

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeine Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1	Einordnung der Thermodynamik als Wissenschaft	1
1.1.1	Was ist Thermodynamik?	2
1.1.2	Historische Entwicklung der Thermodynamik	4
1.1.3	Die Entwicklungslinien der Thermodynamik	12
1.2	System und Zustand	14
1.2.1	System und Systemgrenzen	14
1.2.2	Zustand und Zustandsgrößen	15
1.2.3	Extensive, intensive, spezifische und molare Zustandsgrößen	18
1.2.4	Zustandsgleichungen	22
1.3	Die Temperatur als Zustandgröße	23
1.3.1	Thermisches Gleichgewicht	23
1.3.2	Thermometer und empirische Temperatur	26
1.3.3	Die Temperatur des idealen Gasthermometers	28
1.3.4	Temperaturskalen	31
1.3.5	Die thermische Zustandsgleichung idealer Gase	34
1.4	Prozesse	35
1.4.1	Prozess und Zustandsänderung	35
1.4.2	Reversible und irreversible Prozesse	37
1.4.3	Stationäre Prozesse	38
<b>2</b>	<b>Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik</b>	<b>39</b>
2.1	Die Postulate zum 1. Hauptsatz	40
2.2	Energieformen	44
2.2.1	Kinetische und potenzielle Energie	44
2.2.2	Die innere Energie	47
2.2.3	Arbeit und Wärme	51
2.2.4	Mechanische Arbeit und Leistung	51
2.2.5	Volumenänderungsarbeit	53
2.2.6	Wellenarbeit	57
2.2.7	Elektrische Arbeit und Arbeit nichtfluider Systeme	60
2.2.8	Wärme und Wärmestrom	63
2.3	Energiebilanzgleichungen	66
2.3.1	Energiebilanzgleichungen für geschlossene Systeme	66

2.3.2	Massenbilanz und Energiebilanz für einen Kontrollraum .....	72
2.3.3	Instationäre Prozesse offener Systeme .....	78
2.3.4	Der 1. Hauptsatz für stationäre Fließprozesse .....	81
2.3.5	Enthalpie .....	84
<b>3</b>	<b>Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik .....</b>	<b>89</b>
3.1	Entropie und Entropiebilanzen .....	90
3.1.1	Einführende Überlegungen .....	90
3.1.2	Die Formulierung des 2. Hauptsatzes durch Postulate .	92
3.1.3	Die Entropiebilanzgleichung für geschlossene Systeme .	96
3.1.4	Die Irreversibilität des Wärmeübergangs und die thermodynamische Temperatur .....	102
3.1.5	Die Umwandlung von Wärme in Nutzarbeit. Wärmekraftmaschinen .....	108
3.1.6	Die Entropiebilanzgleichung für einen Kontrollraum ...	112
3.1.7	Die Entropiebilanzgleichung für stationäre Fließprozesse .....	116
3.2	Die Entropie als Zustandsgröße .....	120
3.2.1	Die Entropie reiner Stoffe .....	121
3.2.2	Die Messung thermodynamischer Temperaturen und die Entropie idealer Gase .....	125
3.2.3	Das $T,s$ -Diagramm .....	131
3.2.4	Fundamentalgleichungen und charakteristische Funktionen .....	134
3.2.5	Gleichgewichts- und Stabilitätsbedingungen. Phasengleichgewicht .....	138
3.3	Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf Energieumwandlungen: Exergie und Anergie .....	146
3.3.1	Die beschränkte Umwandelbarkeit der Energie .....	146
3.3.2	Die Definitionen von Exergie, Anergie und thermodynamischer Umgebung .....	149
3.3.3	Die Rolle der Exergie in der Thermodynamik und ihren technischen Anwendungen .....	153
3.3.4	Die Berechnung von Exergien und Exergieverlusten ...	155
3.3.5	Exergie und Anergie der Wärme .....	159
3.3.6	Exergie und Anergie eines Stoffstroms .....	164
3.3.7	Exergiebilanzen und exergetische Wirkungsgrade ....	166
<b>4</b>	<b>Die thermodynamischen Eigenschaften reiner Fluide .....</b>	<b>171</b>
4.1	Die thermischen Zustandsgrößen .....	171
4.1.1	Die $p, v, T$ -Fläche .....	172
4.1.2	Das $p, T$ -Diagramm und die Gleichung von Clausius-Clapeyron .....	175
4.1.3	Die thermische Zustandsgleichung .....	179

4.1.4	Das Prinzip der korrespondierenden Zustände . . . . .	184
4.1.5	Kubische Zustandsgleichungen . . . . .	187
4.2	Das Nassdampfgebiet . . . . .	193
4.2.1	Nasser Dampf . . . . .	193
4.2.2	Dampfdruck und Siedetemperatur . . . . .	195
4.2.3	Die spezifischen Zustandsgrößen im Nassdampfgebiet . . . . .	197
4.3	Zwei Stoffmodelle: ideales Gas und inkompressibles Fluid . . . . .	202
4.3.1	Die Zustandsgleichungen des idealen Gases . . . . .	203
4.3.2	Die spezifischen Wärmekapazitäten idealer Gase . . . . .	206
4.3.3	Entropie und isentrope Zustandsänderungen idealer Gase . . . . .	208
4.3.4	Das inkompressible Fluid . . . . .	212
4.4	Zustandsgleichungen, Tafeln und Diagramme . . . . .	215
4.4.1	Die Bestimmung von Enthalpie und Entropie mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung . . . . .	216
4.4.2	Fundamentalgleichungen . . . . .	218
4.4.3	Schallgeschwindigkeit und Isentropenexponent . . . . .	221
4.4.4	Tafeln der Zustandsgrößen . . . . .	223
4.4.5	Zustandsdiagramme . . . . .	225
<b>5</b>	<b>Gemische und chemische Reaktionen . . . . .</b>	<b>231</b>
5.1	Mischphasen und Phasengleichgewichte . . . . .	231
5.1.1	Größen zur Beschreibung der Zusammensetzung . . . . .	232
5.1.2	Mischungsgrößen und die Irreversibilität des Mischungsvorgangs . . . . .	236
5.1.3	Partielle molare Größen . . . . .	240
5.1.4	Die Gibbs-Funktion einer Mischphase . . . . .	246
5.1.5	Chemische Potenziale. Membrangleichgewicht . . . . .	249
5.1.6	Phasengleichgewichte . . . . .	254
5.1.7	Phasengleichgewichte in Zweistoffsystemen . . . . .	257
5.2	Ideale Gemische . . . . .	263
5.2.1	Ideale Gasgemische . . . . .	263
5.2.2	Die Zustandsgleichungen idealer Gasgemische . . . . .	265
5.2.3	Ideale Lösungen . . . . .	269
5.2.4	Phasengleichgewicht. Gesetz von Raoult . . . . .	274
5.3	Ideale Gas-Dampf-Gemische. Feuchte Luft . . . . .	278
5.3.1	Der Sättigungspartialdruck des Wasserdampfes und der Taupunkt . . . . .	279
5.3.2	Absolute und relative Feuchte . . . . .	283
5.3.3	Die Wasserbeladung . . . . .	285
5.3.4	Das spezifische Volumen feuchter Luft . . . . .	287
5.3.5	Die spezifische Enthalpie feuchter Luft . . . . .	288
5.3.6	Das Enthalpie, Wasserbeladungs-Diagramm . . . . .	293
5.3.7	Die spezifische Entropie feuchter Luft . . . . .	296
5.4	Reale fluide Gemische . . . . .	299

5.4.1	Realpotenzial und Fugazitätskoeffizient . . . . .	300
5.4.2	Thermische Zustandsgleichungen für Gemische . . . . .	304
5.4.3	Die Berechnung des Verdampfungsgleichgewichts mit der thermischen Zustandsgleichung des Gemisches . . .	307
5.4.4	Exzesspotenzial und Aktivitätskoeffizient . . . . .	308
5.4.5	Das Verdampfungsgleichgewicht bei mäßigen Drücken .	312
5.4.6	Die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten . . . . .	318
5.5	Chemisch reagierende Gemische . . . . .	325
5.5.1	Reaktionen und Reaktionsgleichungen . . . . .	325
5.5.2	Stöchiometrie . . . . .	331
5.5.3	Reaktionsenthalpien und Standard-Bildungsenthalpien	336
5.5.4	Der 3. Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	342
5.5.5	Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf chemische Reaktionen . . . . .	345
5.5.6	Chemische Exergien . . . . .	349
5.6	Reaktionsgleichgewichte . . . . .	354
5.6.1	Die Bedingungen des Reaktionsgleichgewichts . . . . .	354
5.6.2	Das Reaktionsgleichgewicht in einfachen Fällen. Gleichgewichtskonstanten . . . . .	361
5.6.3	Gasgleichgewichte . . . . .	365
5.6.4	Heterogene Reaktionsgleichgewichte . . . . .	370
<b>6</b>	<b>Stationäre Fließprozesse . . . . .</b>	<b>375</b>
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 . . . . .	402
6.2.5	Nichtadiabate Verdichtung . . . . .	409
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 Exergieverlust eines Wärmeübertragers . . . . .	418
6.4	Thermische Stofftrennprozesse . . . . .	420
6.4.1	Trocknen . . . . .	421
6.4.2	Verdampfen und Eindampfen . . . . .	427
6.4.3	Destillieren und Rektifizieren . . . . .	430
6.4.4	Absorption . . . . .	436

<b>7</b>	<b>Verbrennungsprozesse und Verbrennungskraftmaschinen . .</b>	<b>443</b>
7.1	Mengenberechnung bei vollständiger Verbrennung . . . . .	444
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 . . . . .	489
7.3.2	Die einfache Gasturbinenanlage . . . . .	490
7.3.3	Die genauere Berechnung des Gasturbinenprozesses . .	495
7.3.4	Die Gasturbine als Flugzeugantrieb . . . . .	500
7.3.5	Verbrennungsmotoren . . . . .	504
7.4	Die Brennstoffzelle . . . . .	508
7.4.1	Die Nernst-Gleichung . . . . .	512
7.4.2	Die Strom-Spannungskennlinie . . . . .	515
7.4.3	Brennstoffzellen-Systeme und Wasserstoff-Erzeugung . .	521
<b>8</b>	<b>Thermodynamik der Wärmekraftanlagen . . . . .</b>	<b>527</b>
8.1	Die Umwandlung von Primärenergie in Nutzenergie . . . . .	527
8.1.1	Übersicht über die Umwandlungsverfahren . . . . .	531
8.1.2	Thermische Kraftwerke . . . . .	534
8.1.3	Kraftwerkswirkungsgrade . . . . .	536
8.1.4	Kreisprozesse für Wärmekraftmaschinen . . . . .	539
8.2	Dampfkraftwerke . . . . .	544
8.2.1	Die einfache Dampfkraftanlage . . . . .	545
8.2.2	Zwischenüberhitzung . . . . .	552
8.2.3	Regenerative Speisewasser- und Luftvorwärmung . . . .	553
8.2.4	Das moderne Dampfkraftwerk . . . . .	556
8.2.5	Kombinierte Gas-Dampf-Kraftwerke . . . . .	559
8.2.6	Kernkraftwerke . . . . .	562
8.3	Die CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromerzeugung . . . . .	563
8.3.1	Die Berechnung der CO <sub>2</sub> -Emission . . . . .	563
8.3.2	Ergebnisse . . . . .	566

<b>9</b>	<b>Thermodynamik des Heizens und Kühlens</b>	573
9.1	Thermodynamische Grundlagen des Heizens und des Kühlens	573
9.1.1	Die Grundaufgabe der Heiztechnik und der Kältetechnik	573
9.1.2	Wärmepumpe und Kältemaschine	576
9.1.3	Wärmetransformation	580
9.2	Heizsysteme	582
9.2.1	Heizzahl und exergetischer Wirkungsgrad	583
9.2.2	Konventionelle Heizsysteme	586
9.2.3	Wärmepumpen-Heizsysteme	588
9.2.4	Kraft-Wärme-Kopplung. Heizkraftwerke	590
9.3	Einige Verfahren zur Kälteerzeugung	594
9.3.1	Kompressionskältemaschinen	596
9.3.2	Absorptionskältemaschinen	601
9.3.3	Kältemittel	605
9.3.4	Das Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung	609
<b>10</b>	<b>Mengenmaße, Einheiten, Stoffdaten</b>	613
10.1	Mengenmaße	613
10.1.1	Masse und Gewicht	613
10.1.2	Teilchenzahl und Stoffmenge	614
10.1.3	Das Normvolumen	615
10.2	Einheiten	617
10.2.1	Die Einheiten des Internationalen Einheitensystems	617
10.2.2	Einheiten anderer Einheitensysteme. Umrechnungsfaktoren	621
10.3	Stoffdaten	622
10.3.1	Allgemeine Daten	622
10.3.2	Berechnungsgleichungen für Enthalpie und Entropie von Luft und Verbrennungsgasen	624
10.3.3	Tabellen der mittleren spezifischen Wärmekapazität und der spezifischen Entropie beim Standarddruck	628
10.3.4	Aus der Dampftafel für Wasser	631
10.3.5	Heizwerte, Brennwerte und Brennstoff-Exergien	632
	<b>Literatur</b>	635
	<b>Index</b>	655

Thermodynamik

Grundlagen und technische Anwendungen

Baehr, H.D.; Kabelac, S.

2016, XIX, 672 S. 294 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-49567-4