

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeine Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1	Thermodynamik	1
1.1.1	Von der historischen Entwicklung der Thermodynamik	1
1.1.2	Was ist Thermodynamik?	9
1.2	System und Zustand	11
1.2.1	System und Systemgrenzen	12
1.2.2	Zustand und Zustandsgrößen	13
1.2.3	Extensive, intensive, spezifische und molare Zustandsgrößen, Dichten	16
1.2.4	Fluide Phasen. Zustandsgleichungen	20
1.3	Prozesse	21
1.3.1	Prozess und Zustandsänderung	21
1.3.2	Reversible und irreversible Prozesse	22
1.3.3	Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik als Prinzip der Irreversibilität	26
1.3.4	Quasistatische Zustandsänderungen und irreversible Prozesse	27
1.3.5	Stationäre Prozesse	28
1.4	Temperatur	30
1.4.1	Thermisches Gleichgewicht und Temperatur	30
1.4.2	Thermometer und empirische Temperatur	33
1.4.3	Die Temperatur des idealen Gasthermometers	35
1.4.4	Celsius-Temperatur. Internationale Praktische Temperaturskala	38
1.4.5	Die thermische Zustandsgleichung idealer Gase	41
<b>2</b>	<b>Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik</b>	<b>43</b>
2.1	Der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme	43
2.1.1	Mechanische Energien	43
2.1.2	Der 1. Hauptsatz. Innere Energie	47
2.1.3	Die kalorische Zustandsgleichung flüssiger Phasen	51
2.1.4	Die Energiebilanzgleichung	54
2.2	Arbeit und Wärme	56
2.2.1	Mechanische Arbeit und Leistung	56
2.2.2	Volumenänderungsarbeit	58

2.2.3	Wellenarbeit . . . . .	62
2.2.4	Elektrische Arbeit und Arbeit nichtflüssiger Systeme . . . . .	64
2.2.5	Wärme und Wärmestrom . . . . .	68
2.3	Energiebilanzgleichungen . . . . .	70
2.3.1	Energiebilanzgleichungen für geschlossene Systeme . . . . .	70
2.3.2	Massenbilanz und Energiebilanz für einen Kontrollraum . . . . .	76
2.3.3	Instationäre Prozesse offener Systeme . . . . .	82
2.3.4	Der 1. Hauptsatz für stationäre Fließprozesse . . . . .	85
2.3.5	Enthalpie . . . . .	87
3	<b>Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik</b> . . . . .	93
3.1	Entropie und Entropiebilanzen . . . . .	93
3.1.1	Einführende Überlegungen . . . . .	94
3.1.2	Die Formulierung des 2. Hauptsatzes durch Entropie und thermodynamische Temperatur . . . . .	97
3.1.3	Die Entropiebilanzgleichung für geschlossene Systeme .	101
3.1.4	Die Irreversibilität des Wärmeübergangs und die thermodynamische Temperatur . . . . .	106
3.1.5	Die Umwandlung von Wärme in Nutzarbeit. Wärmekraftmaschinen . . . . .	112
3.1.6	Die Entropiebilanzgleichung für einen Kontrollraum .	117
3.1.7	Die Entropiebilanzgleichung für stationäre Fließprozesse . . . . .	120
3.2	Die Entropie als Zustandsgröße . . . . .	125
3.2.1	Die Entropie reiner Stoffe . . . . .	125
3.2.2	Die Messung thermodynamischer Temperaturen und die Entropie idealer Gase . . . . .	129
3.2.3	Das $T,s$ -Diagramm . . . . .	134
3.2.4	Fundamentalgleichungen und charakteristische Funktionen . . . . .	137
3.2.5	Gleichgewichts- und Stabilitätsbedingungen. Phasengleichgewicht . . . . .	142
3.3	Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf Energieumwandlungen: Exergie und Anergie . . . . .	150
3.3.1	Die beschränkte Umwandelbarkeit der Energie . . . . .	150
3.3.2	Die Definitionen von Exergie, Anergie und thermodynamischer Umgebung . . . . .	152
3.3.3	Die Rolle der Exergie in der Thermodynamik und ihren technischen Anwendungen . . . . .	156
3.3.4	Die Berechnung von Exergien und Exergieverlusten .	159
3.3.5	Exergie und Anergie der Wärme . . . . .	164
3.3.6	Exergie und Anergie eines Stoffstroms . . . . .	169
3.3.7	Exnergiebilanzen und exergetische Wirkungsgrade . . . . .	171

<b>4 Die thermodynamischen Eigenschaften reiner Fluide . . . . .</b>	<b>177</b>
4.1 Die thermischen Zustandsgrößen . . . . .	177
4.1.1 Die $p, v, T$ -Fläche . . . . .	178
4.1.2 Das $p, T$ -Diagramm und die Gleichung von Clausius-Clapeyron . . . . .	181
4.1.3 Die thermische Zustandsgleichung . . . . .	185
4.1.4 Das Prinzip der korrespondierenden Zustände . . . . .	190
4.1.5 Kubische Zustandsgleichungen . . . . .	192
4.2 Das Nassdampfgebiet . . . . .	199
4.2.1 Nasser Dampf . . . . .	199
4.2.2 Dampfdruck und Siedetemperatur . . . . .	200
4.2.3 Die spezifischen Zustandsgrößen im Nassdampfgebiet . . . . .	203
4.3 Zwei Stoffmodelle: ideales Gas und inkompressibles Fluid . . . . .	208
4.3.1 Die Zustandsgleichungen des idealen Gases . . . . .	208
4.3.2 Die spezifischen Wärmekapazitäten idealer Gase . . . . .	211
4.3.3 Entropie und isentrope Zustandsänderungen idealer Gase . . . . .	214
4.3.4 Das inkompressible Fluid . . . . .	217
4.4 Zustandsgleichungen, Tafeln und Diagramme . . . . .	220
4.4.1 Die Bestimmung von Enthalpie und Entropie mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung . . . . .	221
4.4.2 Fundamentalgleichungen . . . . .	224
4.4.3 Schallgeschwindigkeit und Isentropenexponent . . . . .	226
4.4.4 Tafeln der Zustandsgrößen . . . . .	229
4.4.5 Zustandsdiagramme . . . . .	231
<b>5 Gemische und chemische Reaktionen . . . . .</b>	<b>235</b>
5.1 Mischphasen und Phasengleichgewichte . . . . .	235
5.1.1 Größen zur Beschreibung der Zusammensetzung . . . . .	236
5.1.2 Mischungsgrößen und die Irreversibilität des Mischungsvorgangs . . . . .	240
5.1.3 Partielle molare Größen . . . . .	243
5.1.4 Die Gibbs-Funktion einer Mischphase . . . . .	248
5.1.5 Chemische Potenziale. Membrangleichgewicht . . . . .	252
5.1.6 Phasengleichgewichte . . . . .	257
5.1.7 Phasengleichgewichte in Zweistoffsystemen . . . . .	260
5.2 Ideale Gemische . . . . .	266
5.2.1 Ideale Gasgemische . . . . .	266
5.2.2 Die Zustandsgleichungen idealer Gasgemische . . . . .	268
5.2.3 Ideale Lösungen . . . . .	272
5.2.4 Phasengleichgewicht. Gesetz von Raoult . . . . .	277
5.3 Ideale Gas-Dampf-Gemische. Feuchte Luft . . . . .	281
5.3.1 Der Sättigungspartialdruck des Wasserdampfes und der Taupunkt . . . . .	282
5.3.2 Absolute und relative Feuchte . . . . .	286

5.3.3	Die Wasserbeladung . . . . .	288
5.3.4	Das spezifische Volumen feuchter Luft . . . . .	290
5.3.5	Die spezifische Enthalpie feuchter Luft . . . . .	291
5.3.6	Das Enthalpie, Wasserbeladungs-Diagramm . . . . .	295
5.3.7	Die spezifische Entropie feuchter Luft . . . . .	297
5.4	Reale fluide Gemische . . . . .	302
5.4.1	Realpotenzial und Fugazitätskoeffizient . . . . .	302
5.4.2	Thermische Zustandsgleichungen für Gemische . . . . .	306
5.4.3	Die Berechnung des Verdampfungsgleichgewichts mit der thermischen Zustandsgleichung des Gemisches . . . . .	310
5.4.4	Exzesspotenzial und Aktivitätskoeffizient . . . . .	311
5.4.5	Das Verdampfungsgleichgewicht bei mäßigen Drücken . . . . .	315
5.4.6	Die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten . . . . .	320
5.5	Chemisch reagierende Gemische . . . . .	327
5.5.1	Reaktionen und Reaktionsgleichungen . . . . .	327
5.5.2	Stöchiometrie . . . . .	333
5.5.3	Reaktionsenthalpien und Standard-Bildungsenthalpien . . . . .	338
5.5.4	Der 3. Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	344
5.5.5	Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf chemische Reaktionen . . . . .	346
5.5.6	Chemische Exergien . . . . .	350
5.6	Reaktionsgleichgewichte . . . . .	356
5.6.1	Die Bedingungen des Reaktionsgleichgewichts . . . . .	356
5.6.2	Das Reaktionsgleichgewicht in einfachen Fällen. Gleichgewichtskonstanten . . . . .	363
5.6.3	Gasgleichgewichte . . . . .	367
5.6.4	Heterogene Reaktionsgleichgewichte . . . . .	371
6	<b>Stationäre Fließprozesse . . . . .</b>	375
6.1	Technische Arbeit, Dissipationsenergie und die Zustandsänderung des strömenden Fluids . . . . .	375
6.1.1	Dissipationsenergie und technische Arbeit . . . . .	376
6.1.2	Polytropen, Polytrope Wirkungsgrade . . . . .	382
6.2	Strömungs- und Arbeitsprozesse . . . . .	387
6.2.1	Strömungsprozesse . . . . .	387
6.2.2	Adiabate Düsen und Diffusoren . . . . .	394
6.2.3	Querschnittsflächen adiabater Düsen und Diffusoren . . . . .	397
6.2.4	Adiabate Turbinen und Verdichter . . . . .	401
6.2.5	Nichtadiabatische Verdichtung . . . . .	408
6.3	Wärmeübertrager . . . . .	411
6.3.1	Die Anwendung des 1. Hauptsatzes . . . . .	411
6.3.2	Die Temperaturen der beiden Fluidströme . . . . .	415
6.3.3	Der Exiergeverlust eines Wärmeübertragers . . . . .	418
6.4	Thermische Stofftrennprozesse . . . . .	420
6.4.1	Trocknen . . . . .	420

6.4.2	Verdampfen und Eindampfen . . . . .	427
6.4.3	Destillieren und Rektifizieren . . . . .	430
6.4.4	Absorbieren . . . . .	436
<b>7</b>	<b>Verbrennungsprozesse und Verbrennungskraftanlagen . . . . .</b>	<b>443</b>
7.1	Mengenberechnung bei vollständiger Verbrennung . . . . .	443
7.1.1	Brennstoffe und Verbrennungsgleichungen . . . . .	444
7.1.2	Mindestluftmenge, Luftverhältnis und Verbrennungsgas	446
7.1.3	Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse . . . . .	449
7.1.4	Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung	453
7.2	Energetik der Verbrennungsprozesse . . . . .	457
7.2.1	Die Anwendung des 1. Hauptsatzes . . . . .	457
7.2.2	Heizwert und Brennwert . . . . .	464
7.2.3	Abgasverlust und Kesselwirkungsgrad . . . . .	468
7.2.4	Die Nutzung der Wasserdampf-Teilkondensation in Brennwertkesseln . . . . .	471
7.2.5	Die adiabate Verbrennungstemperatur . . . . .	478
7.2.6	Die Exergie der Brennstoffe . . . . .	480
7.2.7	Der Exergieverlust der adiabaten Verbrennung . . . . .	484
7.3	Verbrennungskraftanlagen . . . . .	487
7.3.1	Leistungsbilanz und Wirkungsgrad . . . . .	487
7.3.2	Die einfache Gasturbinenanlage . . . . .	489
7.3.3	Die genauere Berechnung des Gasturbinenprozesses . .	494
7.3.4	Die Gasturbine als Flugzeugantrieb . . . . .	500
7.3.5	Verbrennungsmotoren . . . . .	504
7.3.6	Die Brennstoffzelle . . . . .	508
7.3.7	Brennstoffzellen-Systeme . . . . .	517
<b>8</b>	<b>Thermodynamik der Wärmekraftanlagen . . . . .</b>	<b>523</b>
8.1	Die Umwandlung von Primärenergie in Nutzenergie . . . . .	523
8.1.1	Übersicht über die Umwandlungsverfahren . . . . .	527
8.1.2	Thermische Kraftwerke . . . . .	530
8.1.3	Kraftwerkswirkungsgrade . . . . .	532
8.1.4	Kreisprozesse für Wärmekraftmaschinen . . . . .	535
8.2	Dampfkraftwerke . . . . .	541
8.2.1	Die einfache Dampfkraftanlage . . . . .	541
8.2.2	Zwischenüberhitzung . . . . .	548
8.2.3	Regenerative Speisewasser- und Luftvorwärmung . . .	550
8.2.4	Das moderne Dampfkraftwerk . . . . .	553
8.2.5	Kombinierte Gas-Dampf-Kraftwerke . . . . .	555
8.2.6	Kernkraftwerke . . . . .	558
8.3	Die CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromerzeugung . . . . .	560
8.3.1	Die Berechnung der CO <sub>2</sub> -Emission . . . . .	561
8.3.2	Ergebnisse . . . . .	564

<b>9 Thermodynamik des Heizens und Kühlens . . . . .</b>	<b>569</b>
9.1 Thermodynamische Grundlagen des Heizens und des Kühlens . . . . .	569
9.1.1 Die Grundaufgabe der Heiztechnik und der Kältetechnik . . . . .	569
9.1.2 Wärmepumpe und Kältemaschine . . . . .	572
9.1.3 Wärmetransformation . . . . .	576
9.2 Heizsysteme . . . . .	579
9.2.1 Heizzahl und exergetischer Wirkungsgrad . . . . .	579
9.2.2 Konventionelle Heizsysteme . . . . .	582
9.2.3 Wärmepumpen-Heizsysteme . . . . .	584
9.2.4 Kraft-Wärme-Kopplung. Heizkraftwerke . . . . .	586
9.3 Einige Verfahren zur Kälteerzeugung . . . . .	590
9.3.1 Kompressionskältemaschinen . . . . .	592
9.3.2 Absorptionskältemaschinen . . . . .	597
9.3.3 Kältemittel . . . . .	602
9.3.4 Das Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung . . . . .	605
<b>10 Mengenmaße, Einheiten, Stoffdaten . . . . .</b>	<b>609</b>
10.1 Mengenmaße . . . . .	609
10.1.1 Masse und Gewicht . . . . .	609
10.1.2 Teilchenzahl und Stoffmenge . . . . .	610
10.1.3 Das Normvolumen . . . . .	612
10.2 Einheiten . . . . .	613
10.2.1 Die Einheiten des Internationalen Einheitensystems . . . . .	613
10.2.2 Einheiten anderer Einheitensysteme. Umrechnungsfaktoren . . . . .	616
10.3 Stoffdaten . . . . .	618
10.3.1 Allgemeine Daten . . . . .	618
10.3.2 Berechnungsgleichungen für Enthalpie und Entropie von Luft und Verbrennungsgasen . . . . .	620
10.3.3 Tabellen der mittleren spezifischen Wärmekapazität und der spezifischen Entropie beim Standarddruck . . . . .	624
10.3.4 Aus der Dampftafel für Wasser . . . . .	627
10.3.5 Heizwerte, Brennwerte und Brennstoff-Exergien . . . . .	628
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>631</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>651</b>