
Günter Cerbe
Gernot Wilhelms

Technische Thermodynamik

Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

18., überarbeitete Auflage

Mit 217 Bildern, 40 Tafeln,
136 Beispielen, 139 Aufgaben und 182 Kontrollfragen

HANSER

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 Temperaturlausgleich	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	Dampfkräftenanlagen	247
5.3.1	Arbeitsprinzip der Dampfkräftenanlagen	247
5.3.2	Clausius-Rankine-Prozess als Vergleichsprozess der Dampfkräftenanlage	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 Dampfkräftenanlagen	261
5.4	Kombiniertes Gas-Dampf-Kraftwerk (GUD-Prozess)	268
5.4.1	Zweck der Kombination	268
5.4.2	Grundschaltung 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
6.5 Reale Gemische	332
Kontrollfragen	339
7 Strömungsvorgänge	341
7.1 Kontinuitätsgleichung	341
7.2 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für Strömungsvorgänge	342
7.2.1 Arbeitsprozesse	342
7.2.2 Strömungsprozesse	347
7.3 Kraftwirkung bei Strömungsvorgängen	351
7.3.1 Impulssatz	351
7.3.2 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	355
7.4 Düsen- und Diffusorströmung	356
7.4.1 Energieumwandlung in Düsen und Diffusoren	356
7.4.2 Reibungsfreie Düsenströmung	358
7.4.3 Schallgeschwindigkeit	362
7.4.4 Reibungsfreie Diffusorströmung	362
7.4.5 Ausbildung einer Laval-Düse oder eines Überschall-Diffusors	363
Kontrollfragen	368
8 Wärmeübertragung	369
8.1 Arten der Wärmeübertragung	369
8.2 Wärmeleitung	369
8.2.1 Ebene Wand	369
8.2.2 Zylindrische Wand	375
8.2.3 Hohlkugelwand	376

8.3	Konvektiver Wärmeübergang	377
8.3.1	Wärmeübergangsbeziehungen	377
8.3.2	Ähnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs	378
8.3.3	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen	389
8.4	Temperaturstrahlung	393
8.4.1	Einführung	393
8.4.2	Wärmeübertragung durch Strahlung	398
8.4.3	Gas- und Flammenstrahlung	399
8.5	Wärmedurchgang	400
8.5.1	Wärmedurchgangsbeziehungen	400
8.5.2	Beeinflussung des Wärmedurchgangs	402
8.5.3	Zwischentemperaturen	403
8.6	Wärmeübertrager	403
8.6.1	Gegen-, Gleich- und Kreuzstrom	404
8.6.2	Berechnungsverfahren	407
8.6.3	Verfahrensoptimierung bei der Wärmenutzung	411
8.6.4	Exergieverlust im Wärmeübertrager	412
	Kontrollfragen	414
9	Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	416
9.1	Umwandlung der Brennstoffenergie durch Verbrennung	416
9.1.1	Verbrennungstechnische Eigenschaften der Brennstoffe	416
9.1.2	Verbrennungsvorgang	419
9.1.3	Reaktionsgleichungen	420
9.2	Verbrennungsrechnung	421
9.2.1	Feste und flüssige Brennstoffe	421
9.2.2	Gasförmige Brennstoffe	430
9.2.3	Näherungslösungen	434
9.3	Verbrennungskontrolle	435
9.3.1	Messmethode	435
9.3.2	Auswertung der Messung	436
9.3.3	Verbrennungsdreiecke	439
9.4	Theoretische Verbrennungstemperatur	443
9.5	Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad	449
9.5.1	Konventionelle Verbrennungsanlagen	449
9.5.2	Verbrennungsanlagen mit Kondensation im Abgas	450
9.6	Abgastaupunkt	454
9.7	Emissionen aus Verbrennungsanlagen	455
9.7.1	Einführung	455
9.7.2	Minderung der Schwefeloxidemission	459
9.7.3	Minderung der Stickstoffoxidemission	461
9.7.4	Minderung der Kohlenstoffdioxidemission	464
9.8	Chemische Reaktionen und Irreversibilität der Verbrennung	469
9.8.1	Enthalpie, Entropie, freie Enthalpie	469
9.8.2	Brennstoffexergie	477
9.8.3	Exergieverlust bei der Verbrennung	481

9.9 Brennstoffzellen	483
9.9.1 Wirkprinzip	483
9.9.2 Energetische Bewertung	484
9.9.3 Bauarten	488
Kontrollfragen	492
10 Lösungsergebnisse der Aufgaben	494
11 Antworten auf die Kontrollfragen	504
11.1 Grundlagen der Thermodynamik	504
11.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	505
11.3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	507
11.4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	510
11.5 Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	511
11.6 Gemische	513
11.7 Strömungsvorgänge	515
11.8 Wärmeübertragung	515
11.9 Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	517
Anhang	519
A1 Schrifttum	519
A2 Nachweis verwendeter Unterlagen	521
A3 Wiederholung häufig benutzter Tafeln	522
Sachwortverzeichnis	539