

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** *XI*

**Nomenklatur** *XIII*

|          |                                                           |           |
|----------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                         | <b>1</b>  |
| 1.1      | Technische Thermodynamik                                  | 1         |
| 1.2      | Zur Handhabung des Arbeitsbuches                          | 2         |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen</b>                                         | <b>5</b>  |
| 2.1      | Das thermodynamische System                               | 5         |
| 2.2      | Thermodynamische Größen                                   | 8         |
| 2.2.1    | Zustandsgrößen                                            | 9         |
| 2.2.2    | Zustandsänderungen                                        | 11        |
| 2.2.3    | Energie                                                   | 15        |
| 2.2.4    | Prozessgrößen                                             | 15        |
| 2.3      | Temperatur                                                | 17        |
| 2.3.1    | Thermisches Gleichgewicht                                 | 18        |
| 2.3.2    | Nullter Hauptsatz der Thermodynamik und Temperaturmessung | 18        |
|          | Zusammenfassung                                           | 20        |
|          | Aufgaben und Lösungen                                     | 23        |
| <b>3</b> | <b>Der erste Hauptsatz der Thermodynamik</b>              | <b>33</b> |
| 3.1      | Allgemeine Formulierung                                   | 34        |
| 3.1.1    | Geschlossenes System                                      | 35        |
| 3.1.2    | Offenes System                                            | 35        |
| 3.2      | Arbeitsformen                                             | 36        |
| 3.2.1    | Mechanische Arbeit                                        | 36        |
| 3.2.2    | Volumenarbeit                                             | 37        |
| 3.2.3    | Dissipationsarbeit (Reibungsarbeit)                       | 37        |
| 3.2.4    | Nutzarbeit                                                | 38        |
| 3.2.5    | Verschiebearbeit                                          | 39        |
| 3.2.6    | Die technische Arbeit                                     | 40        |
| 3.2.7    | Andere Arbeitsformen                                      | 42        |

|          |                                                                         |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3      | Wärme                                                                   | 43         |
| 3.4      | Innere Energie                                                          | 43         |
| 3.5      | Enthalpie                                                               | 44         |
| 3.6      | Mechanische Energie                                                     | 46         |
| 3.7      | Spezielle Formulierungen                                                | 46         |
| 3.7.1    | Geschlossenes System                                                    | 47         |
| 3.7.2    | Das stationäre offene System                                            | 48         |
| 3.7.3    | Beispiele                                                               | 48         |
|          | Zusammenfassung                                                         | 51         |
|          | Aufgaben und Lösungen                                                   | 57         |
| <b>4</b> | <b>Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik</b>                           | <b>87</b>  |
| 4.1      | Die Richtung von Prozessen                                              | 87         |
| 4.2      | Entropie und deren Bilanzierung                                         | 89         |
| 4.2.1    | Geschlossene Systeme und Kreisprozesse                                  | 89         |
| 4.2.2    | Entropiebilanz am offenen System                                        | 90         |
| 4.2.3    | Schlussfolgerungen                                                      | 92         |
| 4.3      | Die Gibbssche Fundamentalgleichung                                      | 96         |
| 4.3.1    | Entropieberechnung                                                      | 97         |
| 4.3.2    | Beziehungen zwischen Zustandsgrößen                                     | 98         |
| 4.4      | Beispiele, Tipps und Tricks                                             | 100        |
|          | Zusammenfassung                                                         | 105        |
|          | Aufgaben und Lösungen                                                   | 109        |
| <b>5</b> | <b>Stoffthermodynamik – Eigenschaften der Materie</b>                   | <b>125</b> |
| 5.1      | Das $p$ , $v$ , $T$ -Verhalten reiner realer Stoffe                     | 125        |
| 5.2      | Die Bestimmung thermischer und kalorischer Zustandsgrößen               | 130        |
| 5.2.1    | Festkörper, Flüssigkeit, Schmelzen/Erstarren, Sublimieren/Desublimieren | 131        |
| 5.2.2    | Nassdampfgebiet, Verdampfen/Verflüssigen                                | 133        |
| 5.2.3    | Gase und Dämpfe                                                         | 134        |
|          | Zusammenfassung                                                         | 148        |
|          | Aufgaben und Lösungen                                                   | 152        |
| <b>6</b> | <b>Einfache Zustandsänderungen</b>                                      | <b>177</b> |
| 6.1      | Ideales Gas                                                             | 177        |
| 6.1.1    | Isochore Zustandsänderung                                               | 178        |
| 6.1.2    | Isobare Zustandsänderung                                                | 179        |
| 6.1.3    | Isotherme Zustandsänderung                                              | 180        |
| 6.1.4    | Adiabate Zustandsänderung                                               | 182        |
| 6.1.5    | Polytrope Zustandsänderung                                              | 183        |
| 6.1.6    | Irreversibel adiabate Explosion                                         | 185        |
| 6.2      | Nassdampf                                                               | 186        |
| 6.2.1    | Isobare, isotherme Zustandsänderung                                     | 186        |
| 6.2.2    | Isochore Zustandsänderung                                               | 187        |

|          |                                            |            |
|----------|--------------------------------------------|------------|
| 6.2.3    | Adiabate Zustandsänderung                  | 188        |
| 6.2.4    | Isenthalpe Zustandsänderung                | 188        |
| 6.3      | Kreisprozesse, Carnot-Prozess              | 189        |
| 6.3.1    | Der rechtsgängige Kreisprozess             | 190        |
| 6.3.2    | Der linksgängige Kreisprozess              | 193        |
| 6.3.3    | Der Carnot-Prozess                         | 195        |
|          | Zusammenfassung                            | 198        |
|          | Aufgaben und Lösungen                      | 203        |
| <b>7</b> | <b>Exergie</b>                             | <b>243</b> |
| 7.1      | Exergie einer Wärme                        | 244        |
| 7.2      | Exergie der Arbeit                         | 246        |
| 7.3      | Exergie eines geschlossenen Systems        | 248        |
| 7.4      | Exergie eines offenen Systems              | 250        |
| 7.5      | Exergieverlust                             | 251        |
| 7.6      | Der exergetische Wirkungsgrad              | 253        |
| 7.7      | Beispiele, Tipps und Tricks                | 255        |
|          | Zusammenfassung                            | 259        |
|          | Aufgaben und Lösungen                      | 262        |
| <b>8</b> | <b>Thermodynamische Prozesse</b>           | <b>277</b> |
| 8.1      | Wärme-Kraft-Prozesse                       | 278        |
| 8.1.1    | Vergleichsprozesse für Verbrennungsmotoren | 278        |
| 8.1.2    | Stirling-Prozess                           | 287        |
| 8.1.3    | Ericson-Prozess                            | 288        |
| 8.1.4    | Joule-Prozess                              | 290        |
| 8.1.5    | Dampfkraftprozesse                         | 293        |
| 8.2      | Linksgängige Prozesse                      | 299        |
| 8.2.1    | Kaltgasprozess                             | 300        |
| 8.2.2    | Kaltdampfprozess                           | 302        |
| 8.2.3    | Das Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung  | 304        |
| 8.2.4    | Verdichter                                 | 305        |
|          | Zusammenfassung                            | 307        |
|          | Aufgaben und Lösungen                      | 314        |
| <b>9</b> | <b>Gasgemische und feuchte Luft</b>        | <b>361</b> |
| 9.1      | Gemisch idealer Gase                       | 361        |
| 9.1.1    | Konzentrationen                            | 361        |
| 9.1.2    | Eigenschaften idealer Gasmischungen        | 362        |
| 9.2      | Feuchte Luft                               | 365        |
| 9.2.1    | Konzentrationsmaße                         | 367        |
| 9.2.2    | Thermische und kalorische Zustandsgrößen   | 369        |
| 9.2.3    | Das Mollier $h_{G/L}$ , $x$ -Diagramm      | 371        |
| 9.2.4    | Zustandsänderungen feuchter Luft           | 372        |
|          | Zusammenfassung                            | 380        |
|          | Aufgaben und Lösungen                      | 385        |

|           |                                                                                                       |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>10</b> | <b>Chemische Reaktionen</b>                                                                           | <b>425</b> |
| 10.1      | Reaktionsenthalpie                                                                                    | 425        |
| 10.1.1    | Standardreaktionsenthalpie                                                                            | 427        |
| 10.1.2    | Reaktionsenthalpie bei beliebiger Temperatur                                                          | 428        |
| 10.2      | Verbrennungsprozesse                                                                                  | 429        |
| 10.2.1    | Verbrennung mit Luft                                                                                  | 431        |
| 10.2.2    | Verbrennungsreaktionen der Praxis                                                                     | 432        |
|           | Zusammenfassung                                                                                       | 436        |
|           | Aufgaben und Lösungen                                                                                 | 438        |
|           | <b>Anhang A Tabellen und Stoffwerte</b>                                                               | <b>451</b> |
|           | <b>Anhang B Herleitungen</b>                                                                          | <b>465</b> |
| B.1       | Das vollständige oder totale Differenzial                                                             | 465        |
| B.2       | Betrachtung der Differenzialausdrücke $(\partial u / \partial v)_T$ und $(\partial h / \partial p)_v$ | 465        |
| B.3       | Kinetische Gastheorie                                                                                 | 467        |
|           | <b>Anhang C Diagramme</b>                                                                             | <b>469</b> |
|           | <b>Weiterführende Literatur</b>                                                                       | <b>471</b> |
|           | <b>Sachverzeichnis</b>                                                                                | <b>473</b> |