

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 Aussagen des zweiten Hauptsatzes	82
3.2 Entropie	82
3.2.1 Einführung der Entropie	82
3.2.2 Entropiebilanzen	84
3.2.3 T,S -Diagramm	88
3.3 Fundamentalgleichungen	89
3.4 Einfache Zustandsänderungen des idealen Gases	90
3.4.1 Isochore Zustandsänderung	91
3.4.2 Isobare Zustandsänderung	94
3.4.3 Isotherme Zustandsänderung	98
3.4.4 Isentrope Zustandsänderung	103
3.4.5 Polytrope Zustandsänderung	109
3.4.6 Zustandsänderungen in adiabaten Systemen	118
3.5 Kreisprozesse	121
3.5.1 Kontinuierlicher Ablauf in Kreisprozessen	121
3.5.2 Arbeit und Prozessverlauf	122
3.5.3 Wärmekraftmaschine	126
3.5.4 Grenzen der thermischen Energieumwandlung	129
3.5.5 Vergleich reversibler und irreversibler Kreisprozesse	132
3.5.6 Wärmepumpe und Kältemaschine	137
3.6 Adiabate Drosselung	140
3.7 Instationäre Prozesse	144
3.7.1 Füllen eines Behälters	144
3.7.2 Temperatenausgleich	145
3.8 Wärmetransport	149
3.8.1 Entropieerzeugung beim Wärmetransport	149
3.8.2 Thermodynamische Mitteltemperatur	150
3.9 Exergie und Anergie	152
3.9.1 Begrenzte Umwandelbarkeit der inneren Energie und der Wärme	152
3.9.2 Exergie und Anergie eines strömenden Fluids	153
3.9.3 Exergie und Anergie eines geschlossenen Systems	157
3.9.4 Exergie und Anergie der Wärme	158
3.9.5 Exergieverlust	162
3.9.6 Exergetischer Wirkungsgrad	165
3.9.7 Energie- und Exergie-Flussbild	165
Kontrollfragen	167
4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	170
4.1 Kreisprozesse für Wärme- und Verbrennungskraftanlagen	170
4.1.1 Vergleichsprozesse	170
4.1.2 Bewertungszahlen für die Kreisprozesse	171
4.2 Kreisprozesse der Gasturbinenanlagen	177
4.2.1 Arbeitsprinzip der Gasturbinenanlagen	177
4.2.2 Joule-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	178

4.2.3	Ericsson-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	186
4.2.4	Der wirkliche Prozess in der Gasturbinenanlage	189
4.3	Kreisprozess des Heißgasmotors	197
4.3.1	Arbeitsprinzip des Heißgasmotors	197
4.3.2	Stirling-Prozess als Vergleichsprozess des Heißgasmotors	197
4.3.3	Der wirkliche Prozess im Heißgasmotor	199
4.4	Kreisprozesse der Verbrennungsmotoren	201
4.4.1	Übertragung des Arbeitsprinzips der Motoren in einen Kreisprozess	201
4.4.2	Otto-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichraumprozess)	201
4.4.3	Diesel-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichdruckprozess)	205
4.4.4	Seiliger-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gemischter Vergleichsprozess)	207
4.4.5	Der wirkliche Prozess in den Verbrennungsmotoren	209
4.5	Kolbenverdichter	210
4.5.1	Der verlustlose Kolbenverdichter ohne Schadraum	210
4.5.2	Bewertungszahlen für den Kolbenverdichter	215
	Kontrollfragen	222
5	Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	223
5.1	Das reale Verhalten der Stoffe	223
5.1.1	Aggregatzustandsänderungen, Phasenwechsel	223
5.1.2	Thermische Zustandsgleichungen realer Fluide	227
5.1.3	p, v, T -Diagramm	230
5.2	Wasserdampf	231
5.2.1	Zustandsgleichungen des Wasserdampfes	231
5.2.2	Spezifische Zustandsgrößen	232
5.2.3	Gleichung von Clausius und Clapeyron	243
5.2.4	Zustandsänderungen des Wasserdampfes	244
5.3	Dampfkraftanlagen	247
5.3.1	Arbeitsprinzip der Dampfkraftanlagen	247
5.3.2	Clausius-Rankine-Prozess als Vergleichsprozess der Dampfkraftanlage	248
5.3.3	Verfahren zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades	253
5.3.4	Zwischenüberhitzen. Verfahren zur Verringerung des Wassergehaltes im Abdampf	259
5.3.5	Der wirkliche Prozess in Dampfkraftanlagen	261
5.4	Kombiniertes Gas-Dampf-Kraftwerk (GUD-Prozess)	268
5.4.1	Zweck der Kombination	268
5.4.2	Grundschtaltung des Gas-Dampf-Kraftwerkes	268
5.4.3	Wirkungsgrade beim Gas-Dampf-Kraftwerk	270
5.4.4	Schaltungsbeispiele	272
5.5	Organische Rankine-Prozesse (ORC)	278
5.5.1	Prozessverlauf	278
5.5.2	Organische Arbeitsfluide	279
5.6	Linkslaufende Kreisprozesse mit Dämpfen	284
	Kontrollfragen	289

6 Gemische	291
6.1 Zusammensetzung von Gemischen	291
6.1.1 Massenanteil	291
6.1.2 Stoffmengenanteil (Molanteil)	292
6.1.3 Molare Masse des Gemisches	292
6.1.4 Beladung	293
6.2 Ideale Gemische	295
6.2.1 Gesetz von Amagat	295
6.2.2 Partialdichte (Massenkonzentration) und Gemischdichte	296
6.2.3 Raumanteil	297
6.2.4 Die extensiven Zustandsgrößen des idealen Gemisches	299
6.3 Gemisch idealer Gase	304
6.3.1 Thermische Zustandsgleichung	304
6.3.2 Partialdruck (Gesetz von Dalton)	304
6.3.3 Mischungsentropie und Exergie eines Gemisches idealer Gase	305
6.3.4 Zusammensetzung von Gemischen idealer Gase	308
6.4 Gas-Dampf-Gemisch; Feuchte Luft	311
6.4.1 Sättigungszustand, Taupunkt	311
6.4.2 Feuchte Luft als Beispiel eines Gas-Dampf-Gemisches	313
6.4.3 Zusammensetzung feuchter Luft	314
6.4.4 Spezifisches Volumen feuchter Luft	318
6.4.5 Spezifische Enthalpie feuchter Luft	319
6.4.6 h,x -Diagramm von Mollier	321
6.4.7 Einfache isobare Zustandsänderungen feuchter Luft im h,x -Diagramm	324
Kontrollfragen	332
7 Strömungsvorgänge	335
7.1 Kontinuitätsgleichung	335
7.2 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für Strömungsvorgänge	336
7.2.1 Arbeitsprozesse	336
7.2.2 Strömungsprozesse	341
7.3 Kraftwirkung bei Strömungsvorgängen	345
7.3.1 Impulssatz	345
7.3.2 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	349
7.4 Düsen- und Diffusorströmung	350
7.4.1 Energieumwandlung in Düsen und Diffusoren	350
7.4.2 Reibungsfreie Düsenströmung	352
7.4.3 Schallgeschwindigkeit	356
7.4.4 Reibungsfreie Diffusorströmung	356
7.4.5 Ausbildung einer Laval-Düse oder eines Überschall-Diffusors	357
Kontrollfragen	362
8 Wärmeübertragung	363
8.1 Arten der Wärmeübertragung	363
8.2 Wärmeleitung	363
8.2.1 Ebene Wand	363
8.2.2 Zylindrische Wand	369
8.2.3 Hohlkugelwand	370
8.3 Konvektiver Wärmeübergang	371
8.3.1 Wärmeübergangsbeziehungen	371

8.3.2	Ähnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs	372
8.3.3	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen	383
8.4	Temperaturstrahlung	387
8.4.1	Einführung	387
8.4.2	Wärmeübertragung durch Strahlung	392
8.4.3	Gas- und Flammenstrahlung	393
8.5	Wärmedurchgang	394
8.5.1	Wärmedurchgangsbeziehungen	394
8.5.2	Beeinflussung des Wärmedurchgangs	396
8.5.3	Zwischentemperaturen	397
8.6	Wärmeübertrager	397
8.6.1	Gegen-, Gleich- und Kreuzstrom	398
8.6.2	Berechnungsverfahren	401
8.6.3	Verfahrensoptimierung bei der Wärmenutzung	405
8.6.4	Exergieverlust im Wärmeübertrager	406
	Kontrollfragen	408
9	Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	410
9.1	Umwandlung der Brennstoffenergie durch Verbrennung	410
9.1.1	Verbrennungstechnische Eigenschaften der Brennstoffe	410
9.1.2	Verbrennungsvorgang	413
9.1.3	Reaktionsgleichungen	414
9.2	Verbrennungsrechnung	415
9.2.1	Feste und flüssige Brennstoffe	415
9.2.2	Gasförmige Brennstoffe	424
9.2.3	Näherungslösungen	428
9.3	Verbrennungskontrolle	429
9.3.1	Messmethode	429
9.3.2	Auswertung der Messung	430
9.3.3	Verbrennungsdreiecke	433
9.4	Theoretische Verbrennungstemperatur	437
9.5	Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad	443
9.5.1	Konventionelle Verbrennungsanlagen	443
9.5.2	Verbrennungsanlagen mit Kondensation im Abgas	444
9.6	Abgastaupunkt	448
9.7	Emissionen aus Verbrennungsanlagen	449
9.7.1	Einführung	449
9.7.2	Minderung der Schwefeloxidemission	453
9.7.3	Minderung der Stickoxidemission	455
9.7.4	Minderung der Kohlendioxidemission	458
9.8	Chemische Reaktionen und Irreversibilität der Verbrennung	463
9.8.1	Enthalpie, Entropie, freie Enthalpie	463
9.8.2	Brennstoffexergie	471
9.8.3	Exergieverlust bei der Verbrennung	475
9.9	Brennstoffzellen	477
9.9.1	Wirkprinzip	477

9.9.2 Energetische Bewertung	478
9.9.3 Bauarten	482
Kontrollfragen	486
10 Lösungsergebnisse der Aufgaben	488
11 Antworten auf die Kontrollfragen	498
11.1 Grundlagen der Thermodynamik	498
11.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	499
11.3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	501
11.4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	504
11.5 Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	505
11.6 Gemische	507
11.7 Strömungsvorgänge	509
11.8 Wärmeübertragung	509
11.9 Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	511
Anhang	513
A1 Schrifttum	513
A2 Nachweis verwendeter Unterlagen	515
A3 Wiederholung häufig benutzter Tafeln	516
Sachwortverzeichnis	533