

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Grundlagen

1.1 Thermodynamik	1
1.11 Von der historischen Entwicklung der Thermodynamik	1
1.12 Was ist Thermodynamik ?	7
1.2 System und Zustand	9
1.21 System und Systemgrenze	9
1.22 Zustand und Zustandsgrößen	10
1.23 Intensive, extensive, spezifische und molare Zustandsgrößen	13
1.24 Einfache Systeme	15
1.3 Temperatur	16
1.31 Das thermische Gleichgewicht	16
1.32 Nullter Hauptsatz und Temperatur	17
1.33 Thermometer und empirische Temperaturen	19
1.34 Die Temperatur des idealen Gasthermometers. Celsius-Temperatur	20
1.35 Die thermische Zustandsgleichung	24
1.4 Der thermodynamische Prozeß	26
1.41 Prozeß und Zustandsänderung	26
1.42 Natürliche Prozesse	29
1.43 Reversible und irreversible Prozesse	29
1.44 Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik als Prinzip der Irreversibilität	32
1.45 Quasistatische Zustandsänderungen und irreversible Prozesse	33
1.46 Stationäre Fließprozesse	34

2. Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik

2.1 Arbeit	38
2.11 Mechanische Arbeit und mechanische Energie	38
2.12 Volumenänderungsarbeit	41
2.13 Wellenarbeit	46
2.14 Arbeit an einem Massenelement eines strömenden Fluids	49
2.15 Elektrische Arbeit und Arbeit bei nicht einfachen Systemen	52
2.2 Der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme	56
2.21 Innere Energie	56
2.22 Wärme	58
2.23 Der 1. Hauptsatz für ruhende geschlossene Systeme	61
2.24 Der 1. Hauptsatz für bewegte geschlossene Systeme	63
2.25 Die kalorische Zustandsgleichung	66
2.3 Der 1. Hauptsatz für stationäre Fließprozesse	70
2.31 Technische Arbeit	70
2.32 Der 1. Hauptsatz für stationäre Fließprozesse	71
2.33 Instationäre Prozesse in offenen Systemen. Strömungsenergie	77
2.34 Enthalpie	82
2.35 Kreisprozesse mit stationär umlaufendem Fluid	85

3. Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik

3.1 Entropie und thermodynamische Temperatur	91
3.11 Das Prinzip der Irreversibilität, angewendet auf adiabate Systeme	91
3.12 Die empirische Entropie	95
3.13 Metrische Entropie und thermodynamische Temperatur	101
3.14 Entropie und 2. Hauptsatz der Thermodynamik	105
3.15 Das T, s -Diagramm	109
3.2 Entropie, Wärme und Dissipationsenergie	112
3.21 Die Irreversibilität des Wärmeübergangs	112
3.22 Entropietransport und Entropieerzeugung	118
3.23 Dissipationsenergie	120
3.24 Die Entropiebilanz für einen stationären Fließprozeß	124
3.3 Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf Energieumwandlungen: Exergie und Anergie	128
3.31 Die beschränkte Umwandelbarkeit der Energie	128
3.32 Der Einfluß der Umgebung auf die Energieumwandlungen	131
3.33 Exergie und Anergie	135
3.34 Exergie und Anergie der Wärme und die Umwandlung von Wärme in Nutzarbeit	139
3.35 Exergie und Anergie eines stationär strömenden Fluids	144
3.36 Die Berechnung von Exergieverlusten	148
3.37 Exergie-Anergie-Flußbilder. Exergetische Wirkungsgrade	151

4. Thermodynamische Eigenschaften reiner Stoffe

4.1 Die thermischen Zustandsgrößen reiner Stoffe	157
4.11 Die p, v, T -Fläche	157
4.12 Das p, T -Diagramm	160
4.13 Die thermische Zustandsgleichung für Fluide	161
4.14 Die heterogenen Zustandsgebiete	165
4.2 Das Naßdampfgebiet	167
4.21 Nasser Dampf	167
4.22 Die Zustandsgrößen im Naßdampfgebiet	170
4.23 Die Gleichung von Clausius-Clapeyron	175
4.3 Zustandsgleichungen, Tafeln und Diagramme für Fluide	177
4.31 Die Bestimmung von Enthalpie und Entropie mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung	178
4.32 Tafeln der Zustandsgrößen	183
4.33 Zustandsdiagramme	185
4.34 Die Bestimmung isentroper Enthalpiedifferenzen	190
4.4 Der Zustandsbereich des Festkörpers	193
4.41 Ausdehnungs- und Kompressibilitätskoeffizient	193
4.42 Die spezifische Wärmekapazität	195
4.43 Schmelzen und Sublimieren	198

5. Ideale Gase, Gas- und Gas-Dampf-Gemische

5.1 Ideale Gase	201
5.11 Thermische und kalorische Zustandsgleichung	201
5.12 Die allgemeine Gaskonstante	202
5.13 Die spezifische Wärmekapazität	203
5.14 Entropie und isentrope Zustandsänderungen idealer Gase	206
5.2 Ideale Gasgemische	208
5.21 Masse- und Molanteile. Partialdrücke	208
5.22 Eigenschaften idealer Gasgemische	211
5.23 Die Entropie idealer Gasgemische	213
5.3 Gas-Dampf-Gemische. Feuchte Luft	216
5.31 Allgemeines	216

5.32 Der Sättigungsdruck des Dampfes	217
5.33 Der Taupunkt	219
5.34 Feuchte Luft	220
5.35 Der Wassergehalt feuchter Luft	221
5.36 Absolute und relative Feuchte	223
5.37 Das spez. Volumen feuchter Luft	225
5.38 Die spez. Enthalpie feuchter Luft	225
5.39 Das h, x -Diagramm für feuchte Luft	228

6. Stationäre Fließprozesse

6.1 Technische Arbeit, Dissipationsenergie und die Zustandsänderung des strömenden Fluids	232
6.11 Dissipationsenergie in einem stationär strömenden Fluid	232
6.12 Dissipationsenergie und technische Arbeit. Eindimensionale Theorie	234
6.13 Eigenarbeit. Hydraulischer Wirkungsgrad	239
6.2 Strömungsprozesse	243
6.21 Strömungsprozesse mit Wärmezufuhr	244
6.22 Die Schallgeschwindigkeit	245
6.23 Der gerade Verdichtungsstoß	247
6.24 Adiabate Strömungsprozesse	252
6.25 Adiabate Düsen- und Diffusor-Strömung	257
6.26 Querschnittsflächen und Massenstromdichte bei isentroper Düsen- und Diffusor-Strömung	261
6.27 Strömungszustand in einer Laval-Düse bei verändertem Gegendruck	265
6.3 Mischungsprozesse	267
6.31 Masse-, Energie- und Entropie-Bilanzen	267
6.32 Isobar-isotherme Mischung idealer Gase	272
6.33 Mischung zweier Ströme feuchter Luft	275
6.34 Zusatz von Wasser und Wasserdampf zu feuchter Luft	278
6.4 Arbeitsprozesse	279
6.41 Adiabate Expansion in Turbinen	279
6.42 Adiabate Verdichtung	282
6.43 Dissipationsenergie, Arbeitsverlust und Exergieverlust bei der adiabaten Expansion und Kompression	284
6.44 Nichtadiabatische Verdichtung	289

7. Thermodynamik der Kälteerzeugung

7.1 Heizen und Kühlen als thermodynamische Grundaufgaben	293
7.11 Exergie und Anergie bei der Wärmeübertragung	293
7.12 Die Grundaufgabe der Heiztechnik und der Kältetechnik	294
7.13 Reversible und irreversible Heizung. Wärmepumpe	297
7.14 Die Kältemaschine	301
7.2 Einige Verfahren zur Kälteerzeugung	306
7.21 Die Kaltdampf-Kompressionskältemaschine	307
7.22 Prozeßverbesserungen. Mehrstufige Kompressionskälteanlagen	313
7.23 Die Gaskältemaschine mit adiabater Entspannung	318
7.24 Das Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung	323

8. Verbrennungsprozesse

8.1 Allgemeines	327
8.2 Mengenberechnungen bei vollständiger Verbrennung	328
8.21 Die Verbrennungsgleichungen	328
8.22 Gemische chemisch einheitlicher Stoffe	330
8.23 Feste und flüssige Brennstoffe	332
8.24 Feuerungskontrolle durch Abgasanalyse	334

8.3 Energetik der Verbrennungsprozesse	336
8.31 Die Anwendung des 1.Hauptsatzes	336
8.32 Der spez. Heizwert des Brennstoffs	338
8.33 Das h, t -Diagramm der Verbrennung	341
8.34 Chemisch einheitliche Stoffe. Reaktionsenthalpie	346
8.4 Die Anwendung des 2.Hauptsatzes auf Verbrennungsprozesse	349
8.41 Die reversible chemische Reaktion	349
8.42 Absolute Entropien. Nernstsches Wärmetheorem	351
8.43 Die Brennstoffzelle	354
8.44 Die Exergie der Brennstoffe	359
8.45 Der Exergieverlust der adiabaten Verbrennung	363
9. Thermodynamik der Wärme- und Verbrennungs-Kraftanlagen	
9.1 Die Umwandlung chemischer und nuklearer Energie in Nutzarbeit und elektrische Energie	369
9.11 Übersicht über die Umwandlungsverfahren	369
9.12 Wärme- und Verbrennungs-Kraftanlagen	372
9.2 Die einfache Dampfkraftanlage	374
9.21 Der Dampferzeuger	374
9.22 Der Kreisprozeß des Wassers	380
9.23 Der exergetische Gesamtwirkungsgrad und seine Begrenzung durch die Endnässe	387
9.3 Verbesserungen der einfachen Dampfkraftanlage	390
9.31 Zwischenüberhitzung	390
9.32 Kombinierte Luft- und Speisewasservorwärmung	394
9.33 Das moderne Dampfkraftwerk	399
9.4 Gaskraftanlagen	399
9.41 Die geschlossene Gasturbinenanlage	400
9.42 Die offene Gasturbinenanlage	406
9.43 Verbesserungen des Gasturbinenprozesses	411
10. Anhang: Einheiten. Tabellen	
10.1 Die Stoffmenge und ihre Maße	413
10.11 Masse, Gewicht und Gewichtskraft	413
10.12 Teilchenzahl und Substanzmenge	416
10.13 Normzustand und Normvolumen	418
10.2 Einheiten	420
10.21 Die Einheiten des Internationalen Einheitensystems	420
10.22 Einheiten anderer Einheitensysteme. Umrechnungsfaktoren	423
10.3 Tabellen	424
Sachverzeichnis	433