

Technische Thermodynamik

Einführung und Anwendung

von

Erich Hahne

4., überarbeitete Auflage

Oldenbourg Verlag München Wien

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	15
Vorwort zur 2. Auflage	17
Formelzeichen	19
I	
Grundbegriffe	25
1.1	Energie
1.2	Thermodynamische Systeme
1.3	Thermodynamischer Zustand
3.1	Zustandsgrößen einfacher Systeme
3.2	Intensive und extensive Zustandsgrößen
3.3	Spezifische und molare Zustandsgrößen
3.4	Thermische und kalorische Zustandsgrößen
1.4	Zustandsgleichungen
4.1	Festlegung des thermodynamischen Zustands
4.2	Thermische Zustandsgleichung
4.3	Kalorische Zustandsgleichungen
1.5	Zustandsänderungen
5.1	Quasistatische und nichtstatische Zustandsänderungen ...
5.2	Reversible und irreversible Zustandsänderungen
5.3	Thermodynamischer Prozeß und Kreisprozeß
1.6	Temperatur
6.1	Gesetzliche Festlegung
6.2	Thermisches Gleichgewicht
6.3	Nullter Hauptsatz
6.4	Die Zustandsgröße Temperatur •&
6.5	Temperaturskalen
6.6	Thermometer

Inhaltsverzeichnis

6.6.1	Flüssigkeitsthermometer	51
6.6.2	Thermoelemente	52
6.6.3	Widerstandsthermometer	55
6.6.4	Strahlungsthermometer	56
1.7	Thermodynamisches Gleichgewicht	56
1.8	Wärme	57
1.9	Arbeit	60
9.1	Volumenarbeit	62
9.2	Verschiebearbeit	63
9.3	Mechanische Arbeit	64
9.4	Technische Arbeit	64
1.10	Dissipationsenergie	65
1.11	Innere Energie, Gesamtenergie eines Systems	66
1.12	Enthalpie	67
1.13	Entropie	67
1.14	Exergie, Anergie	68
1.15	Idealisierungen	68
15.1	Reversible Zustandsänderungen	68
15.2	Ideales Gas	69
1.16	Erfahrungssätze	69
1.17	Diagramme	70
17.1	Aufbau der Diagramme	70
17.2	Darstellung bei reversiblen und irreversiblen Zustandsänderungen	71
17.3	Volumenarbeit im p , u -Diagramm	72
17.4	Darstellung von Kreisprozessen im p , w -Diagramm	75
1.18	Mathematische Beziehungen	77
18.1	Unterschied zwischen Zustandsgrößen und Prozeßgrößen	77
18.2	Das vollständige Differential	80
18.3	Integrierender Faktor	83
II	Der 1. Hauptsatz	87
II.1	Der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme	87
1.1	Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit	87
1.2	Innere Energie	89
1.3	Mathematische Form des 1. Hauptsatzes für geschlossene Systeme	90
1.4	Der 1. Hauptsatz für Kreisprozesse	91
1.5	Formulierungen und Folgerungen	93
1.6	Bewegtes geschlossenes System	95
1.7	Enthalpie	96

Inhaltsverzeichnis

II. 2	Der 1. Hauptsatz für offene Systeme	98
2.1	Stationäre Strömung; instationäre Strömung	99
2.2	Technische Arbeit, Leistung	100
2.3	Modell und Energiebilanz für das offene System	101
2.4	Math. Form des 1. Hauptsatzes für offene Systeme	104
2.5	Technische Arbeit im p, «-Diagramm	105
II. 3	Thermischer Wirkungsgrad und Leistungszahl	107
3.1	Thermischer Wirkungsgrad von Wärmekraftprozessen	107
3.2	Leistungszahl für Kälte- und Wärmepumpenprozesse	108
II. 4	Wärmekapazität	109
4.1	Spezifische Wärmekapazität, molare Wärmekapazität	109
4.2	Mittlere Wärmekapazität	111
II. 5	Zusammenstellung der mathematischen Formen des 1. Hauptsatzes	114
5.1	Geschlossenes System	114
5.1.1	Ruhendes geschlossenes System	114
5.1.2	Bewegtes geschlossenes System	114
5.2	Offenes System, stationäre Durchströmung	115
5.3	Kreisprozeß	115
III	Ideale Gase	119
III. 1	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase	119
III. 2	Kalorische Zustandsgleichung idealer Gase	123
III. 3	Theoretische Bestimmung von Zustandsgrößen	125
3.1	Kinetische Gastheorie	125
3.2	Molare innere Energie und molare Wärmekapazität	127
III. 4	Entropie idealer Gase	129
III. 5	Das T, s-Diagramm	130
III. 6	Kriterien und Beziehungen für das ideale Gas	133
III. 7	Einfache Zustandsänderungen idealer Gase	135
7.1	Isochore Zustandsänderung	136
7.2	Isobare Zustandsänderung	137
7.3	Isotherme Zustandsänderung	139
7.4	Adiabate Zustandsänderung	140
7.5	Polytrope Zustandsänderung	143
III. 8	Zustandsänderungen bei instationären Vorgängen	147
8.1	Füllen eines Behälters mit idealem Gas	147
8.2	Ausströmen eines idealen Gases aus einem Behälter	149
III. 9	Der Carnot-Prozeß für ideale Gase	152
9.1	Der rechtsgängige Prozeß: Wärmekraftprozeß	152
9.2	Der linksgängige Prozeß: Kälteprozeß bzw. Wärmepumpenprozeß	156

IV	Der 2. Hauptsatz	165
IV.1	Formulierungen des 2. Hauptsatzes	165
IV.2	Folgesätze des 2. Hauptsatzes	167
2.1	Erster Folgesatz	167
2.2	Zweiter und Dritter Folgesatz	168
2.3	Vierter Folgesatz	170
2.4	Fünfter Folgesatz	171
2.5	Sechster Folgesatz	173
IV.3	Die Entropie	175
3.1	Definition der Entropie	175
3.2	Hauptgleichung der Thermodynamik	178
3.3	Allgemeine thermodynamische Beziehungen	178
3.4	Anwendungen der thermodynamischen Beziehungen	181
3.4.1	Spezifische Wärmekapazität	181
3.4.2	Kompressibilität, Ausdehnungskoeffizient, Spannungskoeffizient	182
3.4.3	Drosselkoeffizienten	185
3.4.4	Bestimmung der Entropie	187
3.4.5	Nachweis für $(du/dv)T = 0$ bei idealen Gasen	188
3.5	Entropiezunahme bei irreversiblen Prozessen	190
3.5.1	Strömung mit Reibung	190
3.5.2	Drosselung	195
3.5.3	Vermischung und Diffusion	197
3.5.4	Überströmversuch von Joule	199
3.5.5	Wärmeübertragung	199
IV.4	Wirkungsgrade von arbeitsabgebenden und arbeitsaufnehmenden Maschinen	200
IV.5	Die Exergie	202
5.1	Exergie der Wärme bei $T = \text{const}$	206
5.2	Exergie geschlossener Systeme	207
5.2.1	Isochore Zustandsänderung, $v = \text{const}$	209
5.2.2	Isobare Zustandsänderung, $p = \text{const}$	211
5.2.3	Exergie für Reaktionen mit gleicher Anfangs- und Endtemperatur	212
5.3	Exergie offener stationärer Systeme	213
5.4	Exergieverlust bei irreversiblen Prozessen	215
5.5	Exergetischer Wirkungsgrad	217
5.5.1	Exergetischer Wirkungsgrad von Wärmeübertragern	218
5.6	Exergie-Anergie-Flußbilder	221

V	Mehrphasige Systeme	233
V.1	Grundlagen	233
V.2	Zustandsgrößen im Zweiphasengebiet	236
2.1	Dampfgehalt	237
2.2	Spezifisches Volumen	237
2.3	Spezifische innere Energie, Enthalpie und Entropie	238
V.3	Diagramme im Zweiphasengebiet	239
3.1	Temperatur, Volumen-Diagramm; T , v -Diagramm	239
3.2	Druck, Volumen-Diagramm; p , v -Diagramm	240
3.3	Druck, Temperatur-Diagramm; p , T -Diagramm	241
3.4	Zustandsfläche im p , v , T -Raum	242
3.5	Temperatur, Entropie-Diagramm; T , s -Diagramm	242
3.6	Enthalpie, Entropie-Diagramm; h , s -Diagramm	243
3.7	Druck, Enthalpie-Diagramm; $\log p$, i -Diagramm	244
V.4	Zustandsgleichungen und Zahlentafeln	245
V.5	Einfache Zustandsänderungen im Zweiphasengebiet	248
5.1	Isobare, isotherme Zustandsänderung	248
5.2	Isochore Zustandsänderung	249
5.3	Adiabate Zustandsänderung	250
5.4	Isenthalpe Zustandsänderung (irreversibel adiabat)	251
V.6	Die Clausius-Clapeyron-Gleichung	251
V.7	Kreisprozesse mit Dämpfen	252
7.1	Dampfkraftprozesse (Rechtsgängige Prozesse)	253
7.1.1	Der Carnot-Prozeß	255
7.1.2	Der Clausius-Rankine-Prozeß	257
7.2	Kaltdampfprozesse (Linksgängige Prozesse)	260
7.2.1	Linksgängiger Carnot-Prozeß	261
7.2.2	Der Kaltdampfprozeß als Kälteprozeß	262
7.2.3	Der Wärmepumpenprozeß	264
V.8	Dreiphasengebiet	267
8.1	Zustandsdiagramme	267
8.2	Die Clausius-Clapeyron Gleichung	269
VI	Gemische von Gasen	277
VI.1	Zusammensetzung, Konzentration	277
VI.2	Gemische idealer Gase	280
2.1	Zustandsgleichung, Gaskonstante	280
2.2	Innere Energie, Enthalpie, Wärmekapazitäten	281
2.3	Entropie	283
2.4	Exergie	284
2.5	Zusammenstellung der Konzentrationsmaße; Zusammenstellung von Größen	284

VI. 3	Luft-Wasserdampf-Gemische (Feuchte Luft)	286
3.1	Konzentrationsmaße	286
3.2	Zustandsgrößen	290
3.2.1	Dichte des Gemisches	290
3.2.2	Enthalpie des Gemisches	291
3.3	Das h, x -Diagramm	293
3.3.1	Konstruktion des h, x -Diagramms	294
3.4	Anwendungen des h, x -Diagrammes	297
3.4.1	Erwärmung und Kühlung bei konstantem Dampfgehalt ($x = \text{const.}$)	297
3.4.2	Trocknung feuchter Luft ($x \wedge \text{const.}$)	298
3.4.3	Adiabate Vermischung zweier feuchter Luftströme	300
3.4.4	Zugabe von Flüssigkeit oder Dampf	302
3.4.5	Adiabate Kühlung (Naßkühlung)	304
3.4.6	Das Psychrometer-Prinzip	306
VI. 4	Binäre zweiphasige Systeme (Zweistoff- Zweiphasen-Gemisch)	309
4.1	Darstellung des Siedens und Kondensierens im Phasendiagramm	309
4.1.1	Das T, x -Diagramm	309
4.1.2	Das p, x -Diagramm	312
4.1.3	Gemische mit azeotropem Punkt	313
4.2	Das Enthalpie-, Konzentrations-Diagramm (h, w)	314
VII	Vergleichsprozesse mit idealem Gas	321
VII. 1	Allgemeines	321
1.1	Arbeit, Leistung, Mitteldruck	322
1.2	Arbeitsmitteldurchsatz	324
VII. 2	Rechtsgängige Prozesse	324
2.1	Wirkungsgrade	324
2.2	Carnot-Prozeß	325
2.3	Vergleichsprozesse für Otto-Motor und Diesel-Motor	327
2.3.1	Annahmen für den Vergleichsprozeß	329
2.3.2	Definitionen	330
2.3.3	Wirkungsgrade	330
2.3.4	Mitteldruck	332
2.3.5	Vergleich des realen Otto-Prozesses mit dem Vergleichsprozeß	334
2.4	Stirlingmotor	335
2.4.1	Stirling-Prozeß	335
2.4.2	Thermischer Wirkungsgrad	337
2.4.3	Mitteldruck	337

2.5	Heißgasmotor	338
2.5.1	Ericson-Prozeß	338
2.5.2	Thermischer Wirkungsgrad	339
2.5.3	Mitteldruck	339
2.6	Gasturbinenanlagen, Strahltriebwerke	340
2.6.1	Offene und geschlossene Gasturbinenanlage ohne Wärmerückführung	340
2.6.2	Joule-Prozeß	340
2.6.2.1	Thermischer Wirkungsgrad	342
2.6.2.2	Mitteldruck	342
2.6.3	Offene und geschlossene Gasturbinenanlagen mit Wärmerückführung	343
2.6.3.1	Thermischer Wirkungsgrad	344
2.6.3.2	Mitteldruck	345
2.6.3.3	Mehrstufige Gasturbinenprozesse	345
2.6.4	Strahltriebwerke	345
2.6.4.1	Thermischer Wirkungsgrad	348
2.6.5	Raketen	349
2.6.6	Äußerer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad von Strahltriebwerken und Raketen	351
2.7	Vergleich der Vergleichsprozesse	352
VII.3	Linksgängige Prozesse	354
3.1	Verdichter (Kompressoren)	354
3.1.1	Vergleichsprozeß	354
3.1.2	Arbeit, Leistung	356
3.1.3	Wirkungsgrade	357
3.1.4	Definitionen	357
3.2	Mehrstufige Verdichter	359
3.3	Gaskältemaschinen	361
3.3.1	Stirling-Prozeß	363
3.3.2	Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung	364
VIII	Vergleichsprozesse mit Dämpfen	375
VIII.1	Dampfkraftanlagen	375
1.1	Thermodynamische Mitteltemperatur und Wirkungsgrade	376
1.2	Exergetische Wirkungsgrade	377
1.3	Clausius-Rankine-Prozeß	380
1.3.1	Clausius-Rankine-Prozeß mit Zwischenüberhitzung	380
1.3.2	Regenerative Speisewasservorwärmung	382
1.4	Gas-Dampf-Kraftprozesse (GD-Prozesse)	385
VIII.2	Kaltdampfprozesse	387
2.1	Exergetische Behandlung von Kälteprozessen	388
2.2	Irreversibel ablaufende Kälteprozesse	390

IX	Strömungsvorgänge	395
IX. 1	Allgemeines	395
IX.2	Grundlagen	395
IX. 3	Strömungen kompressibler Medien in Düsen und	
	Diffusoren	398
3.1	Düsen und Diffusoren	398
3.2	Ausströmung aus Behältern durch sich	
	verengende Düsen	399
3.2.1	Ausströmgeschwindigkeit	399
3.2.2	Ausströmende Masse, Durchflußfunktion	401
3.2.3	Schallgeschwindigkeit	405
3.2.4	Schallgeschwindigkeit bei Ausströmung aus einer	
	sich verengenden Düse	406
3.3	Strömung durch konvergente Düsen	410
3.4	Laval-Düse	410
3.4.1	Grundlagen	410
3.4.2	Zusammenstellung der Gleichungen	414
3.4.3	Druck- und Geschwindigkeitsverlauf in einer	
	Laval-Düse und in Diffusoren	415
3.5	Verdichtungsstöße	421
3.5.1	Grundgleichungen	421
3.5.2	Darstellung des Verdichtungsstoßes im Diagramm	426
3.6	Bewertungsgrößen von Düsen und Diffusoren	428
X	Verbrennungsprozesse	439
X. 1	Allgemeines	439
1.1	Größen und Symbole	441
X.2	Brennwert, Heizwert	442
2.1	Brennwert	442
2.1.1	Messung des Brennwertes	444
2.1.2	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsenthalpie	446
2.2	Heizwert	446
2.3	Berechnung von Brennwert und Heizwert	448
2.3.1	Brennstoffgemische	448
2.3.2	Chemische Verbindungen	449
2.3.3	Verbandsformeln	450
X.3	Sauerstoff- und Luftbedarf	451
3.1	Mindestbedarf an Sauerstoff für feste und flüssige	
	Brennstoffe	451
3.2	Mindestbedarf an Sauerstoff für gasförmige Brennstoffe	452
3.3	Luftbedarf und Luftüberschuß	454

X. 4	Brennstoffkennzahlen	457
4.1	Kennzahl für den Sauerstoffbedarf, er	457
4.2	Kennzahl für den Stickstoffgehalt, v	458
X. 5	Rauchgase	458
5.1	Feuchte Rauchgase fester und flüssiger Brennstoffe	459
5.2	Feuchte Rauchgase gasförmiger Brennstoffe	460
5.3	Näherungsgleichungen	462
5.4	Trockene Rauchgase	462
5.5	Anwendung für die Rauchgasanalyse	463
X.6	Verbrennungstemperatur	464
6.1	Rauchenthalpie und Rauchgastemperatur	464
6.2	Maximale Verbrennungstemperatur	466
6.3	Schornsteinverluste	468
6.4	Wärmekapazität der Rauchgase	469
6.5	Das h, Λ -Diagramm	470
X. 7	Feuerungswirkungsgrad	473
X.8	Irreversibilität der Verbrennung	474
8.1	Reaktionsarbeit und Reaktionsentropie	474
8.2	Absolute Entropie, dritter Hauptsatz, Standardentropie	476
8.3	Brennstoffexergie	479
8.4	Exergieverluste bei der Verbrennung	482
8.5	Exergetischer Wirkungsgrad	484
Anhang		493
Anhang 1	Lösungen der Aufgaben	493
Anhang 2	Thermodynamische Größen einiger Stoffe	503
Anhang 3	Berechnung der Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf	504
	Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf bei Sättigungszustand (Drucktafel)	504
	Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf bei Sättigungszustand (Temperaturtafel)	508
	Zustandsgrößen für Wasser und überhitzten Dampf	510
Anhang 4	h, x -Diagramm	517
Anhang 5	Wirkungsgrade von Energiewandlungsanlagen in der Technik	518
Anhang 6	Beispiele für Energien und Leistungen	519
Anhang 7	Beispiele für Leistungsdichten	519
Anhang 8	Tripelpunkte und kritische Daten einiger Stoffe	520
Anhang 9	Literatur	521
Anhang 10	Stichwortverzeichnis	523