

Hans Dieter Baehr

# Thermodynamik

Eine Einführung in die Grundlagen  
und ihre technischen Anwendungen

Siebente, korrigierte Auflage

Mit 262 Abbildungen und zahlreichen Tabellen  
sowie 57 Beispielen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo Hong Kong 1989

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b> . . . . .	XIII
<b>1 Allgemeine Grundlagen</b> . . . . .	1
1.1 Thermodynamik . . . . .	1
1.1.1 Von der historischen Entwicklung der Thermodynamik . . . . .	1
1.1.2 Was ist Thermodynamik? . . . . .	7
1.2 System und Zustand . . . . .	9
1.2.1 System und Systemgrenze . . . . .	9
1.2.2 Zustand und Zustandsgrößen . . . . .	10
1.2.3 Extensive, intensive, spezifische und molare Zustandsgrößen . . . . .	13
1.2.4 Fluide Phasen. Zustandsgleichungen . . . . .	15
1.3 Prozesse . . . . .	17
1.3.1 Prozeß und Zustandsänderung . . . . .	17
1.3.2 Reversible und irreversible Prozesse . . . . .	18
1.3.3 Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik als Prinzip der Irreversibilität . . . . .	20
1.3.4 Quasistatische Zustandsänderungen und irreversible Prozesse . . . . .	21
1.3.5 Stationäre Prozesse . . . . .	22
1.4 Temperatur . . . . .	23
1.4.1 Thermisches Gleichgewicht und Temperatur . . . . .	23
1.4.2 Thermometer und empirische Temperatur . . . . .	26
1.4.3 Die Temperatur des idealen Gasthermometers . . . . .	28
1.4.4 Celsius-Temperatur. Internationale Praktische Temperaturskala . . . . .	31
1.4.5 Die thermische Zustandsgleichung idealer Gase . . . . .	33
<b>2 Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik</b> . . . . .	35
2.1 Der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme . . . . .	35
2.1.1 Mechanische Energien . . . . .	35
2.1.2 Der 1. Hauptsatz. Innere Energie . . . . .	38
2.1.3 Die kalorische Zustandsgleichung der Fluide . . . . .	41
2.1.4 Die Energiebilanzgleichung . . . . .	44
2.2 Arbeit und Wärme . . . . .	46
2.2.1 Mechanische Arbeit und Leistung . . . . .	46
2.2.2 Volumenänderungsarbeit . . . . .	47
2.2.3 Wellenarbeit . . . . .	51
2.2.4 Elektrische Arbeit und Arbeit bei nichtfluiden Systemen . . . . .	53
2.2.5 Wärme und Wärmestrom . . . . .	56
2.3 Energiebilanzgleichungen . . . . .	58
2.3.1 Energiebilanzgleichungen für geschlossene Systeme . . . . .	58
2.3.2 Massenbilanz und Energiebilanz für einen Kontrollraum . . . . .	63

2.3.3	Instationäre Prozesse offener Systeme . . . . .	69
2.3.4	Der 1. Hauptsatz für stationäre Fließprozesse. . . . .	72
2.3.5	Enthalpie . . . . .	74
<b>3</b>	<b>Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .</b>	<b>79</b>
3.1	Der 2. Hauptsatz für geschlossene Systeme . . . . .	79
3.1.1	Einführende Überlegungen . . . . .	79
3.1.2	Die Formulierung des 2. Hauptsatzes durch Entropie und thermodynamische Temperatur . . . . .	82
3.1.3	Adiabate Systeme . . . . .	86
3.1.4	Die Irreversibilität des Wärmeübergangs . . . . .	88
3.1.5	Stationäre Prozesse. Perpetuum mobile 2. Art . . . . .	94
3.1.6	Die Umwandlung von Wärme in Nutzarbeit. Wärmekraftmaschine . . . . .	96
3.2	Die Entropie als Zustandsgröße . . . . .	100
3.2.1	Die Entropie reiner Stoffe . . . . .	100
3.2.2	Kanonische Zustandsgleichungen . . . . .	105
3.2.3	Die Messung thermodynamischer Temperaturen . . . . .	107
3.2.4	Entropie und Gibbs-Funktion einer Mischphase. Chemische Potentiale . . . . .	111
3.3	Ergänzungen . . . . .	117
3.3.1	Das $T,s$ -Diagramm . . . . .	117
3.3.2	Dissipationsenergie . . . . .	120
3.3.3	Die Entropiebilanzgleichung für einen Kontrollraum . . . . .	122
3.3.4	Die Entropiebilanzgleichung für stationäre Fließprozesse . . . . .	124
3.4	Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf Energieumwandlungen: Exergie und Anergie . . . . .	129
3.4.1	Die beschränkte Umwandelbarkeit der Energie . . . . .	129
3.4.2	Der Einfluß der Umgebung auf die Energieumwandlungen . . . . .	131
3.4.3	Exergie und Anergie . . . . .	133
3.4.4	Exergie und Anergie der Wärme . . . . .	137
3.4.5	Exergie und Anergie eines stationär strömenden Fluids . . . . .	141
3.4.6	Die Berechnung von Exergieverlusten . . . . .	144
3.4.7	Exergie-Anergie-Flußbilder. Exergetische Wirkungsgrade . . . . .	147
<b>4</b>	<b>Thermodynamische Eigenschaften reiner Fluide . . . . .</b>	<b>153</b>
4.1	Die thermischen Zustandsgrößen . . . . .	153
4.1.1	Die $p,v,T$ -Fläche . . . . .	153
4.1.2	Das $p,T$ -Diagramm . . . . .	156
4.1.3	Die Zweiphasengebiete . . . . .	157
4.1.4	Die thermische Zustandsgleichung für Fluide . . . . .	160
4.1.5	Das Theorem der korrespondierenden Zustände. Generalisierte Zustandsgleichungen . . . . .	162
4.2	Das Naßdampfgebiet . . . . .	168
4.2.1	Nasser Dampf . . . . .	168
4.2.2	Dampfdruck und Siedetemperatur . . . . .	169
4.2.3	Die spezifischen Zustandsgrößen im Naßdampfgebiet . . . . .	171
4.3	Zustandsgleichungen, Tafeln und Diagramme . . . . .	177
4.3.1	Die Bestimmung von Enthalpie und Entropie mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung . . . . .	178

4.3.2	Enthalpie und Entropie eines inkompressiblen Fluids . . . . .	181
4.3.3	Tafeln der Zustandsgrößen . . . . .	183
4.3.4	Zustandsdiagramme . . . . .	185
4.3.5	Die Bestimmung isentroper Enthalpiedifferenzen . . . . .	189
<b>5</b>	<b>Ideale Gase, Gas- und Gas-Dampf-Gemische . . . . .</b>	<b>193</b>
5.1	Ideale Gase . . . . .	193
5.1.1	Thermische und kalorische Zustandsgleichung . . . . .	193
5.1.2	Die spezifische Wärmekapazität . . . . .	195
5.1.3	Entropie und isentrope Zustandsänderungen idealer Gase . . . . .	197
5.2	Ideale Gasgemische . . . . .	200
5.2.1	Massen- und Molanteile. Partialdrücke . . . . .	200
5.2.2	Die Gibbs-Funktion des idealen Gasgemisches . . . . .	202
5.2.3	Thermische, kalorische und Entropie-Zustandsgleichung . . . . .	204
5.3	Gas-Dampf-Gemische. Feuchte Luft . . . . .	208
5.3.1	Der Sättigungsdruck des Dampfes . . . . .	208
5.3.2	Der Taupunkt . . . . .	210
5.3.3	Feuchte Luft . . . . .	211
5.3.4	Absolute und relative Feuchte . . . . .	212
5.3.5	Die Wasserbeladung . . . . .	215
5.3.6	Das spez. Volumen feuchter Luft . . . . .	216
5.3.7	Die spez. Enthalpie feuchter Luft . . . . .	217
5.3.8	Das $h,x$ -Diagramm für feuchte Luft . . . . .	220
<b>6</b>	<b>Stationäre Fließprozesse . . . . .</b>	<b>223</b>
6.1	Technische Arbeit, Dissipationsenergie und die Zustandsänderung des strömenden Fluids . . . . .	223
6.1.1	Dissipationsenergie und technische Arbeit. Eindimensionale Theorie . . . . .	223
6.1.2	Statische Arbeit und statischer Wirkungsgrad . . . . .	227
6.1.3	Polytrope. Polytroper Wirkungsgrad . . . . .	230
6.2	Strömungsprozesse . . . . .	235
6.2.1	Strömungsprozesse mit Wärmezufuhr . . . . .	235
6.2.2	Die Schallgeschwindigkeit . . . . .	236
6.2.3	Adiabate Strömungsprozesse . . . . .	239
6.2.4	Adiabate Düsen- und Diffusorströmung . . . . .	242
6.2.5	Querschnittsflächen und Massenströmdichte bei isentroper Düsen- und Diffusorströmung . . . . .	246
6.2.6	Strömungszustand in einer Laval-Düse bei verändertem Gegendruck . . . . .	250
6.3	Wärmeübertrager . . . . .	252
6.3.1	Allgemeines . . . . .	253
6.3.2	Anwendung des 1. Hauptsatzes . . . . .	254
6.3.3	Die Temperaturen der beiden Fluidströme . . . . .	256
6.3.4	Der Exergieverlust des Wärmeübertragers . . . . .	260
6.4	Mischungsprozesse . . . . .	262
6.4.1	Massen-, Energie- und Entropiebilanzen . . . . .	262
6.4.2	Isobar-isotherme Mischung idealer Gase . . . . .	265
6.4.3	Mischungsprozesse mit feuchter Luft . . . . .	267

6.5	Arbeitsprozesse . . . . .	272
6.5.1	Adiabate Expansion in Turbinen . . . . .	272
6.5.2	Adiabate Verdichtung . . . . .	276
6.5.3	Dissipationsenergie, Arbeitsverlust und Exergieverlust bei der adiabaten Expansion und Kompression . . . . .	278
6.5.4	Nichtadiabate Verdichtung . . . . .	281
<b>7</b>	<b>Verbrennungsprozesse, Verbrennungskraftanlagen . . . . .</b>	<b>284</b>
7.1	Allgemeines . . . . .	284
7.2	Mengenberechnung bei vollständiger Verbrennung . . . . .	285
7.2.1	Brennstoffe und Verbrennungsgleichungen . . . . .	285
7.2.2	Die Berechnung der Verbrennungsluftmenge . . . . .	287
7.2.3	Menge und Zusammensetzung des Verbrennungsgases . . . . .	291
7.3	Energetik der Verbrennungsprozesse . . . . .	294
7.3.1	Die Anwendung des 1. Hauptsatzes . . . . .	294
7.3.2	Heizwert und Brennwert . . . . .	296
7.3.3	Die Enthalpie des Verbrennungsgases und das $h,t$ -Diagramm . . . . .	298
7.3.4	Kesselwirkungsgrad und adiabate Verbrennungstemperatur . . . . .	302
7.3.5	Reaktions- und Bildungsenthalpien . . . . .	306
7.4	Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf Verbrennungsprozesse . . . . .	309
7.4.1	Die reversible chemische Reaktion . . . . .	309
7.4.2	Absolute Entropien, Nernstsches Wärmetheorem . . . . .	310
7.4.3	Die Brennstoffzelle . . . . .	312
7.4.4	Die Exergie der Brennstoffe . . . . .	316
7.4.5	Der Exergieverlust der adiabaten Verbrennung . . . . .	320
7.5	Verbrennungskraftanlagen . . . . .	322
7.5.1	Leistungsbilanz und Wirkungsgrad . . . . .	323
7.5.2	Die einfache Gasturbinenanlage . . . . .	324
7.5.3	Die genauere Berechnung des Gasturbinenprozesses . . . . .	329
7.5.4	Die Gasturbine als Flugzeugantrieb . . . . .	333
7.5.5	Verbrennungsmotoren . . . . .	339
<b>8</b>	<b>Wärmeanlagen . . . . .</b>	<b>344</b>
8.1	Die Umwandlung von Primärenergie in elektrische Energie . . . . .	344
8.1.1	Übersicht über die Umwandlungsverfahren . . . . .	344
8.1.2	Thermische Kraftwerke . . . . .	348
8.1.3	Kraftwerkswirkungsgrade . . . . .	350
8.1.4	Kreisprozesse für Wärmekraftmaschinen . . . . .	355
8.2	Dampfkraftwerke . . . . .	361
8.2.1	Die einfache Dampfkraftanlage . . . . .	361
8.2.2	Zwischenüberhitzung . . . . .	368
8.2.3	Regenerative Speisewasservorwärmung . . . . .	368
8.2.4	Das moderne Dampfkraftwerk . . . . .	373
8.2.5	Kombinierte Gas-Dampf-Kraftwerke . . . . .	375
8.2.6	Kernkraftwerke . . . . .	378

<b>9 Thermodynamik des Heizens und Kühlens . . . . .</b>	<b>382</b>
9.1 Heizen und Kühlen als thermodynamische Grundaufgaben . . . . .	382
9.1.1 Die Grundaufgabe der Heiztechnik und der Kältetechnik . . . . .	382
9.1.2 Gebäudeheizung, Wärmepumpe . . . . .	385
9.1.3 Die Kältemaschine . . . . .	389
9.1.4 Wärmetransformation . . . . .	391
9.2 Heizsysteme . . . . .	393
9.2.1 Heizzahl und exergetischer Wirkungsgrad . . . . .	393
9.2.2 Konventionelle Heizsysteme . . . . .	395
9.2.3 Wärmepumpen-Heizsysteme . . . . .	397
9.2.4 Heizkraftwerke . . . . .	400
9.3 Einige Verfahren zur Kälteerzeugung . . . . .	403
9.3.1 Die Kaltampf-Kompressionskältemaschine . . . . .	403
9.3.2 Mehrstufige Kompressionskältemaschinen . . . . .	408
9.3.3 Das Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung . . . . .	410
<b>10 Mengenmaße, Einheiten, Tabellen . . . . .</b>	<b>414</b>
10.1 Mengenmaße . . . . .	414
10.1.1 Masse und Gewicht . . . . .	414
10.1.2 Teilchenzahl und Stoffmenge . . . . .	414
10.1.3 Das Normvolumen . . . . .	416
10.2 Einheiten . . . . .	417
10.2.1 Die Einheiten des Internationalen Einheitensystems . . . . .	418
10.2.2 Einheiten anderer Einheitensysteme, Umrechnungsfaktoren . . . . .	420
10.3 Tabellen . . . . .	422
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>434</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>445</b>