

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Allgemeine Grundlagen</b> .....	1
1.1 Energie- und Stoffumwandlungen .....	1
1.1.1 Energieumwandlungen .....	2
1.1.2 Stoffumwandlungen .....	6
1.1.3 Energie- und Stoffumwandlungen in technischen Pro- zessen .....	9
1.1.4 Allgemeine Schlussfolgerungen .....	11
1.2 Die thermodynamische Analyse .....	13
1.2.1 Das thermodynamische System .....	14
1.2.2 Das System als fluide Phase .....	25
1.2.3 Prozess und Zustandsänderung .....	29
1.3 Kontrollfragen .....	30
<b>2. Fluide Phasen</b> .....	33
2.1 Materiemenge und thermische Zustandsgrößen .....	34
2.1.1 Die Materiemenge .....	34
2.1.2 Das Volumen .....	38
2.1.3 Der Druck .....	38
2.1.4 Die Temperatur .....	42
2.2 Reinstoffe .....	50
2.2.1 Der Gaszustand .....	51
2.2.2 Verdampfung und Kondensation .....	53
2.2.3 Das Nassdampfgebiet .....	59
2.2.4 Kritischer Punkt und Tripelpunkt .....	60
2.2.5 Schmelzen und Erstarren .....	62
2.2.6 Das gesamte Zustandsgebiet .....	63
2.3 Gemische .....	65
2.3.1 Verdampfung und Kondensation .....	66
2.3.2 Verdunstung und Absorption .....	74
2.3.3 Entmischung in flüssigen Gemischen .....	76
2.3.4 Schmelzen und Erstarren in Gemischen .....	78
2.3.5 Chemische Eigenschaften .....	80
2.4 Stoffmodelle für Reinstoffe .....	84
2.4.1 Die Dampftafel .....	84

2.4.2	Gase bei niedrigen Drücken . . . . .	85
2.4.3	Flüssigkeiten . . . . .	87
2.5	Stoffmodelle für Gemische . . . . .	88
2.5.1	Partielle Größen . . . . .	88
2.5.2	Gasgemische . . . . .	90
2.5.3	Gas/Dampf-Gemische . . . . .	93
2.5.4	Flüssige Gemische . . . . .	99
2.6	Kontrollfragen . . . . .	104
2.7	Aufgaben . . . . .	106
<b>3.</b>	<b>Die Materiemengenbilanz . . . . .</b>	<b>115</b>
3.1	Materiemengenbilanz bei thermischen Energie- und Stoffumwandlungen . . . . .	116
3.1.1	Umwandlungen reiner Stoffe . . . . .	117
3.1.2	Umwandlungen von Gemischen . . . . .	118
3.2	Materiemengenbilanz bei chemischen Energie- und Stoffumwandlungen . . . . .	126
3.2.1	Vollständig ablaufende Reaktionen . . . . .	127
3.2.2	Unvollständig ablaufende Reaktionen . . . . .	133
3.2.3	Die Elementenbilanz . . . . .	140
3.3	Kontrollfragen . . . . .	143
3.4	Aufgaben . . . . .	143
<b>4.</b>	<b>Die Energiebilanz . . . . .</b>	<b>147</b>
4.1	Die Erscheinungsformen der Energie . . . . .	148
4.1.1	Mechanische Energieformen . . . . .	148
4.1.2	Innere Energie und Enthalpie . . . . .	157
4.1.3	Die Energieform Wärme . . . . .	162
4.2	Energiebilanzgleichungen . . . . .	165
4.2.1	Geschlossene Systeme . . . . .	165
4.2.2	Offene Systeme . . . . .	168
4.2.3	Kreisprozesse . . . . .	173
4.3	Energiebilanzen bei thermischen Zustandsänderungen . . . . .	176
4.3.1	Prozesse mit reinen Stoffen . . . . .	176
4.3.2	Prozesse mit Gemischen . . . . .	189
4.4	Energiebilanzen bei chemischen Zustandsänderungen . . . . .	218
4.4.1	Thermischer und chemischer Anteil . . . . .	219
4.4.2	Die Standardbildungsenthalpie . . . . .	223
4.4.3	Der Heizwert . . . . .	230
4.5	Das Energieflussbild . . . . .	242
4.6	Kontrollfragen . . . . .	244
4.7	Aufgaben . . . . .	246

<b>5. Die Entropiebilanz</b> .....	259
5.1 Das Naturgesetz der Unsymmetrie .....	259
5.1.1 Technische Konsequenzen .....	260
5.1.2 Dissipation .....	262
5.2 Die Zustandsgröße Entropie .....	278
5.2.1 Entropie und Dissipation .....	279
5.2.2 Entropie und Wärme .....	280
5.2.3 Entropieproduktion bei Energietransfer über Temperatur- und Druckdifferenzen .....	283
5.2.4 Atomistische Interpretation .....	286
5.3 Der 2. Hauptsatz .....	290
5.4 Die Berechnung der Entropie aus Stoffmodellen .....	293
5.4.1 Die Fundamentalgleichung .....	294
5.4.2 Die thermodynamische Temperatur .....	295
5.4.3 Reine Gase .....	298
5.4.4 Reine Flüssigkeiten .....	299
5.4.5 Reine Stoffe im gesamten Zustandsgebiet .....	299
5.4.6 Gasgemische .....	300
5.4.7 Gas/Dampf-Gemische .....	304
5.4.8 Flüssige Gemische .....	305
5.4.9 Chemische Zustandsänderungen .....	308
5.5 Energiequalität .....	311
5.5.1 Exergie und Anergie .....	313
5.5.2 Die Exergie eines Stoffstromes .....	313
5.5.3 Exergieverlust und Entropieproduktion .....	322
5.5.4 Exergetische Bewertung .....	323
5.6 Kontrollfragen .....	328
5.7 Aufgaben .....	330
<b>6. Modellprozesse für Energieumwandlungen</b> .....	335
6.1 Grundprozesse .....	336
6.1.1 Reversible Strömungsprozesse .....	336
6.1.2 Reversibel-isotherme Arbeitsprozesse .....	337
6.1.3 Reversibel-adiabate Prozesse .....	339
6.2 Die Umwandlung von Brennstoffenergie in Arbeit .....	347
6.2.1 Das Dampfkraftwerk .....	351
6.2.2 Die Gasturbine .....	366
6.2.3 Das Kombi-Kraftwerk .....	371
6.2.4 Das Strahltriebwerk .....	381
6.2.5 Verbrennungsmotoren .....	388
6.3 Wärme- und Kälteerzeugung .....	392
6.3.1 Die Wärmepumpe .....	392
6.3.2 Kraft-Wärme-Kopplung .....	400
6.4 Maschinenwirkungsgrade .....	410
6.4.1 Isentrope Wirkungsgrade .....	410

6.4.2	Polytrope Wirkungsgrade .....	418
6.5	Kontrollfragen .....	421
6.6	Aufgaben .....	422
<b>7.</b>	<b>Modellprozesse für Stoffumwandlungen .....</b>	<b>431</b>
7.1	Grundprozesse .....	431
7.1.1	Die Grundtypen der Ausgleichsprozesse .....	432
7.1.2	Das chemische Potenzial .....	440
7.1.3	Ausgleichsprozesse und Gleichgewicht in abgeschlosse- nen Systemen .....	443
7.1.4	Ausgleichsprozesse und Gleichgewicht in technischen Anlagen .....	446
7.2	Thermodynamische Gleichgewichte .....	452
7.2.1	Das Verdampfungs- und Kondensationsgleichgewicht ..	452
7.2.2	Das Verdunstungs- und Absorptionsgleichgewicht .....	462
7.2.3	Das Reaktionsgleichgewicht .....	469
7.3	Thermische Stoffumwandlungen .....	475
7.3.1	Wärmeübertragung .....	475
7.3.2	Die Verdunstung .....	489
7.3.3	Die Absorption .....	499
7.3.4	Die Rektifikation .....	510
7.4	Chemische Stoffumwandlungen .....	526
7.4.1	Der isotherme Reaktor .....	526
7.4.2	Der adiabate Reaktor .....	530
7.4.3	Reaktor mit Temperaturprofil .....	534
7.5	Apparatewirkungsgrade .....	539
7.5.1	Wirkungsgrad eines Wärmeübertragers .....	539
7.5.2	Wirkungsgrad einer thermischen Trennstufe .....	539
7.5.3	Wirkungsgrad einer chemischen Stoffumwandlung .....	540
7.6	Kontrollfragen .....	541
7.7	Aufgaben .....	542
<b>Anhang A</b>	<b>Stoffdaten .....</b>	<b>547</b>
Tabelle A1	.....	547
Tabelle A2	.....	566
Tabelle A3	.....	568
Tabelle A4	.....	572
Tabelle A5	.....	572
Tabelle A6	.....	573
Abbildung A1	.....	574
<b>Anhang B</b>	<b>Wichtige Formeln .....</b>	<b>575</b>
B1	Stoffmodelle für Reinstoffe .....	575
B2	Stoffmodelle für Gemische .....	576
B3	Stoffmodelle für Phasen- und Reaktionsgleichgewichte .....	579

B4	Berechnung der Enthalpie und Entropie aus der thermischen Zustandsgleichung $p = p(T, v)$ . . . . .	580
B5	Materiemengenbilanzen . . . . .	581
B6	Energiebilanzen . . . . .	582
B7	Arbeit und Wärme bei quasistatischer Zustandsänderung . . . . .	583
B8	Isentrope und polytrope Zustandsänderungen idealer Gase . . . . .	583
B9	Verbrennung . . . . .	584
B10	Beiträge zur irreversiblen Entropieproduktion . . . . .	584
B11	Wirkungsgrade . . . . .	585
B12	Exergieformeln . . . . .	585
<b>Anhang C Einheiten</b> . . . . .		586
<b>Anhang D Antworten auf die Kontrollfragen</b> . . . . .		588
<b>Anhang E Ergebnisse der Aufgaben</b> . . . . .		600
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .		621