

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	9
2.1 Das Prinzip von der Erhaltung der Energie	9
2.2 Potentielle Energie	10
2.3 Kinetische Energie	13
2.4 Arbeit	14
2.4.1 Volumenänderungsarbeit	14
2.4.2 Kupplungsarbeit	16
2.4.3 Verschiebearbeit	16
2.4.4 Druckänderungsarbeit	17
2.4.5 Reibungsarbeit	19
2.5 Thermische Energie	20
2.5.1 Innere Energie	21
2.5.2 Wärme	22
2.5.3 Enthalpie	23
2.6 Energiebilanzen	24
2.6.1 Energiebilanz für das geschlossene System	24
2.6.2 Energiebilanz für das offene System	26
2.7 Wärmekapazität	30
2.7.1 Spezifische Wärmekapazität	31
2.7.2 Die spezifische Wärmekapazität der Gase	34
3 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	37
3.1 Die Aussage des zweiten Hauptsatzes	37
3.1.1 Reversible und irreversible Prozesse	38
3.1.2 Quasistatische Zustandsänderungen	39
3.2 Irreversible Vorgänge	40
3.2.1 Reibung	40
3.2.2 Temperaturausgleich	41
3.2.3 Druckausgleich	41
3.2.4 Drosselung	42
3.3 Entropie	43
3.3.1 Reversible Ersatzprozesse adiabater Prozesse	44
3.3.2 Die Berechnung der Entropieänderung	46
3.3.3 Die Entropie als Zustandsgröße, totales Differential	46
3.4 Die Entropieänderung der irreversiblen Vorgänge	49
3.4.1 Reibung	49
3.4.2 Temperaturausgleich	50
3.4.3 Druckausgleich	52
3.4.4 Drosselung	53

3.5 Nichtadiabater Prozess und reversibler Ersatzprozess	53
3.5.1 Isentrope	55
3.5.2 Entropiediagramme	56
3.5.3 Kreisintegral, thermodynamische Temperatur	58
3.5.4 Dissipative Energie	60
4 Ideale Gase	63
4.1 Thermische Zustandsgleichung	63
4.1.1 Gesetz von <i>Boyle</i> und <i>Mariotte</i>	63
4.1.2 Gesetz von <i>Gay-Lussac</i>	63
4.1.3 Physikalischer Normzustand	64
4.1.4 Gasthermometer	65
4.1.5 Spezielle Gaskonstante	66
4.1.6 Allgemeine Gaskonstante	68
4.2 Kalorische Zustandsgrößen der idealen Gase	68
4.2.1 Innere Energie	69
4.2.2 Enthalpie	69
4.2.3 Entropie	70
4.3 Zustandsänderungen	71
4.3.1 Isochore	71
4.3.2 Isobare	73
4.3.3 Isotherme	76
4.3.4 Isentrope	78
4.3.5 Polytrope	83
4.3.6 Zustandsänderungen mit veränderlicher Masse	90
4.4 Thermische Energie und Arbeit im T, s -Diagramm	91
4.5 Mischungen idealer Gase	93
4.5.1 Der Mischungsvorgang im abgeschlossenen System	96
4.5.2 Mischung bei unverändertem Gesamtvolumen	99
4.5.3 Mischung ohne Temperatur- und Druckänderung bei unverändertem Gesamtvolumen	100
4.5.4 Der Mischungsvorgang im offenen System	102
5 Reale Gase und Dämpfe	109
5.1 Eigenschaften der Dämpfe	109
5.1.1 Phasenübergänge	109
5.1.2 Zweiphasengebiete	110
5.1.3 Sieden und Kondensieren	111
5.1.4 Verdunsten und Tauen	113
5.1.5 Flüssigkeit	115
5.1.6 Nassdampf	118
5.1.7 Überhitzter Dampf	121
5.2 Zustandsdiagramme	122
5.2.1 Die p, v, T -Fläche	122
5.2.2 Das T, s -Diagramm	125
5.2.3 Das h, s -Diagramm	128
5.3 Thermische Zustandsgleichungen	130
5.3.1 Die <i>van der Waalssche</i> Gleichung	130

5.3.2 Die Grenzkurve und die <i>Maxwell</i> -Beziehung	132
5.3.3 Die reduzierte <i>van der Waalssche</i> Gleichung	134
5.3.4 Verschiedene Ansätze	135
5.3.5 Virialkoeffizienten	139
5.4 Berechnung von Zustandsgrößen; Dampftafeln	141
5.4.1 Die kalorischen Zustandsgrößen	142
5.4.2 Die spezifischen Wärmekapazitäten c_p und c_v	147
5.4.3 Der Isentropenexponent und der Isothermenexponent	149
5.4.4 Die <i>Clausius-Clapeyronsche</i> Gleichung	151
5.4.5 Freie Energie und freie Enthalpie	155
5.4.5.1 Allgemeines	155
5.4.5.2 Ein g, s -Zustandsdiagramm für Wasser und Wasserdampf ..	161
5.4.6 Der <i>Joule-Thomson</i> -Effekt	165
6 Thermische Maschinen	171
6.1 Einteilung und Arten der Maschinen	171
6.1.1 Unterteilung nach der Richtung der Energieumwandlung	171
6.1.2 Unterteilung nach der Bauart der Maschinen	172
6.1.3 Unterteilung nach der Art des ablaufenden Prozesses	172
6.2 Ideale Maschinen	172
6.2.1 Verdichtung und Entspannung in idealen Maschinen	173
6.2.2 Mehrstufige Verdichtung und Entspannung	174
6.2.3 Die Energiebilanz für Strömungsmaschinen	176
6.2.4 Die Energiebilanz für Verdrängermaschinen	178
6.3 Energiebilanzen für wirkliche Maschinen	181
6.3.1 Innere oder indizierte Arbeit	182
6.3.2 Totalarbeit	183
6.3.3 Totalenthalpie	184
6.4 Wirkliche Maschinen	184
6.4.1 Der ungekühlte Verdichter	184
6.4.2 Der gekühlte Verdichter	187
6.4.3 Kolbenverdichter	189
6.4.4 Turboverdichter	189
6.4.5 Gas- und Dampfturbinen	189
6.5 Wirkungsgrade	193
6.5.1 Vergleichsprozesse	194
6.5.2 Der innere Wirkungsgrad	194
6.5.3 Der mechanische Wirkungsgrad	196
6.5.4 Der Gesamtwirkungsgrad	196
6.5.5 Der isentrope Wirkungsgrad	196
6.5.6 Der isotherme Wirkungsgrad	197
6.5.7 Der polytropen Wirkungsgrad	197
7 Kreisprozesse	203
7.1 Kreisprozessarbeit, Wärmezufuhr und Wärmeabgabe	207
7.2 Rechts- und linkslaufende Kreisprozesse	209
7.3 Die Theorie der rechtslaufenden Kreisprozesse	210
7.3.1 Umwandlung von thermischer in mechanische Energie	211

7.3.2 Der thermische Wirkungsgrad	212
7.3.3 Der rechtslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	213
7.3.4 Die Auswirkung irreversibler Vorgänge	214
7.3.5 Der <i>Carnot</i> -Faktor	216
7.4 Technisch genutzte rechtslaufende Kreisprozesse	218
7.4.1 <i>Seiliger</i> -Prozess, <i>Otto</i> -Prozess, <i>Diesel</i> -Prozess, verallgemeinerter <i>Diesel</i> -Prozess	219
7.4.2 <i>Joule</i> -Prozess	223
7.4.3 <i>Ericsson</i> -Prozess	226
7.4.4 <i>Stirling</i> -Prozess	228
7.4.5 Einfach-polytropischer <i>Carnot</i> -Prozess	230
7.4.6 Gasexpansions-Prozess	231
7.4.7 <i>Clausius-Rankine</i> -Prozess	232
7.5 Vergleichende Bewertung von rechtslaufenden Kreisprozessen	235
7.5.1 Prozessgrößen und Kreisprozesse	236
7.5.2 Mechanische Anstrengungsverhältnisse und thermische Anstrengungsverhältnisse	237
7.5.3 Bewertungskriterien für wichtige thermodynamische Kreisprozesse ..	241
7.5.3.1 Allgemeine thermodynamische Beziehungen	241
7.5.3.2 Beispiele	243
7.5.3.3 Graphische Darstellung der thermodynamischen Beziehungen	257
7.5.3.4 Kreisprozessberechnungen für reale Fluide	269
7.6 Linkslaufende Kreisprozesse	275
7.6.1 Leistungszahl	276
7.6.2 Der linkslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	277
7.6.3 Der linkslaufende <i>Joule</i> -Prozess	278
7.6.4 Der Gasexpansions-Prozess als Kälteprozess	279
7.6.5 Der Kompressions-Kaltdampfprozess	283
8 Exergie	291
8.1 Energie und Exergie	291
8.1.1 Die Exergie der Wärme	293
8.1.2 Die Exergie der gebundenen Energie	295
8.1.3 Die Exergie der Temperaturänderungswärme	296
8.1.4 Die Exergie der Volumenänderungsarbeit	297
8.1.5 Die Exergie der Verschiebearbeit	298
8.1.6 Die Exergie der Druckänderungsarbeit	300
8.1.7 Die Exergie der inneren Energie	300
8.1.8 Die Exergie der Enthalpie	304
8.1.9 Die Exergie der freien Energie	309
8.1.10 Die Exergie der freien Enthalpie	309
8.1.11 Unterschied zwischen <i>EU</i> und <i>EF</i>	310
8.1.12 Unterschied zwischen <i>EH</i> und <i>EG</i>	312
8.1.13 Freie Energie und freie Enthalpie als thermodynamische Potentiale	312
8.2 Exergie und Anergie	315
8.2.1 Die Anergie im p, V -Diagramm und im T, S -Diagramm	317
8.2.2 Anergiefreie Energien	320
8.3 Exergieverlust	321

8.3.1 Irreversibilität und Exergieverlust	321
8.3.2 Exergieverlust und Anergiegewinn	325
8.3.3 Exergetische Wirkungsgrade	328
9 Wärmeübertragung	333
9.1 Wärmestrahlung	333
9.1.1 <i>Stefan-Boltzmannsches Gesetz</i>	333
9.1.2 <i>Kirchhoff'sches Gesetz</i>	333
9.1.3 <i>Plancksches Strahlungsgesetz</i>	334
9.1.4 <i>Wiensches Verschiebungsgesetz</i>	335
9.1.5 <i>Lambertsches Kosinusgesetz</i>	336
9.1.6 Einstrahlzahl	336
9.2 Strahlungsaustausch	341
9.2.1 Hohlraummethode	342
9.2.2 Umhüllung einer Fläche durch eine andere	343
9.2.3 Zwei große parallele Flächen	344
9.2.4 Matrizendarstellung	344
9.3 Stationäre eindimensionale Wärmeleitung	347
9.3.1 Ebene Wand	347
9.3.2 Rohrwand	348
9.4 Instationäre eindimensionale Wärmeleitung	349
9.4.1 Ebene einschichtige Wand	350
9.4.2 Halbunendlicher Körper	352
9.4.3 Kontakttemperatur	353
9.5 Konvektion	354
9.5.1 Wärmeübergangskoeffizient	355
9.5.2 Ähnlichkeitstheorie	356
9.5.3 <i>Reynolds</i> -Analogie	359
9.5.4 <i>Prandtl</i> -Analogie	360
9.5.5 Potenzansätze für die turbulente Rohrströmung	363
9.6 Wärmedurchgang	364
9.6.1 Wärmedurchgangskoeffizient	364
9.6.2 Rippenwirkungsgrad und Flächenwirkungsgrad	365
9.6.3 Mittlere Temperaturdifferenz	366
9.6.4 Betriebscharakteristik	366
9.7 Berippte Wärmeübertragungsflächen	367
9.7.1 Gerade Rippe mit Rechteckquerschnitt	368
9.7.2 Kreisförmige Rippe mit Rechteckquerschnitt	368
9.8 Trennwandwärmeübertrager	370
9.8.1 Gleichstrom	370
9.8.2 Gegenstrom	371
9.8.3 Kreuzstrom	373
9.8.4 Wärmeübertragung mit Phasenübergang	377
9.9 Auswertung und Auslegung	378
9.9.1 Korrekturfaktor für Kreuzstrom	379
9.9.2 Darstellung der Betriebscharakteristik	381
9.9.3 Wärmelängsleitung in der ebenen Trennwand	384
9.9.4 Auslegungsdiagramm	393

10 Feuchte Luft	399
10.1 Zustandseigenschaften feuchter Luft	399
10.1.1 Relative Feuchte	399
10.1.2 Feuchtegrad und Sättigungsgrad	399
10.1.3 Spezifische Enthalpie	401
10.1.4 Spezifisches Volumen und Dichte	402
10.2 Zustandsänderungen feuchter Luft	402
10.2.1 Temperaturänderung	403
10.2.2 Befeuchtung und Entfeuchtung	403
10.2.3 Mischung zweier Feuchtluftmengen	404
10.3 Das h,x -Diagramm von <i>Mollier</i>	405
10.3.1 Temperaturänderung	407
10.3.2 Befeuchtung und Entfeuchtung	408
10.3.3 Mischung zweier Feuchtluftmengen	408
10.4 Verdunstungsmodell	408
10.4.1 Verdunstungskoeffizient	408
10.4.2 Energiebilanzen	409
10.4.3 <i>Lewissche Beziehung</i>	410
10.5 Kühlgrenze	411
10.6 Verdunstung und Tauniederschlag	413
10.7 Wasserdampfdiffusion durch Wände	414
11 Verbrennung	421
11.1 Brennstoffe	421
11.1.1 Gasförmige Brennstoffe	422
11.1.2 Feste und flüssige Brennstoffe	426
11.1.3 Zusammensetzung des Verbrennungsgases, Verbrennungsdreiecke, Verbrennungskontrolle	429
11.2 Technische Gesichtspunkte der Verbrennung	437
11.2.1 Einleitung und Ablauf der Verbrennung	437
11.2.2 Vollkommene und unvollkommene Verbrennung	437
11.2.3 Taupunkt der Verbrennungsgase	440
11.2.4 Schornsteinzug	440
11.3 Brennwert und Heizwert	441
11.4 Theoretische Verbrennungstemperatur	443
Anhang	453