

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Liste der Formelzeichen</b>	<b>XV</b>
<b>1    Gegenstand und Grundbegriffe der Thermodynamik</b>	<b>1</b>
1.1    Gegenstand der Thermodynamik	1
1.2    Thermodynamische Systeme	3
1.3    Die Koordinaten und der Zustand eines Systems	5
1.4    Zustandsgrößen und Systemeigenschaften	7
1.5    Maßsysteme und Einheiten. Größengleichungen	11
1.5.1    Das Internationale Einheitensystem	11
1.5.2    Andere Einheitensysteme	13
1.5.3    Größengleichungen	13
<b>2    Das thermodynamische Gleichgewicht und die empirische Temperatur</b>	<b>17</b>
2.1    Das thermodynamische Gleichgewicht	17
2.2    Der nullte Hauptsatz und die empirische Temperatur	20
2.3    Die internationale Temperaturskala	25
2.4    Praktische Temperaturmessung	27
2.4.1    Flüssigkeitsthermometer	27
2.4.2    Widerstandsthermometer	29
2.4.3    Thermoelemente	30
2.4.4    Strahlungsthermometer	32
<b>3    Die thermische Zustandsgleichung</b>	<b>35</b>
3.1    Das totale Differential der thermischen Zustandsgleichung	36
3.2    Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	39
3.3    Die Einheit Stoffmenge und die universelle Gaskonstante	40
3.4    Beispiele und Aufgaben	43

<b>4</b>	<b>Energieformen</b>	47
4.1	Systemenergie	47
4.1.1	Mechanische Energie	48
4.1.2	Innere Energie und ihre kinetische Deutung	49
4.2	Arbeit	54
4.2.1	Mechanische Arbeit	55
4.2.2	Volumenänderungsarbeit und Nutzarbeit	57
4.2.3	Wellenarbeit	60
4.2.4	Elektrische Arbeit	61
4.2.5	Weitere Arbeitsformen	62
4.2.6	Verallgemeinerung des Begriffes Arbeit und die dissipierte Arbeit	74
4.3	Wärme	77
4.4	An Materietransport gebundene Energie und die Zustandsgröße Enthalpie	78
4.5	Beispiele und Aufgaben	80
<b>5</b>	<b>Methode der Bilanzierung und der erste Hauptsatz der Thermodynamik</b>	81
5.1	Die allgemeine Struktur einer Bilanzgleichung	81
5.2	Formulierung des ersten Hauptsatzes und die technische Arbeit	82
5.3	Der erste Hauptsatz für geschlossenen Systeme	84
5.4	Messung und Eigenschaften von innerer Energie und Wärme	87
5.5	Die Massenbilanz für offene Systeme	89
5.6	Der erste Hauptsatz für offene Systeme	91
5.7	Technische Arbeit in stationär durchströmten Kontrollräumen	93
5.8	Beispiele und Aufgaben	96
<b>6</b>	<b>Die kalorischen Zustandsgleichungen und die spezifischen Wärmekapazitäten</b>	97
6.1	Die spezifischen Wärmekapazitäten der idealen Gase	99
6.2	Die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten der idealen Gase	103
6.3	Die kalorischen Zustandsgleichungen inkompressibler Stoffe	112
6.4	Beispiele und Aufgaben	112
<b>7</b>	<b>Anwendungen des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik</b>	115
7.1	Zustandsänderungen idealer Gase	115
7.1.1	Zustandsänderungen bei konstantem Volumen oder Isochore	115
7.1.2	Zustandsänderung bei konstantem Druck oder Isobare	116
7.1.3	Zustandsänderung bei konstanter Temperatur oder Isotherme	117
7.1.4	Dissipationsfreie adiabate Zustandsänderungen	118
7.1.5	Polytrope Zustandsänderungen	122
7.2	Kreisprozesse	124

7.3	Wasserkraftwerke	126
7.4	Stoffstrommischung	127
7.5	Wärmeübertrager	128
7.6	Verdichten und Entspannen idealer Gase	129
7.7	Strömungen durch Kanäle mit Querschnittsänderungen	132
7.8	Drosselvorgänge	134
7.9	Überströmvorgänge	135
7.10	Beispiele und Aufgaben	137
<b>8</b>	<b>Das Prinzip der Irreversibilität und die Zustandsgröße Entropie</b>	<b>145</b>
8.1	Das Prinzip der Irreversibilität	145
8.2	Entropie und absolute Temperatur	150
8.3	Die Entropie als vollständiges Differential und die absolute Temperatur als integrierender Nenner	156
8.3.1	Mathematische Grundlagen zum integrierenden Nenner	156
8.3.2	Einführung des Entropiebegriffes und der absoluten Temperaturskala mit Hilfe des integrierenden Nenners	162
8.4	Statistische Deutung der Entropie	166
8.4.1	Die thermodynamische Wahrscheinlichkeit eines Zustandes	166
8.4.2	Entropie und thermodynamische Wahrscheinlichkeit	170
8.4.3	Die endliche Größe der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit, Quantentheorie, Nernstsches Wärmetheorem	171
8.5	Gibbssche Fundamentalgleichungen	174
8.6	Zustandsgleichungen für die Entropie und Entropiediagramme	178
8.6.1	Die Entropie idealer Gase und anderer Stoffe	178
8.6.2	Die Entropiediagramme	180
8.7	Beispiele und Aufgaben	182
<b>9</b>	<b>Entropiebilanz und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik</b>	<b>185</b>
9.1	Austauschprozesse und das thermodynamische Gleichgewicht	185
9.2	Entropiebilanz und allgemeine Formulierung des zweiten Hauptsatzes	188
9.3	Der zweite Hauptsatz für geschlossene Systeme	190
9.3.1	Zusammenhang zwischen Entropie und Wärme	193
9.3.2	Zustandsänderungen geschlossener adiabater Systeme	195
9.3.3	Isentrope Zustandsänderungen	195
9.4	Der zweite Hauptsatz für offene Systeme	196
9.5	Entropiebilanz und Kreisprozesse	198
9.6	Beispiele und Aufgaben	202

<b>10</b>	<b>Anwendungen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik</b> . . . . .	205
10.1	Reibungsbehaftete Prozesse . . . . .	205
10.2	Wärmeleitung unter Temperaturgefälle . . . . .	210
10.3	Drosselung . . . . .	212
10.4	Mischung und Diffusion . . . . .	215
10.5	Isentrope Strömung eines idealen Gases durch Düsen . . . . .	218
10.6	Beispiele und Aufgaben . . . . .	226
<b>11</b>	<b>Energieumwandlungen und Exergie</b> . . . . .	235
11.1	Einfluss der Umgebung auf Energieumwandlungen . . . . .	235
11.2	Die Exergie eines geschlossenen Systems . . . . .	236
11.3	Die Exergie eines Stoffstroms . . . . .	239
11.4	Die Exergie einer Wärme . . . . .	240
11.5	Die Exergie bei der Mischung zweier idealer Gase . . . . .	241
11.6	Exergieverlust und Exergiebilanz . . . . .	241
11.7	Beispiele und Aufgaben . . . . .	245
<b>12</b>	<b>Beziehungen zwischen kalorischen und thermischen Zustandsgrößen</b> . . .	251
12.1	Darstellung der thermodynamischen Eigenschaften durch Zustandsgleichungen . . . . .	251
12.2	Innere Energie und Enthalpie als Funktion der thermischen Zustandsgrößen . . . . .	253
12.3	Die Entropie als Funktion der thermischen Zustandsgrößen . . . . .	257
12.4	Die spezifischen Wärmekapazitäten . . . . .	259
<b>13</b>	<b>Thermodynamische Eigenschaften der Materie</b> . . . . .	261
13.1	Thermische Zustandsgrößen und $p, v, T$ -Diagramme . . . . .	262
13.2	Kalorische Zustandsgrößen. Enthalpie- und Entropiediagramme . . . .	274
13.2.1	Kalorische Zustandsgrößen von Dämpfen . . . . .	274
13.2.2	Tabellen und Diagramme der kalorischen Zustandsgrößen . . . .	278
13.3	Die Gleichung von Clausius und Clapeyron . . . . .	285
13.4	Spezifische Wärmekapazität und Entropie fester Körper . . . . .	289
13.4.1	Das Gefrieren von Wasser . . . . .	289
13.4.2	Kristalline Festkörper . . . . .	289
13.5	Zustandsgleichungen für reale Fluide . . . . .	292
13.5.1	Reale Gase . . . . .	292
13.5.2	Die van-der-Waalssche Zustandsgleichung . . . . .	295
13.5.3	Das erweiterte Korrespondenzprinzip . . . . .	301
13.5.4	Zustandsgleichungen für den praktischen Gebrauch und Stoffdaten . . . . .	302
13.5.5	Zustandsgleichungen des Wasserdampfes . . . . .	305

13.6	Zustandsänderungen realer Fluide . . . . .	307
13.6.1	Die adiabate Drosselung realer Gase . . . . .	307
13.6.2	Zustandsänderungen im Nassdampfgebiet . . . . .	310
13.7	Beispiele und Aufgaben . . . . .	314
<b>14</b>	<b>Thermodynamische Prozesse, Maschinen und Anlagen . . . . .</b>	<b>319</b>
14.1	Thermodynamische Modelle von Anlagenkomponenten . . . . .	320
14.1.1	Pumpen . . . . .	320
14.1.2	Verdichter, Kompressoren und Ventilatoren . . . . .	321
14.1.3	Turbinen . . . . .	323
14.1.4	Verdampfer und Kondensatoren . . . . .	325
14.2	Rechtsläufige und linksläufige Kreisprozesse. Wärmekraftmaschinen, Kältemaschinen und Wärmepumpen . . . . .	326
14.3	Der rechtsläufige Carnotsche Kreisprozess und seine Anwendung auf das ideale Gas . . . . .	329
14.4	Der linksläufige Carnotsche Kreisprozess . . . . .	334
14.5	Die Heißluftmaschine und die Gasturbine . . . . .	335
14.6	Der Stirling-Motor . . . . .	342
14.7	Die Stirling-Kältemaschine . . . . .	345
14.8	Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung. Otto- und Diesel-Motor . . . . .	347
14.8.1	Der Otto-Prozess . . . . .	349
14.8.2	Der Diesel-Prozess . . . . .	351
14.8.3	Der gemischte Vergleichsprozess . . . . .	352
14.8.4	Abweichungen des Vorganges in der wirklichen Maschine vom theoretischen Vergleichsprozess; Wirkungsgrade . . . . .	354
14.9	Die Dampfkraftanlage . . . . .	356
14.9.1	Der Clausius-Rankine-Prozess . . . . .	356
14.9.2	Verluste beim Clausius-Rankine-Prozess und Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades . . . . .	363
14.10	Kombinierte Gas-Dampf-Prozesse . . . . .	368
14.11	Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	371
14.12	Der linksläufige Clausius-Rankine-Prozess . . . . .	374
14.12.1	Die Kaltdampfmaschine als Kältemaschine . . . . .	374
14.12.2	Die Kaltdampfmaschine als Wärmepumpe . . . . .	376
14.13	Linde-Verfahren zur Gasverflüssigung . . . . .	377
14.14	Beispiele und Aufgaben . . . . .	380
<b>15</b>	<b>Grundbegriffe der Wärmeübertragung . . . . .</b>	<b>399</b>
15.1	Allgemeines . . . . .	399
15.2	Stationäre Wärmeleitung . . . . .	400
15.3	Wärmeübergang und Wärmedurchgang . . . . .	405

15.4	Nichtstationäre Wärmeleitung . . . . .	409
15.5	Grundlagen der Wärmeübertragung durch Konvektion . . . . .	412
15.5.1	Dimensionslose Kenngrößen und Beschreibung des Wärmetransportes in einfachen Strömungsfeldern . . . . .	416
15.5.2	Spezielle Probleme der Wärmeübertragung ohne Phasenumwandlung . . . . .	425
15.6	Wärmeübertragung beim Sieden und Kondensieren . . . . .	434
15.6.1	Wärmeübergang beim Sieden . . . . .	434
15.6.2	Wärmeübergang beim Kondensieren . . . . .	440
15.7	Wärmeübertrager – Gleichstrom, Gegenstrom, Kreuzstrom . . . . .	444
15.7.1	Gleichstrom . . . . .	445
15.7.2	Gegenstrom . . . . .	447
15.7.3	Kreuzstrom . . . . .	448
15.8	Die Wärmeübertragung durch Strahlung . . . . .	451
15.8.1	Grundbegriffe, Emission, Absorption, das Gesetz von Kirchhoff . . . . .	451
15.8.2	Die Strahlung des schwarzen Körpers . . . . .	456
15.8.3	Die Strahlung technischer Oberflächen. Der graue Körper . . . . .	458
15.8.4	Der Strahlungsaustausch . . . . .	460
15.9	Beispiele und Aufgaben . . . . .	466
<b>Anhang A: Dampftabellen . . . . .</b>		<b>471</b>
<b>Anhang B: Lösungen der Übungsaufgaben . . . . .</b>		<b>491</b>
<b>Anhang C: Glossar . . . . .</b>		<b>523</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>		<b>555</b>

Thermodynamik

Grundlagen und technische Anwendungen Band 1:

Einstoffsysteme

Stephan, P.; Schaber, K.; Stephan, K.; Mayinger, F.

2013, XIX, 559 S. 208 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-30097-4