



Auf einen Blick

Über den Autor	7
Einleitung	21
Teil I: Grundlegendes	27
Kapitel 1: Bausteine der Thermodynamik	29
Kapitel 2: Wärmekapazitäten	51
Kapitel 3: Ideale Gase	67
Teil II: Fluide, die in Bewegung sind	87
Kapitel 4: Mischungen idealer Gase	89
Kapitel 5: Kompressibilität der Fluide	107
Kapitel 6: Aerostatik und Auftrieb	119
Kapitel 7: Erhaltung der Masse	135
Teil III: Energiebilanzen mit realen und idealen Gasen	149
Kapitel 8: Reale Gase	151
Kapitel 9: Einstieg in die höhere Thermodynamik	169
Kapitel 10: Erster Hauptsatz für offene Systeme	187
Kapitel 11: Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme	209
Kapitel 12: Entropie und der zweite Hauptsatz	225
Teil IV: Zustandsänderungen der Stoffe	257
Kapitel 13: Der Joule-Thomson-Effekt	259
Kapitel 14: Zustandsänderungen idealer Gase	275
Teil V: Kreisprozesse mit Gasen und Wasserdampf	295
Kapitel 15: Thermodynamische Kreisprozesse	297
Kapitel 16: Wasser und Wasserdampf	327
Kapitel 17: Fundamentalgleichungen und die Maxwell-Beziehungen	359
Teil VI: Top-Ten-Teil	373
Kapitel 18: Zehn 3-D-Darstellungen von Kreisprozessen	375
Anhang Lösungen und Lösungswege	389
Stichwortverzeichnis	437







Inhaltsverzeichnis

Über den Autor	7
Danksagung	7
Einleitung	21
Über dieses Buch	21
Konventionen in diesem Buch	21
Törichte Annahmen über die Leser	22
Wie dieses Buch aufgebaut ist	22
Teil 1: Grundlegendes (Kapitel 1, 2, 3)	23
Teil 2: Fluide, die in Bewegung sind (Kapitel 4, 5, 6, 7)	23
Teil 3: Energiebilanzen mit realen und idealen Gasen (Kapitel 8, 9, 10, 11, 12)	23
Teil 4: Zustandsänderungen der Stoffe (Kapitel 13 und 14)	24
Teil 5: Kreisprozesse mit Gasen und Wasserdampf (Kapitel 15, 16, 17)	24
Top-Ten-Teil (Kapitel 18)	24
Lösungen zu den Übungsaufgaben	24
Symbole, die in diesem Buch verwendet werden	25
Wie es weitergeht	25
TEIL I	
GRUNDLEGENDES	27
Kapitel 1	
Bausteine der Thermodynamik	29
Atome und Moleküle	29
Temperatur ϑ und absolute Temperatur T	31
Volumenausdehnungskoeffizienten der Stoffe	33
Der Druck in Flüssigkeiten und Gasen	35
Hydrostatischer Druck in einer Flüssigkeit	36
Den Druck eines Gases mit einem Schrägrohrmanometer messen	40
Norm- und Standardzustand eines Gases	41
Normzustand eines Gases	42
Standardzustand eines Gases	43
Die Stoffmenge einer Substanz	43
Das Molvolumen	44
SI-Einheiten	45
Umrechnungstafel der abgeleiteten Einheiten	46
Kohärente und inkohärente Einheiten	46
Übungsaufgaben	47
Aufgabe 1.1: Einheiten umrechnen	47
Aufgabe 1.2: Die Stoffmenge in einem Kilogramm Wasser berechnen	47





12 Inhaltsverzeichnis

Aufgabe 1.3: An einem schrägen U-Rohrschenkel die Ablesegenauigkeit erhöhen	47
Aufgabe 1.4: Eine einfache Druckerhöhung bewerkstelligen	48
Aufgabe 1.5: Den Druckabfall in einer Wasserleitung berechnen	48

Kapitel 2

Wärmekapazitäten..... 51

Wärmekapazitäten der Gase	51
Mittlere spezifische Wärmekapazitäten	54
Tabellierte mittlere Wärmekapazitäten	56
Wärmekapazitäten der Flüssigkeiten und Festkörper	60
Übersicht: Wärmekapazitäten der Stoffe.....	61
Experimentelle Bestimmung der Wärmekapazität c_p	62
Übungsaufgaben	64
Aufgabe 2.1: Mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	64
Aufgabe 2.2: Warmwasser bereitstellen	65
Aufgabe 2.3: Die Wärmekapazität einer Sodalösung berechnen	65

Kapitel 3

Ideale Gase..... 67

Eigenschaften eines idealen Gases	67
Die Grundform der idealen Gasgleichung.....	68
Historische Entwicklung der idealen Gasgleichungen	69
Ideale Gasgleichungen (Thermische Zustandsgleichungen).....	71
Übungsaufgaben	79
Aufgabe 3.1: Das Molvolumen aus der Dichte eines Gases berechnen	79
Aufgabe 3.2: Molmasse eines H-Atoms bestimmen	79
Aufgabe 3.3: Stoffmenge eines Salzkristalls	80
Aufgabe 3.4: Massenstrom berechnen	80
Aufgabe 3.5: Luftfederung	81
Aufgabe 3.6: Druckausgleich bei verschiedenen Gasen	81
Aufgabe 3.7: Einen Gasbehälter auf Dichtheit prüfen.....	82
Aufgabe 3.8: Ein Kilogramm Gas im Normzustand einschließen	82
Aufgabe 3.9: Ein dreistufiger Verdichtungsprozess	83
Aufgabe 3.10: Eine luftgefüllte Stahlflasche kühlt sich ab	83
Aufgabe 3.11: Sauerstoff in Flaschen umfüllen	83
Aufgabe 3.12: Dauerbelastung eines pneumatischen Stoßdämpfers	83
Aufgabe 3.13: Masse und Stoffmenge	84
Aufgabe 3.14: Norm- und Standardzustand	84
Aufgabe 3.15: Außergewöhnlicher Verdichtungsprozess	84
Aufgabe 3.16: Masse und Dichte einer Stoffmenge	85
Aufgabe 3.17: Zum 1. Gesetz von Gay-Lussac (Gesetz von Charles)	85
Aufgabe 3.18: Relative Zustandsgrößen berechnen	86



Inhaltsverzeichnis 13

TEIL II	
FLUIDE, DIE IN BEWEGUNG SIND	87
Kapitel 4	
Mischungen idealer Gase	89
Die Konzentration einer Substanz in einer Mischung.....	89
Massenkonzentration	90
Stoffkonzentration	90
Volumenkonzentration	92
Zusammenhang zwischen Massen- und Stoffkonzentration.....	92
Gesetz von Dalton.....	93
Spezielle Gaskonstante einer Mischung	94
Die Dichte einer Gasmischung	95
Spezifische Wärmekapazitäten einer Mischung	95
Intensive und extensive Zustandsgrößen.....	96
Innere Energie einer Mischung aus idealen Gasen.....	97
Enthalpie einer Mischung aus idealen Gasen.....	98
Mischungstemperatur	100
Entropieänderung einer Mischung aus idealen Gasen	101
Übungsaufgaben	101
Aufgabe 4.1: Partialdrücke und Temperatur einer Gasmischung.....	101
Aufgabe 4.2: Eine Massenkonzentration in Volumenanteile umrechnen ...	102
Aufgabe 4.3: Die Dichte einer O ₂ -N ₂ -Gasmischung berechnen.....	102
Aufgabe 4.4: Gaslieferung an ein Zementwerk.....	102
Aufgabe 4.5: Partialdrücke und Mischtemperatur	103
Aufgabe 4.6: Brennwert einer Gasmischung	103
Aufgabe 4.7: Mischung aus gegebenen Volumenkonzentrationen.....	103
Aufgabe 4.8: Mittlere Molmasse einer Gasmischung.....	103
Aufgabe 4.9: Eine Gasmischung für Schutzgasschweißungen	104
Aufgabe 4.10: Kaltes und heißes Wasser mischen.....	104
Aufgabe 4.11: Mittlere Molmasse einer Mischung.....	104
Aufgabe 4.12: Dichte und Gesamtmasse einer Mischung.....	104
Aufgabe 4.13: Die Wärmekapazität in einem Experiment bestimmen	105
Kapitel 5	
Kompressibilität der Fluide	107
Das Hooke'sche Gesetz der Festkörper	107
Das Hooke'sche Gesetz der Flüssigkeiten und Gase.....	108
Übungsaufgaben	116
Aufgabe 5.1: Kompressionsmodul und örtlicher Gasdruck	116
Aufgabe 5.2: Dichteänderung der Luft in einer isothermen Atmosphäre... ..	116
Aufgabe 5.3: Kompressionsmodul einer Ölmenge bestimmen.....	117
Aufgabe 5.4: Dichteänderung versus Kompressionsmodul.....	117



14 Inhaltsverzeichnis

Kapitel 6

Aerostatik und Auftrieb	119
Die Standardatmosphäre	120
Isotherme Atmosphäre (barometrische Höhenformel)	125
Auftriebskräfte in Fluiden	127
Auftrieb in Flüssigkeiten	127
Schwimmen, Schweben, Sinken und Aufsteigen	128
Thermischer Auftrieb in Fluiden	130
Übungsaufgaben	130
Aufgabe 6.1: Wie hoch steigt ein Ballon?	130
Aufgabe 6.2: Luftdruck am Berggipfel	131
Aufgabe 6.3: Auftrieb in der Atmosphäre	131
Aufgabe 6.4: Luftdruck am Boden eines Erdschachts	131
Aufgabe 6.5: Auftriebsfehler bei präzisen Wägungen in der Luft	132
Aufgabe 6.6: Zeppeline können auch Lasten tragen	132
Aufgabe 6.7: Wie tief taucht ein Körper in eine Flüssigkeit beim Schwimmen ein?	132
Aufgabe 6.8: Der Auftriebszug im Schornstein	133
Aufgabe 6.9: Archimedes und Gold	133
Aufgabe 6.10: Öchslegrad	133

Kapitel 7

Erhaltung der Masse	135
Eindimensionale Kontinuitätsgleichung für Flüssigkeiten	135
Eindimensionale Kontinuitätsgleichung für Gase	137
Kontinuitätsgleichung in 3-D-Strömungsfeldern	137
Was ist ein Vektorfeld?	137
Die allgemeine Kontinuitätsgleichung für Gase als Feldgleichung	139
Kontinuitätsgleichung für flüssige 3-D-Strömungsfelder	142
Übungsaufgaben	144
Aufgabe 7.1: Divergenz eines zweidimensionalen Vektorfelds	144
Aufgabe 7.2: Ein allgemeines Vektorfeld eines Gases	144
Aufgabe 7.3: Eindimensionale Kontinuitätsgleichung	144
Aufgabe 7.4: Ein rechteckiger Luftkanal	144
Aufgabe 7.5: Ist das Feld einer Grenzschichtströmung inkompressibel?	144
Aufgabe 7.6: Zwei Gasströme werden gemischt	145
Aufgabe 7.7: Ein Geschwindigkeitsfeld auf Inkompressibilität prüfen	145
Aufgabe 7.8: Wie schnell steigt der Wasserspiegel in einem Gefäß?	145
Aufgabe 7.9: Strömungsverzweigung in einer Arterie	145
Aufgabe 7.10: Wasserstandsänderung in einem Tank	146
Aufgabe 7.11: Beschleunigte Hochdruckströmung eines heißen Gases	147
Aufgabe 7.12: Volumenstrom eines Gases aus einer Erdgasquelle	147
Aufgabe 7.13: Wie schnell lässt sich ein Schwimmbecken füllen?	148
Aufgabe 7.14: In welcher Zeit wird ein Trichter mit Wasser gefüllt?	148



TEIL III ENERGIEBILANZEN MIT REALEN UND IDEALEN GASEN 149

Kapitel 8

Reale Gase 151

Eigenschaften realer Gase	151
Van-der-Waals-Gase und ihre Zustandsgleichungen.....	152
Beschreibung realer Gase mit der Realgasgleichung	162
Übungsaufgaben	166
Aufgabe 8.1: Vergleichsrechnung zwischen realem und idealem Gas.....	166
Aufgabe 8.2: Den Druck in einem Behälter bestimmen	166
Aufgabe 8.3: Den Stoffstrom durch eine Gasleitung berechnen.....	167
Aufgabe 8.4: Wirkliche Dichteänderung eines strömenden Gases.....	167

Kapitel 9

Einstieg in die höhere Thermodynamik 169

Totale Differenziale	169
Das Differenzial einer Funktion.....	169
Funktionen mit mehreren Veränderlichen	171
Implizite Funktionen und ihre Ableitungen.....	176
Implizite Funktionen ableiten	177
Allgemeine Eigenschaften impliziter Zustandsgleichungen	179
Übungsaufgaben	185
Aufgabe 9.1: Druckänderung eines idealen Gases infolge einer Temperatur- und Volumenänderung	185
Aufgabe 9.2: Volumenänderung eines Van-der-Waals-Gases infolge einer Temperaturänderung.....	185
Aufgabe 9.3: Messfehler mit totalen Differenzialen abschätzen	185
Aufgabe 9.4: Die Änderung der inneren Energie eines Van-der-Waals-Gases infolge einer Verdichtung des Gases.....	185
Aufgabe 9.5: Die spezifische innere Energieänderung eines idealen Gases bestimmen.....	186

Kapitel 10

Erster Hauptsatz für offene Systeme 187

Thermodynamische Systeme.....	187
Die Systemgrenze umgibt das System.....	188
Allgemeine Erklärung der reversiblen Prozesse.....	188
Innere Energie	189
Mikroskopische Beschreibung der inneren Energie eines idealen Gases ...	189
Makroskopische Beschreibung der inneren Energie eines realen Gases....	190
Der erste Hauptsatz für offene Systeme.....	191
Spezifische Energien formulieren	194
Mathematische Formulierung der Energiebilanz	195
Die integrale Form des ersten Hauptsatzes für offene Systeme	197
Spezifische Enthalpie eines idealen Gases	198



16 Inhaltsverzeichnis

Technische Arbeit.....	199
Der erste Hauptsatz für offene Systeme als Leistungsbilanz.....	201
Übungsaufgaben.....	205
Aufgabe 10.1: Industrieller Lufterhitzer.....	205
Aufgabe 10.2: Wasserturbine.....	206
Aufgabe 10.3: Die Reibungsarbeit in einer Strömung ermitteln.....	206
Aufgabe 10.4: Die Leistung einer Wasserpumpe berechnen.....	207

Kapitel 11

Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme 209

Die Energiebilanz für geschlossene Systeme.....	209
Integrale Form des ersten Hauptsatzes.....	211
Leistungsbilanz im geschlossenen System.....	212
Thermodynamische Arbeit.....	213
Reversible Wärme.....	215
Reversible adiabate Prozesse idealer Gase.....	216
Die Arbeit eines adiabatischen Prozesses.....	218
Übungsaufgaben.....	223
Aufgabe 11.1: Isobare Expansion eines idealen Gases.....	223
Aufgabe 11.2: Mischungstemperatur und Gleichgewichtsdruck einer Gasmischung.....	223
Aufgabe 11.3: Nutzungsgrad eines Prozesses.....	224
Aufgabe 11.4: Kaltes und heißes Wasser mischen.....	224
Aufgabe 11.5: Adiabate Expansion eines idealen Gases.....	224

Kapitel 12

Entropie und der zweite Hauptsatz 225

Molekularstatistische Interpretation der Entropie.....	225
Entropie und thermodynamische Wahrscheinlichkeit.....	226
Stirlings Näherungsformel.....	229
Gleichgewichtszustand und Maximum der Entropie.....	229
Die Entropie als Zustandsfunktion.....	234
Die Entropie eines idealen Gases.....	235
Entropieänderung reiner Stoffe infolge von Zustandsänderungen.....	238
Entropieänderungen bei irreversiblen Vorgängen.....	239
Die Gesamtentropie eines Gesamtsystems (Universums).....	240
Temperaturausgleich zwischen zwei Teilsystemen.....	242
Übungsaufgaben.....	250
Aufgabe 12.1: Entropieproduktion eines expandierenden idealen Gases.....	250
Aufgabe 12.2: Ist die reversible Wärme $\delta q_{rev}(T, v)$ eine Zustandsgröße?.....	250
Aufgabe 12.3: Ist die Entropie ds eine Zustandsfunktion?.....	251
Aufgabe 12.4: Ist der zweite Hauptsatz der Thermodynamik verletzt?.....	251
Aufgabe 12.5: Den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik anwenden....	252



Inhaltsverzeichnis 17

Aufgabe 12.6: Wärmeleitung durch eine Wand	253
Aufgabe 12.7: Entropieproduktion beim Wärmedurchgang durch eine Wand	253
Aufgabe 12.8: Erfüllt der Betrieb eines Axialkompressors den zweiten Hauptsatz?	254
Aufgabe 12.9: Die Entropieänderung bestimmt die Strömungsrichtung	254
Aufgabe 12.10: Eine Flüssigkeit mit einem Quirl erwärmen	255

TEIL IV ZUSTANDSÄNDERUNGEN DER STOFFE.....257

Kapitel 13 Der Joule-Thomson-Effekt 259

Das Experiment	259
Der Joule-Thomson-Koeffizient	265
Übungsaufgaben	272
Aufgabe 13.1: Aus einer Druckflasche entweicht Sauerstoff	272
Aufgabe 13.2: Isenthalpe Expansion eines Gases bei hohem Druck	272

Kapitel 14 Zustandsänderungen idealer Gase 275

Wichtige thermodynamische Prozesse idealer Gase	275
Isotherme Zustandsänderung $dT = 0$	276
Isobare Zustandsänderung $dp = 0$	279
Isochore Zustandsänderung $dv = 0$	281
Isentrope Zustandsänderung $ds = 0$	283
Polytrope Zustandsänderung	287
Übungsaufgaben	292
Aufgabe 14.1: Entropieänderung einer polytropen Zustandsänderung	292
Aufgabe 14.2: Übertragung der Prozessfunktionen $ds = 0$ und $dv = 0$ aus dem p - v -Diagramm in das T - s -Diagramm	292
Aufgabe 14.3: Sind Änderungen der inneren Energie wegunabhängig?	293

TEIL V KREISPROZESSE MIT GASEN UND WASSERDAMPF 295

Kapitel 15 Thermodynamische Kreisprozesse 297

Wie werden Kreisprozesse thermodynamisch beschrieben?	297
Ein rechtsläufiger Kreisprozess	298
Ein linksläufiger Kreisprozess	299
Der erste Hauptsatz für reversible Kreisprozesse	300
Berechnungsansätze für Kreisprozesse	301
Rechtsläufige Kreisprozesse	303





18 Inhaltsverzeichnis

Der Carnot-Kreisprozess	310
Linksläufige Kreisprozesse	320
Übungsaufgaben	325
Aufgabe 15.1: Ein rechtsläufiger Carnot-Kreisprozess.....	325
Aufgabe 15.2: Maximale reversible Arbeit zwischen zwei Temperaturen ...	325
Aufgabe 15.3: Wahr oder falsch: Zum Betrieb einer Wärmekraftmaschine.	325
Aufgabe 15.4: Ein theoretischer Kreisprozess zum Üben.....	325

Kapitel 16

Wasser und Wasserdampf 327

Grundbegriffe der Kraftwerkstechnik	327
3-D-Zustandsdiagramm für Wasser und Wasserdampf	332
Zweidimensionale Phasendiagramme	335
Das p - v -Diagramm des reinen Wassers.....	335
Das p - ϑ -Diagramm	336
Das ϑ - s -Diagramm für H_2O	337
Das h - s -Diagramm für H_2O	338
Die Wasserdampftafeln.....	340
Die Temperaturtafel (Tafel I)	340
Die Drucktafel (Tafel II)	340
Wasser und überhitzter Dampf (Tafel III)	340
Übungsaufgaben	356
Aufgabe 16.1: Zum Betrieb eines Überhitzers und einer Dampfturbine....	356
Aufgabe 16.2: Wirkungsgrad eines Erwärmungsvorgangs	357
Aufgabe 16.3: Wasser isobar erhitzen	357
Aufgabe 16.4: Wie funktioniert ein Geysir?	357

Kapitel 17

Fundamentalgleichungen und die Maxwell-Beziehungen 359

Herleitung der Fundamentalgleichung.....	359
Maxwell-Beziehungen	361
Übungsaufgaben	371
Aufgabe 17.1: Isobarer Ausdehnungskoeffizient eines Van-der-Waals-Gases.....	371
Aufgabe 17.2: Zahlenbeispiel zum Ausdehnungskoeffizienten der Luft.....	371

TEIL VI

TOP-TEN-TEIL..... 373

Kapitel 18

Zehn 3-D-Darstellungen von Kreisprozessen 375

Mit fünf Prozessfunktionen lassen sich die wichtigsten Kreisprozesse beschreiben	375
Der Otto-Kreisprozess in 3-D-Darstellung	377
Diesel-Kreisprozess.....	378



Inhaltsverzeichnis 19

Seilinger-Kreisprozess	379
Der Carnot-Kreisprozess im p - v - T -Diagramm	381
Der Carnot-Kreisprozess im T - s - p -Diagramm	382
Der Joule-Kreisprozess (offener Gasturbinenprozess)	383
Ericson-Kreisprozess (geschlossener Gasturbinenprozess)	384
Der Stirling-Kreisprozess	385
Der Clausius-Rankine-Kreisprozess	386
Anhang Lösungen und Lösungswege	389
Stichwortverzeichnis	437



