

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Definitionen	1
1.1	Womit beschäftigt sich die Thermodynamik?	1
1.2	Thermodynamisches System	2
1.2.1	Systeme	2
1.2.2	Eigenschaften der Systeme	4
1.3	Thermodynamische Prozess- und Zustandsgrößen	5
1.3.1	Prozess- und Zustandsgrößen	5
1.3.2	Prozess, Zustandsänderung, Gleichgewicht	6
1.4	Spezielle Zustandsänderungen	8
1.5	Methodik der thermodynamischen Prozessanalyse	9
	Literatur	15
2	Eigenschaften der Stoffe	17
2.1	Formulierung des Zustands	17
2.1.1	Klassifizierung der Zustandsgrößen	17
2.1.2	Eigenschaften der Zustandsgrößen	18
2.2	Thermische Zustandsgrößen	18
2.2.1	Dichte und spezifisches Volumen	19
2.2.2	Druck	23
2.2.3	Temperatur	26
2.2.4	Thermometer und Temperaturskala	28
2.3	Energetische Zustandsgrößen	30
2.4	Thermische Zustandsgrößen reiner Substanzen	31
2.4.1	p, v, T -Fläche	32
2.4.2	p, T -Diagramm	33
2.5	p, v -Diagramm	36
2.5.1	Phasenübergänge	36
2.6	Tabellen und Programme der Zustandsgrößen	39
2.6.1	Thermische und energetische Zustandsgrößen	40
2.6.2	Programme der Zustandsgrößen	40

2.7	Zustandsgleichungen energetischer Zustandsgrößen	43
2.7.1	Enthalpie	43
2.7.2	Innere Energie	44
2.7.3	Referenzzustände und Referenzwerte	45
2.7.4	Näherungswerte für Flüssigkeiten	47
2.8	Ideale Gase	49
2.8.1	Thermische Zustandsgleichungen	49
2.8.2	Energetische Zustandsgrößen	52
2.8.3	Zustandsänderung idealer Gase	56
2.9	Reale Gase	60
2.9.1	Realgasfaktor	60
2.9.2	Theorem korrespondierender Zustände	61
2.10	Gasmischungen	66
2.10.1	Mischung idealer Gase	66
2.10.2	Mischung realer Gase	75
	Literatur	78
3	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	79
3.1	Verschiedene Arten der Energie	79
3.1.1	Arbeit, kinetische und potentielle Energie	79
3.1.2	Arbeitstransfer zu einem System	82
3.1.3	Leistung	83
3.1.4	Volumenänderungsarbeit	83
3.1.5	Druckänderungsarbeit	85
3.1.6	Dissipationsarbeit	86
3.1.7	Verschiebearbeit, effektive Arbeit, Nutz- und Kolbenarbeit	88
3.2	Innere Energie eines Systems	90
3.3	Energieform Wärme	91
3.4	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	93
3.5	Energieanalyse geschlossener Systeme	94
3.5.1	Energiebilanz stationärer Zustandsänderungen	94
3.5.2	Energiebilanz instationärer Zustandsänderungen	101
3.6	Energieanalyse offener Systeme	105
3.6.1	Erhaltung der Masse im offenen System	105
3.6.2	Erhaltung der Energie im offenen System	110
3.6.3	Energiebilanzgleichung	112
	Literatur	126
4	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	127
4.1	Einführung	127
4.1.1	Richtung natürlicher Ausgleichsprozesse	127
4.1.2	Ausgleichsprozess mit Arbeitsgewinn	130

4.2	Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	131
4.2.1	Forderungen an den zweiten Hauptsatz	131
4.2.2	Formulierung von Clausius	132
4.2.3	Formulierung von Thomson (Lord Kelvin) und Planck	132
4.2.4	Äquivalenz der Formulierung von Clausius und Kelvin-Planck ...	134
4.3	Umkehrbarkeit der Prozesse	135
4.3.1	Irreversible Prozesse	135
4.3.2	Reversible Prozesse	136
4.3.3	Intern reversible Prozesse	137
4.4	Analytische Form der Kelvin-Planck-Formulierung	137
4.5	Zweiter Hauptsatz für Kreisprozesse	139
4.5.1	Auswirkung auf Wärmekraftmaschinen	139
4.5.2	Auswirkung auf thermische Arbeitsmaschinen	142
4.6	Kelvin -Temperaturskala	143
4.7	Obergrenze der Nutzung reversibler Kreisprozesse	145
4.7.1	Thermische Kraftmaschinenprozesse	145
4.7.2	Kälteanlagen und Wärmepumpen	147
4.8	Entropie	151
4.8.1	Analytische Formulierung des zweiten Hauptsatzes	151
4.8.2	Zustandsgröße Entropie	155
4.8.3	Berechnung der Zustandsgröße Entropie reiner Substanzen	156
4.8.4	Entropieänderung der Mischungen idealer Gase	162
4.8.5	Fundamentalgleichungen	165
4.9	Entropiediagramme	167
4.9.1	Temperatur-Entropie-Diagramm (T, s -Diagramm)	167
4.9.2	Mollier-h, s -Diagramm des Wasser	168
4.9.3	T, s -Diagramm idealer Gase	173
4.10	Isentrope Zustandsänderungen	175
4.11	Isentrope Zustandsänderung idealer Gase	175
4.12	Entropiebilanzgleichungen	184
4.12.1	Entropiebilanzgleichungen für geschlossene Systeme	184
4.12.2	Irreversibilität des Wärmeübergangs	187
4.12.3	Entropiebilanz für offene Systeme	189
4.12.4	Entropiebilanz für stationäre offene Systeme	190
	Literatur	192
5	Energie, Exergie und Anergie	195
5.1	Einleitung	195
5.2	Arbeitsverfügbarkeit, Exergie und Anergie	197
5.3	Umgebung und Umwelt	198
5.4	Ermittlung der Exergie	199
5.4.1	Exergie eines geschlossenen Systems	201
5.4.2	Exergie eines offenen Systems	210

5.5	Exergiebilanzen	210
5.5.1	Geschlossenes System	210
5.5.2	Offene Systeme	213
5.6	Exergieanalysen	218
5.6.1	Exergieanalyse der Primärenergien	218
5.6.2	Exergieanalyse adiabater Maschinen	221
5.6.3	Exergieanalyse von Wärmeübertragern	222
5.6.4	Exergetischer Wirkungsgrad von Anlagen	223
5.7	Exergie-Anergie-Flussbilder	224
	Literatur	227
6	Anwendung bei technischen Prozessen	229
6.1	Analyse technischer Prozesse	229
6.1.1	Anwendungsgebiete	230
6.1.2	Einteilung thermischer Maschinen	230
6.1.3	Thermische Kreisprozesse	231
6.1.4	Wirkungs- und Leistungsgrade thermischer Prozesse	231
6.2	Spezialfälle der Zustandsänderungen und Prozesse	234
6.2.1	Beispiele spezieller Zustandsänderungen	234
6.3	Kompressoren und Verdichter	253
6.3.1	Innere Wirkungsgrade	253
6.3.2	Zwischenkühlung bei Kompressoren und Verdichtern	254
	Literatur	258
7	Dampfturbinenprozesse	259
7.1	Einleitung	259
7.2	Clausius-Rankine-Prozess	261
7.3	Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung	263
7.3.1	Carnotisierung des Prozesses	263
7.3.2	Überhitzung und Zwischenüberhitzung	264
7.3.3	Irreversibilitäten und Verluste	267
7.4	Dampfkreisprozess im Mollier-h,s-Diagramm	268
7.5	Dampfkreisprozess mit regenerativer Vorwärmung	278
7.5.1	Mischvorwärmer	280
7.5.2	Oberflächenvorwärmer	285
7.5.3	Mehrstufige regenerative Vorwärmung	292
7.6	Kraft-Wärme-Kopplung	300
	Literatur	305
8	Gasturbinen- und Gasmotorenprozesse	307
8.1	Prozesse der Gasmotoren	307
8.1.1	Arbeitsverfahren der Verbrennungsmotoren	307

8.1.2	Idealer <i>Otto</i> prozess	311
8.1.3	Idealer <i>Diesel</i> prozess	318
8.2	<i>Stirling</i> prozess	325
8.2.1	Idealer <i>Stirling</i> prozess	326
8.2.2	Realer <i>Stirling</i> prozess	329
8.2.3	<i>Stirling</i> prozess als Kältemaschinenprozess	330
8.3	Gasturbinen- und Triebwerkprozesse	331
8.3.1	Anwendungen	331
8.3.2	<i>Joule</i> prozess	332
8.3.3	Verluste und Irreversibilitäten	336
8.3.4	Verbesserung des Wirkungsgrades	341
8.4	Triebwerkprozess	351
8.4.1	Kombinierte Gas- und Dampfturbinenprozesse	355
8.5	Kraft-Wärme-Kopplung	361
	Literatur	363
9	Kältemaschinen- und Wärmepumpenprozesse	365
9.1	Einführung	365
9.1.1	Linksläufiger Carnotprozess	366
9.1.2	Kältemaschinen- und Wärmepumpenprozess	368
9.2	Eigenschaften der Kältemittel	369
9.2.1	Das $\log(p), h$ -Diagramm	370
9.2.2	Azeotrope Kältemittel	371
9.2.3	Zeotrope Kältemittel	371
9.2.4	Kriterien zur Kältemittelwahl	372
9.3	Kaltdampfprozess	373
9.3.1	Idealer Kaltdampfprozess	373
9.3.2	Realer Kaltdampfprozess	376
9.3.3	Kaltdampfprozess mit Rekuperation	379
9.3.4	Zweistufige Kompression mit Zwischenkühlung	381
9.4	Technische Anwendungen des Kaltdampfprozesses	386
9.4.1	Kältemaschinen	387
9.4.2	Wärmepumpen	387
9.5	Kaltgasprozess	392
9.5.1	Ideale Kaltluftmaschine	392
9.5.2	Realer Kaltgasprozess	394
9.5.3	Luftverflüssigung nach dem Linde-Verfahren	396
9.5.4	Kaltgasprozess mit Rekuperation	397
9.6	Wärmetransformationsprozesse	400
9.6.1	Thermisch angetriebene Wärmepumpen und Kältemaschinen	400
9.6.2	Wärmetransformatoren (Typ 2 Wärmepumpen)	403
9.7	Absorptionskältemaschinen und -wärmepumpen	404
9.7.1	Funktionsprinzip	404

9.8	Adsorptionskältemaschinen und -wärmepumpen	406
9.8.1	Funktionsprinzip	407
9.8.2	Thermodynamik der Adsorptionswärmepumpe	408
	Literatur	412
10	Feuchte Luft	413
10.1	Zustandsgrößen feuchter Luft	413
10.1.1	Relative Feuchte	414
10.1.2	Absolute Feuchte	415
10.1.3	Spezifisches Volumen ungesättigter feuchter Luft	417
10.1.4	Spezifische Enthalpie feuchter Luft	419
10.2	<i>Mollier-h, x</i> -Diagramm feuchter Luft	421
10.2.1	Druckabhängigkeit relativer Feuchte	423
10.3	Isobare Zustandsänderungen feuchter Luft	425
10.3.1	Wärmetransfer	425
10.3.2	Kühlung mit Taubildung	426
10.4	Mischung zweier feuchter Luftmassen	429
10.5	Befeuchten mit Wasser oder Wasserdampf	434
10.5.1	Verdunstung	437
10.5.2	Feuchtemessung mit dem Aspirationspsychrometer	438
10.6	Trocknung	441
10.6.1	Natürliche Trocknung	441
10.6.2	Trocknung durch erwärmte Luft	443
	Literatur	449
11	Verbrennungsprozesse	451
11.1	Einführung	451
11.2	Umwandlung der Brennstoffenergie	452
11.2.1	Verbrennungsvorgang	452
11.2.2	Eigenschaften der Brennstoffe	453
11.3	Mengenberechnung bei der Verbrennung	455
11.3.1	Verbrennungsgleichungen für vollständige Verbrennung	456
11.3.2	Luftbedarf	459
11.3.3	Unvollständige Verbrennung	462
11.4	Kontrolle der Verbrennung	467
11.4.1	Messmethoden	467
11.4.2	Auswertung der Analyse	468
11.5	Energiebilanz der Verbrennung	470
11.5.1	Anwendung des ersten Hauptsatzes	470
11.5.2	Enthalpie und Temperatur des Verbrennungsgases	472
11.5.3	Kesselwirkungsgrad	478

11.6 Anwendung des 2. Hauptsatzes auf die Verbrennung	484
11.6.1 Reversible chemische Reaktion	485
11.6.2 Dritter Hauptsatz der Thermodynamik	486
11.6.3 Exergie der Brennstoffe und Verluste bei der Verbrennung	486
11.7 Brennstoffzellen	487
Literatur	490
12 Berechnung von Stoffeigenschaften	491
12.1 Zustandsgrößen idealer Gase	491
12.1.1 Spezifisches Volumen	492
12.1.2 Kalorische Zustandsgrößen	492
12.1.3 Dissoziation der Verbrennungsgase	495
12.2 Stoffwertprogramm CoolProp	496
12.3 Verfügbare Programme in Mathcad	500
Literatur	500
Anhang	501
Deutsch-Englisch-Glossar	591
Sachverzeichnis	599