

Inhalt

Vorwort	v
Einleitung	1
1 Grundbegriffe	7
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
2 Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie	77
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

3	Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik	109
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
4	Zustandsänderungen idealer Gase	173
4.1	Voraussetzungen.....	173

4.2	Einfache Zustandsänderungen idealer Gase mit $c_p = const.$	174
4.2.1	Die Isobare $p = const.$ nach der einfachen Theorie.....	174
4.2.2	Die Isochore $v = const.$ nach der einfachen Theorie.....	175
4.2.3	Die Isotherme $T = const.$ nach der einfachen Theorie	176
4.2.4	Die Isentrope $s = const.$ nach der einfachen Theorie.....	177
4.2.5	Die Polytrope $n = const.$ 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 $p = const.$ nach der erweiterten Theorie.....	191
4.3.2	Isochore $v = const.$ nach der erweiterten Theorie	191
4.3.3	Isotherme $T = const.$ nach der erweiterten Theorie	191
4.3.4	Isentrope $s = const.$ nach der erweiterten Theorie	191
4.3.5	Polytrope $v = const.$ 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
5	Kreisprozesse mit idealen Gasen	221
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

6	Reale Fluide mit Phasenwechsel	287
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 Programm Paket 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
7	Kreisprozesse mit Dämpfen	329
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
8	Feuchte Luft	377
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
9	Technische Verbrennung	405
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
10	Anhang	481
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
Lehrbücher der Thermodynamik		499
Nachweise		501
Index		503