

# Inhaltsverzeichnis

(Das Inhaltsverzeichnis bezieht sich auf die Abschnitte des Lehrbuchs "Grundlagen der Technischen Thermodynamik")

1 Aufgaben zu Abschnitt 1: Thermodynamische Grundbegriffe .....	1
2 Aufgaben zu Abschnitt 2: Der erste Hauptsatz der Thermodynamik .....	5
3 Aufgaben zu Abschnitt 3: Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik .....	21
4 Aufgaben zu Abschnitt 4: Ideale Gase .....	29
5 Aufgaben zu Abschnitt 5: Reale Gase und Dämpfe .....	83
6 Aufgaben zu Abschnitt 6: Thermische Maschinen .....	115
7 Aufgaben zu Abschnitt 7: Kreisprozesse .....	129
8 Aufgaben zu Abschnitt 8: Exergie .....	195
9 Aufgaben zu Abschnitt 9: Wärmeübertragung .....	213
10 Aufgaben zu Abschnitt 10: Feuchte Luft .....	253
11 Aufgaben zu Abschnitt 11: Verbrennung .....	291
12 Aufgaben zu Abschnitt 12: Chemische Thermodynamik .....	317
Ankreuz- und Einsetzaufgaben .....	335
Anhang: Zustandsdiagramme und Tabellen mit Stoffwerten .....	385

# Vollständiges Inhaltsverzeichnis des Lehrbuchs

<b>1 Thermodynamische Grundbegriffe</b> .....	<b>1</b>
1.1 Anwendungsgebiete der Thermodynamik .....	1
1.2 System .....	4
1.3 Zustand, Zustandsgrößen, Zustandsänderungen .....	5
1.4 Prozess, Prozessgrößen .....	8
<b>2 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik</b> .....	<b>9</b>
2.1 Das Prinzip von der Erhaltung der Energie .....	9
2.2 Potentielle Energie .....	10
2.3 Kinetische Energie .....	13
2.4 Arbeit .....	14
2.4.1 Volumenänderungsarbeit .....	14
2.4.2 Kupplungsarbeit .....	16
2.4.3 Verschiebearbeit .....	16
2.4.4 Druckänderungsarbeit .....	17
2.4.5 Reibungsarbeit .....	19
2.5 Thermische Energie .....	20
2.5.1 Innere Energie .....	21
2.5.2 Wärme .....	22
2.5.3 Enthalpie .....	23
2.6 Energiebilanzen .....	24
2.6.1 Energiebilanz für das geschlossene System .....	24
2.6.2 Energiebilanz für das offene System .....	26
2.7 Wärmekapazität .....	30
2.7.1 Spezifische Wärmekapazität .....	31
2.7.2 Die spezifische Wärmekapazität der Gase .....	34
2.8 Strömungstechnische Grundlagen .....	35
2.8.1 Allgemeines .....	35
2.8.2 Strömungsformen .....	36
2.8.3 Reibung und Rauigkeit .....	36
2.8.4 Einzelwiderstände .....	38
2.8.5 Äquivalente Rohrlänge .....	39
2.8.6 Druckverlust bzw. Druckgewinn infolge des Dichteunterschieds zwischen strömendem Fluid und Umgebungsfluid .....	39
2.8.7 Gesamtdruckdifferenz bei der Fluidfortleitung .....	39
<b>3 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik</b> .....	<b>43</b>
3.1 Die Aussage des zweiten Hauptsatzes .....	43
3.1.1 Reversible und irreversible Prozesse .....	44
3.1.2 Quasistatische Zustandsänderungen .....	45
3.2 Irreversible Vorgänge .....	46
3.2.1 Reibung .....	46
3.2.2 Temperaturausgleich .....	47
3.2.3 Druckausgleich .....	47
3.2.4 Drosselung .....	48

3.3 Entropie .....	49
3.3.1 Reversible Ersatzprozesse adiabater Prozesse .....	50
3.3.2 Die Berechnung der Entropieänderung .....	52
3.3.3 Die Entropie als Zustandsgröße, totales Differential .....	52
3.4 Die Entropieänderung der irreversiblen Vorgänge .....	55
3.4.1 Reibung .....	55
3.4.2 Temperaturausgleich .....	56
3.4.3 Druckausgleich .....	58
3.4.4 Drosselung .....	59
3.5 Nichtadiabater Prozess und reversibler Ersatzprozess .....	59
3.5.1 Isentrope; Deutungen des Entropiebegriffs .....	61
3.5.2 Entropiediagramme .....	62
3.5.3 Kreisintegral, thermodynamische Temperatur .....	64
3.5.4 Dissipative Energie .....	66
<b>4 Ideale Gase .....</b>	<b>69</b>
4.1 Thermische Zustandsgleichung .....	69
4.1.1 Gesetz von <i>Boyle</i> und <i>Mariotte</i> .....	69
4.1.2 Gesetz von <i>Gay-Lussac</i> .....	69
4.1.3 Physikalischer Normzustand .....	70
4.1.4 Gasthermometer .....	71
4.1.5 Spezielle Gaskonstante .....	72
4.1.6 Allgemeine Gaskonstante .....	74
4.2 Kalorische Zustandsgrößen der idealen Gase .....	74
4.2.1 Innere Energie .....	75
4.2.2 Enthalpie .....	75
4.2.3 Entropie .....	76
4.3 Zustandsänderungen .....	77
4.3.1 Isochore .....	77
4.3.2 Isobare .....	79
4.3.3 Isotherme .....	82
4.3.4 Isentrope .....	84
4.3.5 Polytrope .....	89
4.3.6 Zustandsänderungen mit veränderlicher Masse .....	96
4.4 Thermische Energie und Arbeit im <i>T, s</i> -Diagramm .....	97
4.5 Mischungen idealer Gase .....	99
4.5.1 Der Mischungsvorgang im abgeschlossenen System .....	102
4.5.2 Mischung bei unverändertem Gesamtvolumen .....	105
4.5.3 Mischung ohne Temperatur- und Druckänderung bei unverändertem Gesamtvolumen .....	106
4.5.4 Der Mischungsvorgang im offenen System .....	108
4.6 Dynamik idealer Gase: Kompressible stationäre Gasströmung .....	111
4.6.1 Einführung .....	111
4.6.2 Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung .....	112
4.6.3 Energiegleichung und <i>Bernoulli</i> -Gleichung der kompressiblen eindimensionalen Strömung idealer Gase .....	115
4.6.4 Ruhegrößen und kritischer Zustand .....	118
4.6.5 Das Geschwindigkeitsdiagramm der spezifischen Energiegleichung ..	121

4.6.6 Die Durchflussfunktion .....	122
4.6.7 Isentrope Gasströmung in Düsen und Blenden .....	125
4.6.8 Beschleunigte kompressible Strömung .....	126
4.6.9 Verdichtungsstoß .....	142
<b>5 Reale Gase und Dämpfe .....</b>	<b>151</b>
5.1 Eigenschaften der Dämpfe .....	151
5.1.1 Phasenübergänge .....	151
5.1.2 Zweiphasengebiete .....	152
5.1.3 Sieden und Kondensieren .....	153
5.1.4 Verdunsten und Tauen .....	155
5.1.5 Flüssigkeit .....	157
5.1.6 Nassdampf .....	160
5.1.7 Überhitzter Dampf .....	163
5.2 Zustandsdiagramme .....	164
5.2.1 Die $p, v, T$ -Fläche .....	164
5.2.2 Das $T, s$ -Diagramm .....	167
5.2.3 Das $h, s$ -Diagramm .....	170
5.3 Thermische Zustandsgleichungen .....	172
5.3.1 Die <i>van der Waalssche</i> Gleichung .....	172
5.3.2 Die Grenzkurve und die <i>Maxwell</i> -Beziehung .....	174
5.3.3 Die reduzierte <i>van der Waalssche</i> Gleichung .....	176
5.3.4 Verschiedene Ansätze .....	177
5.3.5 Virialkoeffizienten .....	181
5.4 Berechnung von Zustandsgrößen; Dampftafeln .....	183
5.4.1 Die kalorischen Zustandsgrößen .....	184
5.4.2 Die spezifischen Wärmekapazitäten $c_p$ und $c_v$ .....	189
5.4.3 Der Isentropenexponent und der Isothermenexponent .....	191
5.4.4 Die <i>Clausius-Clapeyronsche</i> Gleichung .....	193
5.4.5 Freie Energie und freie Enthalpie .....	197
5.4.5.1 Allgemeines .....	197
5.4.5.2 Ein $g, s$ -Zustandsdiagramm für Wasser und Wasserdampf ..	203
5.4.6 Der <i>Joule-Thomson</i> -Effekt .....	207
<b>6 Thermische Maschinen .....</b>	<b>213</b>
6.1 Einteilung und Arten der Maschinen .....	213
6.1.1 Unterteilung nach der Richtung der Energieumwandlung .....	213
6.1.2 Unterteilung nach der Bauart der Maschinen .....	214
6.1.3 Unterteilung nach der Art des ablaufenden Prozesses .....	214
6.2 Ideale Maschinen .....	214
6.2.1 Verdichtung und Entspannung in idealen Maschinen .....	215
6.2.2 Mehrstufige Verdichtung und Entspannung .....	216
6.2.3 Die Energiebilanz für Strömungsmaschinen .....	218
6.2.4 Die Energiebilanz für Verdrängermaschinen .....	220
6.3 Energiebilanzen für wirkliche Maschinen .....	221
6.3.1 Innere oder indizierte Arbeit .....	224
6.3.2 Totalarbeit .....	225
6.3.3 Totalenthalpie .....	226

6.4 Wirkliche Maschinen .....	226
6.4.1 Der ungekühlte Verdichter .....	226
6.4.2 Der gekühlte Verdichter .....	229
6.4.3 Kolbenverdichter .....	231
6.4.4 Turboverdichter .....	231
6.4.5 Gas- und Dampfturbinen .....	231
6.5 Wirkungsgrade .....	235
6.5.1 Vergleichsprozesse .....	236
6.5.2 Der innere Wirkungsgrad .....	236
6.5.3 Der mechanische Wirkungsgrad .....	238
6.5.4 Der Gesamtwirkungsgrad .....	238
6.5.5 Der isentrope Wirkungsgrad .....	238
6.5.6 Der isotherme Wirkungsgrad .....	239
6.5.7 Der polytrope Wirkungsgrad .....	239
<b>7 Kreisprozesse .....</b>	<b>245</b>
7.1 Kreisprozessarbeit, Wärmezufuhr und Wärmeabgabe .....	245
7.2 Rechts- und linkslaufende Kreisprozesse .....	251
7.3 Die Theorie der rechtslaufenden Kreisprozesse .....	252
7.3.1 Umwandlung von thermischer in mechanische Energie .....	253
7.3.2 Der thermische Wirkungsgrad .....	254
7.3.3 Der rechtslaufende <i>Carnot</i> -Prozess .....	255
7.3.4 Die Auswirkung irreversibler Vorgänge .....	256
7.3.5 Der <i>Carnot</i> -Faktor .....	258
7.4 Technisch genutzte rechtslaufende Kreisprozesse .....	260
7.4.1 <i>Seiliger</i> -Prozess, <i>Otto</i> -Prozess, <i>Diesel</i> -Prozess, verallgemeinerter <i>Diesel</i> -Prozess .....	261
7.4.2 <i>Joule</i> -Prozess .....	265
7.4.3 <i>Ericsson</i> -Prozess .....	268
7.4.4 <i>Stirling</i> -Prozess .....	270
7.4.5 Einfach-polytropischer <i>Carnot</i> -Prozess .....	272
7.4.6 Gasexpansions-Prozess .....	273
7.4.7 <i>Clausius-Rankine</i> -Prozess .....	274
7.5 Vergleichende Bewertung von rechtslaufenden Kreisprozessen .....	277
7.5.1 Prozessgrößen und Kreisprozesse .....	278
7.5.2 Mechanische Anstrengungsverhältnisse und thermische Anstrengungsverhältnisse .....	279
7.5.3 Bewertungskriterien für wichtige thermodynamische Kreisprozesse ..	283
7.5.3.1 Allgemeine thermodynamische Beziehungen .....	283
7.5.3.2 Beispiele .....	285
7.5.3.3 Graphische Darstellung der thermodynamischen Beziehungen	299
7.5.3.4 Kreisprozessberechnungen für reale Fluide .....	311
7.6 Linkslaufende Kreisprozesse .....	317
7.6.1 Leistungszahl .....	318
7.6.2 Der linkslaufende <i>Carnot</i> -Prozess .....	319
7.6.3 Der linkslaufende <i>Joule</i> -Prozess .....	320
7.6.4 Der Gasexpansions-Prozess als Kälteprozess .....	321
7.6.5 Der Kompressions-Kaltdampfprozess .....	325

<b>8 Exergie</b> .....	<b>333</b>
8.1 Energie und Exergie .....	333
8.1.1 Die Exergie der Wärme .....	335
8.1.2 Die Exergie der gebundenen Energie .....	335
8.1.3 Die Exergie der Temperaturänderungswärme .....	338
8.1.4 Die Exergie der Volumenänderungsarbeit .....	340
8.1.5 Die Exergie der Verschiebearbeit .....	341
8.1.6 Die Exergie der Druckänderungsarbeit .....	342
8.1.7 Die Exergie der inneren Energie .....	343
8.1.8 Die Exergie der Enthalpie .....	347
8.1.9 Die Exergie der freien Energie .....	351
8.1.10 Die Exergie der freien Enthalpie .....	351
8.1.11 Unterschied zwischen <i>EU</i> und <i>EF</i> .....	354
8.1.12 Unterschied zwischen <i>EH</i> und <i>EG</i> .....	355
8.1.13 Freie Energie und freie Enthalpie als thermodynamische Potentiale	355
8.2 Exergie und Anergie .....	358
8.2.1 Die Anergie im <i>p, V</i> -Diagramm und im <i>T, S</i> -Diagramm .....	360
8.2.2 Anergiefreie Energien .....	361
8.3 Exergieverlust .....	363
8.3.1 Irreversibilität und Exergieverlust .....	363
8.3.2 Exergieverlust und Anergiegewinn .....	367
8.3.3 Exergetische Wirkungsgrade .....	370
<b>9 Wärmeübertragung</b> .....	<b>375</b>
9.1 Wärmestrahlung .....	375
9.1.1 <i>Stefan-Boltzmannsches Gesetz</i> .....	375
9.1.2 <i>Kirchhoffsches Gesetz</i> .....	375
9.1.3 <i>Plancksches Strahlungsgesetz</i> .....	376
9.1.4 <i>Wiensches Verschiebungsgesetz</i> .....	377
9.1.5 <i>Lambertsches Kosinusgesetz</i> .....	378
9.1.6 Einstrahlzahl .....	378
9.2 Strahlungsaustausch .....	383
9.2.1 Hohlraummethode .....	384
9.2.2 Umhüllung einer Fläche durch eine andere .....	385
9.2.3 Zwei große parallele Flächen .....	386
9.2.4 Matrizendarstellung .....	386
9.3 Stationäre eindimensionale Wärmeleitung .....	389
9.3.1 Ebene Wand .....	389
9.3.2 Rohrwand .....	390
9.4 Instationäre eindimensionale Wärmeleitung .....	391
9.4.1 Ebene einschichtige Wand .....	392
9.4.2 Halbunendlicher Körper .....	394
9.4.3 Kontakttemperatur .....	395
9.5 Konvektion .....	396
9.5.1 Wärmeübergangskoeffizient .....	397
9.5.2 Ähnlichkeitstheorie .....	398
9.5.3 <i>Reynolds</i> -Analogie .....	401
9.5.4 <i>Prandtl</i> -Analogie .....	402

9.5.5	Potenzansätze für die laminare und die turbulente Strömung	405
9.5.6	Ansätze für Phasenübergänge	411
9.6	Wärmedurchgang	414
9.6.1	Wärmedurchgangskoeffizient	415
9.6.2	Rippenwirkungsgrad und Flächenwirkungsgrad	416
9.6.3	Mittlere Temperaturdifferenz	417
9.6.4	Betriebscharakteristik	417
9.7	Berippte Wärmeübertragungsflächen	418
9.7.1	Gerade Rippe mit Rechteckquerschnitt	419
9.7.2	Kreisförmige Rippe mit Rechteckquerschnitt	419
9.8	Trennwandwärmeübertrager	421
9.8.1	Gleichstrom	421
9.8.2	Gegenstrom	422
9.8.3	Kreuzstrom	424
9.8.4	Wärmeübertragung mit Phasenübergang	428
9.9	Auswertung und Auslegung	429
9.9.1	Korrekturfaktor für Kreuzstrom	430
9.9.2	Darstellung der Betriebscharakteristik	432
9.9.3	Wärmelängsleitung in der ebenen Trennwand	434
9.9.4	Auslegungsdiagramm	437
<b>10</b>	<b>Feuchte Luft</b>	<b>453</b>
10.1	Zustandseigenschaften feuchter Luft	453
10.1.1	Relative Feuchte	453
10.1.2	Feuchtegrad und Sättigungsgrad	453
10.1.3	Spezifische Enthalpie	455
10.1.4	Spezifisches Volumen und Dichte	456
10.2	Zustandsänderungen feuchter Luft	456
10.2.1	Temperaturänderung	457
10.2.2	Befeuchtung und Entfeuchtung	457
10.2.3	Mischung zweier Feuchtluftmengen	458
10.3	Das $h,x$ -Diagramm von <i>Mollier</i>	459
10.3.1	Temperaturänderung	461
10.3.2	Befeuchtung und Entfeuchtung	462
10.3.3	Mischung zweier Feuchtluftmengen	462
10.4	Verdunstungsmodell	462
10.4.1	Verdunstungskoeffizient	462
10.4.2	Energiebilanzen	463
10.4.3	<i>Lewissche Beziehung</i>	464
10.5	Kühlgrenze	413
10.6	Verdunstung und Tauniederschlag	467
10.7	Wasserdampfdiffusion durch Wände	468
<b>11</b>	<b>Verbrennung</b>	<b>475</b>
11.1	Brennstoffe	476
11.1.1	Gasförmige Brennstoffe	476
11.1.2	Feste und flüssige Brennstoffe	480
11.1.3	Zusammensetzung des Verbrennungsgases, Verbrennungsdreiecke,	

Verbrennungskontrolle .....	483
11.2 Technische Gesichtspunkte der Verbrennung .....	491
11.2.1 Einleitung und Ablauf der Verbrennung .....	491
11.2.2 Vollkommene und unvollkommene Verbrennung .....	491
11.2.3 Taupunkt der Verbrennungsgase .....	494
11.2.4 Schornsteinzug .....	494
11.3 Brennwert und Heizwert .....	495
11.4 Theoretische Verbrennungstemperatur .....	497
<b>12 Chemische Thermodynamik .....</b>	<b>507</b>
12.1 Systeme mit chemischen Reaktionen .....	507
12.2 Reaktionsumsatz und Umsatzgrad .....	509
12.3 Molare Reaktionsenthalpien und molare Standard-Bildungsenthalpien; Satz von <i>Hess</i> .....	512
12.3.1 Molare Reaktionsenthalpien .....	512
12.3.2 Molare Standard-Bildungsenthalpien; Satz von <i>Hess</i> .....	516
12.4 Absolute molare Entropien; dritter Hauptsatz der Thermodynamik .....	522
12.5 Die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes für chemische Reaktionen .....	526
12.6 Chemische Exergien .....	533
12.7 Brennstoffexergien .....	536
12.8 Chemische Potentiale .....	541
12.9 Das Massenwirkungsgesetz .....	543
12.10 Druck- und Temperaturabhängigkeit der Konstanten des Massenwirkungsgesetzes; Gesetz von <i>LeChatelier</i> und <i>Braun</i> .....	548
12.11 Modell isotherm-isobarer reversibler chemischer Reaktionen .....	553
12.11.1 Modell der reversiblen Oxidation von Wasserstoff .....	553
12.11.2 Modell beliebiger homogener reversibler chemischer Reaktionen idealer Gase .....	557
12.11.3 Verlustlose Speicherung von Wärme und Arbeit in Form chemischer Energie .....	558
12.12 Brennstoffzellen .....	560
<b>Anhang .....</b>	<b>567</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>604</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>612</b>