

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                      |           |
|----------|------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Thermodynamische Grundbegriffe</b>                | <b>1</b>  |
| 1.1      | Anwendungsgebiete der Thermodynamik                  | 1         |
| 1.2      | System                                               | 3         |
| 1.3      | Zustand, Zustandsgrößen, Zustandsänderungen          | 4         |
| 1.4      | Prozess, Prozessgrößen                               | 7         |
| <b>2</b> | <b>Der erste Hauptsatz der Thermodynamik</b>         | <b>9</b>  |
| 2.1      | Das Prinzip von der Erhaltung der Energie            | 9         |
| 2.2      | Potentielle Energie                                  | 10        |
| 2.3      | Kinetische Energie                                   | 13        |
| 2.4      | Arbeit                                               | 14        |
| 2.4.1    | Volumenänderungsarbeit                               | 14        |
| 2.4.2    | Kupplungsarbeit                                      | 16        |
| 2.4.3    | Verschiebearbeit                                     | 16        |
| 2.4.4    | Druckänderungsarbeit                                 | 17        |
| 2.4.5    | Reibungsarbeit                                       | 19        |
| 2.5      | Thermische Energie                                   | 20        |
| 2.5.1    | Innere Energie                                       | 21        |
| 2.5.2    | Wärme                                                | 22        |
| 2.5.3    | Enthalpie                                            | 23        |
| 2.6      | Energiebilanzen                                      | 24        |
| 2.6.1    | Energiebilanz für das geschlossene System            | 24        |
| 2.6.2    | Energiebilanz für das offene System                  | 26        |
| 2.7      | Wärmekapazität                                       | 30        |
| 2.7.1    | Spezifische Wärmekapazität                           | 31        |
| 2.7.2    | Die spezifische Wärmekapazität der Gase              | 34        |
| <b>3</b> | <b>Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik</b>        | <b>37</b> |
| 3.1      | Die Aussage des zweiten Hauptsatzes                  | 37        |
| 3.1.1    | Reversible und irreversible Prozesse                 | 38        |
| 3.1.2    | Quasistatische Zustandsänderungen                    | 39        |
| 3.2      | Irreversible Vorgänge                                | 40        |
| 3.2.1    | Reibung                                              | 40        |
| 3.2.2    | Temperaturausgleich                                  | 41        |
| 3.2.3    | Druckausgleich                                       | 41        |
| 3.2.4    | Drosselung                                           | 42        |
| 3.3      | Entropie                                             | 43        |
| 3.3.1    | Reversible Ersatzprozesse adiabater Prozesse         | 44        |
| 3.3.2    | Die Berechnung der Entropieänderung                  | 46        |
| 3.3.3    | Die Entropie als Zustandsgröße, totales Differential | 46        |
| 3.4      | Die Entropieänderung der irreversiblen Vorgänge      | 49        |
| 3.4.1    | Reibung                                              | 49        |
| 3.4.2    | Temperaturausgleich                                  | 50        |
| 3.4.3    | Druckausgleich                                       | 52        |
| 3.4.4    | Drosselung                                           | 53        |

|                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.5 Nichtadiabater Prozess und reversibler Ersatzprozess .....                             | 53         |
| 3.5.1 Isentrope; Deutungen des Entropiebegriffs .....                                      | 55         |
| 3.5.2 Entropiediagramme .....                                                              | 56         |
| 3.5.3 Kreisintegral, thermodynamische Temperatur .....                                     | 58         |
| 3.5.4 Dissipative Energie .....                                                            | 60         |
| <b>4 Ideale Gase .....</b>                                                                 | <b>63</b>  |
| 4.1 Thermische Zustandsgleichung .....                                                     | 63         |
| 4.1.1 Gesetz von <i>Boyle</i> und <i>Mariotte</i> .....                                    | 63         |
| 4.1.2 Gesetz von <i>Gay-Lussac</i> .....                                                   | 63         |
| 4.1.3 Physikalischer Normzustand .....                                                     | 64         |
| 4.1.4 Gasthermometer .....                                                                 | 65         |
| 4.1.5 Spezielle Gaskonstante .....                                                         | 66         |
| 4.1.6 Allgemeine Gaskonstante .....                                                        | 68         |
| 4.2 Kalorische Zustandsgrößen der idealen Gase .....                                       | 68         |
| 4.2.1 Innere Energie .....                                                                 | 69         |
| 4.2.2 Enthalpie .....                                                                      | 69         |
| 4.2.3 Entropie .....                                                                       | 70         |
| 4.3 Zustandsänderungen .....                                                               | 71         |
| 4.3.1 Isochore .....                                                                       | 71         |
| 4.3.2 Isobare .....                                                                        | 73         |
| 4.3.3 Isotherme .....                                                                      | 76         |
| 4.3.4 Isentrope .....                                                                      | 78         |
| 4.3.5 Polytrope .....                                                                      | 83         |
| 4.3.6 Zustandsänderungen mit veränderlicher Masse .....                                    | 90         |
| 4.4 Thermische Energie und Arbeit im $T, s$ -Diagramm .....                                | 91         |
| 4.5 Mischungen idealer Gase .....                                                          | 93         |
| 4.5.1 Der Mischungsvorgang im abgeschlossenen System .....                                 | 96         |
| 4.5.2 Mischung bei unverändertem Gesamtvolumen .....                                       | 99         |
| 4.5.3 Mischung ohne Temperatur- und Druckänderung bei unverändertem<br>Gesamtvolumen ..... | 100        |
| 4.5.4 Der Mischungsvorgang im offenen System .....                                         | 102        |
| <b>5 Reale Gase und Dämpfe .....</b>                                                       | <b>109</b> |
| 5.1 Eigenschaften der Dämpfe .....                                                         | 109        |
| 5.1.1 Phasenübergänge .....                                                                | 109        |
| 5.1.2 Zweiphasengebiete .....                                                              | 110        |
| 5.1.3 Sieden und Kondensieren .....                                                        | 111        |
| 5.1.4 Verdunsten und Tauen .....                                                           | 113        |
| 5.1.5 Flüssigkeit .....                                                                    | 115        |
| 5.1.6 Nassdampf .....                                                                      | 118        |
| 5.1.7 Überhitzter Dampf .....                                                              | 121        |
| 5.2 Zustandsdiagramme .....                                                                | 122        |
| 5.2.1 Die $p, v, T$ -Fläche .....                                                          | 122        |
| 5.2.2 Das $T, s$ -Diagramm .....                                                           | 125        |
| 5.2.3 Das $h, s$ -Diagramm .....                                                           | 128        |
| 5.3 Thermische Zustandsgleichungen .....                                                   | 130        |
| 5.3.1 Die <i>van der Waals</i> sche Gleichung .....                                        | 130        |

|          |                                                             |            |
|----------|-------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.2    | Die Grenzkurve und die <i>Maxwell</i> -Beziehung .....      | 132        |
| 5.3.3    | Die reduzierte <i>van der Waalssche</i> Gleichung .....     | 134        |
| 5.3.4    | Verschiedene Ansätze .....                                  | 135        |
| 5.3.5    | Virialkoeffizienten .....                                   | 139        |
| 5.4      | Berechnung von Zustandsgrößen; Dampftafeln .....            | 141        |
| 5.4.1    | Die kalorischen Zustandsgrößen .....                        | 142        |
| 5.4.2    | Die spezifischen Wärmekapazitäten $c_p$ und $c_v$ .....     | 147        |
| 5.4.3    | Der Isentropenexponent und der Isothermenexponent .....     | 149        |
| 5.4.4    | Die <i>Clausius-Clapeyronsche</i> Gleichung .....           | 151        |
| 5.4.5    | Freie Energie und freie Enthalpie .....                     | 155        |
| 5.4.5.1  | Allgemeines .....                                           | 155        |
| 5.4.5.2  | Ein $g, s$ -Zustandsdiagramm für Wasser und Wasserdampf ... | 161        |
| 5.4.6    | Der <i>Joule-Thomson</i> -Effekt .....                      | 165        |
| <b>6</b> | <b>Thermische Maschinen .....</b>                           | <b>171</b> |
| 6.1      | Einteilung und Arten der Maschinen .....                    | 171        |
| 6.1.1    | Unterteilung nach der Richtung der Energieumwandlung .....  | 171        |
| 6.1.2    | Unterteilung nach der Bauart der Maschinen .....            | 172        |
| 6.1.3    | Unterteilung nach der Art des ablaufenden Prozesses .....   | 172        |
| 6.2      | Ideale Maschinen .....                                      | 172        |
| 6.2.1    | Verdichtung und Entspannung in idealen Maschinen .....      | 173        |
| 6.2.2    | Mehrstufige Verdichtung und Entspannung .....               | 174        |
| 6.2.3    | Die Energiebilanz für Strömungsmaschinen .....              | 176        |
| 6.2.4    | Die Energiebilanz für Verdrängermaschinen .....             | 178        |
| 6.3      | Energiebilanzen für wirkliche Maschinen .....               | 181        |
| 6.3.1    | Innere oder indizierte Arbeit .....                         | 182        |
| 6.3.2    | Totalarbeit .....                                           | 183        |
| 6.3.3    | Totalenthalpie .....                                        | 184        |
| 6.4      | Wirkliche Maschinen .....                                   | 184        |
| 6.4.1    | Der ungekühlte Verdichter .....                             | 184        |
| 6.4.2    | Der gekühlte Verdichter .....                               | 187        |
| 6.4.3    | Kolbenverdichter .....                                      | 189        |
| 6.4.4    | Turboverdichter .....                                       | 189        |
| 6.4.5    | Gas- und Dampfturbinen .....                                | 189        |
| 6.5      | Wirkungsgrade .....                                         | 193        |
| 6.5.1    | Vergleichsprozesse .....                                    | 194        |
| 6.5.2    | Der innere Wirkungsgrad .....                               | 194        |
| 6.5.3    | Der mechanische Wirkungsgrad .....                          | 196        |
| 6.5.4    | Der Gesamtwirkungsgrad .....                                | 196        |
| 6.5.5    | Der isentrope Wirkungsgrad .....                            | 196        |
| 6.5.6    | Der isotherme Wirkungsgrad .....                            | 197        |
| 6.5.7    | Der polytrope Wirkungsgrad .....                            | 197        |
| <b>7</b> | <b>Kreisprozesse .....</b>                                  | <b>203</b> |
| 7.1      | Kreisprozessarbeit, Wärmezufuhr und Wärmeabgabe .....       | 207        |
| 7.2      | Rechts- und linkslaufende Kreisprozesse .....               | 209        |
| 7.3      | Die Theorie der rechtslaufenden Kreisprozesse .....         | 210        |
| 7.3.1    | Umwandlung von thermischer in mechanische Energie .....     | 211        |

|         |                                                                                                                           |     |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3.2   | Der thermische Wirkungsgrad .....                                                                                         | 212 |
| 7.3.3   | Der rechtslaufende <i>Carnot</i> -Prozess .....                                                                           | 213 |
| 7.3.4   | Die Auswirkung irreversibler Vorgänge .....                                                                               | 214 |
| 7.3.5   | Der <i>Carnot</i> -Faktor .....                                                                                           | 216 |
| 7.4     | Technisch genutzte rechtslaufende Kreisprozesse .....                                                                     | 218 |
| 7.4.1   | <i>Seiliger</i> -Prozess, <i>Otto</i> -Prozess, <i>Diesel</i> -Prozess, verallgemeinerter<br><i>Diesel</i> -Prozess ..... | 219 |
| 7.4.2   | <i>Joule</i> -Prozess .....                                                                                               | 223 |
| 7.4.3   | <i>Ericsson</i> -Prozess .....                                                                                            | 226 |
| 7.4.4   | <i>Stirling</i> -Prozess .....                                                                                            | 228 |
| 7.4.5   | Einfach-polytropischer <i>Carnot</i> -Prozess .....                                                                       | 230 |
| 7.4.6   | Gasexpansions-Prozess .....                                                                                               | 231 |
| 7.4.7   | <i>Clausius-Rankine</i> -Prozess .....                                                                                    | 232 |
| 7.5     | Vergleichende Bewertung von rechtslaufenden Kreisprozessen .....                                                          | 235 |
| 7.5.1   | Prozessgrößen und Kreisprozesse .....                                                                                     | 236 |
| 7.5.2   | Mechanische Anstrengungsverhältnisse und thermische<br>Anstrengungsverhältnisse .....                                     | 237 |
| 7.5.3   | Bewertungskriterien für wichtige thermodynamische Kreisprozesse ..                                                        | 241 |
| 7.5.3.1 | Allgemeine thermodynamische Beziehungen .....                                                                             | 241 |
| 7.5.3.2 | Beispiele .....                                                                                                           | 243 |
| 7.5.3.3 | Graphische Darstellung der thermodynamischen Beziehungen ..                                                               | 257 |
| 7.5.3.4 | Kreisprozessberechnungen für reale Fluide .....                                                                           | 269 |
| 7.6     | Linkslaufende Kreisprozesse .....                                                                                         | 275 |
| 7.6.1   | Leistungszahl .....                                                                                                       | 276 |
| 7.6.2   | Der linkslaufende <i>Carnot</i> -Prozess .....                                                                            | 277 |
| 7.6.3   | Der linkslaufende <i>Joule</i> -Prozess .....                                                                             | 278 |
| 7.6.4   | Der Gasexpansions-Prozess als Kälteprozess .....                                                                          | 279 |
| 7.6.5   | Der Kompressions-Kaltdampfprozess .....                                                                                   | 283 |
| 8       | <b>Exergie</b> .....                                                                                                      | 291 |
| 8.1     | Energie und Exergie .....                                                                                                 | 291 |
| 8.1.1   | Die Exergie der Wärme .....                                                                                               | 293 |
| 8.1.2   | Die Exergie der gebundenen Energie .....                                                                                  | 295 |
| 8.1.3   | Die Exergie der Temperaturänderungswärme .....                                                                            | 296 |
| 8.1.4   | Die Exergie der Volumenänderungsarbeit .....                                                                              | 298 |
| 8.1.5   | Die Exergie der Verschiebearbeit .....                                                                                    | 299 |
| 8.1.6   | Die Exergie der Druckänderungsarbeit .....                                                                                | 300 |
| 8.1.7   | Die Exergie der inneren Energie .....                                                                                     | 301 |
| 8.1.8   | Die Exergie der Enthalpie .....                                                                                           | 305 |
| 8.1.9   | Die Exergie der freien Energie .....                                                                                      | 309 |
| 8.1.10  | Die Exergie der freien Enthalpie .....                                                                                    | 309 |
| 8.1.11  | Unterschied zwischen <i>EU</i> und <i>EF</i> .....                                                                        | 312 |
| 8.1.12  | Unterschied zwischen <i>EH</i> und <i>EG</i> .....                                                                        | 313 |
| 8.1.13  | Freie Energie und freie Enthalpie als thermodynamische Potentiale ..                                                      | 313 |
| 8.2     | Exergie und Anergie .....                                                                                                 | 316 |
| 8.2.1   | Die Anergie im $p, V$ -Diagramm und im $T, S$ -Diagramm .....                                                             | 318 |
| 8.2.2   | Anergiefreie Energien .....                                                                                               | 321 |
| 8.3     | Exergieverlust .....                                                                                                      | 321 |

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.3.1 Irreversibilität und Exergieverlust .....                        | 321        |
| 8.3.2 Exergieverlust und Anergiegewinn .....                           | 325        |
| 8.3.3 Exergetische Wirkungsgrade .....                                 | 328        |
| <b>9 Wärmeübertragung .....</b>                                        | <b>333</b> |
| 9.1 Wärmestrahlung .....                                               | 333        |
| 9.1.1 <i>Stefan-Boltzmannsches</i> Gesetz .....                        | 333        |
| 9.1.2 <i>Kirchhoffsches</i> Gesetz .....                               | 333        |
| 9.1.3 <i>Plancksches</i> Strahlungsgesetz .....                        | 334        |
| 9.1.4 <i>Wiensches</i> Verschiebungsgesetz .....                       | 335        |
| 9.1.5 <i>Lambertsches</i> Kosinusgesetz .....                          | 336        |
| 9.1.6 Einstrahlzahl .....                                              | 336        |
| 9.2 Strahlungsaustausch .....                                          | 341        |
| 9.2.1 Hohlraummethode .....                                            | 342        |
| 9.2.2 Umhüllung einer Fläche durch eine andere .....                   | 343        |
| 9.2.3 Zwei große parallele Flächen .....                               | 344        |
| 9.2.4 Matrizendarstellung .....                                        | 344        |
| 9.3 Stationäre eindimensionale Wärmeleitung .....                      | 347        |
| 9.3.1 Ebene Wand .....                                                 | 347        |
| 9.3.2 Rohrwand .....                                                   | 348        |
| 9.4 Instationäre eindimensionale Wärmeleitung .....                    | 349        |
| 9.4.1 Ebene einschichtige Wand .....                                   | 350        |
| 9.4.2 Halbunendlicher Körper .....                                     | 352        |
| 9.4.3 Kontakttemperatur .....                                          | 353        |
| 9.5 Konvektion .....                                                   | 354        |
| 9.5.1 Wärmeübergangskoeffizient .....                                  | 355        |
| 9.5.2 Ähnlichkeitstheorie .....                                        | 356        |
| 9.5.3 <i>Reynolds</i> -Analogie .....                                  | 359        |
| 9.5.4 <i>Prandtl</i> -Analogie .....                                   | 360        |
| 9.5.5 Potenzansätze für die laminare und die turbulente Strömung ..... | 363        |
| 9.5.6 Ansätze für Phasenübergänge .....                                | 369        |
| 9.6 Wärmedurchgang .....                                               | 372        |
| 9.6.1 Wärmedurchgangskoeffizient .....                                 | 373        |
| 9.6.2 Rippenwirkungsgrad und Flächenwirkungsgrad .....                 | 374        |
| 9.6.3 Mittlere Temperaturdifferenz .....                               | 375        |
| 9.6.4 Betriebscharakteristik .....                                     | 375        |
| 9.7 Berippte Wärmeübertragungsflächen .....                            | 376        |
| 9.7.1 Gerade Rippe mit Rechteckquerschnitt .....                       | 377        |
| 9.7.2 Kreisförmige Rippe mit Rechteckquerschnitt .....                 | 377        |
| 9.8 Trennwandwärmeübertrager .....                                     | 379        |
| 9.8.1 Gleichstrom .....                                                | 379        |
| 9.8.2 Gegenstrom .....                                                 | 380        |
| 9.8.3 Kreuzstrom .....                                                 | 382        |
| 9.8.4 Wärmeübertragung mit Phasenübergang .....                        | 386        |
| 9.9 Auswertung und Auslegung .....                                     | 387        |
| 9.9.1 Korrekturfaktor für Kreuzstrom .....                             | 388        |
| 9.9.2 Darstellung der Betriebscharakteristik .....                     | 390        |
| 9.9.3 Wärmelängsleitung in der ebenen Trennwand .....                  | 392        |

|                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.9.4 Auslegungsdiagramm .....                                                                     | 401        |
| <b>10 Feuchte Luft .....</b>                                                                       | <b>407</b> |
| 10.1 Zustandseigenschaften feuchter Luft .....                                                     | 407        |
| 10.1.1 Relative Feuchte .....                                                                      | 407        |
| 10.1.2 Feuchtegrad und Sättigungsgrad .....                                                        | 407        |
| 10.1.3 Spezifische Enthalpie .....                                                                 | 409        |
| 10.1.4 Spezifisches Volumen und Dichte .....                                                       | 410        |
| 10.2 Zustandsänderungen feuchter Luft .....                                                        | 410        |
| 10.2.1 Temperaturänderung .....                                                                    | 411        |
| 10.2.2 Befeuchtung und Entfeuchtung .....                                                          | 411        |
| 10.2.3 Mischung zweier Feuchtluftmengen .....                                                      | 412        |
| 10.3 Das $h,x$ -Diagramm von <i>Mollier</i> .....                                                  | 413        |
| 10.3.1 Temperaturänderung .....                                                                    | 415        |
| 10.3.2 Befeuchtung und Entfeuchtung .....                                                          | 416        |
| 10.3.3 Mischung zweier Feuchtluftmengen .....                                                      | 416        |
| 10.4 Verdunstungsmodell .....                                                                      | 416        |
| 10.4.1 Verdunstungskoeffizient .....                                                               | 416        |
| 10.4.2 Energiebilanzen .....                                                                       | 417        |
| 10.4.3 <i>Lewissche</i> Beziehung .....                                                            | 418        |
| 10.5 Kühlgrenze .....                                                                              | 419        |
| 10.6 Verdunstung und Tauniederschlag .....                                                         | 421        |
| 10.7 Wasserdampfdiffusion durch Wände .....                                                        | 422        |
| <b>11 Verbrennung .....</b>                                                                        | <b>429</b> |
| 11.1 Brennstoffe .....                                                                             | 429        |
| 11.1.1 Gasförmige Brennstoffe .....                                                                | 430        |
| 11.1.2 Feste und flüssige Brennstoffe .....                                                        | 434        |
| 11.1.3 Zusammensetzung des Verbrennungsgases, Verbrennungsdreiecke,<br>Verbrennungskontrolle ..... | 437        |
| 11.2 Technische Gesichtspunkte der Verbrennung .....                                               | 445        |
| 11.2.1 Einleitung und Ablauf der Verbrennung .....                                                 | 445        |
| 11.2.2 Vollkommene und unvollkommene Verbrennung .....                                             | 445        |
| 11.2.3 Taupunkt der Verbrennungsgase .....                                                         | 440        |
| 11.2.4 Schornsteinzug .....                                                                        | 448        |
| 11.3 Brennwert und Heizwert .....                                                                  | 449        |
| 11.4 Theoretische Verbrennungstemperatur .....                                                     | 451        |
| <b>Anhang .....</b>                                                                                | <b>461</b> |