

Inhaltsverzeichnis

1	Thermodynamische Grundbegriffe	1
1.1	Anwendungsgebiete der Thermodynamik	1
1.2	System	3
1.3	Zustand, Zustandsgrößen, Zustandsänderungen	4
1.4	Prozess, Prozessgrößen	5
2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	6
2.1	Das Prinzip von der Erhaltung der Energie	6
2.2	Potentielle Energie	7
2.3	Kinetische Energie	8
2.4	Arbeit	8
2.4.1	Volumenänderungsarbeit	9
2.4.2	Kupplungsarbeit	10
2.4.3	Verschiebearbeit	10
2.4.4	Druckänderungsarbeit	11
2.4.5	Reibungsarbeit	12
2.5	Thermische Energie	13
2.5.1	Innere Energie	13
2.5.2	Wärme	14
2.5.3	Enthalpie	15
2.6	Energiebilanzen	15
2.6.1	Energiebilanz für das geschlossene System	15
2.6.2	Energiebilanz für das offene System	17
2.7	Wärmekapazität	18
2.7.1	Spezifische Wärmekapazität	19
2.7.2	Die spezifische Wärmekapazität der Gase	20
3	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	21
3.1	Die Aussage des zweiten Hauptsatzes	21
3.1.1	Reversible und irreversible Prozesse	21
3.1.2	Quasistatische Zustandsänderungen	21
3.2	Irreversible Vorgänge	22
3.3	Entropie	22
3.3.1	Reversible Ersatzprozesse adiabater Prozesse	22
3.3.2	Die Berechnung der Entropieänderung	23
3.3.3	Die Entropie als Zustandsgröße, totales Differential	23
3.4	Die Entropieänderung der irreversiblen Vorgänge	25
3.4.1	Reibung	25
3.4.2	Temperatenausgleich	26
3.4.3	Druckausgleich	27
3.4.4	Drosselung	28
3.5	Nichtadiabater Prozess und reversibler Ersatzprozess	29
3.5.1	Isentrope; Deutungen des Entropiebegriffs	30
3.5.2	Entropiediagramme	31
3.5.3	Kreisintegral, thermodynamische Temperatur	32

3.5.4 Dissipative Energie	33
4 Ideale Gase	34
4.1 Thermische Zustandsgleichung	34
4.1.1 Gesetz von <i>Boyle</i> und <i>Mariotte</i>	34
4.1.2 Gesetz von <i>Gay-Lussac</i>	34
4.1.3 Gesetz des Gasthermometers	34
4.1.4 Physikalischer Normzustand	35
4.1.5 Spezielle Gaskonstante	35
4.1.6 Allgemeine Gaskonstante	36
4.2 Kalorische Zustandsgrößen der idealen Gase	36
4.2.1 Innere Energie	37
4.2.2 Enthalpie	37
4.2.3 Entropie	37
4.3 Zustandsänderungen	38
4.3.1 Isochore	38
4.3.2 Isobare	38
4.3.3 Isotherme	39
4.3.4 Isentrope	40
4.3.5 Polytrope	42
4.4 Thermische Energie und Arbeit im T, s -Diagramm	46
4.5 Mischungen idealer Gase	47
4.5.1 Der Mischungsvorgang im abgeschlossenen System	49
4.5.2 Mischung bei unverändertem Gesamtvolumen	51
4.5.3 Mischung ohne Temperatur- und Druckänderung bei unverändertem Gesamtvolumen	51
4.5.4 Der Mischungsvorgang im offenen System	52
5 Reale Gase und Dämpfe	53
5.1 Eigenschaften der Dämpfe	53
5.1.1 Phasenübergänge	53
5.1.2 Zweiphasengebiete	53
5.1.3 Sieden und Kondensieren	54
5.1.4 Verdunsten und Tauen	55
5.1.5 Flüssigkeit	57
5.1.6 Nassdampf	58
5.1.7 Überhitzter Dampf	59
5.2 Zustandsdiagramme	59
5.2.1 Die p, v, T -Fläche	59
5.2.2 Das T, s -Diagramm	63
5.2.3 Das h, s -Diagramm	63
5.3 Thermische Zustandsgleichungen	65
5.3.1 Die <i>van der Waalssche</i> Gleichung	65
5.3.2 Die Grenzkurve und die <i>Maxwell</i> -Beziehung	65
5.3.3 Die reduzierte <i>van der Waalssche</i> Gleichung	66
5.3.4 Verschiedene Ansätze	66
5.3.5 Virialkoeffizienten	68
5.4 Berechnung von Zustandsgrößen; Dampftafeln	68

5.4.1	Die kalorischen Zustandsgrößen	69
5.4.2	Die spezifischen Wärmekapazitäten c_p und c_v	70
5.4.3	Der Isentropenexponent und der Isothermenexponent	70
5.4.4	Die <i>Clausius-Clapeyronsche</i> Gleichung	71
5.4.5	Freie Energie und freie Enthalpie	71
5.4.5.1	Allgemeines	71
5.4.5.2	Ein g, s -Zustandsdiagramm für Wasser und Wasserdampf	74
5.4.6	Der <i>Joule-Thomson</i> -Effekt	76
6	Thermische Maschinen	78
6.1	Einteilung und Arten der Maschinen	78
6.1.1	Unterteilung nach der Richtung der Energieumwandlung	78
6.1.2	Unterteilung nach der Bauart der Maschinen	78
6.1.3	Unterteilung nach der Art des ablaufenden Prozesses	78
6.2	Ideale Maschinen	79
6.2.1	Verdichtung und Entspannung in idealen Maschinen	79
6.2.2	Mehrstufige Verdichtung und Entspannung	80
6.2.3	Die Energiebilanz für Strömungsmaschinen	81
6.2.4	Die Energiebilanz für Verdrängermaschinen	82
6.3	Energiebilanzen für wirkliche Maschinen	83
6.3.1	Innere oder indizierte Arbeit	83
6.3.2	Totalarbeit	85
6.3.3	Totalenthalpie	85
6.4	Wirkliche Maschinen	85
6.4.1	Der ungekühlte Verdichter	85
6.4.2	Der gekühlte Verdichter	86
6.4.3	Kolbenverdichter	87
6.4.4	Turboverdichter	88
6.4.5	Gas- und Dampfturbinen	88
6.5	Wirkungsgrade	90
6.5.1	Vergleichsprozesse	90
6.5.2	Der innere Wirkungsgrad	91
6.5.3	Der mechanische Wirkungsgrad	92
6.5.4	Der Gesamtwirkungsgrad	92
6.5.5	Der isentrope Wirkungsgrad	93
6.5.6	Der isotherme Wirkungsgrad	93
6.5.7	Der polytrope Wirkungsgrad	93
7	Kreisprozesse	95
7.1	Kreisprozessarbeit, Wärmezufuhr und Wärmeabgabe	97
7.2	Rechts- und linkslaufende Kreisprozesse	99
7.3	Die Theorie der rechtslaufenden Kreisprozesse	100
7.3.1	Umwandlung von thermischer in mechanische Energie	100
7.3.2	Der thermische Wirkungsgrad	101
7.3.3	Der rechtslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	101
7.3.4	Die Auswirkung irreversibler Vorgänge	102
7.3.5	Der <i>Carnot</i> -Faktor	104
7.4	Technisch genutzte rechtslaufende Kreisprozesse	105

7.4.1	<i>Seiliger</i> -Prozess, <i>Otto</i> -Prozess, <i>Diesel</i> -Prozess	106
7.4.2	<i>Joule</i> -Prozess	107
7.4.3	<i>Ericsson</i> -Prozess	109
7.4.4	<i>Stirling</i> -Prozess	109
7.4.5	Einfach-polytropischer <i>Carnot</i> -Prozess	111
7.4.6	Gasexpansions-Prozess	111
7.4.7	<i>Clausius-Rankine</i> -Prozess	112
7.5	Vergleichende Bewertung von rechtslaufenden Kreisprozessen	114
7.5.1	Prozessgrößen und Kreisprozesse	114
7.5.2	Mechanische Anstrengungsverhältnisse und thermische Anstrengungsverhältnisse	115
7.5.3	Bewertungskriterien für wichtige thermodynamische Kreisprozesse	118
7.5.3.1	Allgemeine thermodynamische Beziehungen	118
7.5.3.2	Beispiele	119
7.5.3.3	Graphische Darstellung der thermodynamischen Beziehungen	127
7.5.3.4	Kreisprozessberechnungen für reale Fluide	137
7.6	Linkslaufende Kreisprozesse	141
7.6.1	Leistungszahl	142
7.6.2	Der linkslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	143
7.6.3	Der linkslaufende <i>Joule</i> -Prozess	143
7.6.4	Der Gasexpansions-Prozess als Kälteprozess	144
7.6.5	Der Kompressions-Kaltdampfprozess	147
8	Exergie	149
8.1	Energie und Exergie	149
8.1.1	Die Exergie der Wärme	150
8.1.2	Die Exergie der gebundenen Energie	151
8.1.3	Die Exergie der Temperaturänderungswärme	152
8.1.4	Die Exergie der Volumenänderungsarbeit	152
8.1.5	Die Exergie der Verschiebearbeit	154
8.1.6	Die Exergie der Druckänderungsarbeit	154
8.1.7	Die Exergie der inneren Energie	155
8.1.8	Die Exergie der Enthalpie	157
8.1.9	Die Exergie der freien Energie	158
8.1.10	Die Exergie der freien Enthalpie	159
8.1.11	Unterschied zwischen <i>EU</i> und <i>EF</i>	159
8.1.12	Unterschied zwischen <i>EH</i> und <i>EG</i>	160
8.1.13	Freie Energie und freie Enthalpie als thermodynamische Potentiale	161
8.2	Exergie und Anergie	162
8.2.1	Die Anergie im p, V -Diagramm und im T, S -Diagramm	164
8.2.2	Anergiefreie Energien	166
8.3	Exergieverlust	166
8.3.1	Irreversibilität und Exergieverlust	166
8.3.2	Exergieverlust und Anergiegewinn	168
8.3.3	Exergetische Wirkungsgrade	169
9	Wärmeübertragung	171
9.1	Wärmestrahlung	171

9.1.1	<i>Stefan-Boltzmannsches</i> Gesetz	171
9.1.2	<i>Kirchhoff'sches</i> Gesetz	171
9.1.3	<i>Plancksches</i> Strahlungsgesetz	172
9.1.4	<i>Wiensches</i> Verschiebungsgesetz	173
9.1.5	<i>Lambertsches</i> Kosinusetz	173
9.1.6	Einstrahlzahl	174
9.2	Strahlungsaustausch	175
9.2.1	Hohlraummethode	175
9.2.2	Umhüllung einer Fläche durch eine andere	176
9.2.3	Zwei große parallele Flächen	176
9.2.4	Matrizendarstellung	177
9.3	Stationäre eindimensionale Wärmeleitung	177
9.3.1	Ebene Wand	177
9.3.2	Rohrwand	178
9.4	Instationäre eindimensionale Wärmeleitung	179
9.4.1	Ebene einschichtige Wand	179
9.4.2	Halbunendlicher Körper	180
9.4.3	Kontakttemperatur	181
9.5	Konvektion	182
9.5.1	Wärmeübergangskoeffizient	182
9.5.2	Ähnlichkeitstheorie	183
9.5.3	<i>Reynolds</i> -Analogie	186
9.5.4	<i>Prandtl</i> -Analogie	187
9.5.5	Potenzansätze für die laminare und die turbulente Strömung	189
9.5.6	Ansätze für Phasenübergänge	194
9.6	Wärmedurchgang	197
9.6.1	Wärmedurchgangskoeffizient	197
9.6.2	Rippenwirkungsgrad und Flächenwirkungsgrad	199
9.6.3	Mittlere Temperaturdifferenz	199
9.6.4	Betriebscharakteristik	200
9.7	Berippte Wärmeübertragungsflächen	201
9.7.1	Gerade Rippe mit Rechteckquerschnitt	201
9.7.2	Kreisförmige Rippe mit Rechteckquerschnitt	201
9.8	Trennwandwärmeübertrager	202
9.8.1	Gleichstrom	203
9.8.2	Gegenstrom	203
9.8.3	Kreuzstrom	204
9.8.4	Wärmeübertragung mit Phasenübergang	207
9.9	Auswertung und Auslegung	208
9.9.1	Korrekturfaktor für Kreuzstrom	208
9.9.2	Darstellung der Betriebscharakteristik	210
9.9.3	Wärmelängsleitung in der ebenen Trennwand	211
9.9.4	Auslegungsdiagramm	214
10	Feuchte Luft	217
10.1	Zustandseigenschaften feuchter Luft	217
10.1.1	Relative Feuchte	217
10.1.2	Feuchtegrad und Sättigungsgrad	217

10.1.3	Spezifische Enthalpie	218
10.1.4	Spezifisches Volumen und Dichte	219
10.2	Zustandsänderungen feuchter Luft	220
10.2.1	Temperaturänderung	220
10.2.2	Befeuchtung und Entfeuchtung	220
10.2.3	Mischung zweier Feuchtluftmengen	221
10.3	Das h,x -Diagramm von <i>Mollier</i>	221
10.3.1	Temperaturänderung	224
10.3.2	Befeuchtung und Entfeuchtung	224
10.3.3	Mischung zweier Feuchtluftmengen	224
10.4	Verdunstungsmodell	225
10.4.1	Verdunstungskoeffizient	225
10.4.2	Energiebilanzen	225
10.4.3	<i>Lewissche</i> Beziehung	226
10.5	Kühlgrenze	227
10.6	Verdunstung und Tauniederschlag	228
10.7	Wasserdampfdiffusion durch Wände	230
11	Verbrennung	233
11.1	Brennstoffe	233
11.1.1	Gasförmige Brennstoffe	233
11.1.2	Feste und flüssige Brennstoffe	236
11.1.3	Zusammensetzung des Verbrennungsgases, Verbrennungsdreiecke, Verbrennungskontrolle	238
11.2	Technische Gesichtspunkte der Verbrennung	243
11.2.1	Einleitung und Ablauf der Verbrennung	243
11.2.2	Vollkommene und unvollkommene Verbrennung	243
11.2.3	Taupunkt der Verbrennungsgase	244
11.2.4	Schornsteinzug	244
11.3	Brennwert und Heizwert	245
11.4	Theoretische Verbrennungstemperatur	246
12	Chemische Thermodynamik	251
12.1	Systeme mit chemischen Reaktionen	251
12.2	Reaktionsumsatz und Umsatzgrad	253
12.3	Molare Reaktionsenthalpien und molare Standard-Bildungsenthalpien; Satz von Hess	254
12.3.1	Molare Reaktionsenthalpien	254
12.3.2	Molare Standard-Bildungsenthalpien; Satz von Hess	258
12.4	Absolute molare Entropien; dritter Hauptsatz der Thermodynamik	262
12.5	Die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes für chemische Reaktionen	264
12.6	Chemische Exergien	269
12.7	Brennstoffexergien	271
12.8	Chemische Potentiale	276
12.9	Das Massenwirkungsgesetz	278
12.10	Druck- und Temperaturabhängigkeit der Konstanten des Massenwirkungsgesetzes; Gesetz von Le Chatelier und Braun	281
12.11	Modell isotherm-isobarer reversibler chemischer Reaktionen	285

12.11.1	Modell der reversiblen Oxidation von Wasserstoff	285
12.11.2	Modell beliebiger reversibler chemischer Reaktionen idealer Gase	289
12.11.3	Verlustlose Speicherung von Wärme und Arbeit in Form chemischer Energie	289
12.12	Brennstoffzellen	291
Anhang	296
Literaturverzeichnis	314
Stichwortverzeichnis	319