K$ zwischen $0\ ^\circ C$ und $t\ ^\circ C$ .....	205
Tabelle A4	Spez. Wärmekapazität von Flüssigkeiten bei Raumtemperatur .....	205
Tabelle A5	Schmelztemperatur und -wärme, Siedetemperatur und Verdampfungsenthalpie für einige feste Körper und Flüssigkeiten. Die Werte bei Flüssigkeiten gelten unter 1 bar Druck .....	205
Tabelle A6	Siedetemperatur und Verdampfungsenthalpie von Wasser, abhängig vom Druck .....	206
Tabelle A7	Einige Stoffwerte von Gasen .....	206
Tabelle A8	Realgasfaktor $Z = p \cdot v/R_i \cdot T$ für Luft .....	206
Tabelle A9a	Beziehungen zwischen mechanischer, thermischer, elektrischer Arbeit .....	207
Tabelle A9b	Beziehungen mechanischer, thermischer, elektrischer Leistung .....	207
Tabelle A10	$c_{pm}$ -Werte für Gase in $kJ/kg\ K = c_{pm} _0\ ^\circ C$ .....	207
Tabelle A11	Polytrope ZÄ von Gasen .....	208
Tabelle A12a	Wasserdampf tabel, Sättigungszustand (Drucktafel) .....	208
Tabelle A12b	Wasserdampf tabel, überhitzter Dampf .....	209
Zusammenfassung der wichtigsten Gleichungen	.....	213
Literaturverzeichnis	.....	217
Stichwortverzeichnis	.....	219