

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	13
<b>1 Grundlagen der Thermodynamik</b>	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
<b>2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik</b>	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

<b>3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik</b>	<b>82</b>
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
<b>4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen</b>	<b>170</b>
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
<b>5</b>	<b>Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen . . . . .</b>	<b>223</b>
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	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

<b>6 Gemische</b>	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
<b>7 Strömungsvorgänge</b>	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
<b>8 Wärmeübertragung</b>	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
<b>9</b>	<b>Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen . . . . .</b>	<b>416</b>
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
<b>10 Lösungsergebnisse der Aufgaben . . . . .</b>	<b>494</b>
<b>11 Antworten auf die Kontrollfragen . . . . .</b>	<b>504</b>
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
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>519</b>
A1 Schrifttum . . . . .	519
A2 Nachweis verwendeter Unterlagen . . . . .	521
A3 Wiederholung häufig benutzter Tafeln . . . . .	522
<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>539</b>