

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	13
1 Grundlagen der Thermodynamik	17
1.1 Aufgabe der Thermodynamik	17
1.2 Größen und Einheitensysteme	17
1.2.1 Physikalische Größen und Größenarten	17
1.2.2 Größengleichungen	18
1.2.3 Zahlenwertgleichungen	19
1.2.4 Einheitensysteme	20
1.3 Thermische Zustandsgrößen	23
1.3.1 Volumen	23
1.3.2 Druck	24
1.3.3 Temperatur	29
1.4 Thermische Zustandsgleichung	32
1.4.1 Thermische Zustandsgleichung eines homogenen Systems	32
1.4.2 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	32
1.5 Mengenmaße Kilomol und Normvolumen; molare Gaskonstante	36
1.5.1 Kilomol	36
1.5.2 Normvolumen	37
1.5.3 Molare Gaskonstante	38
1.6 Thermische Ausdehnung	40
1.6.1 Längenänderung	40
1.6.2 Volumenänderung	42
1.7 Thermodynamisches System	46
1.7.1 Systeme und Systemgrenzen	46
1.7.2 Zustandsgrößen und Prozessgrößen	47
1.7.3 Zustandsänderungen und Prozesse	48
Kontrollfragen	51
2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	52
2.1 Energieerhaltung, Energiebilanz	52
2.2 Arbeit am geschlossenen System	52
2.3 Innere Energie	56
2.4 Wärme	58
2.5 Arbeit am offenen System und Enthalpie	60
2.6 Formulierungen des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik	66
2.7 Kalorische Zustandsgleichungen	68
2.7.1 Kalorische Zustandsgleichungen eines homogenen Systems	68
2.7.2 Spezifische Wärmekapazitäten eines homogenen Systems	68
2.7.3 Kalorische Zustandsgleichungen des idealen Gases	72
2.7.4 Spezifische Wärmekapazitäten des idealen Gases	75
2.7.5 Molare Wärmekapazitäten des idealen Gases	78
Kontrollfragen	80

3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	82
3.1 Definition der Entropie	82
3.2 Entropie und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	84
3.3 <i>T,S</i> -Diagramm	85
3.4 Einfache Zustandsänderungen des idealen Gases	86
3.4.1 Isochore Zustandsänderung	88
3.4.2 Isobare Zustandsänderung	91
3.4.3 Isotherme Zustandsänderung	95
3.4.4 Isentrope Zustandsänderung	100
3.4.5 Polytrope Zustandsänderung	106
3.4.6 Zustandsänderungen in adiabaten Systemen	115
3.5 Kreisprozesse	118
3.5.1 Kontinuierlicher Ablauf in Kreisprozessen	118
3.5.2 Arbeit und Prozessverlauf	119
3.5.3 Wärmekraftmaschine	123
3.5.4 Grenzen der thermischen Energieumwandlung	126
3.5.5 Vergleich reversibler und irreversibler Kreisprozesse	129
3.5.6 Wärmepumpe und Kältemaschine	132
3.6 Adiabate Drosselung	137
3.7 Füllen eines Behälters	141
3.8 Temperaturausgleich	142
3.9 Exergie und Anergie	146
3.9.1 Begrenzte Umwandelbarkeit der inneren Energie und der Wärme	146
3.9.2 Exergie und Anergie eines strömenden Fluids	148
3.9.3 Exergie und Anergie eines geschlossenen Systems	151
3.9.4 Exergie und Anergie der Wärme	152
3.9.5 Exergieverlust	157
3.9.6 Exergetischer Wirkungsgrad	160
3.9.7 Energiequalitätsgrad	160
3.9.8 Energie- und Exergie-Flussbild	161
Kontrollfragen	162
4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	165
4.1 Kreisprozesse für Wärme- und Verbrennungskraftanlagen	165
4.1.1 Vergleichsprozesse	165
4.1.2 Bewertungszahlen für die Kreisprozesse	166
4.2 Kreisprozesse der Gasturbinenanlagen	172
4.2.1 Arbeitsprinzip der Gasturbinenanlagen	172
4.2.2 Joule-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	173
4.2.3 Ericsson-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	181
4.2.4 Der wirkliche Prozess in der Gasturbinenanlage	184
4.3 Kreisprozess des Heißgasmotors	191
4.3.1 Arbeitsprinzip des Heißgasmotors	191
4.3.2 Stirling-Prozess als Vergleichsprozess des Heißgasmotors	191
4.3.3 Der wirkliche Prozess im Heißgasmotor	193

4.4	Kreisprozesse der Verbrennungsmotoren	195
4.4.1	Übertragung des Arbeitsprinzips der Motoren in einen Kreisprozess	195
4.4.2	Otto-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichraumprozess)	195
4.4.3	Diesel-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichdruckprozess)	199
4.4.4	Seiliger-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gemischter Vergleichsprozess)	201
4.4.5	Der wirkliche Prozess in den Verbrennungsmotoren	203
4.5	Kolbenverdichter	204
4.5.1	Der verlustlose Kolbenverdichter ohne Schadraum	204
4.5.2	Bewertungszahlen für den Kolbenverdichter	209
	Kontrollfragen	216
5	Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	217
5.1	Das reale Verhalten der Stoffe	217
5.1.1	Aggregatzustandsänderungen, Phasenwechsel	217
5.1.2	Thermische Zustandsgleichungen realer Fluide	221
5.1.3	p, v, T -Diagramm	224
5.2	Wasserdampf	225
5.2.1	Zustandsgleichungen des Wasserdampfes	225
5.2.2	Spezifische Zustandsgrößen	226
5.2.3	Gleichung von Clausius und Clapeyron	237
5.2.4	Zustandsänderungen des Wasserdampfes	238
5.3	Dampfkraftanlagen	241
5.3.1	Arbeitsprinzip der Dampfkraftanlagen	241
5.3.2	Clausius-Rankine-Prozess als Vergleichsprozess der Dampfkraftanlage	242
5.3.3	Verfahren zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades	247
5.3.4	Zwischenüberhitzen. Verfahren zur Verringerung des Wassergehaltes im Abdampf	253
5.3.5	Der wirkliche Prozess in Dampfkraftanlagen	255
5.4	Kombiniertes Gas-Dampf-Kraftwerk (GUD-Prozess)	262
5.4.1	Zweck der Kombination	262
5.4.2	Grundschaltung des Gas-Dampf-Kraftwerkes	262
5.4.3	Wirkungsgrade beim Gas-Dampf-Kraftwerk	264
5.4.4	Schaltungsbeispiele	266
5.5	Organische Rankine-Prozesse (ORC)	272
5.5.1	Prozessverlauf	272
5.5.2	Organische Arbeitsfluide	273
5.6	Linkslaufende Kreisprozesse mit Dämpfen	278
	Kontrollfragen	283
6	Gemische	285
6.1	Zusammensetzung von Gemischen	285
6.1.1	Massenanteil	285
6.1.2	Stoffmengenanteil (Molanteil)	286
6.1.3	Molare Masse des Gemisches	286
6.1.4	Beladung	287

6.2	Ideale Gemische	289
6.2.1	Gesetz von Amagat	289
6.2.2	Partialdichte (Massenkonzentration) und Gemischdichte	290
6.2.3	Raumanteil	291
6.2.4	Die extensiven Zustandsgrößen des idealen Gemisches	293
6.3	Gemisch idealer Gase	298
6.3.1	Thermische Zustandsgleichung	298
6.3.2	Partialdruck (Gesetz von Dalton)	298
6.3.3	Mischungsentropie und Exergie eines Gemisches idealer Gase	299
6.3.4	Zusammensetzung von Gemischen idealer Gase	302
6.4	Gas-Dampf-Gemisch; Feuchte Luft	305
6.4.1	Sättigungszustand, Taupunkt	305
6.4.2	Feuchte Luft als Beispiel eines Gas-Dampf-Gemisches	307
6.4.3	Zusammensetzung feuchter Luft	308
6.4.4	Spezifisches Volumen feuchter Luft	312
6.4.5	Spezifische Enthalpie feuchter Luft	313
6.4.6	h,x -Diagramm von Mollier	315
6.4.7	Einfache isobare Zustandsänderungen feuchter Luft im h,x -Diagramm	318
	Kontrollfragen	326
7	Strömungsvorgänge	328
7.1	Kontinuitätsgleichung	328
7.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für Strömungsvorgänge	329
7.2.1	Arbeitsprozesse	329
7.2.2	Strömungsprozesse	334
7.3	Kraftwirkung bei Strömungsvorgängen	338
7.3.1	Impulssatz	338
7.3.2	Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	342
7.4	Düsen- und Diffusorströmung	343
7.4.1	Energieumwandlung in Düsen und Diffusoren	343
7.4.2	Reibungsfreie Düsenströmung	345
7.4.3	Schallgeschwindigkeit	349
7.4.4	Reibungsfreie Diffusorströmung	349
7.4.5	Ausbildung einer Laval-Düse oder eines Überschall-Diffusors	350
	Kontrollfragen	355
8	Wärmeübertragung	356
8.1	Arten der Wärmeübertragung	356
8.2	Wärmeleitung	356
8.2.1	Ebene Wand	356
8.2.2	Zylindrische Wand	362
8.2.3	Hohlkugelwand	363
8.3	Konvektiver Wärmeübergang	364
8.3.1	Wärmeübergangsbeziehungen	364
8.3.2	Ähnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs	365
8.3.3	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen	376
8.4	Temperaturstrahlung	380
8.4.1	Einführung	380
8.4.2	Wärmeübertragung durch Strahlung	385
8.4.3	Gas- und Flammenstrahlung	386

8.5	Wärmedurchgang	387
8.5.1	Wärmedurchgangsbeziehungen	387
8.5.2	Beeinflussung des Wärmedurchgangs	389
8.5.3	Zwischentemperaturen	390
8.6	Wärmeübertrager	390
8.6.1	Gegen-, Gleich- und Kreuzstrom	391
8.6.2	Berechnungsverfahren	394
8.6.3	Verfahrensoptimierung bei der Wärmenutzung	398
8.6.4	Exnergieverlust im Wärmeübertrager	399
	Kontrollfragen	401
9	Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	403
9.1	Umwandlung der Brennstoffenergie durch Verbrennung	403
9.1.1	Verbrennungstechnische Eigenschaften der Brennstoffe	403
9.1.2	Verbrennungsvorgang	406
9.1.3	Reaktionsgleichungen	407
9.2	Verbrennungsrechnung	408
9.2.1	Feste und flüssige Brennstoffe	408
9.2.2	Gasförmige Brennstoffe	417
9.2.3	Näherungslösungen	421
9.3	Verbrennungskontrolle	422
9.3.1	Messmethode	422
9.3.2	Auswertung der Messung	423
9.3.3	Verbrennungsdreiecke	426
9.4	Theoretische Verbrennungstemperatur	430
9.5	Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad	436
9.5.1	Konventionelle Verbrennungsanlagen	436
9.5.2	Verbrennungsanlagen mit Kondensation im Abgas	437
9.6	Abgastaupunkt	441
9.7	Emissionen aus Verbrennungsanlagen	442
9.7.1	Einführung	442
9.7.2	Minderung der Schwefeloxidemission	446
9.7.3	Minderung der Stickoxidemission	448
9.7.4	Minderung der Kohlendioxidemission	451
9.8	Chemische Reaktionen und Irreversibilität der Verbrennung	456
9.8.1	Enthalpie, Entropie, freie Enthalpie	456
9.8.2	Brennstoffexergie	464
9.8.3	Exnergieverlust bei der Verbrennung	468
9.9	Brennstoffzellen	470
9.9.1	Wirkprinzip	470
9.9.2	Energetische Bewertung	471
9.9.3	Bauarten	475
	Kontrollfragen	479
10	Lösungsergebnisse der Aufgaben	481

11 Antworten auf die Kontrollfragen	491
11.1 Grundlagen der Thermodynamik	491
11.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	492
11.3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	494
11.4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	497
11.5 Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	498
11.6 Gemische	500
11.7 Strömungsvorgänge	502
11.8 Wärmeübertragung	502
11.9 Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	504
Anhang	507
A1 Schrifttum	507
A2 Nachweis verwendeter Unterlagen	509
A3 Wiederholung häufig benutzter Tafeln	510
Sachwortverzeichnis	527