

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 T,S -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 Temperatenausgleich	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	Grundschtaltung 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	Die Zusammensetzungen 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	305
6.4.1	Taupunkt	307
6.4.2	Feuchte Luft	307
6.4.3	Zusammensetzung der feuchten Luft	307
6.4.4	Spezifisches Volumen feuchter Luft	311
6.4.5	Spezifische Enthalpie feuchter Luft	313
6.4.6	h,x -Diagramm von Mollier	314
6.4.7	Einfache isobare Zustandsänderungen feuchter Luft im h,x -Diagramm	317
	Kontrollfragen	325
7	Strömungsvorgänge	327
7.1	Kontinuitätsgleichung	327
7.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für Strömungsvorgänge	328
7.2.1	Arbeitsprozesse	328
7.2.2	Strömungsprozesse	333
7.3	Kraftwirkung bei Strömungsvorgängen	337
7.3.1	Impulssatz	337
7.3.2	Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	341
7.4	Düsen- und Diffusorströmung	342
7.4.1	Energieumwandlung in Düsen und Diffusoren	342
7.4.2	Reibungsfreie Düsenströmung	344
7.4.3	Schallgeschwindigkeit	348
7.4.4	Reibungsfreie Diffusorströmung	348
7.4.5	Ausbildung einer Laval-Düse oder eines Überschall-Diffusors	349
	Kontrollfragen	354
8	Wärmeübertragung	355
8.1	Arten der Wärmeübertragung	355
8.2	Wärmeleitung	355
8.2.1	Ebene Wand	355
8.2.2	Zylindrische Wand	361
8.2.3	Hohlkugelwand	362
8.3	Konvektiver Wärmeübergang	363
8.3.1	Wärmeübergangsbeziehungen	363
8.3.2	Ähnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs	364
8.3.3	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen	375
8.4	Temperaturstrahlung	379
8.4.1	Einführung	379
8.4.2	Wärmeübertragung durch Strahlung	384
8.4.3	Gas- und Flammenstrahlung	385

8.5	Wärmedurchgang	386
8.5.1	Wärmedurchgangsbeziehungen	386
8.5.2	Beeinflussung des Wärmedurchgangs	388
8.5.3	Zwischentemperaturen	389
8.6	Wärmeübertrager	389
8.6.1	Gegen-, Gleich- und Kreuzstrom	390
8.6.2	Berechnungsverfahren	393
8.6.3	Verfahrensoptimierung bei der Wärmenutzung	397
8.6.4	Exergieverlust im Wärmeübertrager	398
	Kontrollfragen	400
9	Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	402
9.1	Umwandlung der Brennstoffenergie durch Verbrennung	402
9.1.1	Verbrennungstechnische Eigenschaften der Brennstoffe	402
9.1.2	Verbrennungsvorgang	404
9.1.3	Reaktionsgleichungen	405
9.2	Verbrennungsrechnung	406
9.2.1	Feste und flüssige Brennstoffe	406
9.2.2	Gasförmige Brennstoffe	415
9.2.3	Näherungslösungen	419
9.3	Verbrennungskontrolle	420
9.3.1	Messmethode	420
9.3.2	Auswertung der Messung	421
9.3.3	Verbrennungsdreiecke	424
9.4	Theoretische Verbrennungstemperatur	428
9.5	Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad	433
9.5.1	Konventionelle Verbrennungsanlagen	433
9.5.2	Verbrennungsanlagen mit Kondensation im Abgas	435
9.6	Abgastauptunkt	438
9.7	Emissionen aus Verbrennungsanlagen	439
9.7.1	Einführung	439
9.7.2	Minderung der Schwefeloxidemission	442
9.7.3	Minderung der Stickoxidemission	444
9.8	Chemische Reaktionen und Irreversibilität der Verbrennung	447
9.8.1	Enthalpie, Entropie, freie Enthalpie	447
9.8.2	Brennstoffexergie	454
9.8.3	Exergieverlust bei der Verbrennung	459
9.9	Brennstoffzellen	461
9.9.1	Wirkprinzip	461
9.9.2	Energetische Bewertung	461
9.9.3	Bauarten	465
	Kontrollfragen	469
10	Lösungsergebnisse der Aufgaben	471

11 Antworten auf die Kontrollfragen	481
11.1 Grundlagen der Thermodynamik	481
11.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	482
11.3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	484
11.4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	487
11.5 Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	488
11.6 Gemische	490
11.7 Strömungsvorgänge	492
11.8 Wärmeübertragung	492
11.9 Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	494
Anhang	496
A1 Schrifttum	496
A2 Nachweis verwendeter Unterlagen	497
A3 Wiederholung häufig benutzter Tafeln	498
Sachwortverzeichnis	514