

# Inhaltsverzeichnis

<b>0.</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>11</b>	<b>2.2.</b>	<b>Mehrere Stoffströme schneiden die Systemgrenze</b> .....	<b>55</b>
<b>0.1.</b>	Gegenstand der Technischen Thermodynamik .....	<b>11</b>	<b>3.</b>	<b>Mischungen idealer Gase</b> ....	<b>58</b>
<b>0.2.</b>	Hinweise für das Studium ....	<b>12</b>	<b>3.1.</b>	Zusammensetzung der Gasgemische .....	<b>58</b>
<b>1.</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>14</b>	<b>3.2.</b>	Zur thermischen Zustandsgleichung der idealen Gas- mischung .....	<b>60</b>
<b>1.1.</b>	Grundbegriffe .....	<b>14</b>	<b>3.2.1.</b>	Dichte $\rho_m$ einer idealen Gas- mischung .....	<b>62</b>
<b>1.1.1.</b>	Thermodynamisches System ..	<b>14</b>	<b>3.2.2.</b>	Molare Masse $M_m$ einer idealen Gasmischung .....	<b>62</b>
<b>1.1.2.</b>	Zustandsgrößen .....	<b>17</b>	<b>3.2.3.</b>	Gaskonstante $R_m$ der idealen Gasmischung .....	<b>62</b>
<b>1.1.3.</b>	Thermische Zustandsgleichung	<b>21</b>	<b>3.2.4.</b>	Zusammenhang zwischen Massen- und Raumanteilen ...	<b>63</b>
<b>1.1.3.1.</b>	Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases .....	<b>21</b>	<b>3.3.</b>	Kalorische Zustandsgrößen der idealen Gasmischung .....	<b>65</b>
<b>1.1.3.2.</b>	Normzustand .....	<b>24</b>	<b>4.</b>	<b>Zustandsänderung idealer Gase</b>	<b>70</b>
<b>1.1.3.3.</b>	Zur thermischen Zustands- gleichung kondensierter Körper	<b>26</b>	<b>4.1.</b>	Grundlagen .....	<b>70</b>
<b>1.1.4.</b>	Prozeß und Zustandsänderung	<b>27</b>	<b>4.2.</b>	Isochore Zustandsänderung ...	<b>72</b>
<b>1.1.5.</b>	Nichtstatische und quasi- statische Zustandsänderung ..	<b>28</b>	<b>4.3.</b>	Isobare Zustandsänderung ....	<b>75</b>
<b>1.1.6.</b>	Reversible und irreversible Prozesse .....	<b>28</b>	<b>4.4.</b>	Isotherme Zustandsänderung .	<b>78</b>
<b>1.2.</b>	Formen der Energieübertragung zwischen System und Umgebung	<b>29</b>	<b>4.5.</b>	Isentrope Zustandsänderung ..	<b>81</b>
<b>1.2.1.</b>	Volumenänderungsarbeit .....	<b>29</b>	<b>4.6.</b>	Polytrope Zustandsänderung .	<b>86</b>
<b>1.2.2.</b>	Technische Arbeit .....	<b>31</b>	<b>4.7.</b>	Verdichterprozeß .....	<b>92</b>
<b>1.2.3.</b>	Wärme .....	<b>34</b>	<b>5.</b>	<b>II. Hauptsatz</b> .....	<b>101</b>
<b>1.3.</b>	Energieerhaltungssatz und Energieinhalt thermo- dynamischer Systeme .....	<b>35</b>	<b>5.1.</b>	Erfahrungssatz über die Rich- tung der natürlichen Prozesse.	<b>101</b>
<b>1.3.1.</b>	Zum Inhalt des I. Hauptsatzes	<b>35</b>	<b>5.2.</b>	Zur mathematischen Formu- lierung des II. Hauptsatzes ...	<b>104</b>
<b>1.3.2.</b>	Innere Energie und I. Hauptsatz	<b>36</b>	<b>5.3.</b>	Zur Berechnung der Entropie- änderung .....	<b>105</b>
<b>1.3.3.</b>	Enthalpie und I. Hauptsatz ...	<b>40</b>	<b>5.4.</b>	Entropietransport und Entropieerzeugung .....	<b>106</b>
<b>1.3.3.1.</b>	Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität .	<b>42</b>			
<b>1.3.3.2.</b>	Berechnung der Enthalpie- änderung für ideales Gas .....	<b>44</b>			
<b>2.</b>	<b>Anwendung des I. Hauptsatzes auf offene thermodynamische Systeme</b> .....	<b>50</b>			
<b>2.1.</b>	Ein Stoffstrom schneidet die Systemgrenze .....	<b>50</b>			

<b>6.</b>	<b>Kreisprozesse</b> .....	110	<b>8.4.2.</b>	<b>Isobare</b> .....	170
<b>6.1.</b>	<b>Allgemeines</b> .....	110	<b>8.4.3.</b>	<b>Isotherme</b> .....	173
<b>6.2.</b>	<b>Kraftmaschinenprozeß</b> .....	110	<b>8.4.4.</b>	<b>Ientropie</b> .....	173
<b>6.2.1.</b>	<b>Prozeßarbeit und thermischer Wirkungsgrad</b> .....	110	<b>8.4.5.</b>	<b>Adiabate</b> .....	174
<b>6.2.2.</b>	<b>Carnotprozeß</b> .....	115	<b>8.4.6.</b>	<b>Drosselung</b> .....	175
<b>6.2.3.</b>	<b>Ottoprozeß</b> .....	118	<b>8.5.</b>	<b>Dampfkreisprozesse</b> .....	179
<b>6.2.4.</b>	<b>Dieselprozeß</b> .....	123	<b>8.5.1.</b>	<b>Dampfkraftprozeß nach Clausius-Rankine</b> .....	179
<b>6.2.5.</b>	<b>Seiligerprozeß</b> .....	126	<b>8.5.2.</b>	<b>Dampfkraftprozeß mit regenerativer Speisewasservorwärmung und Zwischenüberhitzung</b> .....	182
<b>6.2.6.</b>	<b>Zum Gasturbinenprozeß</b> .....	128	<b>8.5.3.</b>	<b>Kältemaschinen und Wärmepumpenprozeß mit Kaltdampf</b> .....	184
<b>6.3.</b>	<b>Kältemaschinen- und Wärmepumpenprozeß</b> .....	131			
<b>7.</b>	<b>Exergie und Anergie</b> .....	134	<b>9.</b>	<b>Gas-Dampf-Gemische</b> .....	187
<b>7.1.</b>	<b>Inhalt und Bedeutung des Exergiebegriffs</b> .....	134	<b>9.1.</b>	<b>Zustandsgrößen der Gas-Dampf-Gemische</b> .....	187
<b>7.2.</b>	<b>Exergie der Wärme</b> .....	136	<b>9.1.1.</b>	<b>Relative Feuchte</b> .....	187
<b>7.3.</b>	<b>Physikalische Exergie eines Stoffstroms</b> .....	137	<b>9.1.2.</b>	<b>Absolute Feuchte</b> .....	188
<b>7.4.</b>	<b>Exergiebilanz und Exergieverlust</b> .....	139	<b>9.1.3.</b>	<b>Zusammenhang zwischen <math>\varphi</math> und <math>x</math></b> .....	188
<b>7.4.1.</b>	<b>Exergieverlust beim Strömungsprozeß</b> .....	142	<b>9.1.4.</b>	<b>Gasmasse, Dampfmasse und Dichte</b> .....	190
<b>7.4.2.</b>	<b>Exergieverlust bei der Wärmeübertragung</b> .....	143	<b>9.1.5.</b>	<b>Enthalpie</b> .....	191
<b>7.5.</b>	<b>Energetische und exergetische Beurteilungsquotienten</b> .....	144	<b>9.1.5.1.</b>	<b>Berechnung der Enthalpie</b> .....	191
<b>8.</b>	<b>Dämpfe</b> .....	147	<b>9.1.5.2.</b>	<b><math>h, x</math>-Diagramm für feuchte Luft (nach Mollier)</b> .....	194
<b>8.1.</b>	<b>Phasen und Komponenten</b> ...	147	<b>9.2.</b>	<b>Zustandsänderungen</b> .....	195
<b>8.2.</b>	<b>Thermische Zustandsgrößen</b> ..	150	<b>9.2.1.</b>	<b>Erwärmung</b> .....	195
<b>8.2.1.</b>	<b>Isobarer Verdampfungsvorgang</b> ..	150	<b>9.2.2.</b>	<b>Mischung</b> .....	196
<b>8.2.2.</b>	<b>Thermische Zustandsdiagramme</b> .....	151	<b>9.2.3.</b>	<b>Zumischung von Flüssigkeit oder Dampf</b> .....	197
<b>8.2.2.1.</b>	<b>Dampfdruckkurve</b> .....	151	<b>9.2.4.</b>	<b>Abkühlung</b> .....	200
<b>8.2.2.2.</b>	<b><math>t, v</math>-Diagramm</b> .....	153	<b>9.2.4.1.</b>	<b>Taupunkt</b> .....	200
<b>8.2.2.3.</b>	<b><math>p, v</math>-Diagramm</b> .....	154	<b>9.2.4.2.</b>	<b>Abkühlung an Kühlflächen</b> ..	201
<b>8.2.3.</b>	<b>Spezifisches Volumen</b> .....	155	<b>9.2.5.</b>	<b>Verdichtung</b> .....	203
<b>8.2.4.</b>	<b>Realgasfaktor</b> .....	156	<b>10.</b>	<b>Wärmeübertragung</b> .....	205
<b>8.3.</b>	<b>Kalorische Zustandsgrößen</b> ...	161	<b>10.1.</b>	<b>Grundbegriffe</b> .....	205
<b>8.3.1.</b>	<b>Bezugspunkt der kalorischen Zustandsgrößen</b> .....	161	<b>10.2.</b>	<b>Stationäre Wärmeleitung</b> ....	206
<b>8.3.2.</b>	<b>Ungesättigte Flüssigkeit</b> .....	162	<b>10.2.1.</b>	<b>Grundgesetz</b> .....	206
<b>8.3.3.</b>	<b>Gesättigte Flüssigkeit</b> .....	163	<b>10.2.2.</b>	<b>Wärmeleitung durch die ebene Wand</b> .....	210
<b>8.3.4.</b>	<b>Sattdampf</b> .....	163	<b>10.2.2.1.</b>	<b>Einschichtige ebene Wand</b> ....	210
<b>8.3.5.</b>	<b>Naßdampf</b> .....	164	<b>10.2.2.2.</b>	<b>Mehrschichtige ebene Wand</b> ..	212
<b>8.3.6.</b>	<b>Heißdampf</b> .....	165	<b>10.2.3.</b>	<b>Wärmeleitung durch die einfach gekrümmte Wand (Rohrwand)</b> ..	214
<b>8.3.7.</b>	<b>Kalorische Dampfdiagramme</b> ..	165	<b>10.2.3.1.</b>	<b>Einschichtige Rohrwand</b> ....	214
<b>8.4.</b>	<b>Zustandsänderungen</b> .....	168	<b>10.2.3.2.</b>	<b>Mehrschichtige Rohrwand</b> ....	215
<b>8.4.1.</b>	<b>Isochore</b> .....	168	<b>10.3.</b>	<b>Wärmeübergang durch Konvektion</b> .....	217

10.3.1.	Wesen des Wärmeübergangs durch Konvektion .....	217	10.5.1.	Grundgleichung .....	266
10.3.2.	Einflüsse, die die Konvektion bestimmen .....	218	10.5.2.	Ebene Wand .....	267
10.3.2.1.	Freie und erzwungene Strömung .....	218	10.5.3.	Einfach gekrümmte Wand ....	268
10.3.2.2.	Laminare und turbulente Strömung .....	218	10.5.4.	Ermittlung der Wandtemperaturen .....	271
10.3.3.	Grundgleichung und Wärmeübergangskoeffizient .....	219	10.5.5.	Berippte Wand .....	272
10.3.4.	Stoffeigenschaften und Kennzahlen .....	222	10.6.	Berechnung der Wärmeübertrager .....	276
10.3.4.1.	Kennzeichnende Stoffeigenschaften für den Wärmeübergang durch Konvektion .....	222	10.6.1.	Allgemeines .....	276
10.3.4.2.	Kennzahlen der Ähnlichkeitstheorie .....	225	10.6.2.	Schaltarten der Wärmeübertrager .....	277
10.3.5.	Wärmeübergang bei freier Strömung .....	227	10.6.3.	Mittleres Temperaturgefälle ..	280
10.3.5.1.	Körper im unbegrenzten Raum	227	10.6.4.	Ablauftemperaturen. Temperaturverlauf längs der Heizfläche .....	284
10.3.5.2.	Begrenzte Räume .....	229	10.6.4.1.	Allgemeines .....	284
10.3.6.	Wärmeübergang bei erzwungener Strömung .....	231	10.6.4.2.	Ermittlung der Ablauftemperaturen durch „Probieren“ ...	284
10.3.6.1.	Strömung entlang einer ebenen Wand .....	231	10.6.4.3.	Analytische Berechnung des Temperaturverlaufes längs der Heizfläche .....	288
10.3.6.2.	Strömung in Rohren und Kanälen .....	232	10.6.4.4.	Betriebscharakteristik $\Phi$ der Wärmeübertrager .....	291
10.3.6.3.	Strömung quer zu Rohren ....	235	10.7.	Nichtstationäre Wärmeleitung.	294
10.3.7.	Wärmeübergang bei Verdampfung und Kondensation..	240	10.7.1.	Kennzeichen der nichtstationären Wärmeleitung .....	294
10.3.7.1.	Verdampfung .....	240	10.7.2.	Grundgleichung .....	295
10.3.7.2.	Kondensation .....	244	10.7.3.	Differenzverfahren nach Schmidt .....	295
10.4.	Wärmeübergang durch Strahlung .....	247	10.7.4.	Analytische Verfahren .....	302
10.4.1.	Wesen der Wärmestrahlung	247	10.7.4.1.	Allgemeines .....	302
10.4.2.	Absorption, Reflexion und Durchlässigkeit .....	247	10.7.4.2.	Mittentemperatur verschiedener Körper nach plötzlicher Änderung der Oberflächentemperatur .....	302
10.4.3.	Strahlung des schwarzen Körpers .....	249	10.7.4.3.	Temperaturverlauf in Körpern nach plötzlicher Änderung der Umgebungstemperatur .....	304
10.4.4.	Strahlung technischer Oberflächen .....	251	11.	Verbrennung .....	310
10.4.5.	Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen Körperoberflächen .....	254	11.1.	Einleitung .....	310
10.4.5.1.	Parallele gleich große Flächen mit geringem Abstand .....	254	11.2.	Brennstoffe .....	310
10.4.5.2.	Umhüllte Flächen .....	257	11.2.1.	Arten .....	310
10.4.5.3.	Beliebig zueinander liegende, sich nicht umhüllende Flächen	259	11.2.2.	Zusammensetzung .....	311
10.4.5.4.	Strahlungsschutz .....	260	11.2.2.1.	Feste Brennstoffe .....	311
10.4.6.	Gasstrahlung .....	261	11.2.2.2.	Flüssige Brennstoffe .....	311
10.4.7.	Flammenstrahlung .....	264	11.2.2.3.	Gasförmige Brennstoffe .....	312
10.4.8.	Wärmeübergang durch Konvektion und Strahlung .....	265	11.3.	Verbrennungswärme und Heizwert .....	312
10.5.	Wärmedurchgang .....	266	11.3.1.	Definition .....	312
			11.3.2.	Ermittlung der Verbrennungswärme und des Heizwertes ...	314
			11.4.	Stöchiometrische Verbrennungsrechnung .....	317

11.4.1.	Ziel der Verbrennungsrechnung	317	<b>Tafelanhang</b>	349
11.4.2.	Luftbedarf und Rauchgasmenge	317	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>	371
11.4.2.1.	Feste und flüssige Brennstoffe	317	<b>Sachwortverzeichnis</b>	372
11.4.2.2.	Brenngase	322		
11.4.3.	Verbrennungsrechnung mit Brennstoffkenngrößen	325	<b>Beilagen:</b>	
11.4.4.	Berücksichtigung der Luftfeuchte	327	Diagramm 8.1	Mollier- $h,s$ -Diagramm für Wasserdampf
11.5.	Statistische Verbrennungsrechnung	329	Diagramm 8.2	Mollier- $lg\ p,h$ -Diagramm für Kühlmittel R 12
11.6.	Zusammensetzung des Rauchgases	329	Diagramm 9.1	Mollier- $h,x$ -Diagramm für feuchte Luft für 0,10 MPa Gesamtdruck (0,1 MPa = 1 bar)
11.7.	Verbrennungskontrolle	332	Diagramm 10.1	Betriebscharakteristik eines Wärmeübertragers bei Gleichstrom [1]
11.7.1.	Vollkommene Verbrennung	332	Diagramm 10.2	Betriebscharakteristik eines Wärmeübertragers bei Gegenstrom [1]
11.7.2.	Unvollkommene Verbrennung	335	Diagramm 10.3	Betriebscharakteristik eines Wärmeübertragers bei Kreuzstrom [1]
11.8.	Stoffwerte von Rauchgasen	339		
11.9.	$h,t$ -Diagramm für Rauchgas	340		
11.10.	Verbrennungstemperatur	341		
11.11.	Taupunkt des Rauchgases	344		
11.11.1.	Wasserdampftaupunkt	344		
11.11.2.	Wirklicher Taupunkt	344		
11.12.	Zündung	345		
11.12.1.	Zündtemperatur und Zündenergie	345		
11.12.2.	Zündgeschwindigkeit und Zündgrenzen	346		