

Inhaltsverzeichnis

1	Thermodynamische Grundbegriffe	1
1.1	Anwendungsgebiete der Thermodynamik	1
1.2	System	4
1.3	Zustand, Zustandsgrößen, Zustandsänderungen	5
1.4	Prozess, Prozessgrößen	8
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
2.8	Strömungstechnische Grundlagen	35
2.8.1	Allgemeines	35
2.8.2	Strömungsformen	36
2.8.3	Reibung und Rauigkeit	36
2.8.4	Einzelwiderstände	38
2.8.5	Äquivalente Rohrlänge	39
2.8.6	Druckverlust bzw. Druckgewinn infolge des Dichteunterschieds zwischen strömendem Fluid und Umgebungsfluid	39
2.8.7	Gesamtdruckdifferenz bei der Fluidfortleitung	39
3	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	43
3.1	Die Aussage des zweiten Hauptsatzes	43
3.1.1	Reversible und irreversible Prozesse	44
3.1.2	Quasistatische Zustandsänderungen	45
3.2	Irreversible Vorgänge	46
3.2.1	Reibung	46
3.2.2	Temperaturausgleich	47
3.2.3	Druckausgleich	47
3.2.4	Drosselung	48

3.3	Entropie	49
3.3.1	Reversible Ersatzprozesse adiabater Prozesse	50
3.3.2	Die Berechnung der Entropieänderung	52
3.3.3	Die Entropie als Zustandsgröße, totales Differential	52
3.4	Die Entropieänderung der irreversiblen Vorgänge	55
3.4.1	Reibung	55
3.4.2	Temperaturausgleich	56
3.4.3	Druckausgleich	58
3.4.4	Drosselung	59
3.5	Nichtadiabater Prozess und reversibler Ersatzprozess	59
3.5.1	Isentrope; Deutungen des Entropiebegriffs	61
3.5.2	Entropiediagramme	62
3.5.3	Kreisintegral, thermodynamische Temperatur	64
3.5.4	Dissipative Energie	66
4	Ideale Gase	69
4.1	Thermische Zustandsgleichung	69
4.1.1	Gesetz von <i>Boyle</i> und <i>Mariotte</i>	69
4.1.2	Gesetz von <i>Gay-Lussac</i>	69
4.1.3	Physikalischer Normzustand	70
4.1.4	Gasthermometer	71
4.1.5	Spezielle Gaskonstante	72
4.1.6	Allgemeine Gaskonstante	74
4.2	Kalorische Zustandsgrößen der idealen Gase	74
4.2.1	Innere Energie	75
4.2.2	Enthalpie	75
4.2.3	Entropie	76
4.3	Zustandsänderungen	77
4.3.1	Isochore	77
4.3.2	Isobare	79
4.3.3	Isotherme	82
4.3.4	Isentrope	84
4.3.5	Polytrope	89
4.3.6	Zustandsänderungen mit veränderlicher Masse	96
4.4	Thermische Energie und Arbeit im T, s -Diagramm	97
4.5	Mischungen idealer Gase	99
4.5.1	Der Mischungsvorgang im abgeschlossenen System	102
4.5.2	Mischung bei unverändertem Gesamtvolumen	105
4.5.3	Mischung ohne Temperatur- und Druckänderung bei unverändertem Gesamtvolumen	106
4.5.4	Der Mischungsvorgang im offenen System	108
4.6	Dynamik idealer Gase: Kompressible stationäre Gasströmung	111
4.6.1	Einführung	111
4.6.2	Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung	112
4.6.3	Energiegleichung und <i>Bernoulli</i> -Gleichung der kompressiblen eindimensionalen Strömung idealer Gase	115
4.6.4	Ruhegrößen und kritischer Zustand	118
4.6.5	Das Geschwindigkeitsdiagramm der spezifischen Energiegleichung ...	121

4.6.6	Die Durchflussfunktion	122
4.6.7	Isentrope Gasströmung in Düsen und Blenden	125
4.6.8	Beschleunigte kompressible Strömung	126
4.6.9	Verdichtungsstoß	142
5	Reale Gase und Dämpfe	151
5.1	Eigenschaften der Dämpfe	151
5.1.1	Phasenübergänge	151
5.1.2	Zweiphasengebiete	152
5.1.3	Sieden und Kondensieren	153
5.1.4	Verdunsten und Tauen	155
5.1.5	Flüssigkeit	157
5.1.6	Nassdampf	160
5.1.7	Überhitzter Dampf	163
5.2	Zustandsdiagramme	164
5.2.1	Die p, v, T -Fläche	164
5.2.2	Das T, s -Diagramm	167
5.2.3	Das h, s -Diagramm	170
5.3	Thermische Zustandsgleichungen	172
5.3.1	Die <i>van der Waalssche</i> Gleichung	172
5.3.2	Die Grenzkurve und die <i>Maxwell</i> -Beziehung	174
5.3.3	Die reduzierte <i>van der Waalssche</i> Gleichung	176
5.3.4	Verschiedene Ansätze	177
5.3.5	Virialkoeffizienten	181
5.4	Berechnung von Zustandsgrößen; Dampftafeln	183
5.4.1	Die kalorischen Zustandsgrößen	184
5.4.2	Die spezifischen Wärmekapazitäten c_p und c_v	189
5.4.3	Der Isentropenexponent und der Isothermenexponent	191
5.4.4	Die <i>Clausius-Clapeyronsche</i> Gleichung	193
5.4.5	Freie Energie und freie Enthalpie	197
5.4.5.1	Allgemeines	197
5.4.5.2	Ein g, s -Zustandsdiagramm für Wasser und Wasserdampf ...	203
5.4.6	Der <i>Joule-Thomson</i> -Effekt	207
6	Thermische Maschinen	213
6.1	Einteilung und Arten der Maschinen	213
6.1.1	Unterteilung nach der Richtung der Energieumwandlung	213
6.1.2	Unterteilung nach der Bauart der Maschinen	214
6.1.3	Unterteilung nach der Art des ablaufenden Prozesses	214
6.2	Ideale Maschinen	214
6.2.1	Verdichtung und Entspannung in idealen Maschinen	215
6.2.2	Mehrstufige Verdichtung und Entspannung	216
6.2.3	Die Energiebilanz für Strömungsmaschinen	218
6.2.4	Die Energiebilanz für Verdrängermaschinen	220
6.3	Energiebilanzen für wirkliche Maschinen	221
6.3.1	Innere oder indizierte Arbeit	224
6.3.2	Totalarbeit	225
6.3.3	Totalenthalpie	226

6.4 Wirkliche Maschinen	226
6.4.1 Der ungekühlte Verdichter	226
6.4.2 Der gekühlte Verdichter	229
6.4.3 Kolbenverdichter	231
6.4.4 Turboverdichter	231
6.4.5 Gas- und Dampfturbinen	231
6.5 Wirkungsgrade	235
6.5.1 Vergleichsprozesse	236
6.5.2 Der innere Wirkungsgrad	236
6.5.3 Der mechanische Wirkungsgrad	238
6.5.4 Der Gesamtwirkungsgrad	238
6.5.5 Der isentrope Wirkungsgrad	238
6.5.6 Der isotherme Wirkungsgrad	239
6.5.7 Der polytrope Wirkungsgrad	239
7 Kreisprozesse	245
7.1 Kreisprozessarbeit, Wärmezufuhr und Wärmeabgabe	245
7.2 Rechts- und linkslaufende Kreisprozesse	251
7.3 Die Theorie der rechtslaufenden Kreisprozesse	252
7.3.1 Umwandlung von thermischer in mechanische Energie	253
7.3.2 Der thermische Wirkungsgrad	254
7.3.3 Der rechtslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	255
7.3.4 Die Auswirkung irreversibler Vorgänge	256
7.3.5 Der <i>Carnot</i> -Faktor	258
7.4 Technisch genutzte rechtslaufende Kreisprozesse	260
7.4.1 <i>Seiliger</i> -Prozess, <i>Otto</i> -Prozess, <i>Diesel</i> -Prozess, verallgemeinerter <i>Diesel</i> -Prozess	261
7.4.2 <i>Joule</i> -Prozess	265
7.4.3 <i>Ericsson</i> -Prozess	268
7.4.4 <i>Stirling</i> -Prozess	270
7.4.5 Einfach-polytropischer <i>Carnot</i> -Prozess	272
7.4.6 Gasexpansions-Prozess	273
7.4.7 <i>Clausius-Rankine</i> -Prozess	274
7.5 Vergleichende Bewertung von rechtslaufenden Kreisprozessen	277
7.5.1 Prozessgrößen und Kreisprozesse	278
7.5.2 Mechanische Anstrengungsverhältnisse und thermische Anstrengungsverhältnisse	279
7.5.3 Bewertungskriterien für wichtige thermodynamische Kreisprozesse ...	283
7.5.3.1 Allgemeine thermodynamische Beziehungen	283
7.5.3.2 Beispiele	285
7.5.3.3 Graphische Darstellung der thermodynamischen Beziehungen	299
7.5.3.4 Kreisprozessberechnungen für reale Fluide	311
7.6 Linkslaufende Kreisprozesse	317
7.6.1 Leistungszahl	318
7.6.2 Der linkslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	319
7.6.3 Der linkslaufende <i>Joule</i> -Prozess	320
7.6.4 Der Gasexpansions-Prozess als Kälteprozess	321
7.6.5 Der Kompressions-Kaltdampfprozess	325

8 Exergie	333
8.1 Energie und Exergie	333
8.1.1 Die Exergie der Wärme	335
8.1.2 Die Exergie der gebundenen Energie	335
8.1.3 Die Exergie der Temperaturänderungswärme	338
8.1.4 Die Exergie der Volumenänderungsarbeit	340
8.1.5 Die Exergie der Verschiebearbeit	341
8.1.6 Die Exergie der Druckänderungsarbeit	342
8.1.7 Die Exergie der inneren Energie	343
8.1.8 Die Exergie der Enthalpie	347
8.1.9 Die Exergie der freien Energie	351
8.1.10 Die Exergie der freien Enthalpie	351
8.1.11 Unterschied zwischen EU und EF	354
8.1.12 Unterschied zwischen EH und EG	355
8.1.13 Freie Energie und freie Enthalpie als thermodynamische Potentiale	355
8.2 Exergie und Anergie	358
8.2.1 Die Anergie im p, V -Diagramm und im T, S -Diagramm	360
8.2.2 Anergiefreie Energien	361
8.3 Exergieverlust	363
8.3.1 Irreversibilität und Exergieverlust	363
8.3.2 Exergieverlust und Anergiegewinn	367
8.3.3 Exergetische Wirkungsgrade	370
9 Wärmeübertragung	375
9.1 Wärmestrahlung	375
9.1.1 <i>Stefan-Boltzmannsches</i> Gesetz	375
9.1.2 <i>Kirchhoffsches</i> Gesetz	375
9.1.3 <i>Plancksches</i> Strahlungsgesetz	376
9.1.4 <i>Wiensches</i> Verschiebungsgesetz	377
9.1.5 <i>Lambertsches</i> Kosinusgesetz	378
9.1.6 Einstrahlzahl	378
9.2 Strahlungsaustausch	383
9.2.1 Hohlraummethode	384
9.2.2 Umhüllung einer Fläche durch eine andere	385
9.2.3 Zwei große parallele Flächen	386
9.2.4 Matrizendarstellung	386
9.3 Stationäre eindimensionale Wärmeleitung	389
9.3.1 Ebene Wand	389
9.3.2 Rohrwand	390
9.4 Instationäre eindimensionale Wärmeleitung	391
9.4.1 Ebene einschichtige Wand	392
9.4.2 Halbunendlicher Körper	394
9.4.3 Kontakttemperatur	395
9.5 Konvektion	396
9.5.1 Wärmeübergangskoeffizient	397
9.5.2 Ähnlichkeitstheorie	398
9.5.3 <i>Reynolds</i> -Analogie	401
9.5.4 <i>Prandtl</i> -Analogie	402

9.5.5	Potenzansätze für die laminare und die turbulente Strömung	405
9.5.6	Ansätze für Phasenübergänge	411
9.6	Wärmedurchgang	414
9.6.1	Wärmedurchgangskoeffizient	415
9.6.2	Rippenwirkungsgrad und Flächenwirkungsgrad	416
9.6.3	Mittlere Temperaturdifferenz	417
9.6.4	Betriebscharakteristik	417
9.7	Berippte Wärmeübertragungsflächen	418
9.7.1	Gerade Rippe mit Rechteckquerschnitt	419
9.7.2	Kreisförmige Rippe mit Rechteckquerschnitt	419
9.8	Trennwandwärmeübertrager	421
9.8.1	Gleichstrom	421
9.8.2	Gegenstrom	422
9.8.3	Kreuzstrom	424
9.8.4	Wärmeübertragung mit Phasenübergang	428
9.9	Auswertung und Auslegung	429
9.9.1	Korrekturfaktor für Kreuzstrom	430
9.9.2	Darstellung der Betriebscharakteristik	432
9.9.3	Wärmelängsleitung in der ebenen Trennwand	434
9.9.4	Auslegungsdiagramm	437
10	Feuchte Luft	453
10.1	Zustandseigenschaften feuchter Luft	453
10.1.1	Relative Feuchte	453
10.1.2	Feuchtegrad und Sättigungsgrad	453
10.1.3	Spezifische Enthalpie	455
10.1.4	Spezifisches Volumen und Dichte	456
10.2	Zustandsänderungen feuchter Luft	456
10.2.1	Temperaturänderung	457
10.2.2	Befeuchtung und Entfeuchtung	457
10.2.3	Mischung zweier Feuchtluftmengen	458
10.3	Das h,x -Diagramm von <i>Mollier</i>	459
10.3.1	Temperaturänderung	461
10.3.2	Befeuchtung und Entfeuchtung	462
10.3.3	Mischung zweier Feuchtluftmengen	462
10.4	Verdunstungsmodell	462
10.4.1	Verdunstungskoeffizient	462
10.4.2	Energiebilanzen	463
10.4.3	<i>Lewissche</i> Beziehung	464
10.5	Kühlgrenze	413
10.6	Verdunstung und Tauniederschlag	467
10.7	Wasserdampfdiffusion durch Wände	468
11	Verbrennung	475
11.1	Brennstoffe	476
11.1.1	Gasförmige Brennstoffe	476
11.1.2	Feste und flüssige Brennstoffe	480
11.1.3	Zusammensetzung des Verbrennungsgases, Verbrennungsdreiecke,	

Verbrennungskontrolle	483
11.2 Technische Gesichtspunkte der Verbrennung	491
11.2.1 Einleitung und Ablauf der Verbrennung	491
11.2.2 Vollkommene und unvollkommene Verbrennung	491
11.2.3 Taupunkt der Verbrennungsgase	494
11.2.4 Schornsteinzug	494
11.3 Brennwert und Heizwert	495
11.4 Theoretische Verbrennungstemperatur	497
12 Chemische Thermodynamik	507
12.1 Systeme mit chemischen Reaktionen	507
12.2 Reaktionsumsatz und Umsatzgrad	509
12.3 Molare Reaktionsenthalpien und molare Standard-Bildungsenthalpien; Satz von <i>Hess</i>	512
12.3.1 Molare Reaktionsenthalpien	512
12.3.2 Molare Standard-Bildungsenthalpien; Satz von <i>Hess</i>	516
12.4 Absolute molare Entropien; dritter Hauptsatz der Thermodynamik	522
12.5 Die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes für chemische Reaktionen	526
12.6 Chemische Exergien	533
12.7 Brennstoffexergien	536
12.8 Chemische Potentiale	541
12.9 Das Massenwirkungsgesetz	543
12.10 Druck- und Temperaturabhängigkeit der Konstanten des Massenwirkungsgesetzes; Gesetz von <i>LeChatelier</i> und <i>Braun</i>	548
12.11 Modell isotherm-isobarer reversibler chemischer Reaktionen	553
12.11.1 Modell der reversiblen Oxidation von Wasserstoff	553
12.11.2 Modell beliebiger homogener reversibler chemischer Reaktionen idealer Gase	557
12.11.3 Verlustlose Speicherung von Wärme und Arbeit in Form chemischer Energie	558
12.12 Brennstoffzellen	560
Anhang	567
Literaturverzeichnis	604
Sachwortverzeichnis	612