

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Formelzeichen	IX
Indizes.....	XIII
1 Grundbegriffe	1
1.1 Energie	2
1.2 Thermodynamische Systeme	3
1.3 Thermodynamischer Zustand	5
1.3.1 Zustandsgrößen einfacher Systeme	6
1.3.2 Intensive und extensive Zustandsgrößen	6
1.3.3 Spezifische und molare Zustandsgrößen	7
1.3.4 Thermische und kalorische Zustandsgrößen	10
1.4 Zustandsgleichungen	11
1.4.1 Festlegung des thermodynamischen Zustands	11
1.4.2 Thermische Zustandsgleichung	12
1.4.3 Kalorische Zustandsgleichungen	12
1.5 Zustandsänderungen	13
1.5.1 Quasistatische und nichtstatische Zustandsänderungen	13
1.5.2 Reversible und irreversible Zustandsänderungen	16
1.5.3 Thermodynamischer Prozess und Kreisprozess	18
1.6 Temperatur	19
1.6.1 Gesetzliche Festlegung	19
1.6.2 Thermisches Gleichgewicht	21
1.6.3 Nullter Hauptsatz	22
1.6.4 Die Zustandsgröße Temperatur ϑ	23
1.6.5 Temperaturskalen	23
1.6.6 Thermometer	26
1.6.6.1 Flüssigkeitsthermometer	26
1.6.6.2 Thermoelemente	28
1.6.6.3 Widerstandsthermometer	30

1.6.6.4	Strahlungsthermometer	31
1.7	Thermodynamisches Gleichgewicht	31
1.8	Wärme	32
1.9	Arbeit	34
1.9.1	Volumenarbeit	37
1.9.2	Verschiebearbeit	38
1.9.3	Mechanische Arbeit	38
1.9.4	Technische Arbeit	39
1.10	Dissipationsenergie	39
1.11	Innere Energie, Gesamtenergie eines Systems	40
1.12	Enthalpie	41
1.13	Entropie	41
1.14	Exergie, Anergie	42
1.15	Idealisierungen	43
1.15.1	Reversible Zustandsänderung	43
1.15.2	Ideales Gas	43
1.16	Erfahrungssätze	43
1.17	Diagramme	44
1.17.1	Aufbau der Diagramme	44
1.17.2	Darstellung bei reversiblen und irreversiblen Zustandsänderungen	45
1.17.3	Volumenarbeit im p, v -Diagramm	46
1.17.4	Darstellung von Kreisprozessen im p, v -Diagramm	49
1.18	Mathematische Beziehungen	51
1.18.1	Unterschied zwischen Zustandsgrößen und Prozessgrößen	51
1.18.2	Das vollständige Differential	54
1.18.3	Integrierender Faktor	57
2	Der 1. Hauptsatz	61
2.1	Der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme	61
2.1.1	Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit	61
2.1.2	Innere Energie	63
2.1.3	Mathematische Form des 1. Hauptsatzes für geschlossene Systeme	64
2.1.4	Der 1. Hauptsatz für Kreisprozesse	65
2.1.5	Formulierungen und Folgerungen	67
2.1.6	Bewegtes geschlossenes System	69
2.1.7	Enthalpie	70

2.2	Der 1. Hauptsatz für offene Systeme	72
2.2.1	Stationäre Strömung; instationäre Strömung	72
2.2.2	Technische Arbeit, Leistung	73
2.2.3	Modell und Energiebilanz für das offene System	74
2.2.4	Mathematische Form des 1. Hauptsatzes für offene Systeme	77
2.2.5	Technische Arbeit im p , v -Diagramm	78
2.3	Thermischer Wirkungsgrad und Leistungszahl	80
2.3.1	Thermischer Wirkungsgrad von Wärmekraftprozessen	80
2.3.2	Leistungszahl für Kälte- und Wärmepumpenprozesse	82
2.4	Wärmekapazität	83
2.4.1	Spezifische Wärmekapazität, molare Wärmekapazität	83
2.4.2	Mittlere spezifische Wärmekapazität	85
2.5	Zusammenstellung der mathematischen Formen des 1. Hauptsatzes	88
2.5.1	Geschlossenes System	88
2.5.1.1	Ruhendes geschlossenes System	88
2.5.1.2	Bewegtes geschlossenes System	88
2.5.2	Offenes System, stationäre Durchströmung	89
2.5.3	Kreisprozess	89
3	Ideale Gase	93
3.1	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase	93
3.2	Kalorische Zustandsgleichungen idealer Gase	97
3.3	Theoretische Bestimmung von Zustandsgrößen	99
3.3.1	Kinetische Gastheorie	99
3.3.2	Molare innere Energie und molare Wärmekapazität	102
3.4	Entropie idealer Gase	104
3.5	Das T , s -Diagramm	105
3.6	Kriterien und Beziehungen für ideale Gase	108
3.7	Einfache Zustandsänderungen idealer Gase	110
3.7.1	Isochore Zustandsänderung	111
3.7.2	Isobare Zustandsänderung	113
3.7.3	Isotherme Zustandsänderung	114
3.7.4	Adiabate Zustandsänderung	116
3.7.5	Polytrope Zustandsänderung	118
3.8	Zustandsänderungen bei instationären Vorgängen	123
3.8.1	Füllen eines Behälters mit idealem Gas	123
3.8.2	Ausströmen eines idealen Gases aus einem Behälter	125

3.9	Der Carnot-Prozess für ideale Gase	128
3.9.1	Der rechtsgängige Prozess: Wärmekraftprozess	128
3.9.2	Der linksgängige Prozess: Kälteprozess bzw. Wärmepumpenprozess	132
4	Der 2. Hauptsatz	139
4.1	Formulierungen des 2. Hauptsatzes	139
4.2	Folgesätze des 2. Hauptsatzes	141
4.2.1	Erster Folgesatz	141
4.2.2	Zweiter und Dritter Folgesatz	142
4.2.3	Vierter Folgesatz	143
4.2.4	Fünfter Folgesatz	144
4.2.5	Sechster Folgesatz	147
4.3	Die Entropie	149
4.3.1	Definition der Entropie	149
4.3.2	Hauptgleichung der Thermodynamik	152
4.3.3	Allgemeine thermodynamische Beziehungen	152
4.3.4	Anwendungen der thermodynamischen Beziehungen	155
4.3.4.1	Spezifische Wärmekapazität	155
4.3.4.2	Kompressibilität, Ausdehnungskoeffizient, Spannungskoeffizient	156
4.3.4.3	Drosselkoeffizienten	158
4.3.4.4	Bestimmung der Entropie	161
4.3.4.5	Nachweis für $(\partial u / \partial v)_T = 0$ bei idealen Gasen	162
4.3.5	Entropiezunahme bei irreversiblen Prozessen	164
4.3.5.1	Strömung mit Reibung	164
4.3.5.2	Drosselung	169
4.3.5.3	Vermischung und Diffusion	170
4.3.5.4	Überströmversuch von Joule	172
4.3.5.5	Wärmeübertragung	172
4.4	Wirkungsgrade von arbeitsabgebenden und arbeitsaufnehmenden Maschinen ..	174
4.5	Die Exergie	175
4.5.1	Exergie der Wärme bei $T = \text{const.}$	179
4.5.2	Exergie geschlossener Systeme	180
4.5.2.1	Isochore Zustandsänderung, $v = \text{const.}$	182
4.5.2.2	Isobare Zustandsänderung, $p = \text{const.}$	184
4.5.2.3	Exergie für Reaktionen mit gleicher Anfangs- und Endtemperatur	185
4.5.3	Exergie offener stationärer Systeme	186
4.5.4	Exergieverlust bei irreversiblen Prozessen	188
4.5.5	Exergetischer Wirkungsgrad	190
4.5.6	Exergie-Anergie-Flussbilder	193

5	Mehrphasige Systeme reiner Stoffe	203
5.1	Grundlagen	203
5.2	Zustandsgrößen im Zweiphasengebiet	206
5.2.1	Dampfgehalt	206
5.2.2	Spezifisches Volumen	207
5.2.3	Spezifische innere Energie, Enthalpie und Entropie	208
5.3	Diagramme im Zweiphasengebiet	209
5.3.1	Temperatur, Volumen-Diagramm; T, v -Diagramm	209
5.3.2	Druck, Volumen-Diagramm; p, v -Diagramm	210
5.3.3	Druck, Temperatur-Diagramm; p, T -Diagramm	211
5.3.4	Zustandsfläche im p, v, T -Raum	211
5.3.5	Temperatur, Entropie-Diagramm; T, s -Diagramm	212
5.3.6	Enthalpie, Entropie-Diagramm; h, s -Diagramm	213
5.3.7	Druck, Enthalpie-Diagramm; $\log p, h$ -Diagramm	214
5.4	Zustandsgleichungen und Zahlentafeln	214
5.5	Einfache Zustandsänderungen im Zweiphasengebiet	217
5.5.1	Isobare, isotherme Zustandsänderung	217
5.5.2	Isochore Zustandsänderung	218
5.5.3	Adiabate Zustandsänderung	219
5.5.4	Isenthalpe Zustandsänderung (irreversibel adiabatisch)	220
5.6	Die Clausius-Clapeyron-Gleichung	221
5.7	Kreisprozesse mit Dämpfen	222
5.7.1	Dampfkraftprozesse (Rechtsgängige Prozesse)	222
5.7.1.1	Der Carnot-Prozess	225
5.7.1.2	Der Clausius-Rankine-Prozess	226
5.7.2	Kaltdampfprozesse (Linksgängige Prozesse)	229
5.7.2.1	Linksgängiger Carnot-Prozess	231
5.7.2.2	Der Kaltdampfprozess als Kälteprozess	231
5.7.2.3	Der Wärmepumpenprozess	233
5.8	Dreiphasengebiet	235
5.8.1	Zustandsdiagramme	235
5.8.2	Die Clausius-Clapeyron-Gleichung	238
6	Gemische von Gasen	245
6.1	Zusammensetzung, Konzentration	245
6.2	Gemische idealer Gase	248
6.2.1	Zustandsgleichung, Gaskonstante	248

6.2.2	Innere Energie, Enthalpie, Wärmekapazitäten	250
6.2.3	Entropie	251
6.2.4	Exergie	252
6.2.5	Zusammenstellung der Konzentrationsmaße; Zusammenstellung von Größen ..	253
6.3	Luft-Wasserdampf-Gemische (Feuchte Luft)	255
6.3.1	Konzentrationsmaße	255
6.3.2	Zustandsgrößen	259
6.3.2.1	Dichte des Gemisches	259
6.3.2.2	Enthalpie des Gemisches	260
6.3.3	Das h, x -Diagramm	262
6.3.4	Anwendungen des h, x -Diagrammes	265
6.3.4.1	Erwärmung und Kühlung bei konstantem Dampfgehalt ($x = \text{const.}$)	265
6.3.4.2	Trocknung feuchter Luft ($x \neq \text{const.}$)	267
6.3.4.3	Adiabate Vermischung zweier feuchter Luftströme	268
6.3.4.4	Zugabe von Flüssigkeit oder Dampf	270
6.3.4.5	Verdunstungskühlung (Nasskühlung)	272
6.3.4.6	Das Psychrometer-Prinzip	274
6.4	Binäre zweiphasige Systeme (Zweistoff-Zweiphasen-Gemisch)	277
6.4.1	Darstellung des Siedens und Kondensierens im Phasendiagramm	277
6.4.1.1	Das T, x -Diagramm	277
6.4.1.2	Das p, x -Diagramm	279
6.4.1.3	Gemische mit azeotropem Punkt	280
6.4.2	Das Enthalpie-, Konzentrations-Diagramm (h, w)	281
7	Vergleichsprozesse mit idealem Gas	287
7.1	Allgemeines	287
7.1.1	Arbeit, Leistung, Mitteldruck	288
7.1.2	Arbeitsmitteldurchsatz	289
7.2	Rechtsgängige Prozesse	290
7.2.1	Wirkungsgrade	290
7.2.2	Carnot-Prozess	291
7.2.3	Vergleichsprozesse für Otto-Motor und Diesel-Motor	292
7.2.3.1	Annahmen für den Vergleichsprozess	294
7.2.3.2	Definitionen	294
7.2.3.3	Wirkungsgrade	296
7.2.3.4	Mitteldruck	298
7.2.3.5	Vergleich des realen Otto-Prozesses mit dem Vergleichsprozess	299
7.2.4	Stirlingmotor	300
7.2.4.1	Stirling-Prozess	300
7.2.4.2	Thermischer Wirkungsgrad	302

7.2.4.3	Mitteldruck	302
7.2.5	Heißgasmotor	303
7.2.5.1	Ericson-Prozess	303
7.2.5.2	Thermischer Wirkungsgrad	304
7.2.5.3	Mitteldruck	304
7.2.6	Gasturbinenanlagen, Strahltriebwerke	305
7.2.6.1	Offene und geschlossene Gasturbinenanlagen ohne Wärmerückführung	305
7.2.6.2	Joule-Prozess	305
7.2.6.3	Offene und geschlossene Gasturbinenanlagen mit Wärmerückführung	308
7.2.6.4	Strahltriebwerke	310
7.2.6.5	Raketen	314
7.2.6.6	Äußerer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad von Strahltriebwerken und Raketen	315
7.2.7	Vergleich der Vergleichsprozesse	316
7.3	Linksgängige Prozesse	318
7.3.1	Verdichter (Kompressoren)	318
7.3.1.1	Vergleichsprozess	319
7.3.1.2	Arbeit, Leistung	320
7.3.1.3	Wirkungsgrade	321
7.3.1.4	Definitionen	321
7.3.2	Mehrstufige Verdichter	323
7.3.3	Gaskältemaschinen	325
7.3.3.1	Stirling-Prozess	326
7.3.3.2	Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung	328
8	Vergleichsprozesse mit Dämpfen	337
8.1	Dampfkraftanlagen	337
8.1.1	Thermodynamische Mitteltemperatur und Wirkungsgrade	338
8.1.2	Exergetische Wirkungsgrade	339
8.1.3	Clausius-Rankine-Prozess	341
8.1.3.1	Clausius-Rankine-Prozess mit Zwischenüberhitzung	342
8.1.3.2	Regenerative Speisewasservorwärmung	343
8.1.4	Gas-Dampf-Kraftprozesse (GD-Prozesse)	346
8.2	Kaltdampfprozesse	348
8.2.1	Exergetische Behandlung von Kälteprozessen	349
8.2.2	Irreversibel ablaufende Kälteprozesse	351
9	Strömungsvorgänge	357
9.1	Allgemeines	357
9.2	Grundlagen	357

9.3	Strömung kompressibler Medien in Düsen und Diffusoren	360
9.3.1	Düsen und Diffusoren	360
9.3.2	Ausströmung aus Behältern durch sich verengende Düsen	361
9.3.2.1	Ausströmgeschwindigkeit	361
9.3.2.2	Ausströmende Masse, Durchflussfunktion	363
9.3.2.3	Schallgeschwindigkeit	367
9.3.2.4	Schallgeschwindigkeit bei Ausströmung aus einer sich verengenden Düse	367
9.3.3	Strömung durch konvergente Düsen	371
9.3.4	Laval-Düse	372
9.3.4.1	Grundlagen	372
9.3.4.2	Zusammenstellung der Gleichungen	375
9.3.4.3	Druck- und Geschwindigkeitsverlauf in einer Laval-Düse und in Diffusoren wenn $c_0 = 0$ und $c_0 \neq 0$	376
9.3.5	Verdichtungsstöße	381
9.3.5.1	Grundgleichungen	382
9.3.5.2	Darstellung des Verdichtungsstoßes im Diagramm	387
9.3.6	Bewertungsgrößen von Düsen und Diffusoren	389
10	Verbrennungsprozesse	397
10.1	Allgemeines	397
10.1.1	Größen und Symbole	399
10.2	Brennwert, Heizwert	400
10.2.1	Brennwert	400
10.2.1.1	Messung des Brennwertes	402
10.2.1.2	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsenthalpie	404
10.2.2	Heizwert	404
10.2.3	Berechnung von Brennwert und Heizwert	406
10.2.3.1	Brennstoffgemische	407
10.2.3.2	Chemische Verbindungen	407
10.2.3.3	Verbandsformeln	408
10.3	Sauerstoff- und Luftbedarf	410
10.3.1	Mindestbedarf an Sauerstoff für feste und flüssige Brennstoffe	410
10.3.2	Mindestbedarf an Sauerstoff für gasförmige Brennstoffe	411
10.3.3	Luftbedarf und Luftüberschuss	412
10.4	Brennstoffkennzahlen	415
10.4.1	Kennzahl für den Sauerstoffbedarf, σ	415
10.4.2	Kennzahl für den Stickstoffgehalt, ν	417
10.5	Rauchgase	417
10.5.1	Feuchte Rauchgase fester und flüssiger Brennstoffe	417
10.5.2	Feuchte Rauchgase gasförmiger Brennstoffe	419

10.5.3	Näherungsgleichungen	421
10.5.4	Trockene Rauchgase	421
10.5.5	Anwendung für die Rauchgasanalyse	422
10.6	Verbrennungstemperatur	423
10.6.1	Rauchgasenthalpie und Rauchgastemperatur	423
10.6.2	Maximale Verbrennungstemperatur	425
10.6.3	Schornsteinverluste	427
10.6.4	Wärmekapazität der Rauchgase	428
10.6.5	Das h, ϑ -Diagramm	429
10.7	Feuerungswirkungsgrad	432
10.8	Irreversibilität der Verbrennung	433
10.8.1	Reaktionsarbeit und Reaktionsentropie	433
10.8.2	Absolute Entropie, Dritter Hauptsatz, Standardentropie	435
10.8.3	Brennstoffexergie	438
10.8.4	Exergieverluste bei der Verbrennung	441
10.8.5	Exergetischer Wirkungsgrad	443
Anhang		451
Anhang 1:	Lösungen der Aufgaben	451
Anhang 2:	Thermodynamische Größen einiger Stoffe	460
Anhang 3:	Berechnung der Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf	460
Anhang 4:	h, x -Diagramm	475
Anhang 5:	Wirkungsgrade von Energiewandlungsanlagen in der Technik	476
Anhang 6:	Beispiele für Energien und Leistungen	477
Anhang 7:	Beispiele für Leistungsdichten	477
Anhang 8:	Tripelpunkte und kritische Daten einiger Stoffe	478
Anhang 9:	Literatur	479
Anhang 10:	Sachverzeichnis	482