

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
Formelzeichen und Einheiten .....	11
Einleitung .....	13
<b>1 Physikalisch-wärmetechnische Grundlagen .....</b>	<b>15</b>
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 $V_{\text{Mv}}$ 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 $c_p$ , $c_v$ ; Molwärmen $C_{mp}$ , $C_{mv}$ ; $\kappa = c_p/c_v$ .....	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>	<b>59</b>
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 (isentrope) 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

## 8 Inhaltsverzeichnis

---

<b>3 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 Dieselprozess 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 $\varepsilon$	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 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 Isovolum (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 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 Wärmeerzeugung</b>	177
6.1 Verbrennung	177
6.1.1 Verbrennungsreaktionen	177
6.1.2 Feste Brennstoffe und Heizöl	179
6.1.3 Brenngase	183
6.1.4 Rauchgasdaten	185
6.1.5 Verbrennungstemperatur	186

6.2 Elektrischer Strom .....	191
6.2.1 Elektroerhitzer in Behälterbauweise .....	191
6.2.2 Elektroerhitzer mit Rohrsystem .....	192
6.2.3 Heizelemente .....	192
6.3 Solarstrahlung .....	193
6.4 Erdwärme .....	194
<b>7 Grundlagen der Wärmeübertragung .....</b>	<b>195</b>
7.1 Wärmeleitung .....	195
7.2 Konvektion .....	196
7.3 Wärmestrahlung .....	199
7.4 Strahlungsaustausch .....	200
7.5 Wärmedurchgang .....	201
7.6 Wärmetauscher .....	202
7.6.1 Basisgleichung .....	202
7.6.2 Nachrechnung der Austrittstemperaturen bei vorhandenem Wärmetauscher .....	204
7.6.3 Wärmetauscher Wirkungsgrad $\eta_{WT}$ .....	204
<b>Anhang .....</b>	<b>207</b>
Tabelle A1 Umrechnung für Druckeinheiten .....	207
Tabelle A2 $\alpha_m _{t_0}^{t_1}$ Werte metallischer Werkstoffe in K <sup>-1</sup> .....	207
Tabelle A3 Mittlere spez. Wärmekapazität $c_m$ metallischer Werkstoffe in kJ/kg K zwischen 0 °C und t °C .....	207
Tabelle A4 Spez. Wärmekapazität von Flüssigkeiten bei Raumtemperatur .....	207
Tabelle A5 Schmelztemperatur und -wärme, Siedetemperatur und Verdampfungsenthalpie für einige feste Körper und Flüssigkeiten. Die Werte bei Flüssigkeiten gelten unter 1 bar Druck .....	207
Tabelle A6 Siedetemperatur und Verdampfungsenthalpie von Wasser, abhängig vom Druck .....	208
Tabelle A7 Einige Stoffwerte von Gasen .....	208
Tabelle A8 Realgasfaktor $Z = p \cdot v/R_i \cdot T$ für Luft .....	208
Tabelle A9a Beziehungen zwischen mechanischer, thermischer, elektrischer Arbeit .....	209
Tabelle A9b Beziehungen mechanischer, thermischer, elektrischer Leistung .....	209
Tabelle A10 $c_{pm}$ -Werte für Gase in kJ/kg K = $c_{pm} _{0}^L$ °C .....	209
Tabelle A11 Polytrope ZÄ von Gasen .....	210
Tabelle A12a Wasserdampftafel, Sättigungszustand (Drucktafel) .....	210
Tabelle A12b Wasserdampftafel, überhitzter Dampf .....	211
<b>Zusammenfassung der wichtigsten Gleichungen .....</b>	<b>215</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>219</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>221</b>