

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Das Buch und sein Konzept</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1	Umfang des Buches . . . . .	1
1.2	Inhalt . . . . .	1
1.3	Form . . . . .	2
<b>Teil I Grundlagen</b>		
<b>2</b>	<b>Einführende Vorbemerkungen/Beispiele</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1	Was ist Thermodynamik? . . . . .	7
2.2	Ist Thermodynamik ein „schwieriges Fach“? . . . . .	8
2.3	Statistische/phänomenologische Thermodynamik . . . . .	9
2.4	Thermodynamisches Gleichgewicht – grundlegende Definitionen . . . . .	10
2.5	Beispiele aus dem Alltag . . . . .	12
2.6	Beispiele aus technischen Anwendungen . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Das thermodynamische Verhalten von Stoffen</b> . . . . .	<b>15</b>
3.1	Zustandsgrößen, Zustandsgleichungen . . . . .	15
3.2	Druck, spezifisches Volumen und Temperatur . . . . .	16
3.3	Ideales Gas (Modellgas) . . . . .	20
3.4	Reale Gase . . . . .	22
3.5	Inkompressible Flüssigkeit (Modellflüssigkeit) . . . . .	24
3.6	Zusammenfassung . . . . .	25
3.7	Fragen und deren Diskussion . . . . .	25
3.7.1	Fragen – Stimmt es, dass . . . ? . . . . .	26
3.7.2	Diskussion der Fragen . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik</b> . . . . .	<b>31</b>
4.1	Der thermodynamische Energiebegriff . . . . .	31
4.2	Der 1. Hauptsatz als Bilanz der thermodynamischen Gesamtenergie . . . . .	34
4.3	Erläuterungen zum 1. Hauptsatz . . . . .	35
4.4	1. Hauptsatz für geschlossene Systeme . . . . .	39

VII

4.4.1	Die thermodynamische Gesamtenergie und ihre Anteile . . .	40
4.4.2	Prozessgröße Arbeit . . . . .	43
4.4.3	Prozessgröße Wärme . . . . .	47
4.5	1. Hauptsatz für offene Systeme . . . . .	48
4.5.1	Massenbilanz . . . . .	49
4.5.2	Spezielle Formen des 1. Hauptsatzes für offene Systeme . . .	49
4.5.3	Mechanische Teilenergiegleichung . . . . .	55
4.5.4	Thermische Teilenergiegleichung . . . . .	58
4.6	Polytrope Zustandsänderungen idealer Gase . . . . .	58
4.7	Zusammenfassung . . . . .	62
4.8	Fragen und deren Diskussion . . . . .	63
4.8.1	Fragen – Stimmt es, dass ...? . . . . .	63
4.8.2	Diskussion der Fragen . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .</b>	<b>73</b>
5.1	Die thermodynamische Größe Entropie . . . . .	73
5.2	Der 2. Hauptsatz als Bilanz der Entropie . . . . .	75
5.3	Erläuterungen zum 2. Hauptsatz . . . . .	77
5.3.1	Entropieänderung durch Wärmeübertragung ( $\Delta_{\text{rev}} S$ ) . . . .	77
5.3.2	Entropieproduktion ( $\Delta_{\text{irr}} S$ ) . . . . .	79
5.3.3	Materieller Entropietransport ( $\Delta_k S$ ) . . . . .	83
5.4	Spezielle Formen des 2. Hauptsatzes . . . . .	83
5.4.1	Der 2. Hauptsatz für geschlossene Systeme . . . . .	83
5.4.2	Der 2. Hauptsatz für offene Systeme . . . . .	84
5.5	Erläuterungen zur Prozessgröße Wärme . . . . .	85
5.5.1	Irreversible Wärmeübertragung . . . . .	85
5.5.2	Wärmeübergang zwischen zwei Systemen im thermischen Kontakt miteinander . . . . .	87
5.5.3	Thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmeübertragung	89
5.6	Umwandelbarkeit von Wärme in Nutzarbeit . . . . .	91
5.6.1	Das Prinzip der Wärmekraftmaschine . . . . .	92
5.6.2	Thermischer Wirkungsgrad, Carnot-Faktor . . . . .	93
5.7	Exergie und Anergie . . . . .	95
5.7.1	Qualitative Angaben zur Exergie und Anergie . . . . .	96
5.7.2	Quantitative Angaben zur Exergie und Anergie . . . . .	97
5.7.3	Exergetische Wirkungsgrade . . . . .	99
5.7.4	Bilanzen für thermodynamische Systeme, Flussdiagramme .	100
5.8	Zusammenfassung . . . . .	101
5.9	Fragen und deren Diskussion . . . . .	101
5.9.1	Fragen – Stimmt es, dass ...? . . . . .	102
5.9.2	Diskussion der Fragen . . . . .	103

<b>6</b>	<b>Thermodynamische Zustandsgleichungen reiner Stoffe</b>	109
6.1	Thermodynamische Zustandsgleichungen	110
6.1.1	Thermische Zustandsgleichung ( $p, v, T$ -Daten)	110
6.1.2	Kalorische Zustandsgleichung	118
6.1.3	Entropie-Zustandsgleichung	121
6.2	Thermodynamische Fundamentalgleichungen	124
6.2.1	Die Fundamentalgleichung $u = u(s, v)$	124
6.2.2	Alternative Formen der Fundamentalgleichung	126
6.2.3	Reziprozitäts- und Maxwell-Beziehungen	127
6.3	Phasengleichgewicht	129
6.4	Zusammenfassung	131
6.5	Fragen und deren Diskussion	132
6.5.1	Fragen – Stimmt es, dass ...?	132
6.5.2	Diskussion der Fragen	134
<b>7</b>	<b>Ideale Gas- und Gas-Dampf-Gemische</b>	139
7.1	Definitionen	139
7.2	Die Zustandsgleichungen idealer Gasgemische	142
7.2.1	Thermische Zustandsgleichung	142
7.2.2	Kalorische Zustandsgleichung	143
7.2.3	Entropie-Zustandsgleichung	144
7.3	Ideale Gas-Dampf-Gemische	144
7.3.1	Ungesättigte und gesättigte Gas-Dampf-Gemische	145
7.4	Feuchte Luft	147
7.4.1	Spezielle Maßangaben	148
7.4.2	Spezifische Größen feuchter Luft	151
7.4.3	Das $h_{1+X}, X$ -Diagramm feuchter Luft	153
7.4.4	Typische Prozesse mit feuchter Luft	156
7.4.5	Kühlgrenz- und Feuchtkugeltemperaturen	161
7.4.6	Das Psychrometer-Messprinzip	167
7.5	Zusammenfassung	169
7.6	Fragen und deren Diskussion	169
7.6.1	Fragen – Stimmt es, dass ...?	169
7.6.2	Diskussion der Fragen	173
<b>8</b>	<b>Thermodynamische Kreisprozesse</b>	181
8.1	Kreisprozesse in technischen Anlagen	181
8.2	Energie- und Entropiebilanzen für Kreisprozesse	185
8.2.1	Energiebilanz für Kreisprozesse	185
8.2.2	Entropiebilanz für Kreisprozesse	187
8.3	Idealisierte Vergleichsprozesse	188
8.3.1	Der Carnot-Prozess (idealisierter Vergleichsprozess)	190

8.3.2	Der Joule-Prozess (idealisierter Vergleichsprozess) . . . . .	190
8.3.3	Der Clausius-Rankine-Prozess (idealisierter Vergleichsprozess) . . . . .	193
8.3.4	Der Seiliger-Prozess (idealisierter Vergleichsprozess) . . . . .	193
8.4	Kreisprozess-Systematik . . . . .	196
8.5	Zusammenfassung . . . . .	197
8.6	Fragen und deren Diskussion . . . . .	198
8.6.1	Fragen – Stimmt es, dass ...? . . . . .	198
8.6.2	Diskussion der Fragen . . . . .	198
<b>9</b>	<b>Arbeitsprozesse (rechtsläufige Kreisprozesse) . . . . .</b>	<b>201</b>
9.1	Definitionen, grundlegende Überlegungen . . . . .	201
9.2	Wärme­kraft­ma­schin­en und -an­la­gen . . . . .	204
9.2.1	Geschlossene Gasturbinenanlage . . . . .	205
9.2.2	Einfache Dampfkraftmaschine . . . . .	208
9.2.3	Verbesserte Dampfkraftmaschine: Zwischenüberhitzung und Speisewasser-Vorwärmung . . . . .	212
9.2.4	Kernkraftwerke . . . . .	215
9.2.5	Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bei Wärme­kraft­ma­schin­en . . . . .	216
9.2.6	Wirkungsgrade von Wärme­kraft­an­la­gen . . . . .	217
9.3	Verbrennungskraftmaschinen und -an­la­gen . . . . .	220
9.3.1	Offene Gasturbinenanlagen . . . . .	221
9.3.2	Otto- und Dieselmotoren . . . . .	222
9.3.3	Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bei Verbrennungsmotoren . . . . .	226
9.4	Kombinierte Gas-Dampf-Kraftwerke (GuD) . . . . .	228
9.5	Zusammenfassung . . . . .	229
9.6	Fragen und deren Diskussion . . . . .	230
9.6.1	Fragen – Stimmt es, dass ...? . . . . .	230
9.6.2	Diskussion der Fragen . . . . .	234
<b>10</b>	<b>Wärme­pro­zesse (links­läu­fi­ge Kreis­pro­zesse) . . . . .</b>	<b>243</b>
10.1	Definitionen . . . . .	243
10.2	Energetische und exergetische Aspekte des Heizens und Kühlens . . . . .	244
10.3	Heizen mit Wärmepumpen . . . . .	248
10.3.1	Kompressions-Wärmepumpen . . . . .	250
10.3.2	Wärmepumpen im Vergleich mit anderen Heizsystemen . . . . .	252
10.4	Kühlen mit Kältemaschinen . . . . .	253
10.4.1	Kompressions-Kältemaschinen . . . . .	255
10.5	Zusammenfassung . . . . .	258
10.6	Fragen und deren Diskussion . . . . .	258
10.6.1	Fragen – Stimmt es, dass ...? . . . . .	258
10.6.2	Diskussion der Fragen . . . . .	260

<b>11</b>	<b>Stationäre Strömungen</b> . . . . .	263
11.1	Eindimensionale Näherung in durchströmten Querschnitten . . . . .	264
11.2	Gleichungen für eindimensionale Durchströmungen . . . . .	266
11.3	Strömungen ohne Energietransfer . . . . .	268
11.3.1	Inkompressible Strömungen ohne Energietransfer . . . . .	269
11.3.2	Kompressible Strömungen ohne Energietransfer . . . . .	271
11.4	Strömungen mit Energietransfer . . . . .	278
11.4.1	Inkompressible Strömungen mit Energietransfer . . . . .	279
11.4.2	Kompressible Strömungen mit Energietransfer . . . . .	280
11.5	Zusammenfassung . . . . .	280
11.6	Fragen und deren Diskussion . . . . .	281
11.6.1	Fragen – Stimmt es, dass ...? . . . . .	281
11.6.2	Diskussion der Fragen . . . . .	284
<b>12</b>	<b>Verbrennungsprozesse</b> . . . . .	291
12.1	Verbrennungsreaktionen und Mengenangaben . . . . .	292
12.2	Bilanzen bei Verbrennungsprozessen . . . . .	295
12.2.1	Stoffliche Bilanzen . . . . .	295
12.2.2	Energetische Bilanzen, Feuerungsprozesse . . . . .	295
12.2.3	Exergetische Bilanzen, Verbrennungskraftprozesse . . . . .	299
12.3	Zusammenfassung . . . . .	304
12.4	Fragen und deren Diskussion . . . . .	305
12.4.1	Fragen – Stimmt es, dass ...? . . . . .	305
12.4.2	Diskussion der Fragen . . . . .	305
<b>Teil II Anleitung zum Lösen von Aufgaben</b>		
<b>13</b>	<b>Das SMART-Konzept</b> . . . . .	311
13.1	Das SMART-Konzept . . . . .	311
13.1.1	Vorbemerkung . . . . .	312
13.1.2	Aufgabenstellung und Lösung . . . . .	313
13.2	SMART-EVE: Ein Konzept in drei Schritten . . . . .	314
<b>14</b>	<b>Ausgewählte Übungsaufgaben zu den einzelnen Kapiteln</b> . . . . .	315
14.1	Zu Kapitel 3: Das thermodynamische Verhalten von Stoffen . . . . .	315
14.1.1	Aufgabe 3.1 . . . . .	315
14.1.2	Lösung von Aufgabe 3.1 nach dem SMART-EVE-Konzept . . . . .	316
14.1.3	Aufgabe 3.2 . . . . .	323
14.1.4	Lösung von Aufgabe 3.2 . . . . .	324
14.1.5	Aufgabe 3.3 . . . . .	327
14.1.6	Lösung von Aufgabe 3.3 . . . . .	327
14.2	Zu Kapitel 4: Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	330

---

14.2.1	Aufgabe 4.1 . . . . .	330
14.2.2	Lösung von Aufgabe 4.1 nach dem SMART-EVE-Konzept . . . . .	331
14.2.3	Aufgabe 4.2 . . . . .	337
14.2.4	Lösung von Aufgabe 4.2 . . . . .	338
14.2.5	Aufgabe 4.3 . . . . .	341
14.2.6	Lösung von Aufgabe 4.3 . . . . .	341
14.3	Zu Kapitel 5: Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	346
14.3.1	Aufgabe 5.1 . . . . .	347
14.3.2	Lösung von Aufgabe 5.1 nach dem SMART-EVE-Konzept . . . . .	347
14.3.3	Aufgabe 5.2 . . . . .	356
14.3.4	Lösung von Aufgabe 5.2 . . . . .	356
14.3.5	Aufgabe 5.3 . . . . .	359
14.3.6	Lösung von Aufgabe 5.3 . . . . .	359
14.4	Zu Kapitel 6: Thermodynamische Zustandsgleichungen reiner Stoffe . . . . .	363
14.4.1	Aufgabe 6.1 . . . . .	363
14.4.2	Lösung von Aufgabe 6.1 nach dem SMART-EVE-Konzept . . . . .	364
14.4.3	Aufgabe 6.2 . . . . .	371
14.4.4	Lösung von Aufgabe 6.2 . . . . .	373
14.4.5	Aufgabe 6.3 . . . . .	376
14.4.6	Lösung von Aufgabe 6.3 . . . . .	377
14.5	Zu Kapitel 7: Ideale Gas- und Gas-Dampf-Gemische . . . . .	379
14.5.1	Aufgabe 7.1 . . . . .	379
14.5.2	Lösung von Aufgabe 7.1 nach dem SMART-EVE-Konzept . . . . .	380
14.5.3	Aufgabe 7.2 . . . . .	385
14.5.4	Lösung von Aufgabe 7.2 . . . . .	387
14.5.5	Aufgabe 7.3 . . . . .	391
14.5.6	Lösung von Aufgabe 7.3 . . . . .	392
14.6	Zu Kapitel 8: Thermodynamische Kreisprozesse . . . . .	395
14.6.1	Aufgabe 8.1 . . . . .	395
14.6.2	Lösung von Aufgabe 8.1 nach dem SMART-EVE-Konzept . . . . .	395
14.6.3	Aufgabe 8.2 . . . . .	402
14.6.4	Lösung von Aufgabe 8.2 . . . . .	402
14.6.5	Aufgabe 8.3 . . . . .	405
14.6.6	Lösung von Aufgabe 8.3 . . . . .	406
14.7	Zu Kapitel 9: Arbeitsprozesse (rechtsläufige Prozesse) . . . . .	409
14.7.1	Aufgabe 9.1 . . . . .	409
14.7.2	Lösung von Aufgabe 9.1 nach dem SMART-EVE-Konzept . . . . .	410
14.7.3	Aufgabe 9.2 . . . . .	416
14.7.4	Lösung von Aufgabe 9.2 . . . . .	417
14.7.5	Aufgabe 9.3 . . . . .	420
14.7.6	Lösung von Aufgabe 9.3 . . . . .	422
14.8	Zu Kapitel 10: Wärmeprozesse (linksläufige Prozesse) . . . . .	426

---

14.8.1	Aufgabe 10.1 . . . . .	426
14.8.2	Lösung von Aufgabe 10.1 nach dem SMART-EVE-Konzept .	428
14.8.3	Aufgabe 10.2 . . . . .	433
14.8.4	Lösung von Aufgabe 10.2 . . . . .	435
14.8.5	Aufgabe 10.3 . . . . .	437
14.8.6	Lösung von Aufgabe 10.3 . . . . .	438
14.9	Zu Kapitel 11: Stationäre Strömungen . . . . .	441
14.9.1	Aufgabe 11.1 . . . . .	442
14.9.2	Lösung von Aufgabe 11.1 nach dem SMART-EVE-Konzept .	442
14.9.3	Aufgabe 11.2 . . . . .	452
14.9.4	Lösung von Aufgabe 11.2 . . . . .	452
14.9.5	Aufgabe 11.3 . . . . .	454
14.9.6	Lösung von Aufgabe 11.3 . . . . .	455
14.10	Zu Kapitel 12: Verbrennungsprozesse . . . . .	457
14.10.1	Aufgabe 12.1 . . . . .	457
14.10.2	Lösung von Aufgabe 12.1 nach dem SMART-EVE-Konzept .	458
14.10.3	Aufgabe 12.2 . . . . .	463
14.10.4	Lösung von Aufgabe 12.2 . . . . .	463
14.10.5	Aufgabe 12.3 . . . . .	467
14.10.6	Lösung von Aufgabe 12.3 . . . . .	468
	<b>Verzeichnis wichtiger Symbole und Formelzeichen . . . . .</b>	<b>473</b>
	<b>Verzeichnis der im Text gegebenen Definitionen . . . . .</b>	<b>477</b>
	<b>Standardwerke zur Thermodynamik . . . . .</b>	<b>481</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>483</b>