

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	7
2 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	8
2.1 Das Prinzip von der Erhaltung der Energie	8
2.2 Potentielle Energie	9
2.3 Kinetische Energie	12
2.4 Arbeit	12
2.4.1 Volumenänderungsarbeit	13
2.4.2 Kupplungsarbeit	14
2.4.3 Verschiebearbeit	14
2.4.4 Druckänderungsarbeit	15
2.4.5 Reibungsarbeit	17
2.5 Thermische Energie	19
2.5.1 Innere Energie	19
2.5.2 Wärme	20
2.5.3 Enthalpie	21
2.6 Energiebilanzen	22
2.6.1 Energiebilanz für das geschlossene System	22
2.6.2 Energiebilanz für das offene System	24
2.7 Wärmekapazität	27
2.7.1 Spezifische Wärmekapazität	28
2.7.2 Die spezifische Wärmekapazität der Gase	30
3 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	32
3.1 Die Aussage des zweiten Hauptsatzes	32
3.1.1 Reversible und irreversible Prozesse	33
3.1.2 Quasistatische Zustandsänderungen	33
3.2 Irreversible Vorgänge	34
3.2.1 Reibung	35
3.2.2 Temperatúrausgleich	35
3.2.3 Druckausgleich	36
3.2.4 Drosselung	37
3.3 Entropie	38
3.3.1 Reversible Ersatzprozesse adiabater Prozesse	39
3.3.2 Die Berechnung der Entropieänderung	40
3.3.3 Die Entropie als Zustandsgröße, totales Differential	41
3.4 Die Entropieänderung der irreversiblen Vorgänge	43
3.4.1 Reibung	43
3.4.2 Temperatúrausgleich	44
3.4.3 Druckausgleich	45
3.4.4 Drosselung	46
3.5 Nichtadiabater Prozess und reversibler Ersatzprozess	47
3.5.1 Isentrope	48
3.5.2 Entropiediagramme	49
3.5.3 Kreisintegral, thermodynamische Temperatur	51
3.5.4 Dissipative Energie	53

4 Ideale Gase	55
4.1 Thermische Zustandsgleichung	55
4.1.1 Gesetz von <i>Boyle und Mariotte</i>	55
4.1.2 Gesetz von <i>Gay-Lussac</i>	55
4.1.3 Physikalischer Normzustand	56
4.1.4 Gasthermometer	57
4.1.5 Spezielle Gaskonstante	58
4.1.6 Allgemeine Gaskonstante	59
4.2 Kalorische Zustandsgrößen der idealen Gase	60
4.2.1 Innere Energie	60
4.2.2 Enthalpie	60
4.2.3 Entropie	61
4.3 Zustandsänderungen	62
4.3.1 Isochore	62
4.3.2 Isobare	64
4.3.3 Isotherme	66
4.3.4 Isentrope	69
4.3.5 Polytrope	72
4.3.6 Zustandsänderungen mit veränderlicher Masse	78
4.4 Thermische Energie und Arbeit im T, s -Diagramm	79
4.5 Mischungen idealer Gase	80
4.5.1 Der Mischungsvorgang im abgeschlossenen System	83
4.5.2 Mischung bei unverändertem Gesamtvolumen	87
4.5.3 Mischung ohne Temperaturänderung bei unverändertem Gesamtvolumen	87
4.5.4 Der Mischungsvorgang im offenen System	90
5 Reale Gase und Dämpfe	94
5.1 Eigenschaften der Dämpfe	94
5.1.1 Phasenübergänge	94
5.1.2 Zweiphasengebiete	95
5.1.3 Sieden und Kondensieren	96
5.1.4 Verdunsten und Tauen	98
5.1.5 Flüssigkeit	99
5.1.6 Nassdampf	102
5.1.7 Überhitzter Dampf	104
5.2 Zustandsdiagramme	106
5.2.1 Die p, v, T -Fläche	106
5.2.2 Das T, s -Diagramm	109
5.2.3 Das h, s -Diagramm	111
5.3 Thermische Zustandsgleichungen	113
5.3.1 Die <i>van der Waals</i> sche Gleichung	113
5.3.2 Die Grenzkurve und die <i>Maxwell</i> -Beziehung	115
5.3.3 Die reduzierte <i>van der Waals</i> sche Gleichung	117
5.3.4 Verschiedene Ansätze	118
5.3.5 Virialkoeffizienten	121
5.4 Berechnung von Zustandsgrößen; Dampftafeln	123
5.4.1 Die kalorischen Zustandsgrößen	123
5.4.2 Die spezifischen Wärmekapazitäten c_p und c_v	128
5.4.3 Der Isentropenexponent und der Isothermenexponent	130
5.4.4 Die <i>Clausius-Clapeyron</i> sche Gleichung	132
5.4.5 Freie Energie und freie Enthalpie	135
5.4.5.1 Allgemeines	135
5.4.5.2 Ein g, s -Zustandsdiagramm für Wasser und Wasserdampf	140
5.4.6 Der <i>Joule-Thomson</i> -Effekt	144

6 Thermische Maschinen	149
6.1 Einteilung und Arten der Maschinen	149
6.1.1 Unterteilung nach der Richtung der Energieumwandlung	149
6.1.2 Unterteilung nach der Bauart der Maschinen	150
6.1.3 Unterteilung nach der Art des ablaufenden Prozesses	150
6.2 Ideale Maschinen	150
6.2.1 Verdichtung und Entspannung in idealen Maschinen	151
6.2.2 Mehrstufige Verdichtung und Entspannung	152
6.2.3 Die Energiebilanz für Strömungsmaschinen	154
6.2.4 Die Energiebilanz für Verdrängermaschinen	155
6.3 Energiebilanzen für wirkliche Maschinen	158
6.3.1 Innere oder indizierte Arbeit	158
6.3.2 Totalarbeit	159
6.3.3 Totalenthalpie	161
6.4 Wirkliche Maschinen	161
6.4.1 Der ungekühlte Verdichter	161
6.4.2 Der gekühlte Verdichter	163
6.4.3 Kolbenverdichter	165
6.4.4 Turboverdichter	165
6.4.5 Gas- und Dampfturbinen	165
6.5 Wirkungsgrade	168
6.5.1 Vergleichsprozesse	169
6.5.2 Der innere Wirkungsgrad	170
6.5.3 Der mechanische Wirkungsgrad	171
6.5.4 Der Gesamtwirkungsgrad	171
6.5.5 Der isentrope Wirkungsgrad	171
6.5.6 Der isotherme Wirkungsgrad	172
6.5.7 Der polytrope Wirkungsgrad	172
7 Kreisprozesse	177
7.1 Kreisprozessarbeit, Wärmezufuhr und Wärmeabgabe	180
7.2 Rechts- und linkslaufende Kreisprozesse	183
7.3 Die Theorie der rechtslaufenden Kreisprozesse	184
7.3.1 Umwandlung von thermischer in mechanische Energie	185
7.3.2 Der thermische Wirkungsgrad	186
7.3.3 Der rechtslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	186
7.3.4 Die Auswirkung irreversibler Vorgänge	188
7.3.5 Der <i>Carnot</i> -Faktor	190
7.4 Technisch genutzte rechtslaufende Kreisprozesse	191
7.4.1 <i>Seiliger</i> -Prozess, <i>Otto</i> -Prozess, <i>Diesel</i> -Prozess, verallgemeinerter <i>Diesel</i> -Prozess	192
7.4.2 <i>Joule</i> -Prozess	195
7.4.3 <i>Ericsson</i> -Prozess	198
7.4.4 <i>Stirling</i> -Prozess	200
7.4.5 Einfach-polytropischer <i>Carnot</i> -Prozess	202
7.4.6 Gasexpansions-Prozess	202
7.4.7 <i>Clausius-Rankine</i> -Prozess	204
7.5 Vergleichende Bewertung von rechtslaufenden Kreisprozessen	207
7.5.1 Prozessgrößen und Kreisprozesse	207
7.5.2 Mechanische Anstrengungsverhältnisse und thermische Anstrengungsverhältnisse	208
7.5.3 Bewertungskriterien für wichtige thermodynamische Kreisprozesse	212
7.5.3.1 Allgemeine thermodynamische Beziehungen	212
7.5.3.2 Beispiele	213
7.5.3.3 Graphische Darstellung der thermodynamischen Beziehungen	228
7.5.3.4 Kreisprozessberechnungen für reale Fluide	240

7.6 Linkslaufende Kreisprozesse	246
7.6.1 Leistungszahl	247
7.6.2 Der linkslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	247
7.6.3 Der linkslaufende <i>Joule</i> -Prozess	248
7.6.4 Der Gasexpansions-Prozess als Kälteprozess	250
7.6.5 Der Kompressions-Kaltdampfprozess	253
8 Exergie	259
8.1 Energie und Exergie	259
8.1.1 Die Exergie der Wärme	261
8.1.2 Die Exergie der gebundenen Energie	263
8.1.3 Die Exergie der Temperaturänderungswärme	264
8.1.4 Die Exergie der Volumenänderungsarbeit	265
8.1.5 Die Exergie der Verschiebearbeit	266
8.1.6 Die Exergie der Druckänderungsarbeit	267
8.1.7 Die Exergie der inneren Energie	268
8.1.8 Die Exergie der Enthalpie	271
8.1.9 Die Exergie der freien Energie	275
8.1.10 Die Exergie der freien Enthalpie	275
8.1.11 Unterschied zwischen <i>EU</i> und <i>EF</i>	276
8.1.12 Unterschied zwischen <i>EH</i> und <i>EG</i>	277
8.1.13 Freie Energie und freie Enthalpie als thermodynamische Potentiale	278
8.2 Exergie und Anergie	280
8.2.1 Die Anergie im p, V -Diagramm und im T, S -Diagramm	282
8.2.2 Anergiefreie Energien	285
8.3 Exergieverlust	286
8.3.1 Irreversibilität und Exergieverlust	286
8.3.2 Exergieverlust und Anergiegewinn	290
8.3.3 Exergetische Wirkungsgrade	292
9 Wärmeübertragung	297
9.1 Wärmestrahlung	297
9.1.1 <i>Stefan-Boltzmannsches</i> Gesetz	297
9.1.2 <i>Kirchhoffsches</i> Gesetz	297
9.1.3 <i>Plancksches</i> Strahlungsgesetz	298
9.1.4 <i>Wiensches</i> Verschiebungsgesetz	299
9.1.5 <i>Lambertsches</i> Kosinusetz	299
9.1.6 Einstrahlzahl	300
9.2 Strahlungsaustausch	303
9.2.1 Hohlraummethode	304
9.2.2 Umhüllung einer Fläche durch eine andere	305
9.2.3 Zwei große parallele Flächen	306
9.2.4 Matrizendarstellung	306
9.3 Stationäre eindimensionale Wärmeleitung	309
9.3.1 Ebene Wand	309
9.3.2 Rohrwand	310
9.4 Instationäre eindimensionale Wärmeleitung	311
9.4.1 Ebene einschichtige Wand	311
9.4.2 Halbbunendlicher Körper	313
9.4.3 Kontakttemperatur	314
9.5 Konvektion	316
9.5.1 Wärmeübergangskoeffizient	316
9.5.2 Ähnlichkeitstheorie	317
9.5.3 <i>Reynolds</i> -Analogie	320
9.5.4 <i>Prandtl</i> -Analogie	321
9.5.5 Potenzansätze für die turbulente Rohrströmung	324

9.6 Wärmedurchgang	325
9.6.1 Wärmedurchgangskoeffizient	325
9.6.2 Rippenwirkungsgrad und Flächenwirkungsgrad	326
9.6.3 Mittlere Temperaturdifferenz	327
9.6.4 Betriebscharakteristik	328
9.7 Berippte Wärmeübertragungsflächen	329
9.7.1 Gerade Rippe mit Rechteckquerschnitt	329
9.8 Trennwandwärmeübertrager	329
9.8.1 Gleichstrom	330
9.8.2 Gegenstrom	331
9.8.3 Kreuzstrom	333
9.8.4 Wärmeübertragung mit Phasenübergang	336
9.9 Auswertung und Auslegung	338
9.9.1 Korrekturfaktor für Kreuzstrom	338
9.9.2 Darstellung der Betriebscharakteristik	340
9.9.3 Wärmelängsleitung in der ebenen Trennwand	342
9.9.4 Auslegungsdiagramm	351
10 Feuchte Luft	355
10.1 Zustandseigenschaften feuchter Luft	355
10.1.1 Relative Feuchte	355
10.1.2 Feuchtegrad und Sättigungsgrad	356
10.1.3 Spezifische Enthalpie	357
10.1.4 Spezifisches Volumen und Dichte	358
10.2 Zustandsänderungen feuchter Luft	359
10.2.1 Temperaturänderung	359
10.2.2 Befeuchtung und Entfeuchtung	359
10.2.3 Mischung zweier Feuchtluftmengen	360
10.3 Das h, x -Diagramm von <i>Mollier</i>	361
10.3.1 Temperaturänderung	364
10.3.2 Befeuchtung und Entfeuchtung	364
10.3.3 Mischung zweier Feuchtluftmengen	365
10.4 Verdunstungsmodell	365
10.4.1 Verdunstungskoeffizient	365
10.4.2 Energiebilanzen	366
10.4.3 <i>Lewissche</i> Beziehung	367
10.5 Kühlgrenze	368
10.6 Verdunstung und Tauniederschlag	370
10.7 Wasserdampfdiffusion durch Wände	371
11 Verbrennung	377
11.1 Brennstoffe	377
11.1.1 Gasförmige Brennstoffe	378
11.1.2 Feste und flüssige Brennstoffe	382
11.1.3 Zusammensetzung des Verbrennungsgases, Verbrennungs- dreiecke, Verbrennungskontrolle	384
11.2 Technische Gesichtspunkte der Verbrennung	391
11.2.1 Einleitung und Ablauf der Verbrennung	391
11.2.2 Vollkommene und unvollkommene Verbrennung	391
11.2.3 Taupunkt der Verbrennungsgase	393
11.2.4 Schornsteinzug	394
11.3 Brennwert und Heizwert	395
11.4 Theoretische Verbrennungstemperatur	397
Anhang	404