
Inhaltsverzeichnis

Liste der Formelzeichen XV

1 **Gegenstand und Grundbegriffe der Thermodynamik** 1

 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

2 **Das thermodynamische Gleichgewicht und die empirische Temperatur** . . 17

 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

3 **Die thermische Zustandsgleichung** 35

 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

4	Energieformen	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
5	Methode der Bilanzierung und der erste Hauptsatz der Thermodynamik	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
6	Die kalorischen Zustandsgleichungen und die spezifischen Wärmekapazitäten	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
7	Anwendungen des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik	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
8	Das Prinzip der Irreversibilität und die Zustandsgröße Entropie	145
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
9	Entropiebilanz und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	185
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

10	Anwendungen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik	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
11	Energieumwandlungen und Exergie	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
12	Beziehungen zwischen kalorischen und thermischen Zustandsgrößen	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
13	Thermodynamische Eigenschaften der Materie	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
14	Thermodynamische Prozesse, Maschinen und Anlagen	319
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
15	Grundbegriffe der Wärmeübertragung	399
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
Anhang A: Dampftabellen		471
Anhang B: Lösungen der Übungsaufgaben		491
Anhang C: Glossar		523
Sachverzeichnis		555