

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</b>	<b>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</b>	<b>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>