

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Häufig verwendete Formelzeichen</b> . . . . .	XVII
<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? . . . . .	9
1.2 System und Zustand . . . . .	11
1.2.1 System und Systemgrenze . . . . .	11
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 . . . . .	23
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 . . . . .	29
1.4 Temperatur . . . . .	30
1.4.1 Thermisches Gleichgewicht und Temperatur . . . . .	31
1.4.2 Thermometer und empirische Temperatur . . . . .	33
1.4.3 Die Temperatur des idealen Gasthermometers . . . . .	36
1.4.4 Celsius-Temperatur. Internationale Temperaturskala . . . . .	39
1.4.5 Die thermische Zustandsgleichung idealer Gase . . . . .	42

<b>2</b>	<b>Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik</b>	44
2.1	Der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme	44
2.1.1	Mechanische Energien	44
2.1.2	Der 1. Hauptsatz. Innere Energie	48
2.1.3	Die kalorische Zustandsgleichung der Fluide	51
2.1.4	Die Energiebilanzgleichung	54
2.2	Arbeit und Wärme	57
2.2.1	Mechanische Arbeit und Leistung	57
2.2.2	Volumenänderungsarbeit	58
2.2.3	Wellenarbeit	63
2.2.4	Elektrische Arbeit und Arbeit nichtfluider Systeme	65
2.2.5	Wärme und Wärmestrom	68
2.3	Energiebilanzgleichungen	71
2.3.1	Energiebilanzgleichungen für geschlossene Systeme	71
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	88
<b>3</b>	<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	121
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	135
3.2.4	Fundamentalgleichungen und charakteristische Funktionen	138
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 . . . . .	151
3.3.2	Die Definitionen von Exergie, Anergie und thermodynamischer Umgebung . . . . .	153
3.3.3	Die Rolle der Exergie in der Thermodynamik und ihren technischen Anwendungen . . . . .	157
3.3.4	Die Berechnung von Exergien und Exergieverlusten . . . . .	160
3.3.5	Exergie und Anergie der Wärme . . . . .	165
3.3.6	Exergie und Anergie eines Stoffstroms . . . . .	170
3.3.7	Exergiebilanzen und exergetische Wirkungsgrade . . . . .	172
<b>4</b>	<b>Die thermodynamischen Eigenschaften der Fluide . . . . .</b>	<b>178</b>
4.1	Die thermischen Zustandsgrößen . . . . .	178
4.1.1	Die $p, v, T$ -Fläche . . . . .	179
4.1.2	Das $p, T$ -Diagramm und die Gleichung von Clausius-Clapeyron . . . . .	182
4.1.3	Die thermische Zustandsgleichung . . . . .	186
4.1.4	Das Prinzip der korrespondierenden Zustände . . . . .	191
4.1.5	Kubische Zustandsgleichungen . . . . .	194
4.2	Das Naßdampfgebiet . . . . .	200
4.2.1	Nasser Dampf . . . . .	200
4.2.2	Dampfdruck und Siedetemperatur . . . . .	202
4.2.3	Die spezifischen Zustandsgrößen im Naßdampfgebiet . . . . .	204
4.3	Zwei Stoffmodelle: ideales Gas und inkompressibles Fluid . . . . .	210
4.3.1	Die Zustandsgleichungen des idealen Gases . . . . .	210
4.3.2	Die spezifischen Wärmekapazitäten idealer Gase . . . . .	213
4.3.3	Entropie und isentrope Zustandsänderungen idealer Gase . . . . .	216
4.3.4	Das inkompressible Fluid . . . . .	219
4.4	Zustandsgleichungen, Tafeln und Diagramme . . . . .	222
4.4.1	Die Bestimmung von Enthalpie und Entropie mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung . . . . .	223
4.4.2	Fundamentalgleichungen . . . . .	226
4.4.3	Schallgeschwindigkeit und Isentropenexponent . . . . .	228
4.4.4	Tafeln der Zustandsgrößen . . . . .	231
4.4.5	Zustandsdiagramme . . . . .	233
<b>5</b>	<b>Gemische und chemische Reaktionen . . . . .</b>	<b>237</b>
5.1	Mischphasen und Phasengleichgewichte . . . . .	237
5.1.1	Größen zur Beschreibung der Zusammensetzung . . . . .	238

5.1.2	Mischungsgrößen und die Irreversibilität des Mischungsvorgangs . . . . .	242
5.1.3	Partielle molare Größen . . . . .	246
5.1.4	Die Gibbs-Funktion einer Mischphase . . . . .	251
5.1.5	Chemische Potentiale. Membrangleichgewicht . . . . .	254
5.1.6	Phasengleichgewichte . . . . .	260
5.1.7	Phasengleichgewichte in Zweistoffsystemen . . . . .	262
5.2	Ideale Gemische . . . . .	268
5.2.1	Ideale Gasgemische . . . . .	268
5.2.2	Die Zustandsgleichungen idealer Gasgemische . . . . .	270
5.2.3	Ideale Lösungen . . . . .	274
5.2.4	Phasengleichgewicht. Gesetz von Raoult . . . . .	279
5.3	Ideale Gas-Dampf-Gemische. Feuchte Luft . . . . .	283
5.3.1	Der Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes und der Taupunkt . . . . .	284
5.3.2	Absolute und relative Feuchte . . . . .	288
5.3.3	Die Wasserbeladung . . . . .	290
5.3.4	Das spezifische Volumen feuchter Luft . . . . .	292
5.3.5	Die spezifische Enthalpie feuchter Luft . . . . .	294
5.3.6	Das Enthalpie-Wasserbeladungs-Diagramm . . . . .	298
5.3.7	Die spezifische Entropie feuchter Luft . . . . .	301
5.4	Reale fluide Gemische . . . . .	304
5.4.1	Realpotential und Fugazitätskoeffizient . . . . .	305
5.4.2	Thermische Zustandsgleichungen für Gemische . . . . .	309
5.4.3	Die Berechnung des Verdampfungsgleichgewichts mit der thermischen Zustandsgleichung . . . . .	312
5.4.4	Exzeßpotential und Aktivitätskoeffizient . . . . .	314
5.4.5	Das Verdampfungsgleichgewicht bei mäßigen Drücken . . . . .	318
5.4.6	Die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten . . . . .	323
5.5	Chemisch reagierende Gemische . . . . .	330
5.5.1	Reaktionen und Reaktionsgleichungen . . . . .	330
5.5.2	Stöchiometrie . . . . .	336
5.5.3	Reaktionsenthalpien und Standard-Bildungsenthalpien . . . . .	341
5.5.4	Der 3. Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	347
5.5.5	Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf chemische Reaktionen . . . . .	350
5.5.6	Chemische Exergien . . . . .	353
5.6	Reaktionsgleichgewichte . . . . .	358
5.6.1	Die Bedingungen des Reaktionsgleichgewichts . . . . .	359
5.6.2	Das Reaktionsgleichgewicht in einfachen Fällen. Gleichgewichtskonstanten . . . . .	365

5.6.3	Gasgleichgewichte . . . . .	369
5.6.4	Heterogene Reaktionsgleichgewichte . . . . .	373
<b>6</b>	<b>Stationäre Fließprozesse . . . . .</b>	<b>377</b>
6.1	Technische Arbeit, Dissipationsenergie und die Zustands- änderung des strömenden Fluids . . . . .	377
6.1.1	Dissipationsenergie und technische Arbeit . . . . .	378
6.1.2	Polytropen. Polytrope Wirkungsgrade . . . . .	384
6.2	Strömungs- und Arbeitsprozesse . . . . .	389
6.2.1	Strömungsprozesse . . . . .	390
6.2.2	Adiabate Düsen und Diffusoren . . . . .	397
6.2.3	Querschnittsflächen adiabater Düsen und Diffusoren . . . . .	399
6.2.4	Adiabate Turbinen und Verdichter . . . . .	404
6.2.5	Nichtadiabate Verdichtung . . . . .	411
6.3	Wärmeübertrager . . . . .	414
6.3.1	Die Anwendung des 1. Hauptsatzes . . . . .	414
6.3.2	Die Temperaturen der beiden Fluidströme . . . . .	417
6.3.3	Der Exergieverlust eines Wärmeübertragers . . . . .	421
6.4	Thermische Stofftrennprozesse . . . . .	423
6.4.1	Trocknen . . . . .	423
6.4.2	Verdampfen und Eindampfen . . . . .	430
6.4.3	Destillieren und Rektifizieren . . . . .	433
6.4.4	Absorbieren . . . . .	439
<b>7</b>	<b>Verbrennungsprozesse, Verbrennungskraftanlagen . . . . .</b>	<b>445</b>
7.1	Mengenberechnung bei vollständiger Verbrennung . . . . .	445
7.1.1	Brennstoffe und Verbrennungsgleichungen . . . . .	446
7.1.2	Die Berechnung der Verbrennungsluftmenge . . . . .	448
7.1.3	Menge und Zusammensetzung des Verbrennungsgases . . . . .	452
7.2	Energetik der Verbrennungsprozesse . . . . .	456
7.2.1	Die Anwendung des 1. Hauptsatzes . . . . .	456
7.2.2	Heizwert und Brennwert . . . . .	459
7.2.3	Die Enthalpie der Verbrennungsteilnehmer und das $h, t$ -Diagramm . . . . .	462
7.2.4	Abgasverlust und Kesselwirkungsgrad . . . . .	467
7.2.5	Die adiabate Verbrennungstemperatur . . . . .	472
7.2.6	Die Exergie der Brennstoffe . . . . .	474
7.2.7	Der Exergieverlust der adiabaten Verbrennung . . . . .	478
7.3	Verbrennungskraftanlagen . . . . .	481
7.3.1	Leistungsbilanz und Wirkungsgrad . . . . .	482

7.3.2	Die einfache Gasturbinenanlage . . . . .	484
7.3.3	Die genauere Berechnung des Gasturbinenprozesses . . . . .	488
7.3.4	Die Gasturbine als Flugzeugantrieb . . . . .	492
7.3.5	Verbrennungsmotoren . . . . .	496
7.3.6	Die Brennstoffzelle . . . . .	500
<b>8</b>	<b>Thermodynamik der Wärmekraftanlagen . . . . .</b>	<b>506</b>
8.1	Die Umwandlung von Primärenergie in elektrische Energie . . . . .	506
8.1.1	Übersicht über die Umwandlungsverfahren . . . . .	507
8.1.2	Thermische Kraftwerke . . . . .	510
8.1.3	Kraftwerkswirkungsgrade . . . . .	512
8.1.4	Kreisprozesse für Wärmekraftmaschinen . . . . .	515
8.2	Dampfkraftwerke . . . . .	521
8.2.1	Die einfache Dampfkraftanlage . . . . .	521
8.2.2	Zwischenüberhitzung . . . . .	528
8.2.3	Regenerative Speisewasservorwärmung . . . . .	530
8.2.4	Das moderne Dampfkraftwerk . . . . .	533
8.2.5	Kombinierte Gas-Dampf-Kraftwerke . . . . .	535
8.2.6	Kernkraftwerke . . . . .	538
8.3	Die CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromerzeugung . . . . .	541
8.3.1	Die Berechnung der CO <sub>2</sub> -Emission . . . . .	541
8.3.2	Ergebnisse . . . . .	544
<b>9</b>	<b>Thermodynamik des Heizens und Kühlens . . . . .</b>	<b>547</b>
9.1	Heizen und Kühlen als thermodynamische Grundaufgaben . . . . .	547
9.1.1	Die Grundaufgabe der Heiztechnik und der Kältetechnik . . . . .	547
9.1.2	Wärmepumpe und Kältemaschine . . . . .	550
9.1.3	Wärmetransformation . . . . .	554
9.2	Heizsysteme . . . . .	557
9.2.1	Heizzahl und exergetischer Wirkungsgrad . . . . .	557
9.2.2	Konventionelle Heizsysteme . . . . .	560
9.2.3	Wärmepumpen-Heizsysteme . . . . .	562
9.2.4	Kraft-Wärme-Kopplung, Heizkraftwerke . . . . .	565
9.3	Einige Verfahren zur Kälteerzeugung . . . . .	568
9.3.1	Kältemittel . . . . .	569
9.3.2	Kompressionskältemaschinen . . . . .	571
9.3.3	Absorptionskältemaschinen . . . . .	575
9.3.4	Das Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung . . . . .	580

---

<b>10 Mengenmaße, Einheiten, Stoffdaten</b> . . . . .	585
10.1 Mengenmaße . . . . .	585
10.1.1 Masse und Gewicht . . . . .	585
10.1.2 Teilchenzahl und Stoffmenge . . . . .	586
10.1.3 Das Normvolumen . . . . .	588
10.2 Einheiten . . . . .	589
10.2.1 Die Einheiten des Internationalen Einheitensystems . . . . .	589
10.2.2 Einheiten anderer Einheitensysteme. Umrechnungsfaktoren . . . . .	593
10.3 Stoffdaten . . . . .	594
<b>Literatur</b> . . . . .	607
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	623