

---

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                       |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> . . . . .                                                           | <b>1</b>  |
|          | Richard Zahoransky und Carsten Fichter                                                |           |
|          | Literatur . . . . .                                                                   | <b>8</b>  |
| <b>2</b> | <b>Energietechnische Grundlagen</b> . . . . .                                         | <b>11</b> |
|          | Udo Schelling                                                                         |           |
| 2.1      | Energieformen . . . . .                                                               | 11        |
| 2.2      | Primär- und Sekundärenergien . . . . .                                                | 16        |
| 2.3      | Energieerhaltung . . . . .                                                            | 18        |
| 2.4      | Thermodynamische Kreisprozesse . . . . .                                              | 19        |
| 2.4.1    | Carnot-Prozess . . . . .                                                              | 21        |
| 2.4.2    | Technisch realisierbare Kreisprozesse . . . . .                                       | 23        |
| 2.4.3    | Irreversibilitäten . . . . .                                                          | 24        |
|          | Literatur . . . . .                                                                   | 29        |
| <b>3</b> | <b>Überblick, Energiequellen, Energiebedarfe und Abwärmen</b> . . . . .               | <b>31</b> |
|          | Richard Zahoransky, Carsten Fichter, Frank Allmendinger und Klaus Rüd                 |           |
| 3.1      | Energiequellen . . . . .                                                              | 31        |
| 3.1.1    | Fossile Energieträger: Stein- und Braunkohle, Erdöl, Erdgas .                         | 32        |
| 3.1.2    | Kernbrennstoffe . . . . .                                                             | 34        |
| 3.1.3    | Daten, Förderung, Verbrauch und Reserven fossiler<br>Energieträger und Uran . . . . . | 35        |
| 3.1.4    | Synthetischer Wasserstoff . . . . .                                                   | 38        |
| 3.1.5    | Erneuerbare Energiequellen . . . . .                                                  | 39        |
| 3.2      | Weltweiter Primärenergiebedarf . . . . .                                              | 45        |
| 3.3      | Bereitstellung elektrischer Energie . . . . .                                         | 46        |
| 3.4      | Bereitstellung Nutz- und Prozesswärme . . . . .                                       | 52        |
| 3.5      | Entwicklungen in der Energietechnik . . . . .                                         | 53        |
| 3.5.1    | Erneuerbare Energien . . . . .                                                        | 53        |
| 3.5.2    | Synthetischer Wasserstoff . . . . .                                                   | 54        |
| 3.5.3    | Kernkraftwerke . . . . .                                                              | 58        |

|          |                                                                                               |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.5.4    | Mit fossilen Brennstoffen betriebene Kraftwerke . . . . .                                     | 59         |
| 3.5.5    | Brennstoffzellen . . . . .                                                                    | 59         |
| 3.5.6    | Energieverteilung durch intelligente Netze (Smart Grids)<br>und Energiespeicher . . . . .     | 60         |
| 3.6      | Entwicklung der Energiemärkte und Energiewende . . . . .                                      | 61         |
| 3.7      | Sektorkopplung . . . . .                                                                      | 61         |
| 3.8      | Sektorkopplung: Transformationsphase und Zukunft – Power to X . .                             | 62         |
| 3.9      | Energiedaten . . . . .                                                                        | 65         |
| 3.10     | Globale Energiebilanzen und anthropogen verursachte<br>Abwärmemengen . . . . .                | 65         |
| 3.10.1   | Hintergrund und Problemstellung . . . . .                                                     | 65         |
| 3.10.2   | Analyse . . . . .                                                                             | 65         |
| 3.10.3   | Anthropogene Abwärme . . . . .                                                                | 67         |
| 3.10.4   | Der relative Einfluss der Abwärme . . . . .                                                   | 70         |
| 3.10.5   | Diskussion . . . . .                                                                          | 70         |
|          | Literatur . . . . .                                                                           | 72         |
| <b>4</b> | <b>Globaler Klimawandel und die Energiewende . . . . .</b>                                    | <b>77</b>  |
|          | Mario Hoppema, Carsten Fichter und Richard Zahoransky                                         |            |
| 4.1      | Globaler Klimawandel und Treibhausgase . . . . .                                              | 77         |
| 4.2      | Atmosphärisches Kohlendioxid und der Kohlenstoffkreislauf . . . . .                           | 84         |
| 4.3      | Ursache des Klimawandels . . . . .                                                            | 87         |
| 4.4      | Kyoto-Protokoll und Reduktion von Treibhausgasen . . . . .                                    | 94         |
| 4.5      | Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgase . . . . .                                           | 98         |
| 4.5.1    | Emissionshandel . . . . .                                                                     | 99         |
| 4.5.2    | Joint Implementation . . . . .                                                                | 100        |
| 4.5.3    | Clean Development Mechanism (CDM) . . . . .                                                   | 101        |
| 4.5.4    | Diskussion Kyoto-Protokoll . . . . .                                                          | 102        |
| 4.6      | Negative CO <sub>2</sub> -Emissionen und CO <sub>2</sub> -Abscheidetechniken . . . . .        | 102        |
| 4.7      | Energiewende und Transformation der Gesellschaft . . . . .                                    | 106        |
| 4.7.1    | Energiewende im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor . . . . .                                   | 110        |
|          | Literatur . . . . .                                                                           | 112        |
| <b>5</b> | <b>Dampfbetriebene Prozesse für konventionelle und regenerative<br/>Anwendungen . . . . .</b> | <b>117</b> |
|          | Richard Zahoransky                                                                            |            |
| 5.1      | Thermodynamische Grundlagen von konventionellen<br>Dampfkraftwerken . . . . .                 | 118        |
| 5.1.1    | Clausius-Rankine-Vergleichsprozess (idealer Prozess) . . . . .                                | 118        |
| 5.1.2    | Überhitzung des Frischdampfes . . . . .                                                       | 120        |
| 5.1.3    | Zwischenüberhitzung . . . . .                                                                 | 121        |
| 5.1.4    | Regenerative Speisewasser-Vorwärmung . . . . .                                                | 122        |

|          |                                                              |     |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.5    | Realer Prozess mit auftretenden Verlusten . . . . .          | 125 |
| 5.1.6    | Exergetische Betrachtung . . . . .                           | 127 |
| 5.1.7    | Wärmeauskopplung . . . . .                                   | 127 |
| 5.1.8    | Regelung von Dampfkraftwerken . . . . .                      | 128 |
| 5.2      | Organic Rankine Cycle ORC . . . . .                          | 129 |
| 5.3      | KALINA Prozess . . . . .                                     | 131 |
| 5.4      | Prozessführung bei Kernkraftwerken . . . . .                 | 134 |
| 5.5      | Aufbau von konventionellen Dampfkraftwerken DKW . . . . .    | 134 |
| 5.6      | Wasserqualitäten in Dampfkraftwerken . . . . .               | 137 |
| 5.6.1    | Arbeitsfluid (Speisewasser) . . . . .                        | 138 |
| 5.6.2    | Rückkühlwasser . . . . .                                     | 139 |
| 5.6.3    | Kühlwasser . . . . .                                         | 140 |
| 5.6.4    | Heizwasser . . . . .                                         | 140 |
| 5.6.5    | Wasseraufbereitung . . . . .                                 | 140 |
| 5.7      | Dampferzeuger . . . . .                                      | 143 |
| 5.7.1    | Allgemeine Zusammenhänge . . . . .                           | 143 |
| 5.7.2    | Feuerung . . . . .                                           | 146 |
| 5.7.3    | Strömungsformen . . . . .                                    | 147 |
| 5.7.4    | Siedekrise 1. Art . . . . .                                  | 148 |
| 5.7.5    | Großwasserraumkessel GWRK . . . . .                          | 149 |
| 5.7.6    | Naturumlauf-Dampferzeuger . . . . .                          | 150 |
| 5.7.7    | Zwangsumlauf-Dampferzeuger . . . . .                         | 153 |
| 5.7.8    | Zwangsdurchlauf-Dampferzeuger . . . . .                      | 154 |
| 5.8      | Regenerative Speisewasservorwärmung/Vorwärmstrecke . . . . . | 157 |
| 5.8.1    | Niederdruckvorwärmer . . . . .                               | 157 |
| 5.8.2    | Mischvorwärmer (Speisewasserbehälter) . . . . .              | 158 |
| 5.8.3    | Hochdruckvorwärmer . . . . .                                 | 158 |
| 5.9      | Emissionen und Rauchgasreinigung . . . . .                   | 160 |
| 5.9.1    | Emissionen und deren gesetzliche Vorschriften . . . . .      | 160 |
| 5.9.2    | Entstickung (DeNO <sub>x</sub> Anlage) . . . . .             | 162 |
| 5.9.3    | Entstaubung . . . . .                                        | 163 |
| 5.9.4    | Rauchgasentschwefelungsanlage REA . . . . .                  | 165 |
| 5.9.5    | CO <sub>2</sub> -Abtrennung und Sequestrierung . . . . .     | 166 |
| 5.10     | Kühlsystem . . . . .                                         | 169 |
| 5.10.1   | Kondensator . . . . .                                        | 169 |
| 5.10.2   | Kühltürme . . . . .                                          | 169 |
| 5.10.2.1 | Nasskühlturm (Naturzug-Kühlturm) . . . . .                   | 170 |
| 5.10.2.2 | Trockenkühlturm . . . . .                                    | 170 |
| 5.10.2.3 | Hybridkühlturm . . . . .                                     | 171 |
| 5.11     | Turbinen . . . . .                                           | 171 |
| 5.12     | Pumpen . . . . .                                             | 172 |
| 5.13     | Generatoren, Frequenzhaltung . . . . .                       | 173 |

|          |                                                                                                                    |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.14     | Weitere funktionelle Systeme . . . . .                                                                             | 174        |
| 5.15     | Leittechnik in Kraftwerken . . . . .                                                                               | 174        |
| 5.16     | Entwicklungen . . . . .                                                                                            | 176        |
|          | Literatur . . . . .                                                                                                | 183        |
| <b>6</b> | <b>Solartechnik . . . . .</b>                                                                                      | <b>185</b> |
|          | Elmar Bollin und Daniel Kray                                                                                       |            |
| 6.1      | Überblick . . . . .                                                                                                | 185        |
| 6.2      | Solare Strahlung . . . . .                                                                                         | 186        |
| 6.2.1    | Grundlagen . . . . .                                                                                               | 186        |
| 6.2.2    | Das Strahlungsangebot auf die Erde . . . . .                                                                       | 187        |
| 6.2.3    | Wichtige Begriffe und Größen im Umgang<br>mit Solarstrahlung . . . . .                                             | 190        |
| 6.2.4    | Messgeräte zur Erfassung der Globalstrahlung . . . . .                                                             | 191        |
| 6.3      | Solarthermische Energienutzung . . . . .                                                                           | 193        |
| 6.3.1    | Übersicht . . . . .                                                                                                | 193        |
| 6.3.2    | Sonnenkollektoren . . . . .                                                                                        | 194        |
| 6.3.3    | Charakterisierung von Kollektoren oder die Bestimmung<br>der Nutzleistungen und des Wirkungsgrades von Kollektoren | 196        |
| 6.3.4    | Kollektortestverfahren . . . . .                                                                                   | 198        |
| 6.3.5    | Bauarten von Sonnenkollektoren . . . . .                                                                           | 199        |
| 6.3.6    | Solarthermische Systeme . . . . .                                                                                  | 200        |
| 6.3.7    | Solarthermische Großanlagen zur Trinkwarmwasserbereitung                                                           | 201        |
| 6.3.8    | Spezifische Kennwerte von solarthermischen Anlagen<br>zur Trinkwarmwasserbereitung . . . . .                       | 202        |
| 6.3.9    | Beispiel einer solarthermischen Großanlage<br>zur Trinkwasserbereitung . . . . .                                   | 205        |
| 6.4      | Photovoltaik . . . . .                                                                                             | 207        |
| 6.4.1    | Einführung . . . . .                                                                                               | 207        |
| 6.4.2    | Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle . . . . .                                                               | 210        |
| 6.4.3    | Solarzellentechnologie . . . . .                                                                                   | 211        |
| 6.4.4    | Leistungsfähigkeit von Solarzellen . . . . .                                                                       | 212        |
| 6.4.5    | Verschalten von Solarzellen . . . . .                                                                              | 216        |
| 6.4.6    | Photovoltaische Systeme . . . . .                                                                                  | 217        |
| 6.4.7    | Netzparallele PV-Anlagen . . . . .                                                                                 | 219        |
| 6.4.8    | Evaluation von PV-Systemen . . . . .                                                                               | 222        |
| 6.5      | Solarthermische Kraftwerke . . . . .                                                                               | 223        |
| 6.5.1    | Zur Einführung . . . . .                                                                                           | 223        |
| 6.5.2    | Solarturmkraftwerke . . . . .                                                                                      | 224        |
| 6.5.3    | Parabolrinnenkraftwerke . . . . .                                                                                  | 225        |
| 6.5.4    | Fresnel-Kollektoren . . . . .                                                                                      | 226        |
| 6.5.5    | Dish-Stirling-Systeme . . . . .                                                                                    | 227        |

|   |       |                                                                          |     |
|---|-------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
|   | 6.5.6 | Aufwindkraftwerke . . . . .                                              | 229 |
|   | 6.5.7 | Zusammenfassung zu solarthermischen Kraftwerken . . . . .                | 229 |
|   |       | Literatur . . . . .                                                      | 230 |
| 7 |       | <b>Windenergie</b> . . . . .                                             | 231 |
|   |       | Carsten Fichter und Richard Zahoransky                                   |     |
|   | 7.1   | Einleitung Windenergietechnik . . . . .                                  | 231 |
|   | 7.2   | Historie Windenergieanlagentechnik . . . . .                             | 232 |
|   | 7.3   | Meteorologische Grundlagen . . . . .                                     | 235 |
|   | 7.4   | Leistung im Wind – Energieumwandlung . . . . .                           | 246 |
|   | 7.5   | Klassifikation von Windenergieanlagen . . . . .                          | 253 |
|   | 7.5.1 | Strömungsmechanische (Aerodynamische) Wirkungsweise . . . . .            | 254 |
|   |       | 7.5.1.1 Widerstandsläufer . . . . .                                      | 254 |
|   |       | 7.5.1.2 Auftriebsläufer . . . . .                                        | 257 |
|   | 7.5.2 | Bauformen von Windenergieanlagen . . . . .                               | 267 |
|   |       | 7.5.2.1 Vertikalachser (VAWT) . . . . .                                  | 267 |
|   |       | 7.5.2.2 Horizontalachser (HAWT) . . . . .                                | 268 |
|   |       | 7.5.2.3 Komponenten der Horizontalachser . . . . .                       | 269 |
|   |       | 7.5.2.4 Sonderformen von Windenergieanlagen . . . . .                    | 277 |
|   | 7.6   | Leistungskennlinie und Regelung der Windenergieanlagen . . . . .         | 280 |
|   | 7.7   | Netzanbindung von Windenergieanlagen . . . . .                           | 284 |
|   | 7.8   | Lasten an Windenergieanlagen . . . . .                                   | 285 |
|   | 7.9   | Lebenszyklus der Windenergieanlagen . . . . .                            | 286 |
|   |       | 7.9.1 Projektentwicklung . . . . .                                       | 287 |
|   |       | 7.9.2 Vergütung der Stromlieferungen aus Windenergieanlagen . . . . .    | 288 |
|   |       | 7.9.3 Betrieb von Windenergieanlagen und Windparks . . . . .             | 289 |
|   |       | 7.9.4 Repowering, Rückbau, Weiterbetrieb . . . . .                       | 299 |
|   | 7.10  | Onshore vs. Offshore Wind . . . . .                                      | 302 |
|   | 7.11  | CO <sub>2</sub> Bilanz Onshore und Offshore Windenergieanlagen . . . . . | 305 |
|   | 7.12  | Normen und Gesetze . . . . .                                             | 306 |
|   |       | Literatur . . . . .                                                      | 311 |
| 8 |       | <b>Wasserkraftwerke</b> . . . . .                                        | 315 |
|   |       | Carsten Fichter und Richard Zahoransky                                   |     |
|   | 8.1   | Nutzbare Wasserenergie . . . . .                                         | 318 |
|   | 8.2   | Laufwasserkraftwerke . . . . .                                           | 324 |
|   | 8.3   | Turbinen für Wasserkraftwerke . . . . .                                  | 328 |
|   |       | 8.3.1 Kaplan-Turbinen . . . . .                                          | 330 |
|   |       | 8.3.2 Ossberger-Turbinen (Banki-Turbinen) . . . . .                      | 332 |
|   |       | 8.3.3 Francis-Turbinen . . . . .                                         | 332 |
|   |       | 8.3.4 Dériaz-Turbinen . . . . .                                          | 333 |
|   |       | 8.3.5 Pelton-Turbinen . . . . .                                          | 333 |

|           |        |                                                                                    |            |
|-----------|--------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|           | 8.3.6  | Turgo-Turbine . . . . .                                                            | 335        |
|           | 8.3.7  | Schrauben- oder Kegelturbine . . . . .                                             | 336        |
|           | 8.4    | Gezeiten-Kraftwerke . . . . .                                                      | 336        |
|           | 8.5    | Meereswellen-Kraftwerke . . . . .                                                  | 339        |
|           | 8.6    | Meeresströmungs-Kraftwerke . . . . .                                               | 342        |
|           | 8.7    | Ozeanthermische Kraftwerke . . . . .                                               | 342        |
|           |        | Literatur . . . . .                                                                | 347        |
| <b>9</b>  |        | <b>Energetische Verwertung von Biomasse und Müll . . . . .</b>                     | <b>349</b> |
|           |        | Richard Zahoransky                                                                 |            |
|           | 9.1    | Einleitung zur Biomasse . . . . .                                                  | 349        |
|           | 9.2    | Einleitung zum Müll . . . . .                                                      | 351        |
|           | 9.3    | Thermische Verfahren für Biomassen und Müll . . . . .                              | 352        |
|           | 9.3.1  | Pyrolyse bei Biomassen . . . . .                                                   | 353        |
|           | 9.3.2  | Verbrennung . . . . .                                                              | 353        |
|           | 9.3.3  | Thermische Vergasung . . . . .                                                     | 354        |
|           | 9.4    | Bakterielle Vergasung . . . . .                                                    | 356        |
|           | 9.5    | Biomasse-Verflüssigung . . . . .                                                   | 359        |
|           | 9.5.1  | Pflanzenöle . . . . .                                                              | 359        |
|           | 9.5.2  | Pflanzenölester . . . . .                                                          | 360        |
|           | 9.5.3  | Tierische Fette . . . . .                                                          | 360        |
|           | 9.5.4  | Fischer-Tropsch-Verfahren . . . . .                                                | 360        |
|           | 9.5.5  | Direkte Biomasse-Verflüssigung unter Atmosphärendruck<br>mit Katalysator . . . . . | 360        |
|           | 9.5.6  | Direkte Biomasse-Verflüssigung unter Hochdruck . . . . .                           | 361        |
|           | 9.5.7  | Hydro Thermal Upgrading HTU . . . . .                                              | 361        |
|           | 9.5.8  | Bezeichnungen weiterer Verfahren . . . . .                                         | 361        |
|           | 9.6    | Müllkraftwerke . . . . .                                                           | 362        |
|           | 9.6.1  | Müllkraftwerke mit traditionellen Öfen . . . . .                                   | 362        |
|           | 9.6.2  | Pyrolyse bei Müll . . . . .                                                        | 363        |
|           | 9.6.3  | Thermoselect-Verfahren . . . . .                                                   | 364        |
|           | 9.6.4  | Schwel-Brenn-Verfahren . . . . .                                                   | 365        |
|           | 9.7    | Deponiegas-/Klärgas-Kraftwerke . . . . .                                           | 366        |
|           |        | Literatur . . . . .                                                                | 370        |
| <b>10</b> |        | <b>Nutzung geothermischer Energie . . . . .</b>                                    | <b>373</b> |
|           |        | Carsten Fichter und Richard Zahoransky                                             |            |
|           | 10.1   | Potenzial der Geothermie . . . . .                                                 | 374        |
|           | 10.2   | Erschließungskonzepte für geothermische Anlagen . . . . .                          | 377        |
|           | 10.3   | Geothermische Kraftwerkskonzepte . . . . .                                         | 378        |
|           | 10.3.1 | Thermodynamische Grundlagen . . . . .                                              | 378        |
|           | 10.3.2 | Aufbau tiefegeothermischer Kraftwerke . . . . .                                    | 379        |

|           |                                                                                                            |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.3.3    | Primärkreislauf der tiefengeothermischen Kraftwerksanlage .                                                | 381        |
| 10.3.3.1  | Produktions- und Injektionsbohrung . . . . .                                                               | 385        |
| 10.3.3.2  | Komponenten geothermischer Anlagen . . . . .                                                               | 387        |
| 10.3.4    | Sekundärer Kreislauf der tiefengeothermischen Kraftwerksanlage . . . . .                                   | 389        |
| 10.3.5    | Tertiärer Kreislauf der tiefengeothermischen Kraftwerksanlage . . . . .                                    | 389        |
| 10.4      | Direkte Dampfentspannung – Dry Steam . . . . .                                                             | 390        |
| 10.5      | Nassdampf Entspannung – Flash Prinzip . . . . .                                                            | 391        |
| 10.6      | Binäre Kraftwerksprozesse – ORC und KALINA . . . . .                                                       | 392        |
| 10.7      | Hot-Dry-Rock-Verfahren, HDR . . . . .                                                                      | 393        |
| 10.8      | Geokomprimierte nasse Felder . . . . .                                                                     | 394        |
| 10.9      | Kraft-Wärme-Kopplung mit geothermischer Energiequelle – Tertiärkreislauf . . . . .                         | 395        |
| 10.10     | Hybridsysteme . . . . .                                                                                    | 395        |
| 10.11     | Erdwärmesonden – Erdwärmekollektoren – Oberflächennahe Geothermie in Kombination mit Wärmepumpen . . . . . | 396        |
| 10.12     | Thermalquellen . . . . .                                                                                   | 396        |
| 10.13     | Lithium Gewinnung aus geothermalen Fluiden . . . . .                                                       | 397        |
| 10.14     | Umweltaspekte . . . . .                                                                                    | 397        |
| 10.15     | Risiken . . . . .                                                                                          | 398        |
|           | Literatur . . . . .                                                                                        | 400        |
| <b>11</b> | <b>Brennstoffzellen . . . . .</b>                                                                          | <b>403</b> |
|           | Frank Allmendinger, David Degler und Udo Schelling                                                         |            |
| 11.1      | Historie . . . . .                                                                                         | 403        |
| 11.2      | Funktionsprinzip und Klassifizierung . . . . .                                                             | 406        |
| 11.3      | Thermodynamische Grundlagen . . . . .                                                                      | 409        |
| 11.4      | Wirkungsgrad . . . . .                                                                                     | 411        |
| 11.5      | Typisches Betriebsverhalten . . . . .                                                                      | 413        |
| 11.6      | Anwendungsgebiete und Stand der Entwicklung . . . . .                                                      | 415        |
| 11.6.1    | Die Alkalischen Brennstoffzellen, Typ AFC . . . . .                                                        | 417        |
| 11.6.2    | Die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle, Typ PEMFC . . . . .                                          | 419        |
| 11.6.3    | Die phosphorsaure Brennstoffzelle, Typ PAFC . . . . .                                                      | 426        |
| 11.6.4    | Die Schmelzkarbonat Brennstoffzelle, Typ MCFC . . . . .                                                    | 428        |
| 11.6.5    | Die oxidkeramische Brennstoffzelle, Typ SOFC . . . . .                                                     | 431        |
|           | Literatur . . . . .                                                                                        | 439        |

|           |                                                               |     |
|-----------|---------------------------------------------------------------|-----|
| <b>12</b> | <b>Gasturbinen-Kraftwerke</b>                                 | 441 |
|           | Richard Zahoransky                                            |     |
| 12.1      | Thermodynamische Grundlagen                                   | 442 |
| 12.1.1    | Gasturbine mit isochorer Wärmezufuhr                          | 442 |
| 12.1.2    | Gasturbine mit isobarer Wärmezufuhr                           | 445 |
| 12.1.3    | Thermodynamische Varianten                                    | 448 |
| 12.1.3.1  | Zwischenkühlung                                               | 448 |
| 12.1.3.2  | Zwischenerhitzung                                             | 448 |
| 12.1.3.3  | Luftvorwärmung                                                | 449 |
| 12.1.4    | Realer Gasturbinen-Prozess                                    | 451 |
| 12.1.5    | Umwelteinflüsse                                               | 452 |
| 12.2      | Aufbau moderner stationärer Gasturbinen                       | 453 |
| 12.3      | Verdichter                                                    | 455 |
| 12.4      | Turbine in der Gasturbinenanlage                              | 456 |
| 12.5      | Brennkammer                                                   | 457 |
| 12.5.1    | Silobrennkammer                                               | 458 |
| 12.5.2    | Ringbrennkammer                                               | 458 |
| 12.5.3    | Schadstoffminimierung                                         | 458 |
| 12.6      | Sonstige Komponenten                                          | 462 |
| 12.7      | Jet-Gasturbinen, Aeroderivate                                 | 462 |
| 12.8      | Mikro-Gasturbinen                                             | 463 |
| 12.9      | Gasturbine mit getrennter Nutzleistungsturbine                | 464 |
| 12.10     | Gasturbinen mit geschlossenem Kreislauf                       | 465 |
| 12.11     | Gasturbine mit interner Kohleverbrennung                      | 466 |
| 12.11.1   | Gasturbine mit Kohlestaubfeuerung                             | 466 |
| 12.11.2   | Gasturbine mit Kohlevergasung                                 | 467 |
| 12.12     | Gasturbine mit festen Brennstoffen befeuert                   | 467 |
| 12.13     | Allem Cycle                                                   | 468 |
| 12.14     | Betriebsverhalten                                             | 468 |
| 12.15     | Entwicklungen                                                 | 469 |
| 12.16     | Exkurs zu Wasserstoff als Brennstoff für Flugzeug-Gasturbinen | 470 |
|           | Literatur                                                     | 477 |
| <b>13</b> | <b>Stationäre Kolbenmotoren für energetischen Einsatz</b>     | 479 |
|           | Maurice Kettner und Richard Zahoransky                        |     |
| 13.1      | Otto-Motor                                                    | 480 |
| 13.1.1    | Miller-Verfahren                                              | 487 |
| 13.2      | Diesel-Motor                                                  | 488 |
| 13.3      | Stirling-Motor                                                | 493 |
| 13.4      | Einsatz von Motoren in der Kraft-Wärme-Kopplung               | 497 |
| 13.5      | Emissionsminderung                                            | 497 |
| 13.5.1    | Otto-Motor                                                    | 500 |

|           |                                                                          |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 13.5.2    | Diesel-Motor . . . . .                                                   | 501        |
| 13.5.3    | Gasmotoren . . . . .                                                     | 503        |
| 13.6      | Gasmotoren . . . . .                                                     | 508        |
| 13.6.1    | Brenngase . . . . .                                                      | 508        |
| 13.6.2    | Technische Besonderheiten des Gasmotors . . . . .                        | 511        |
| 13.7      | Dual Fuel (Zweistoff-Motor, Zündstrahl-Motor) . . . . .                  | 518        |
| 13.8      | Hybridmotoren . . . . .                                                  | 520        |
| 13.9      | Notstromaggregate . . . . .                                              | 524        |
| 13.10     | Motorregelung für energetische Zwecke . . . . .                          | 526        |
|           | Literatur . . . . .                                                      | 529        |
| <b>14</b> | <b>Kombinationskraftwerke . . . . .</b>                                  | <b>533</b> |
|           | Richard Zahoransky                                                       |            |
| 14.1      | Gas- und Dampfkraftwerke . . . . .                                       | 533        |
| 14.1.1    | Schaltungsmöglichkeiten . . . . .                                        | 535        |
| 14.1.2    | Prinzipielle Zusammenhänge . . . . .                                     | 536        |
| 14.1.3    | Eindruckprozess . . . . .                                                | 539        |
| 14.1.4    | Zwei- und Mehrdruckprozesse . . . . .                                    | 543        |
| 14.1.5    | Einwellenanlagen . . . . .                                               | 545        |
| 14.1.6    | Abhitzeessel . . . . .                                                   | 545        |
| 14.1.7    | Regelung, Betriebsverhalten . . . . .                                    | 548        |
| 14.2      | Gasturbine mit interner Abwärmenutzung (Cheng bzw. STIG Cycle) . . . . . | 550        |
| 14.3      | Kombination von zwei Dampf-Kraftwerken . . . . .                         | 553        |
| 14.4      | Verbrennungsmotor und Dampfkraftwerk . . . . .                           | 553        |
| 14.5      | Kombinationen mit ORC-Kraftwerk . . . . .                                | 554        |
| 14.6      | Entwicklungen . . . . .                                                  | 554        |
|           | Literatur . . . . .                                                      | 558        |
| <b>15</b> | <b>Kernkraftwerke . . . . .</b>                                          | <b>561</b> |
|           | Hans-Josef Allelein                                                      |            |
| 15.1      | Kerntechnische Grundlagen . . . . .                                      | 563        |
| 15.1.1    | „Nutzbare“ Energie bei Kernreaktionen . . . . .                          | 566        |
| 15.1.2    | Thermische und schnelle Neutronen . . . . .                              | 570        |
| 15.1.3    | Moderation der Neutronen . . . . .                                       | 573        |
| 15.1.4    | Kernbrennstoffe . . . . .                                                | 576        |
| 15.1.5    | Radionuklidbildung in Reaktoren . . . . .                                | 578        |
| 15.2      | Prinzipieller Aufbau des Reaktors . . . . .                              | 579        |
| 15.2.1    | Brennelement . . . . .                                                   | 579        |
| 15.2.2    | Leistungsverteilung . . . . .                                            | 583        |
| 15.2.3    | Reaktordruckbehälter . . . . .                                           | 586        |
| 15.3      | Reaktorsicherheit . . . . .                                              | 589        |
| 15.3.1    | Einführung . . . . .                                                     | 589        |

|           |                                                                                                     |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 15.3.2    | Sicherheitskonzept . . . . .                                                                        | 590        |
| 15.3.3    | Fukushima . . . . .                                                                                 | 593        |
| 15.3.4    | Sicherheitsvorkehrungen . . . . .                                                                   | 597        |
| 15.3.5    | Räumliche Trennung . . . . .                                                                        | 599        |
| 15.3.6    | Reaktorsicherheitsforschung . . . . .                                                               | 599        |
| 15.4      | Reaktortypen . . . . .                                                                              | 600        |
| 15.4.1    | Übersicht der Reaktortypen . . . . .                                                                | 600        |
| 15.4.2    | Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor . . . . .                                                      | 601        |
| 15.4.3    | Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor . . . . .                                                      | 607        |
| 15.4.4    | CANDU Reaktor . . . . .                                                                             | 612        |
| 15.4.5    | Schnelle Brüter . . . . .                                                                           | 613        |
| 15.4.6    | Gasgekühlte Reaktoren, Hochtemperaturreaktor . . . . .                                              | 614        |
| 15.4.7    | Kernkraftwerke der 4. Generation . . . . .                                                          | 617        |
| 15.4.8    | Kleine und/oder modulare Reaktorkonzepte . . . . .                                                  | 619        |
| 15.5      | Wiederaufbereitung, Transport und endzulagerndes Material/<br>Entsorgung . . . . .                  | 623        |
| 15.5.1    | Wiederaufbereitung . . . . .                                                                        | 624        |
| 15.5.2    | Transport . . . . .                                                                                 | 625        |
| 15.5.3    | Endzulagerndes Material/Entsorgung . . . . .                                                        | 626        |
| 15.6      | Fusionskonzepte . . . . .                                                                           | 630        |
|           | Literatur . . . . .                                                                                 | 640        |
| <b>16</b> | <b>Blockheiz-Kraftwerke, Kälteanlagen, Wärmepumpen<br/>und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung . . . . .</b> | <b>643</b> |
|           | Richard Zahoransky und Maurice Kettner                                                              |            |
| 16.1      | Wärmeauskopplung bei Dampfkraftwerken . . . . .                                                     | 645        |
| 16.1.1    | Gegendruckbetrieb . . . . .                                                                         | 645        |
| 16.1.2    | Entnahme- und Anzapfbetrieb . . . . .                                                               | 647        |
| 16.2      | Wärmeauskopplung bei Gasturbinen . . . . .                                                          | 650        |
| 16.3      | Wärmeauskopplung bei Kombikraftwerken (GuD) . . . . .                                               | 651        |
| 16.4      | Wärmeauskopplung bei Kolbenmotoren . . . . .                                                        | 653        |
| 16.5      | Wärmeauskopplung bei anderen Prozessen . . . . .                                                    | 655        |
| 16.6      | Betriebsweise und Dimensionierung von BHKW . . . . .                                                | 656        |
| 16.7      | Klimatisierung (Kälteerzeugung) durch Abwärme . . . . .                                             | 661        |
| 16.7.1    | Kompressions-Kältemaschinen . . . . .                                                               | 663        |
| 16.7.2    | Absorptions-Kältemaschinen . . . . .                                                                | 663        |
| 16.7.3    | Adsorptions-Kälteanlagen . . . . .                                                                  | 665        |
| 16.8      | Wärmepumpen . . . . .                                                                               | 668        |
| 16.9      | Kraft-Wärme-Kälte-Verbund . . . . .                                                                 | 672        |
| 16.10     | Druckluft – KWK . . . . .                                                                           | 673        |
| 16.11     | Abgasnutzung für CO <sub>2</sub> -Düngung . . . . .                                                 | 674        |
|           | Literatur . . . . .                                                                                 | 677        |

|           |                                                                                                                               |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>17</b> | <b>Energieverteilung</b>                                                                                                      | 679 |
|           | Harald Schwarz                                                                                                                |     |
| 17.1      | Elektrische Netze                                                                                                             | 680 |
| 17.1.1    | Grundlagen elektrischer Netze                                                                                                 | 680 |
| 17.1.2    | Netzbetrieb vor Liberalisierung des Strommarktes                                                                              | 686 |
| 17.1.3    | Netzbetrieb nach Liberalisierung des Strommarktes                                                                             | 689 |
| 17.1.4    | Netzbetrieb bei hohem Anteil von EEG-Einspeisungen                                                                            | 692 |
| 17.1.5    | Netzbetrieb bei hohem Anteil von Elektromobilität                                                                             | 713 |
| 17.1.6    | Zukünftige Herausforderungen für den Netzbetrieb:<br>Netzausbau auf Basis kontinuierlich fortgeschriebener<br>Szenario-Rahmen | 717 |
| 17.1.7    | Speicherung und steuerbare Lasten: Aktuelle Situation<br>und Ausblick                                                         | 719 |
| 17.1.8    | Ausbildung für Systemführer und Training<br>des Operativpersonals                                                             | 724 |
| 17.1.9    | Der Beitrag von Hybrid- oder virtuellen Kraftwerken<br>bzw. SMART- oder Micro-Grids                                           | 725 |
| 17.1.10   | Anforderungen an die konventionelle Erzeugung                                                                                 | 728 |
| 17.2      | Mineralöltransporte                                                                                                           | 730 |
| 17.3      | Erdgas-Transport                                                                                                              | 731 |
| 17.3.1    | Transport von gasförmigem Erdgas                                                                                              | 732 |
| 17.3.2    | Transport von flüssigem Erdgas                                                                                                | 733 |
| 17.4      | Wärmetransporte                                                                                                               | 734 |
|           | Literatur                                                                                                                     | 738 |
| <b>18</b> | <b>Energiespeicherung</b>                                                                                                     | 741 |
|           | Carsten Fichter, Richard Zahoransky und David Degler                                                                          |     |
| 18.1      | Speicherung elektrischer Energie                                                                                              | 742 |
| 18.1.1    | Übersicht und Anwendungsbereiche                                                                                              | 742 |
| 18.1.2    | Systeme und Strukturen der Energiespeicherung                                                                                 | 744 |
| 18.1.3    | Systeme für Tageslastausgleich                                                                                                | 744 |
| 18.1.3.1  | Pumpspeicherkraftwerk                                                                                                         | 744 |
| 18.1.3.2  | Betonkugel-Pumpspeicher                                                                                                       | 751 |
| 18.1.3.3  | Lage-Energiespeicher                                                                                                          | 751 |
| 18.1.3.4  | Diabater Druckluftspeicher                                                                                                    | 756 |
| 18.1.3.5  | Adiabater Druckluftspeicher                                                                                                   | 759 |
| 18.1.3.6  | Thermische Speicherung elektrischer Energie                                                                                   | 761 |
| 18.1.3.7  | Akkumulatoren/Batteriespeicher                                                                                                | 765 |
| 18.1.3.8  | Redox-Flow Batterien                                                                                                          | 770 |
| 18.1.4    | Systeme für Wochen- und Jahreslastausgleich –<br>Sektorkopplung                                                               | 772 |
| 18.1.4.1  | Grüne Energieträger                                                                                                           | 773 |

|           |                                                                                        |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 18.1.4.2  | Elektrolyse und Wasserstoffspeicher . . . . .                                          | 777        |
| 18.1.4.3  | Kosten für grünen Wasserstoff . . . . .                                                | 780        |
| 18.1.4.4  | Koppelprodukte Wasserelektrolyse . . . . .                                             | 782        |
| 18.1.4.5  | Wasserstoffbeimischung ins Erdgasnetz . . . . .                                        | 783        |
| 18.1.4.6  | Power to X – Methanisierung – SNG (Synthetic<br>Natural Gas) . . . . .                 | 783        |
| 18.1.5    | Systeme zur Bereitstellung<br>der Wirkleistungssekundenreserve . . . . .               | 785        |
| 18.1.5.1  | Schwungradspeicher . . . . .                                                           | 785        |
| 18.1.5.2  | Supraleitender magnetischer Energiespeicher<br>SMES . . . . .                          | 787        |
| 18.1.6    | Systeme zur Sicherung der unterbrechungsfreien<br>Stromversorgung . . . . .            | 789        |
| 18.1.6.1  | Akkumulatoren/Batterien . . . . .                                                      | 789        |
| 18.1.6.2  | Kondensatoren . . . . .                                                                | 789        |
| 18.1.7    | Vergleich relevanter Speichertechnologien: Leistungs-<br>und Energiespeicher . . . . . | 790        |
| 18.2      | Speicherung von Brennstoffen . . . . .                                                 | 792        |
| 18.2.1    | Kohlelagerung . . . . .                                                                | 792        |
| 18.2.2    | Flüssige Brennstoffe (Erdöl und Mineralölprodukte) . . . . .                           | 792        |
| 18.2.3    | Gasförmige Brennstoffe . . . . .                                                       | 794        |
| 18.2.3.1  | Oberirdische Gasspeicher . . . . .                                                     | 794        |
| 18.2.3.2  | Unterirdische Gasspeicher . . . . .                                                    | 795        |
| 18.2.3.3  | Flüssiggas-Speicher . . . . .                                                          | 796        |
| 18.3      | Wärmespeicher . . . . .                                                                | 797        |
| 18.3.1    | Speicherung fühlbarer Wärme . . . . .                                                  | 797        |
| 18.3.2    | Speicherung latenter Wärme . . . . .                                                   | 798        |
| 18.3.2.1  | Ruths-Speicher . . . . .                                                               | 798        |
| 18.3.2.2  | Fest-Flüssig Latentwärmespeicher<br>(Schmelzwärmespeicher) . . . . .                   | 799        |
| 18.3.2.3  | Thermochemische Speicher . . . . .                                                     | 800        |
|           | Literatur . . . . .                                                                    | 802        |
| <b>19</b> | <b>Lösungen der Übungsaufgaben</b> . . . . .                                           | <b>809</b> |
|           | Richard Zahoransky                                                                     |            |
| 19.1      | Lösungen Kap. 2 . . . . .                                                              | 809        |
| 19.2      | Lösungen Kap. 3 . . . . .                                                              | 812        |
| 19.3      | Lösungen Kap. 4 . . . . .                                                              | 813        |
| 19.4      | Lösungen Kap. 5 . . . . .                                                              | 815        |
| 19.5      | Lösungen Kap. 6 . . . . .                                                              | 825        |
| 19.6      | Lösungen Kap. 7 . . . . .                                                              | 827        |
| 19.7      | Lösungen Kap. 8 . . . . .                                                              | 831        |

---

|       |                                       |            |
|-------|---------------------------------------|------------|
| 19.8  | Lösungen Kap. 9 . . . . .             | 833        |
| 19.9  | Lösungen Kap. 10 . . . . .            | 837        |
| 19.10 | Lösungen Kap. 11 . . . . .            | 840        |
| 19.11 | Lösungen Kap. 12 . . . . .            | 844        |
| 19.12 | Lösungen Kap. 13 . . . . .            | 848        |
| 19.13 | Lösungen Kap. 14 . . . . .            | 852        |
| 19.14 | Lösungen Kap. 15 . . . . .            | 860        |
| 19.15 | Lösungen Kap. 16 . . . . .            | 866        |
| 19.16 | Lösungen Kap. 17 . . . . .            | 869        |
| 19.17 | Lösungen Kap. 18 . . . . .            | 873        |
|       | Literatur . . . . .                   | 880        |
|       | <b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b> | <b>881</b> |