

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundbegriffe</b>	<b>1</b>
1.1	Thermodynamisches System	1
1.2	Zustand und Zustandsgrößen; Prozeß	1
1.3	Natürliche Vorgänge und Gleichgewicht; Temperatur	3
1.4	Nullter Hauptsatz	5
1.5	Temperaturfixpunkte und empirische Temperaturskala	5
<b>2</b>	<b>Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltungsprinzip)</b>	<b>7</b>
2.1	Arbeit am geschlossenen System	7
2.2	Innere Energie und Wärme	10
2.2.1	Diathermes, isoliertes und adiabates System	10
2.2.2	Innere Energie	10
2.2.3	Wärme	11
2.3	Erster Hauptsatz für ein geschlossenes System	12
<b>3</b>	<b>Zustandsgleichungen und Zustandsänderungen</b>	<b>14</b>
3.1	Zustandseigenschaften einfacher Körper	14
3.2	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase	15
3.2.1	Versuch von Gay-Lussac (1816)	15
3.2.2	Boyle-Mariottesches Gesetz (1664–1676)	16
3.2.3	Zustandsgleichung idealer Gase	16
3.2.4	Abweichungen vom idealen Verhalten	17
3.3	Kalorische Zustandsgleichung idealer Gase	19
3.4	Nichtstatische und quasistatische Zustandsänderungen	24
3.5	Quasistatische Zustandsänderungen in ruhenden homogenen Systemen	25
3.5.1	Quasistatische Zustandsänderungen bei konstantem Volumen (Isochore)	25
3.5.2	Quasistatische Zustandsänderungen bei konstantem Druck (Isobare)	26
3.5.3	Quasistatische Zustandsänderungen bei $pV = \text{konst}$	27
3.5.4	Quasistatische Zustandsänderungen mit $\partial q + \partial w_R = 0$ (Isentrope)	28
3.5.5	Polytrope Zustandsänderung	30

<b>4</b>	<b>Kreisprozesse</b>	<b>32</b>
4.1	Kreisprozesse in geschlossenen Systemen	32
4.1.1	Rechtslaufender Carnotscher Kreisprozeß mit id. Gas konst. spez. Wärmekapazität	33
4.2.1	Linkslaufender Carnotscher Kreisprozeß	35
4.1.3	Umkehrung des Carnotschen Kreisprozesses	36
<b>5A</b>	<b>Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik</b>	<b>37</b>
5.1	Umkehrbare und nichtumkehrbare Prozesse	37
5.2	Statistische Deutung des adiabaten Druckausgleichs	38
5.3	Statistische Energieverteilung	41
5.4	Wahrscheinlichkeit und Entropie	45
5.5	Temperatur	46
5.6	Zweiter Hauptsatz für geschlossene Systeme	48
5.7	Zusammenhang zwischen Wärmeaustausch und Entropieänderung	49
5.8	Entropie, Enthalpie und innere Energie einfacher Stoffe	51
5.8.1	Entropie idealer Gase	51
5.8.2	Entropie beliebiger Stoffe, deren Zustand durch zwei unabhängige Zustandsgrößen eindeutig bestimmt ist	52
5.8.3	Enthalpie und innere Energie beliebiger Stoffe, deren Zustand durch zwei unabhängige Zustandsgrößen eindeutig bestimmt ist	54
5.9	T,s-Diagramm für einfache Stoffe	56
5.9.1	Darstellung von Prozeßgrößen im T,s-Diagramm	57
<b>5B</b>	<b>Offene Systeme</b>	<b>60</b>
5.10	Erster und zweiter Hauptsatz für ein offenes System	60
5.10.1	Erster Hauptsatz	60
5.10.2	Zweiter Hauptsatz	61
5.11	Erster und zweiter Hauptsatz für einen stationären Fließprozeß	61
5.11.1	Erster Hauptsatz	62
5.11.2	Zweiter Hauptsatz	62
5.11.3	Quasistatische Zustandsänderungen bei stationären Fließprozessen	62
5.11.4	Kreisprozesse als Folge von stationären Fließprozessen	66
5.12	Mollier h,s-Diagramm für einfache Stoffe	68

<b>5C Exergie</b> .....	<b>70</b>
5.13 Natürliche Vorgänge und Gleichgewicht .....	70
5.14 Umwelt und Energieumwandlung .....	71
5.15 Exergie und Anergie .....	71
5.15.1 Stationäre Fließprozesse; Wärmeaustausch nach außen nur mit der Umgebung .....	71
5.15.2 Stationärer Fließprozeß mit beliebigem Wärmeaustausch .....	73
5.15.3 Exergie geschlossener Systeme (maximale Arbeit) .....	77
<b>6 Zustandsgleichungen realer Gase</b> .....	<b>78</b>
6.1 Zustandsgleichungen nach van der Waals (1873) .....	78
6.2 Weitere Zustandsgleichungen .....	81
6.2.1 Beattie-Bridgeman-Gleichung .....	81
6.2.2 Benedict-Webb-Rubin-Gleichung .....	81
6.2.3 Virialkoeffizienten .....	82
6.2.4 Wasserdampfformeln .....	82
6.3 Zweiphasengebiete .....	83
6.3.1 Clapeyron-Clausius-Gleichung .....	85
6.4 Verdampfung .....	87
6.4.1 Der Verdampfungsvorgang .....	87
6.4.2 Quasistatische Zustandsänderungen vom Naßdampf .....	89
6.5 Mollier $h,s$ -Diagramm für Wasserdampf .....	90
6.6 Joule-Thomson-Effekt; Grundlagen der Gasverflüssigung .....	91
6.6.1 Gasverflüssigungsverfahren nach Linde .....	92
<b>7 Gemische und Mischungsprozesse</b> .....	<b>94</b>
7.1 Gemische .....	94
7.1.1 Gemische idealer Gase .....	95
7.2 Adiabate Mischung idealer Gase (geschlossenes System) .....	96
7.3 Stationärer und adiabater Mischungsprozeß .....	100
7.4 Feuchte Luft .....	101
7.4.1 Zustandsgrößen feuchter Luft .....	101
7.4.2 Mollier $h,x$ -Diagramm für feuchte Luft .....	105
7.4.3 Stationäre und adiabate Mischungsvorgänge mit feuchter Luft ...	106
7.4.4 Stationäre Mischung mit Wärmezufuhr .....	108
7.4.5 Stationäre und adiabate Zumischung von reinem Wasser bzw. Wasserdampf .....	108

<b>8</b>	<b>Verbrennungsvorgänge und andere chemische Umsetzungen</b>	<b>110</b>
8.1	Stoffumsatz	110
8.1.1	Oxidationsverhältnis $\lambda$ und Verbrennungsgasverhältnis $\chi$	111
8.2	Energiebilanz	113
8.2.1	Adiabate Verbrennungstemperatur	115
8.3	Entropiebilanz und Irreversibilität der Verbrennung	116
8.3.1	Exergieverlust bei adiabater Verbrennung	116
<b>9</b>	<b>Strömungs- und Arbeitsprozesse</b>	<b>119</b>
9.1	Beliebige Expansion bzw. Kompression mit quasistatischer polytroper Zustandsänderung	119
9.2	Verzögerte und beschleunigte stationäre Strömungsvorgänge ohne Arbeitsleistung	123
9.3	Stationäre Strömung konstanten Querschnitts mit Wärmeaustausch	125
9.4	Adiabate Strömungsprozesse	126
9.4.1	Strömungsquerschnitte	128
9.4.1.1	Geschwindigkeit im Lavalzustand	129
9.4.1.2	Lavaldruck	130
9.4.1.3	Lavalquerschnitt und beliebiger Düsenquerschnitt	131
9.4.2	Der senkrechte Verdichtungsstoß	132
9.4.3	Schwacher Stoß; Schallgeschwindigkeit	134
9.5	Arbeitsprozesse mit adiabater Expansion oder Kompression	135
9.6	Isotherme Kompression (bzw. Expansion)	139
<b>10</b>	<b>Energieumwandlung Wärme-Arbeit</b>	<b>142</b>
10.1	Thermodynamische Mitteltemperatur beim isobaren Wärmeaustausch (Mittlere Wärmezufuhrtemperatur bzw. Wärmeabfuhrtemperatur)	142
10.2	Dampfkraftprozeß	144
10.2.1	Einfache Dampfkraftanlage	144
10.2.2	Zwischenüberhitzung	147
10.2.3	Speisewasservorwärmung	147
10.3	Gasturbinenprozesse	149
10.3.1	Geschlossener Gasturbinenprozeß	149
10.3.2	Geschlossener Gasturbinenprozeß im Wärmeaustausch	150
10.3.3	Einfacher offener Gasturbinenprozeß	151
10.3.4	Prinzip des Strahltriebwerkes	153
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>155</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>156</b>