

Auf einen Blick

Einführung	19
Teil I: Die exakten Grundlagen	25
Kapitel 1: Warum ist die Thermodynamik wichtig	27
Kapitel 2: Betrachtung der Materie mit Feldgrößen	37
Kapitel 3: Makroskopische Betrachtung der Materie	83
Teil II: Stoffgesetze und ihre praktische Anwendung	117
Kapitel 4: Zustandsgleichungen der idealen Gase	119
Kapitel 5: Reale Gase	145
Kapitel 6: In der Nähe des absoluten Nullpunkts	161
Teil III: Energieprinzip, Hauptsätze und Entropie	177
Kapitel 7: Arbeit und Wärme ist Energie	179
Kapitel 8: Energieprinzip und totale Differentiale	187
Kapitel 9: Der erste Hauptsatz für offene Systeme	207
Kapitel 10: Der erste Hauptsatz für geschlossene Systeme	235
Kapitel 11: Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	249
Kapitel 12: Dritter und nullter Hauptsatz der Thermodynamik	279
Teil IV: Thermodynamische Kreisprozesse	285
Kapitel 13: Grundlagen der Kreisprozesse	287
Kapitel 14: Rechtsläufige Kreisprozesse	297
Kapitel 15: Linksläufige Kreisprozesse	329
Teil V: Wasser und Wasserdampf	343
Kapitel 16: Wasser und Wasserdampf	345
Kapitel 17: Dampfprozesse	373
Teil VI: Chemische Thermodynamik	383
Kapitel 18: Verbrennungsreaktionen	385
Kapitel 19: Erster Hauptsatz für chemisch reagierende Substanzen	399
Kapitel 20: Entropiefunktionen und der zweite Hauptsatz für chemische Reaktionen	411
Teil VII: Der Top-Ten-Teil	435
Kapitel 21: Zehn wichtige Gleichungen	437
Kapitel 22: Zehn Energiebetrachtungen	443
Stichwortverzeichnis	453

Inhaltsverzeichnis

Über den Autor	7
Einführung	19
Über dieses Buch	19
Konventionen in diesem Buch	19
Törichte Annahmen über den Leser	20
Wie dieses Buch aufgebaut ist	20
Teil I: Die exakten Grundlagen	20
Teil II: Stoffgesetze und ihre praktischen Anwendungen	21
Teil III: Energieprinzip, Hauptsätze und Entropie	21
Teil IV: Thermodynamische Kreisprozesse	21
Teil V: Wasser und Wasserdampf	22
Teil VI: Chemische Thermodynamik	22
Teil VII: Der Top-Ten-Teil	22
Symbole, die in diesem Buch verwendet werden	22
Wie es weitergeht	23
TEIL I	
DIE EXAKTEN GRUNDLAGEN	25
Kapitel 1	
Warum ist die Thermodynamik wichtig	27
Was genau ist Thermodynamik?	27
Systeme grenzen Prozesse ab	28
Wie die Temperatur die Eigenschaften der Materie verändert	29
Aggregatzustände	30
Die Stellung der Thermodynamik in der Ingenieurwissenschaft	31
Grundgleichungen der technischen Mechanik	31
Flüssigkeiten sind geschmolzene Festkörper, Gase sind Flüssigkeitsdämpfe	32
Grundgleichungen der Strömungsmechanik	33
Gibt es für Temperaturfelder auch eine Grundgleichung?	34
Ganzheitliche Betrachtung der Grundgleichungen	35
Kapitel 2	
Betrachtung der Materie mit Feldgrößen	37
Grundgrößen der Thermodynamik	37
Verbrennen Sie sich nicht die Finger: Die Temperatur	38
Unter Druck	38
Was noch bleibt: Masse, Volumen, Dichte	39
Wie lassen sich die Grundgrößen exakt berechnen?	39
Kontinuitätsgleichung oder Erhaltungsgleichung für die Masse	40

12 Inhaltsverzeichnis

Das Strömungsfeld als Rechengebiet	40
Die Bilanz der Masse anschaulich gemacht	41
Anwendungsbeispiel: Wie funktioniert ein Ram-Jet?	44
Anwendungsbeispiel: Trägerrakete	47
Spezialfälle der Kontinuitätsgleichung	48
Die Kontinuitätsgleichung für stationäre Strömungen	48
Die Kontinuitätsgleichung für stationäre und inkompressible Strömungen	48
Die eindimensionale und stationäre Kontinuitätsgleichung	49
Beispiel: Stromverzweigung in einer Wasserleitung	50
Die berühmten Navier-Stokes-Gleichungen	51
Das hydrostatische Grundgesetz	53
Was Sie bisher gelernt haben	56
Was noch kommt	56
Gleichung für das Temperaturfeld	57
Was Wärmeleitung ist	57
Eindimensionale und instationäre Wärmeleitung in Festkörpern	60
Die eindimensionale Temperaturverteilung in einer unendlich ausgedehnten Wand	64
Temperaturerhöhung durch adiabatische Kompression	67
Beispiel: Instationäre Wärmeleitung in einer ebenen Wand mit variablen Rand- und Anfangsbedingungen	70
Eine Grundgleichung fehlt noch!	82

Kapitel 3 Makroskopische Betrachtung der Materie 83

Aus Feldgrößen werden Zustandsgrößen	83
Erster Handschlag: System abgrenzen	84
Zweiter Handschlag: Systeme leben von Zustandsgrößen	84
Thermodynamik verbindet Physik mit Chemie	85
Masse und Stoffmenge	85
Eine berühmte Naturkonstante: Avogadro-Zahl	89
Grundgrößen der Physik und Chemie	89
Druckmessgeräte: Manometer und Barometer	97
Der thermodynamische Zustand eines Stoffes	101
Physik und Technik: Der Normzustand eines Gases	102
Chemie: Der Standardzustand eines Gases	102
Eine andere berühmte Naturkonstante: Loschmidt-Zahl	103
Das Molvolumen	103
Kompressibilität der Fluide	104
Ausgangssituation: Ein Festkörper	104
Vom Festkörper zum Fluid: Hooke'sches Gesetz der Fluide	105
Beispiel: Gesucht ist der Kompressibilitätsmodul von Wasser bei verschieden Temperaturen?	109
Beispiel: Wie groß ist die Dichte von Wasser bei 600 bar?	111
Ihr erster Kontakt mit dem idealen Gas	112
Was ist eigentlich die Temperatur?	113

TEIL II STOFFGESETZE UND IHRE PRAKTISCHE ANWENDUNG 117

Kapitel 4 Zustandsgleichungen der idealen Gase 119

Ideale Gase	119
Die Modelleigenschaften der idealen Gase	119
Geschichte der idealen Gasgleichung	120
Heute: Die Vereinigung der Gasgesetze ist die ideale Gasgleichung	121
Weitere praktische Formen der idealen Gasgleichung	122
Übung macht den Meister: Beispiele	126
Folgerungen aus der idealen Gasgleichung	131
Die ideale Gasgleichung für relative Zustandsänderungen	132
Die Vereinigung der Koeffizienten	141
Was auch immer kommt: praktische Beispiele lösen	141

Kapitel 5 Reale Gase 145

Wie erkennen Sie ein reales Gas?	145
Der genaue Blick auf die Realgasgleichung	146
Entscheidungskriterium: Ideales oder reales Gas?	147
Die Van-der-Waals-Zustandsgleichung für reale Gase	151
Eigenschaften der Van-der-Waals-Gasgleichung	152
Kritischer Druck und kritische Temperatur eines Gases	153
Die kritischen Daten eines Gases berechnen	154

Kapitel 6 In der Nähe des absoluten Nullpunkts 161

Den absoluten Nullpunkt bestimmen	161
Absolute Temperaturskala und andere Skalen	164
Ein Maß für die Wärmeaufnahme eines Stoffes: Die Wärmekapazität	165
Mit Wärmemengen umgehen	166
Spezifische Wärmekapazität der Gase	167
Molare Wärmekapazitäten der Gase	169
Spezifische Wärmekapazität der Festkörper	169
Spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeiten	171
Experimentelle Bestimmung der Wärmekapazität	172
Mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	172
Mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	176

**TEIL III
ENERGIEPRINZIP, HAUPTSÄTZE UND ENTROPIE 177**

**Kapitel 7
Arbeit und Wärme ist Energie 179**

Was ist Arbeit?	179
Mechanische Arbeit der Physik	179
Die Arbeit der Thermodynamik	181
Was ist Wärme?	183
Die fünf thermodynamischen Systeme der Technik	185

**Kapitel 8
Energieprinzip und totale Differentiale 187**

Intensive und extensive Zustandsgrößen	187
Etwas Besonderes: Das Energieprinzip der Thermodynamik	190
Handhaben Sie drei Differentialformen	192
Formen der Energie	193
Die Arbeit einer Feder	195
Das totale Differential einer Funktion	196
Ein Stahlkörper dehnt sich. Wie ändert sich sein Volumen?	196
Das totale Differential einer Funktion finden	198
Totales Differential und Linienintegral: Passt das zusammen?	198
Zurück zum Stahlkörper: das anschauliche Ergebnis	199

**Kapitel 9
Der erste Hauptsatz für offene Systeme 207**

Alltägliche Formen der Energie	208
Herleitung des ersten Hauptsatzes	208
Wärme fließt über Systemgrenzen	210
Kein wirkliches System ist ohne Reibung	211
Offene Systeme können nur technische Arbeit abgeben oder aufnehmen ..	212
Die Energien im Eintrittsmassenstrom erfassen	212
Die Energien im Austrittsmassenstrom feststellen	213
Der erste Hauptsatz in differentieller Form	214
Der erste Hauptsatz in integraler Form	216
Der erste Hauptsatz für die Gesamtmasse eines offenen Systems	218
Der erste Hauptsatz als Leistungsbilanz	219
Beispiel: Wärmeübertrager in einer Luftkühlanlage	220
Technische Arbeit	229
Kolbenverdichter in Aktion	230
Absolute technische Arbeit	231
Leistung der technischen Arbeit	232

**Kapitel 10
Der erste Hauptsatz für geschlossene Systeme 235**

Herleitung des ersten Hauptsatzes für geschlossene Systeme	235
Spezifische integrale Form des Hauptsatzes	237

Energiebilanz des Gesamtsystems	238
Leistungsbilanz im geschlossenen System.....	239
Die thermodynamische Arbeit	240
Zum Unterschied zwischen thermodynamischer und technischer Arbeit	241
Ein neuer Begriff: reversible Wärme	243

Kapitel 11

Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik..... 249

Alltägliche Vorgänge und gesunder Menschenverstand	249
Reversible Wärme und das Energieprinzip	251
Herleitung des zweiten Hauptsatzes für reversible Prozesse.....	252
Allgemeine Entropieänderung reversibler Prozesse	257
Entropieänderung reiner Stoffe	259
Entropieänderung irreversibler Prozesse.....	261
Den zweiten Hauptsatz bei irreversiblen Prozessen prüfen	262
Entropieänderung eines Universums	265
Reversible und irreversible Prozesse	272
Entropie und Unordnung	272
Was ist Ordnung und was Unordnung?	272
Statistische Entropie.....	273

Kapitel 12

Dritter und nullter Hauptsatz der Thermodynamik..... 279

Der dritte Hauptsatz der Thermodynamik.....	279
Die Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts.....	280
Die Entropie eines Prüfkörpers am absoluten Nullpunkt	280
Absoluter Nullpunkt: Lässt sich ein Körper auf 0 Kelvin abkühlen?.....	282
Nullter Hauptsatz der Thermodynamik	283

TEIL IV

THERMODYNAMISCHE KREISPROZESSE..... 285

Kapitel 13

Grundlagen der Kreisprozesse 287

Eigenschaften aller Kreisprozesse	287
Rechtsläufige Kreisprozesse mit dem Uhrzeigersinn	289
Linksläufige Kreisprozesse entgegen dem Uhrzeigersinn.....	290
Ausführungsarten der Kreisprozesse	290
Charakteristische Prozessfunktionen der Kreisprozesse.....	291
Graphen der Prozessfunktionen	292
Der erste Hauptsatz für beliebige Kreisprozesse	294

Kapitel 14

Rechtsläufige Kreisprozesse..... 297

Theoretische Berechnung der Nutzarbeit	297
Rechenansatz für die abzugebende Nutzarbeit	299

16 Inhaltsverzeichnis

Theoretische Betrachtung zur Feststellung der abgegebenen Nutzarbeit, ohne Linienintegrale lösen zu müssen	299
Thermischer Wirkungsgrad rechtsläufiger Kreisprozesse	303
Musterbeispiel: rechtsläufiger Carnot-Kreisprozess	304
Die Transformation des Carnot-Prozesses in das T-s-Diagramm	305
Weg A: Die Berechnung der Nutzarbeit im p-v-Diagramm	307
Nutzarbeit im p-v-Diagramm als Flächen repräsentieren	312
Schwierig: Gleichungen vereinfachen	314
Weg B: Die Nutzarbeit im T-s-Diagramm berechnen	316
Weg C: Nutzarbeit aus den Wärmeumsätzen berechnen	317
Thermischer Wirkungsgrad des rechtsläufigen Carnot-Kreisprozesses	318
Allgemeine Energieflüsse rechtsläufiger Kreisprozesse	319
Übersicht: rechtsläufige Kreisprozesse	320
Otto-Kreisprozess	320
Diesel-Kreisprozess	322
Seilinger-Kreisprozess	323
Stirling-Kreisprozess	324
Joule-Kreisprozess	325
Ericson-Kreisprozess	326
Clausius-Rankine-Kreisprozess	326

Kapitel 15 Linksläufige Kreisprozesse 329

Allgemeiner Energiefluss linksläufiger Kreisprozesse	329
Wärme- und Kälteziffer	331
Nutzarbeit bei linksläufigen Kreisprozessen	332
Musterbeispiel: Linksläufiger Carnot-Kreisprozess	333
Notwendig: die zuzuführende Nutzarbeit	333
Wärmeziffer des linksläufigen Carnot-Kreisprozesses	337
Kälteziffer des linksläufigen Carnot-Kreisprozesses	339
Temperaturniveaus von Wärmepumpen und Kältemaschinen	340

TEIL V WASSER UND WASSERDAMPF 343

Kapitel 16 Wasser und Wasserdampf 345

Allgemeine Phasenänderungen	345
Aus Eis wird heißer Dampf: Isobarer Verdampfungsvorgang	346
Neuordnung der Variablen bei Wasserdampfprozessen	349
3-d-Phasendiagramm des Wassers	351
Isobarer Verdampfungsvorgang im 3-d-Phasendiagramm	353
Die Dampfdruckkurve des Wassers	354
Internationale Formel zur Berechnung von p_s als Funktion von ϑ_s	355
Zweidimensionale Phasendiagramme	356
Das p-v-Diagramm des reinen Wassers	357

Das p- ϑ -Diagramm des reinen Wassers	358
Das ϑ -s-Diagramm des reinen Wassers	358
Das h-s-Diagramm des reinen Wassers	360
Wasserdampf Tafel	361
Die Temperaturtafel (Tafel I)	361
Die Drucktafel (Tafel II)	365
Wasser und überhitzter Dampf (Tafel III)	366

Kapitel 17

Dampfprozesse 373

Aus Wasser überhitzten Dampf bereiten	373
Gesucht: Sattdampfmasse	375
Abkühlung einer Sattdampfmasse	376
Idealer und realer Dampfturbinenprozess	379

TEIL VI

CHEMISCHE THERMODYNAMIK 383

Kapitel 18

Verbrennungsreaktionen 385

Vom Wesen der chemischen Reaktionen	385
Reaktionsenthalpie	386
Exotherme Reaktionen	387
Endotherme Reaktionen	387
Brennstoffe und ihre Reaktionsgleichungen	388
Vollständige Verbrennung von Kohlenstoff mit Sauerstoff	389
Unvollständige Verbrennung von Kohlenstoff mit Sauerstoff	390
Vollständige Verbrennung von Kohlenmonoxid mit Sauerstoff	391
Vollständige Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff	391
Vollständige Verbrennung von Schwefel mit Sauerstoff	393
Vollständige Verbrennungen von Kohlenstoff mit Luft	393
Vollständige Verbrennung von Kohlenwasserstoffen	395
Vollständige Verbrennung von organischen Stoffen	396

Kapitel 19

Erster Hauptsatz für chemisch reagierende Substanzen 399

Herleitung des ersten Hauptsatzes für reagierende Substanzen	399
Molare Enthalpie der Stoffe	403
Brennwert und Heizwert	408

Kapitel 20

Entropiefunktionen und der zweite Hauptsatz für chemische Reaktionen 411

Molare Entropiefunktion eines Einzelgases	411
Entropiefunktion einer Gasmischung	414

18 Inhaltsverzeichnis

Partialdruck einer Gasmischung	416
Entropieänderung einer chemischen Reaktion	418
Der zweite Hauptsatz der chemischen Thermodynamik	419
Gesamtentropie ΔS_{ges} des Universums	420
Gesamtentropie einer Knallgasreaktion	421
Gibbs-Funktion oder freie Enthalpie	424
Der chemische Lebensprozess einer Kreatur	424
Glanz der Wissenschaft: freie Enthalpie	424
Bedeutungen der Gibbs-Funktion	426
Die Gibbs-Funktionen bei festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen	428
Die Standard-Gibbs-Funktion	430
Standard-Gibbs-Funktion ausgewählter Substanzen	431
Das Verhalten von chemischen Reaktionen aus Sicht des zweiten Hauptsatzes	433

TEIL VII DER TOP-TEN-TEIL 435

Kapitel 21 Zehn wichtige Gleichungen 437

Realgasgleichung	437
Der erste Hauptsatz für offene Systeme	438
Der erste Hauptsatz für geschlossene Systeme	438
Reversible Wärme.	439
Der erste Hauptsatz für Kreisprozesse	439
Der zweite Hauptsatz für reversible Prozesse	440
Die spezifische Entropieänderung	440
Gesamtentropie eines Universums	440
Absolute Größen	441
Leistung einer Energiegröße	442

Kapitel 22 Zehn Energiebetrachtungen 443

Die Gesichter der potentiellen Energie	443
Die kinetische Energie	444
Die innere Energie	445
Die mechanische Arbeit	446
Die Enthalpie eines Stoffes	447
Chemisch gebundene Energie	447
Die Wärmestrahlung eines Körpers	448
Was ist Wärme?	449
Gibbs-Energie und maximal mögliche Arbeit	449
Helmholtz-Energie und maximale Arbeit	451

Stichwortverzeichnis 453