

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1 Grundbegriffe</b>	<b>7</b>
1.1 Das thermodynamische System.....	7
1.2 Zustandsgrößen und Prozessgrößen .....	12
1.3 Auswirkungen von Prozessgrößen auf den Systemzustand.....	14
1.4 Thermische Zustandsgrößen und Zustandsgleichungen.....	16
1.4.1 Volumen und Volumenstrom .....	16
1.4.2 Druck.....	16
1.4.3 Temperatur .....	20
1.4.4 Thermische Zustandsgleichungen .....	30
1.5 Kalorische Zustandsgrößen und Zustandsgleichungen .....	41
1.5.1 Innere Energie und Enthalpie .....	41
1.5.2 Kalorische Zustandsgleichungen.....	44
1.6 Prozessgrößen.....	58
1.6.1 Arbeit.....	58
1.6.2 Energietransport durch Massen- oder Stoffströme .....	69
1.6.3 Wärmestrom.....	71
<b>2 Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie</b>	<b>77</b>
2.1 Treibende Gefälle .....	77
2.2 Allgemeine Formulierung der Erhaltungssätze .....	79
2.2.1 Beeinflussung des Systems .....	79
2.2.2 Massenerhaltung.....	80
2.2.3 Impulserhaltung.....	81
2.2.4 Energieerhaltung: Der Erste Hauptsatz .....	83
2.3 Sonderfälle der Erhaltungssätze .....	88
2.3.1 Geschlossene Systeme.....	88
2.3.2 Stationäre Systeme .....	96
2.4 Aufspaltung von kalorischen Energiedifferenzen in reversible Arbeit und Dissipation.....	106

<b>3</b>	<b>Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik</b>	<b>109</b>
3.1	Phänomenologische Annäherung: Irreversible und reversible Vorgänge .....	109
3.1.1	Vollkommen irreversible Vorgänge .....	109
3.1.2	Reversible Vorgänge .....	110
3.1.3	Zusammenfassende Bemerkung.....	111
3.2	Entropie, freie Energie und freie Enthalpie .....	112
3.2.1	Reversible Prozessführung im System Zylinder/Kolben .....	112
3.2.2	Adiabate Kompression/Expansion mit Reibung .....	113
3.2.3	Die Entropie als Zustandsgröße .....	113
3.2.4	Kompression/Expansion mit Wärmeaustausch mit der Umgebung .....	115
3.2.5	Definitionen der freien Energie und der freien Enthalpie .....	117
3.3	Entropie im verallgemeinerten, offenen System .....	117
3.3.1	Innere und äußere Einwirkungen bei instationären Strömungen.....	117
3.3.2	Entropiestrombilanz für allgemeine, offene Systeme.....	118
3.4	Zustandsgleichungen der Entropie .....	119
3.4.1	Entropiegleichungen für ein allgemeines Fluid.....	119
3.4.2	Entropiegleichungen des idealen Gases .....	119
3.4.3	Entropiegleichung des inkompressiblen Fluids und Festkörpers .....	120
3.4.4	Das $T,s$ -Diagramm.....	120
3.5	Die Anwendung der Entropiestrombilanz auf verschiedene Systeme .....	121
3.5.1	Irreversibilität von instationären Vorgängen .....	121
3.5.2	Irreversibilität in geschlossenen Systemen.....	125
3.5.3	Irreversibilität in stationären Systemen .....	131
3.6	Exergie und Anergie.....	135
3.6.1	Einführende Bemerkungen.....	135
3.6.2	Exergie im Zylinder/Kolben-System.....	136
3.6.3	Exergie im durchströmten, stationären System .....	137
3.6.4	Das Sankey-Diagramm und das Exergie-Anergie-Flussbild .....	139
3.6.5	Exergie und Exergieverluste im allgemeinen instationären System.....	140
3.7	Wärmeübertrager .....	144
3.7.1	Allgemeine Eigenschaften .....	144
3.7.2	Gleichstrom-Rekuperator .....	147
3.7.3	Gegenstrom-Rekuperator .....	147
3.7.4	Wärmeübertrager mit $R_i = 0$ .....	148
3.7.5	Irreversibilität in Wärmeübertragern.....	150
3.8	Der Carnot-Prozess .....	158
3.8.1	Allgemeine Bemerkungen zu Kreisprozessen.....	158
3.8.2	Der reversible Kreisprozess oder Carnot-Prozess .....	164
3.9	Historischer Exkurs: Der Ursprung des Zweiten Hauptsatzes .....	167
<b>4</b>	<b>Zustandsänderungen idealer Gase</b>	<b>173</b>
4.1	Voraussetzungen.....	173

4.2	Einfache Zustandsänderungen idealer Gase mit $c_p = \text{const.}$ .....	174
4.2.1	Die Isobare $p = \text{const.}$ nach der einfachen Theorie.....	174
4.2.2	Die Isochore $v = \text{const.}$ nach der einfachen Theorie.....	175
4.2.3	Die Isotherme $T = \text{const.}$ nach der einfachen Theorie .....	176
4.2.4	Die Isentrope $s = \text{const.}$ nach der einfachen Theorie.....	177
4.2.5	Die Polytrope $n = \text{const.}$ nach der einfachen Theorie.....	179
4.2.6	Darstellung von Zustandsänderungen im $p, V$ - und im $T, s$ -Diagramm.....	182
4.3	Zustandsänderungen idealer Gase mit $c_p = c_p(T)$ .....	191
4.3.1	Isobare $p = \text{const.}$ nach der erweiterten Theorie.....	191
4.3.2	Isochore $v = \text{const.}$ nach der erweiterten Theorie .....	191
4.3.3	Isotherme $T = \text{const.}$ nach der erweiterten Theorie .....	191
4.3.4	Isentrope $s = \text{const.}$ nach der erweiterten Theorie .....	191
4.3.5	Polytrope $v = \text{const.}$ nach der erweiterten Theorie .....	192
4.4	Zustandsänderungen mit dissipativen Vorgängen.....	196
4.4.1	Reibungsvorgänge im Zylinder/Kolben-System .....	196
4.4.2	Dissipation in einfach durchströmten Systemen.....	198
4.5	Strömungen in Düsen und Diffusoren .....	207
4.5.1	Schallgeschwindigkeit und Machzahl .....	207
4.5.2	Energieerhaltung in Düsen und Diffusoren .....	208
4.5.3	Durchströmung von konvergenten Düsen .....	209
4.5.4	Überschallströmungen in Laval-Düsen .....	212
4.5.5	Reale Durchströmung von Düsen und Diffusoren.....	214
4.5.6	Düsen und Diffusoren mit Reibung nach der erweiterten Theorie .....	216
<b>5</b>	<b>Kreisprozesse mit idealen Gasen</b> .....	<b>221</b>
5.1	Offene und geschlossene Prozesse .....	221
5.2	Vergleichsprozesse für die Gasturbinenanlage: Der Joule-Prozess .....	221
5.2.1	Der einfache Joule-Prozess .....	221
5.2.2	Thermodynamische Verbesserung des Joule-Prozesses .....	229
5.2.3	Das Strahltriebwerk .....	235
5.2.4	Innere und äußere Verluste beim Gasturbinenprozess .....	244
5.2.5	Umkehrung des Joule-Prozesses: Die Kaltgas-Kältemaschine .....	249
5.2.6	Der Gasturbinenprozess mit $c_p = c_p(T)$ .....	253
5.3	Vergleichsprozesse für Stirling-Maschinen .....	256
5.3.1	Der Stirling-Motor.....	256
5.3.2	Die Stirling-Kaltgas-Kältemaschine.....	267
5.4	Vergleichsprozesse für Verbrennungsmotoren.....	271
5.4.1	Allgemeine Bemerkungen.....	271
5.4.2	Der Gleichraumprozess.....	273
5.4.3	Der Gleichdruckprozess .....	275
5.4.4	Der Seiliger-Prozess.....	277
5.4.5	Zusammenfassende Diskussion der Vergleichsprozesse .....	279
5.4.6	Innerer und äußerer Wirkungsgrad des realen Verbrennungsmotors .....	284

<b>6</b>	<b>Reale Fluide mit Phasenwechsel</b>	<b>287</b>
6.1	Der Realgasfaktor .....	287
6.2	Experimenteller Befund der Verflüssigung, weitere Phasenwechsel.....	288
6.3	Latente Wärme des Phasenwechsels, Gleichung von Clausius-Clapeyron .....	296
6.4	Van-der-Waals-Zustandsgleichung.....	299
6.5	Thermodynamisch konsistente, kanonische Zustandsgleichungen .....	302
6.6	Abgrenzung des Zweiphasengebiets, Maxwell-Kriterium .....	306
6.7	Programme zur Berechnung von Zustandsgrößen .....	310
6.7.1	Die Zustandsgleichung IAPWS-IF97 für Wasser und Wasserdampf .....	310
6.7.2	Das Programmpaket CoolPack für Kältemittel .....	314
6.8	Zustände und einfache Zustandsänderungen im Zweiphasengebiet.....	316
6.8.1	Dampfgehalt.....	316
6.8.2	Die Isobare $p = \text{const.}$ im Nassdampfgebiet.....	316
6.8.3	Die Isotherme $T = \text{const.}$ im einphasigen Gebiet .....	317
6.8.4	Die Isochore $v = \text{const.}$ im Nassdampfgebiet .....	317
6.8.5	Die Isentrope $s = \text{const.}$ im Nassdampfgebiet .....	320
6.8.6	Die Isenthalpe $h = \text{const.}$ .....	322
<b>7</b>	<b>Kreisprozesse mit Dämpfen</b>	<b>329</b>
7.1	Der einfache Clausius-Rankine-Prozess .....	329
7.2	Verbesserung des Clausius-Rankine-Prozesses.....	335
7.2.1	Zwischenüberhitzung .....	335
7.2.2	Regenerative Speisewasservorwärmung .....	338
7.3	Kälteprozesse .....	355
7.3.1	Der einfache Kaltdampfprozess .....	355
7.3.2	Verbesserungen des Kaltdampfprozesses.....	360
7.3.3	Der Linde-Prozess zur Luftverflüssigung .....	366
<b>8</b>	<b>Feuchte Luft</b>	<b>377</b>
8.1	Bezeichnungen und Definitionen .....	377
8.2	Die Dichte feuchter Luft .....	379
8.3	Das $h,x$ -Diagramm .....	380
8.4	Zustandsänderungen feuchter Luft.....	385
8.4.1	Lufttrocknung.....	385
8.4.2	Mischvorgänge.....	386
8.4.3	Wechselwirkung zwischen einer Wasseroberfläche und feuchter Luft .....	394
<b>9</b>	<b>Technische Verbrennung</b>	<b>405</b>
9.1	Allgemeine Bemerkungen.....	405

9.2	Stoffmengenberechnungen bei Verbrennungsvorgängen.....	407
9.2.1	Gasförmige Brennstoffe .....	407
9.2.2	Flüssige und feste Brennstoffe .....	409
9.3	Energieumwandlung bei Verbrennungsprozessen .....	412
9.3.1	Heizwert und Brennwert .....	412
9.3.2	Reaktions- und Bildungsenthalpien.....	416
9.3.3	Energiebilanzen.....	419
9.3.4	Prozesse mit innerer Verbrennung.....	422
9.4	Entropieproduktion und Exergie bei Verbrennungsprozessen.....	451
9.4.1	Chemisches Potential, Affinität und Entropieproduktion .....	451
9.4.2	Reversible chemische Reaktionen.....	454
9.4.3	Brennstoffzellen .....	459
9.4.4	Exergieverlust bei der adiabaten Verbrennung .....	472
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>481</b>
10.1	Thermodynamische Basisdaten für chemische Reaktionen.....	481
10.2	Koeffizientenmatrix für ideale Gase.....	482
10.3	Erste Schritte mit Mathcad® .....	483
10.3.1	Vorbemerkung .....	483
10.3.2	Grundlagen des Editierens und das Arbeiten mit Einheiten .....	483
10.3.3	Grundlagen für das Arbeiten mit Matrizen.....	486
10.3.4	Grundlagen bei der Erstellung von Programmblöcken .....	488
10.3.5	Erstellung von Diagrammen.....	490
10.3.6	Symbolische Entwicklungen .....	494
10.3.7	Bezug zu anderen Arbeitsblättern und Ausblenden von Regionen.....	496
10.3.8	Einfügen von externen Daten .....	497
	<b>Lehrbücher der Thermodynamik</b>	<b>499</b>
	<b>Nachweise</b>	<b>501</b>
	<b>Index</b>	<b>503</b>