

# Inhalt

|                                                          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| <b>Vorwort</b> .....                                     | <b>V</b>   |
| <b>Formelzeichen und Einheiten</b> .....                 | <b>XIX</b> |
| <b>1 Einleitung</b> .....                                | <b>1</b>   |
| 1.1 Allgemeine Betrachtungen zur Energieumwandlung ..... | 1          |
| 1.2 Energieumwandlung in der Technik .....               | 3          |
| <b>2 Theoretische Grundlagen</b> .....                   | <b>7</b>   |
| 2.1 Allgemeine physikalische Größen .....                | 7          |
| 2.2 Hydromechanik .....                                  | 10         |
| 2.2.1 Hydrostatik .....                                  | 10         |
| 2.2.2 Kontinuitätsgleichung .....                        | 11         |
| 2.2.3 Bernoullische Gleichung .....                      | 13         |
| 2.2.3.1 Düse und Diffusor .....                          | 14         |
| 2.2.3.2 Messung von Strömungsgeschwindigkeiten .....     | 16         |
| 2.2.4 Strömung in Rohrleitungen .....                    | 17         |
| 2.2.5 Druckenergieverlust in Rohrleitungen .....         | 19         |
| 2.2.6 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen .....        | 21         |
| 2.2.7 Kavitation und Verdichtungsstoß .....              | 23         |
| 2.3 Wärmetechnik .....                                   | 25         |
| 2.3.1 Thermische Zustandsgrößen .....                    | 25         |
| 2.3.2 Erster Hauptsatz .....                             | 27         |
| 2.3.3 Spezifische Wärmekapazität .....                   | 30         |
| 2.3.4 Enthalpie .....                                    | 32         |
| 2.3.5 Zustandsgleichungen des idealen Gases .....        | 36         |

|          |                                                                   |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.5.1  | Thermische Zustandsgleichung .....                                | 36 |
| 2.3.5.2  | Kalorische Zustandsgleichung .....                                | 38 |
| 2.3.6    | Zweiter Hauptsatz .....                                           | 40 |
| 2.3.6.1  | Entropie .....                                                    | 40 |
| 2.3.6.2  | Darstellung der Entropie durch thermische<br>Zustandsgrößen ..... | 41 |
| 2.3.6.3  | Formulierungen des zweiten Hauptsatzes .....                      | 42 |
| 2.3.6.4  | Exergie .....                                                     | 42 |
| 2.3.6.5  | $T,s$ - oder Wärmediagramm .....                                  | 43 |
| 2.3.7    | Technisch wichtige Zustandsänderungen .....                       | 45 |
| 2.3.8    | Gasgemische .....                                                 | 49 |
| 2.3.9    | Normalatmosphäre (Aerostatik) .....                               | 50 |
| 2.3.10   | Feuchte Gase .....                                                | 50 |
| 2.3.11   | Strömung mit großen Druckänderungen .....                         | 51 |
| 2.3.11.1 | Dynamische Temperatur .....                                       | 51 |
| 2.3.11.2 | Totalzustand (Gesamtzustand, Ruhezustand) .....                   | 51 |
| 2.3.12   | Kreisprozesse .....                                               | 52 |
| 2.3.13   | Laval-Düse .....                                                  | 53 |
| 2.3.14   | Zustandsänderungen des Wasserdampfes .....                        | 60 |
| 2.3.15   | Arbeitsvermögen des Wasserdampfes .....                           | 63 |
| 2.3.15.1 | Nutzarbeit im $T,s$ -Diagramm .....                               | 63 |
| 2.3.15.2 | Nutzarbeit im $h,s$ -Diagramm .....                               | 64 |
| 2.3.15.3 | Nutzarbeit im $p,v$ -Diagramm .....                               | 65 |
| 2.3.16   | Brennstoffe und Verbrennung .....                                 | 67 |
| 2.3.16.1 | $h,T$ -Diagramm .....                                             | 72 |
| 2.3.17   | Wärmedurchgang .....                                              | 74 |
| 2.3.17.1 | Wärmeübergang durch Berührung .....                               | 75 |
| 2.3.17.2 | Wärmeübergang durch Strahlung .....                               | 78 |
| 2.4      | Wirkungsgrade der Maschinen .....                                 | 78 |
| 2.5      | Vergleich von Kolben- und Strömungsmaschinen .....                | 81 |
| 2.6      | Regelung .....                                                    | 81 |

|          |                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3</b> | <b>Kolbenmaschinen</b>                                  | <b>93</b> |
| 3.1      | Ventilsteuerung                                         | 93        |
| 3.2      | Kurbeltrieb                                             | 93        |
| 3.2.1    | Kräfte am Kurbeltrieb                                   | 94        |
| 3.2.2    | Tangentialkraftdiagramm                                 | 96        |
| 3.2.2.1  | Ableitung der Bewegungsverhältnisse<br>beim Kurbeltrieb | 97        |
| 3.2.2.2  | Gesamt tangentialkraft                                  | 99        |
| 3.2.3    | Schwungradberechnung                                    | 102       |
| 3.2.4    | Massenausgleich                                         | 105       |
| 3.2.5    | Kräfteausgleich bei der Mehrzylindermaschine            | 108       |
| 3.2.6    | Momentenausgleich bei Mehrzylindermaschinen             | 109       |
| 3.3      | Kolbenpumpen (Verdrängerpumpen)                         | 112       |
| 3.3.1    | Kolbenpumpen mit hin- und hergehendem Kolben            | 113       |
| 3.3.1.1  | Wirkungsweise                                           | 113       |
| 3.3.1.2  | Fördervolumen                                           | 114       |
| 3.3.1.3  | Saughub                                                 | 117       |
| 3.3.1.4  | Druckhub                                                | 120       |
| 3.3.1.5  | Pumpenventile                                           | 120       |
| 3.3.1.6  | Wirkungsgrade                                           | 122       |
| 3.3.1.7  | Sonderformen                                            | 122       |
| 3.3.2    | Drehkolbenpumpen                                        | 123       |
| 3.3.3    | Flüssigkeitsringpumpen                                  | 125       |
| 3.4      | Verdrängungsverdichter                                  | 126       |
| 3.4.1    | Kolbenverdichter                                        | 127       |
| 3.4.1.1  | Thermodynamik der Kolbenverdichter                      | 127       |
| 3.4.1.2  | Schädlicher Raum                                        | 129       |
| 3.4.1.3  | Wirkliche Verdichtung                                   | 133       |
| 3.4.1.4  | Volumetrischer Wirkungsgrad                             | 133       |
| 3.4.1.5  | Indizierter Wirkungsgrad; indizierte Leistung           | 135       |
| 3.4.1.6  | Mechanischer Wirkungsgrad; Antriebsleistung             | 136       |
| 3.4.1.7  | Mehrstufige Kolbenverdichter                            | 137       |
| 3.4.1.8  | Regelung                                                | 139       |

|         |                                                     |     |
|---------|-----------------------------------------------------|-----|
| 3.4.2   | Rotationsverdichter .....                           | 141 |
| 3.4.2.1 | Roots-Gebläse .....                                 | 141 |
| 3.4.2.2 | Drehkolbenverdichter .....                          | 144 |
| 3.4.2.3 | Flüssigkeitsringpumpen als Verdichter .....         | 146 |
| 3.5     | Kolbenmotoren .....                                 | 147 |
| 3.5.1   | Arbeitsverfahren .....                              | 147 |
| 3.5.2   | Aufbau der Kolbenmotoren .....                      | 148 |
| 3.5.3   | Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade .....           | 149 |
| 3.5.4   | Ottomotor (Viertakt) .....                          | 152 |
| 3.5.4.1 | Gemischbildung .....                                | 156 |
| 3.5.4.2 | Zündung .....                                       | 163 |
| 3.5.4.3 | Abgasbehandlung .....                               | 165 |
| 3.5.5   | Dieselmotor (Viertakt) .....                        | 167 |
| 3.5.5.1 | Vergleich Ottomotor - Dieselmotor .....             | 168 |
| 3.5.5.2 | Einspritzung und Gemischbildung .....               | 170 |
| 3.5.6   | Steuerung des Gaswechsels bei Viertaktmotoren ..... | 185 |
| 3.5.7   | Zweitaktverfahren .....                             | 187 |
| 3.5.7.1 | Nachladung beim Zweitaktverfahren .....             | 190 |
| 3.5.8   | Gegenüberstellung von Zweitakt und Viertakt .....   | 191 |
| 3.5.8.1 | Wärmebelastung und Kühlung .....                    | 192 |
| 3.5.8.2 | Mechanische Belastung und Schmierung .....          | 192 |
| 3.5.9   | Kreiskolbenmotor (Wankelmotor) .....                | 194 |
| 3.5.10  | Freikolbenmotoren .....                             | 196 |
| 3.5.11  | Aufladung .....                                     | 197 |
| 3.5.12  | Stirlingmotor .....                                 | 203 |
| 3.5.13  | Kraftstoffe .....                                   | 206 |
| 3.5.14  | Kühlung .....                                       | 209 |
| 3.5.15  | Mehrzylinder-Anordnungen .....                      | 210 |
| 3.5.16  | Ausführungsbeispiele von Kolbenmotoren .....        | 213 |
| 3.5.17  | Betriebsverhalten der Motoren .....                 | 221 |
| 3.5.18  | Alternative Antriebe .....                          | 224 |

|          |                                                     |            |
|----------|-----------------------------------------------------|------------|
| <b>4</b> | <b>Strömungsmaschinen</b>                           | <b>225</b> |
| 4.1      | Arbeitsverfahren der Strömungsmaschinen             | 225        |
| 4.2      | Geschwindigkeitsplan                                | 227        |
| 4.2.1    | Geschwindigkeiten am radialen Laufrad               | 228        |
| 4.2.2    | Geschwindigkeiten am axialen Laufrad                | 231        |
| 4.3      | Hauptgleichung der Strömungsmaschinen               | 231        |
| 4.4      | Strömungsarbeitsmaschinen                           | 232        |
| 4.4.1    | Gemeinsame Grundlagen der Strömungsarbeitsmaschinen | 232        |
| 4.4.1.1  | Radial durchströmte Maschinen                       | 232        |
| 4.4.1.2  | Axial durchströmte Maschinen                        | 262        |
| 4.4.2    | Festlegung der Schaufelzahl                         | 273        |
| 4.4.3    | Betriebsverhalten der Strömungsarbeitsmaschinen     | 274        |
| 4.4.3.1  | Betriebspunkt                                       | 274        |
| 4.4.3.2  | Kennliniendiagramm                                  | 275        |
| 4.4.3.3  | Drehzahlregelung                                    | 276        |
| 4.4.3.4  | Labiler Zweig der Kennlinie                         | 277        |
| 4.4.3.5  | Parallelförderung von Kreiselpumpen                 | 279        |
| 4.4.3.6  | Pumpen bei Kreiselerdichtern                        | 279        |
| 4.4.3.7  | Betriebsverhalten der Radialverdichter              | 280        |
| 4.4.3.8  | Betriebsverhalten der Axialverdichter               | 281        |
| 4.4.4    | Vergleich von Kolben- und Strömungsmaschinen        | 283        |
| 4.4.5    | Kreiselpumpen                                       | 283        |
| 4.4.5.1  | Leistung und spezifische Förderarbeit               | 283        |
| 4.4.5.2  | Saughöhe und Kavitation                             | 284        |
| 4.4.5.3  | Spezifische Drehzahl und Bauarten                   | 287        |
| 4.4.5.4  | Ausgleich des Achsschubes                           | 288        |
| 4.4.5.5  | Sonderformen der Kreiselpumpe                       | 291        |
| 4.4.6    | Wasserstrahlpumpen (Ejektoren)                      | 295        |
| 4.4.7    | Turboverdichter                                     | 296        |
| 4.4.7.1  | Thermodynamik der Turboverdichter                   | 296        |
| 4.4.7.2  | Radialverdichter                                    | 308        |
| 4.4.7.3  | Axialverdichter                                     | 311        |

|         |                                                  |     |
|---------|--------------------------------------------------|-----|
| 4.4.8   | Propeller .....                                  | 312 |
| 4.4.8.1 | Luftschrauben .....                              | 314 |
| 4.4.8.2 | Schiffsschrauben .....                           | 316 |
| 4.5     | Strömungskraftmaschinen .....                    | 316 |
| 4.5.1   | Energieumwandlung im Leitapparat .....           | 318 |
| 4.5.2   | Energieumwandlung im Laufrad .....               | 319 |
| 4.5.2.1 | Energieumwandlung im radialen Laufrad .....      | 319 |
| 4.5.2.2 | Energieumwandlung im axialen Laufrad .....       | 322 |
| 4.5.3   | Verluste, Wirkungsgrade, Leistungsbegriffe ..... | 323 |
| 4.5.4   | Kenngrößen von Strömungskraftmaschinen .....     | 328 |
| 4.5.5   | Wasserturbinen .....                             | 332 |
| 4.5.5.1 | Francis-Turbine .....                            | 333 |
| 4.5.5.2 | Kaplan-Turbine .....                             | 335 |
| 4.5.5.3 | Laufradformen .....                              | 339 |
| 4.5.5.4 | Saugrohr .....                                   | 341 |
| 4.5.5.5 | Freistrah-(Pelton-)Turbine .....                 | 343 |
| 4.5.5.6 | Wirkungsgrade von Wasserturbinen .....           | 348 |
| 4.5.5.7 | Durchströmturbine .....                          | 349 |
| 4.5.6   | Dampfturbinen .....                              | 349 |
| 4.5.6.1 | Leitapparate .....                               | 351 |
| 4.5.6.2 | Gleichdruckstufe .....                           | 355 |
| 4.5.6.3 | Überdruckstufe .....                             | 355 |
| 4.5.6.4 | Geschwindigkeitsstufung .....                    | 359 |
| 4.5.6.5 | Druckstufung .....                               | 362 |
| 4.5.6.6 | Regelung der Dampfturbinen .....                 | 365 |
| 4.5.6.7 | Mehrstufige Großturbinen .....                   | 369 |
| 4.5.6.8 | Gegendruck- und Entnahmeturbinen .....           | 373 |
| 4.5.7   | Gasturbinen .....                                | 374 |
| 4.5.7.1 | Offene Gasturbinenanlagen .....                  | 375 |
| 4.5.7.2 | Geschlossene Gasturbinenanlagen .....            | 381 |
| 4.5.7.3 | Kombianlagen .....                               | 382 |

|          |                                                |            |
|----------|------------------------------------------------|------------|
| <b>5</b> | <b>Grundlagen der Energiewirtschaft</b>        | <b>383</b> |
| 5.1      | Historischer Rückblick                         | 383        |
| 5.2      | Europäische Verbundnetze                       | 384        |
| 5.3      | Strom- und Wärmebedarf                         | 387        |
| 5.4      | Strommarkt und Strommix                        | 389        |
| 5.5      | Energiewende                                   | 391        |
| 5.5.1    | Ziele der Energiewende für die Stromerzeugung  | 392        |
| 5.5.2    | Erneuerbare-Energie-Anlagen (EEA)              | 393        |
| 5.5.3    | Volatilität der Windkraft und der Photovoltaik | 394        |
| 5.5.4    | Netzstabilität                                 | 396        |
| 5.6      | Eigenschaften der Primärenergieträger          | 398        |
| 5.6.1    | Feste und flüssige Kraftwerksbrennstoffe       | 399        |
| 5.6.2    | Gasförmige Kraftwerksbrennstoffe               | 401        |
| 5.6.3    | Biomasse, Abfall                               | 404        |
| 5.6.4    | Kernbrennstoff                                 | 405        |
| 5.7      | Energiekosten                                  | 407        |
| 5.7.1    | Feste Kosten                                   | 408        |
| 5.7.2    | Veränderliche Kosten                           | 410        |
| 5.7.3    | Stromgestehungskosten                          | 412        |
| <b>6</b> | <b>Wasserkraftwerke</b>                        | <b>415</b> |
| 6.1      | Einsatzbedingungen der Wasserkraftwerke        | 416        |
| 6.2      | Pumpspeicherkraftwerke                         | 418        |
| 6.2.1    | Hauptkomponenten                               | 419        |
| 6.2.2    | Energiebilanz                                  | 420        |
| <b>7</b> | <b>Dampfkraftwerke</b>                         | <b>421</b> |
| 7.1      | Hauptkomponenten                               | 422        |
| 7.1.1    | Dampferzeuger                                  | 423        |
| 7.1.1.1  | Brennstoff, Luft, Rauchgas                     | 423        |
| 7.1.1.2  | Feuerung, Brenner, Kohlemühlen                 | 425        |
| 7.1.1.3  | Technische Dampferzeugung                      | 428        |
| 7.1.1.4  | Verdampfersysteme                              | 431        |
| 7.1.1.5  | Druckteil                                      | 432        |

|           |                                                           |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 7.1.2     | Turbosatz, Wasser-/Dampfkreislauf und Wärmeschaltplan ... | 434        |
| 7.1.3     | Rauchgasreinigung .....                                   | 437        |
| 7.1.3.1   | Rauchgasentstickung .....                                 | 438        |
| 7.1.3.2   | Rauchgasentstaubung .....                                 | 439        |
| 7.1.3.3   | Rauchgasentschwefelung .....                              | 440        |
| 7.1.4     | Speisewasseraufbereitung .....                            | 442        |
| 7.2       | Berechnung der Hauptgrößen .....                          | 443        |
| 7.2.1     | Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung .....              | 447        |
| 7.3       | Regelung in Dampfkraftwerken .....                        | 450        |
| 7.3.1     | Betriebsarten .....                                       | 452        |
| 7.3.2     | Schutzfunktionen .....                                    | 456        |
| <b>8</b>  | <b>Kernkraftwerke .....</b>                               | <b>457</b> |
| 8.1       | Kontrollierte nukleare Kettenreaktion .....               | 458        |
| 8.2       | Hauptkomponenten .....                                    | 459        |
| 8.3       | Reaktortypen .....                                        | 462        |
| 8.3.1     | Druckwasserreaktor .....                                  | 462        |
| 8.3.2     | Siedewasserreaktor .....                                  | 463        |
| 8.4       | Sicherheitskonzept .....                                  | 465        |
| 8.5       | Wärmeschaltplan .....                                     | 465        |
| <b>9</b>  | <b>Kombinierte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke .....</b> | <b>469</b> |
| 9.1       | Hauptkomponenten .....                                    | 470        |
| 9.2       | Wärmeschaltplan .....                                     | 471        |
| 9.3       | Berechnung der Hauptgrößen .....                          | 475        |
| 9.4       | Effizienz und Umweltbilanz .....                          | 476        |
| <b>10</b> | <b>Kraft-Wärmekopplung .....</b>                          | <b>479</b> |
| 10.1      | Begriffe und Kennzahlen .....                             | 480        |
| 10.2      | Wärmeschaltplan .....                                     | 481        |
| 10.3      | Industriekraftwerke .....                                 | 483        |
| 10.4      | Heizkraftwerke, Blockheizkraftwerke (BHKW) .....          | 484        |

|           |                                                          |            |
|-----------|----------------------------------------------------------|------------|
| <b>11</b> | <b>Nutzung der Windenergie .....</b>                     | <b>487</b> |
| 11.1      | Vorbemerkungen .....                                     | 487        |
| 11.2      | Windangebot .....                                        | 488        |
| 11.3      | Aerodynamische Grundlagen .....                          | 490        |
| 11.3.1    | Einführung .....                                         | 490        |
| 11.3.2    | Windenergie und Windleistung .....                       | 491        |
| 11.3.3    | Windturbinenleistung .....                               | 491        |
| 11.3.4    | Axialkraft .....                                         | 493        |
| 11.3.5    | Kennwerte .....                                          | 494        |
| 11.3.6    | Ausführungshinweise .....                                | 495        |
| 11.3.7    | Vereinfachte Propellertheorie .....                      | 496        |
| 11.3.8    | Kennzahlen .....                                         | 499        |
| 11.3.9    | Zusammenfassung der Einflüsse bei Windturbinen .....     | 500        |
| <b>12</b> | <b>Energiespeicherung .....</b>                          | <b>503</b> |
| 12.1      | Fluidspeicherung .....                                   | 504        |
| 12.2      | Stromspeicheranlagen .....                               | 507        |
| 12.2.1    | Anforderungen an Stromspeicher .....                     | 510        |
| 12.2.2    | Wasserstoff als Speichermedium .....                     | 511        |
| 12.2.3    | Wasserstoffgewinnung, Speicherung, Rückverstromung ..... | 512        |
|           | <b>Weiterführendes Schrifttum (Auswahl) .....</b>        | <b>517</b> |
|           | <b>Index .....</b>                                       | <b>519</b> |