

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen .....                | XVI |
| <b>1 Einleitung</b> .....                                                      | 1   |
| Literatur .....                                                                | 4   |
| <b>2 Energietechnische Grundlagen</b> (von Prof. Dr.-Ing. U. Schelling) .....  | 5   |
| 2.1 Energieformen .....                                                        | 5   |
| 2.2 Energieerhaltung .....                                                     | 6   |
| 2.3 Thermodynamische Kreisprozesse .....                                       | 7   |
| 2.3.1 Carnot-Prozess .....                                                     | 8   |
| 2.3.2 Technisch realisierbare Kreisprozesse .....                              | 9   |
| 2.3.3 Irreversibilitäten .....                                                 | 10  |
| 2.4 Erschöpfbares und nicht erschöpfbares (regeneratives) Energieangebot ..... | 10  |
| 2.5 Primär- und Sekundärenergien .....                                         | 11  |
| 2.6 Weltenergiebedarf .....                                                    | 12  |
| Übungsaufgaben .....                                                           | 12  |
| Literatur .....                                                                | 14  |
| Anhang .....                                                                   | 14  |
| <b>3 Überblick</b> .....                                                       | 17  |
| 3.1 Nutz- und Prozesswärme .....                                               | 18  |
| 3.2 Erzeugung elektrischer Energie .....                                       | 19  |
| 3.3 Kraft-Wärme-Kopplung .....                                                 | 21  |
| 3.4 Kombinations-Kraftwerke .....                                              | 22  |
| 3.5 Erneuerbare (regenerative) und unerschöpfbare Energiequellen .....         | 22  |
| 3.6 Entwicklungen in der Energietechnik .....                                  | 25  |
| Übungsaufgaben .....                                                           | 26  |
| Literatur .....                                                                | 27  |
| <b>4 Konventionelle Dampfkraftwerke</b> .....                                  | 28  |
| 4.1 Thermodynamische Grundlagen .....                                          | 29  |
| 4.1.1 Clausius-Rankine-Vergleichsprozess .....                                 | 29  |
| 4.1.2 Überhitzung des Frischdampfes .....                                      | 30  |
| 4.1.3 Zwischenüberhitzung .....                                                | 31  |
| 4.1.4 Regenerative Speisewasser-Vorwärmung .....                               | 31  |
| 4.1.5 Exergetische Betrachtung .....                                           | 33  |
| 4.1.6 Wärmeauskopplung .....                                                   | 34  |
| 4.1.7 Regelung von Dampfkraftwerken .....                                      | 34  |
| 4.2 Aufbau von Dampfkraftwerken DKW .....                                      | 35  |
| 4.3 Wasserqualitäten in Dampfkraftwerken .....                                 | 37  |
| 4.3.1 Arbeitsfluid (Speisewasser) .....                                        | 39  |
| 4.3.2 Rückkühlwasser .....                                                     | 40  |
| 4.3.3 Kühlwasser .....                                                         | 40  |
| 4.3.4 Heizwasser .....                                                         | 40  |
| 4.3.5 Wasseraufbereitung .....                                                 | 40  |

|          |                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.4      | Dampferzeuger .....                                                  | 42        |
| 4.4.1    | Allgemeine Zusammenhänge .....                                       | 43        |
| 4.4.2    | Feuerung .....                                                       | 45        |
| 4.4.3    | Strömungsformen .....                                                | 45        |
| 4.4.4    | Siedekrise 1. Art .....                                              | 47        |
| 4.4.5    | Großwasserraumkessel GWRK .....                                      | 48        |
| 4.4.6    | Naturumlauf-Dampferzeuger .....                                      | 48        |
| 4.4.7    | Zwangumlauf-Dampferzeuger .....                                      | 51        |
| 4.4.8    | Zwangdurchlauf-Dampferzeuger .....                                   | 51        |
| 4.5      | Regenerative Speisewasservorwärmung/Vorwärmstrecke .....             | 54        |
| 4.5.1    | Niederdruckvorwärmer .....                                           | 54        |
| 4.5.2    | Mischvorwärmer (Speisewasserbehälter) .....                          | 55        |
| 4.5.3    | Hochdruckvorwärmer .....                                             | 56        |
| 4.6      | Rauchgasreinigung .....                                              | 57        |
| 4.6.1    | Entstickung .....                                                    | 57        |
| 4.6.2    | Entstaubung .....                                                    | 58        |
| 4.6.3    | Rauchgasentschwefelungsanlage REA .....                              | 59        |
| 4.6.4    | CO <sub>2</sub> -Abtrennung und Sequestrierung .....                 | 61        |
| 4.7      | Kühlsystem .....                                                     | 63        |
| 4.7.1    | Kondensator .....                                                    | 63        |
| 4.7.2    | Kühltürme .....                                                      | 64        |
| 4.7.2.1  | Nasskühlturm (Naturzug-Kühlturm) .....                               | 64        |
| 4.7.2.2  | Trockenkühlturm .....                                                | 64        |
| 4.7.2.3  | Hybridkühlturm .....                                                 | 64        |
| 4.8      | Turbinen .....                                                       | 64        |
| 4.9      | Pumpen .....                                                         | 66        |
| 4.10     | Generatoren, Frequenzhaltung .....                                   | 66        |
| 4.11     | Weitere funktionelle Systeme .....                                   | 67        |
| 4.12     | Leittechnik in Kraftwerken .....                                     | 67        |
| 4.13     | Entwicklungen .....                                                  | 69        |
|          | Übungsaufgaben .....                                                 | 70        |
|          | Literatur .....                                                      | 73        |
| <b>5</b> | <b>Kernkraftwerke (von Prof. Dr. rer. nat. H. J. Allelein)</b> ..... | <b>75</b> |
| 5.1      | Kerntechnische Grundlagen .....                                      | 76        |
| 5.1.1    | Kernreaktionen .....                                                 | 76        |
| 5.1.2    | „Nutzbare“ Energie bei Kernreaktionen .....                          | 79        |
| 5.1.3    | Thermische und schnelle Neutronen .....                              | 82        |
| 5.1.4    | Moderation der Neutronen .....                                       | 84        |
| 5.1.5    | Kernbrennstoffe .....                                                | 87        |
| 5.1.6    | Radionuklidbildung in Reaktoren .....                                | 88        |
| 5.2      | Prinzipieller Aufbau des Reaktors .....                              | 89        |
| 5.2.1    | Brennelement .....                                                   | 89        |
| 5.2.2    | Leistungsverteilung .....                                            | 92        |
| 5.2.3    | Reaktordruckbehälter .....                                           | 94        |
| 5.3      | Reaktorsicherheit .....                                              | 95        |
| 5.3.1    | Einführung .....                                                     | 95        |
| 5.3.2    | Sicherheitskonzept .....                                             | 96        |
| 5.3.3    | Fukushima .....                                                      | 99        |

|          |                                                      |            |
|----------|------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.4    | Sicherheitsvorkehrungen .....                        | 105        |
| 5.3.5    | Räumliche Trennung .....                             | 107        |
| 5.3.6    | Reaktorsicherheitsforschung .....                    | 107        |
| 5.4      | Reaktortypen .....                                   | 108        |
| 5.4.1    | Übersicht der Reaktortypen .....                     | 108        |
| 5.4.2    | Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor .....           | 108        |
| 5.4.3    | Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor .....           | 113        |
| 5.4.4    | CANDU-Reaktor .....                                  | 116        |
| 5.4.5    | Schneller Brüter .....                               | 117        |
| 5.4.6    | Gasgekühlte Reaktoren, Hochtemperaturreaktor .....   | 118        |
| 5.4.7    | Kernkraftwerke der 4. Generation .....               | 120        |
| 5.5      | Entsorgung, Wiederaufarbeitung, Transport .....      | 122        |
| 5.5.1    | Wiederaufarbeitung .....                             | 122        |
| 5.5.2    | Entsorgung .....                                     | 123        |
| 5.5.3    | Transport .....                                      | 124        |
| 5.6      | Fusionskonzepte .....                                | 125        |
|          | Übungsaufgaben .....                                 | 127        |
|          | Literatur .....                                      | 130        |
| <b>6</b> | <b>Gasturbinen-Kraftwerke .....</b>                  | <b>131</b> |
| 6.1      | Thermodynamische Grundlagen .....                    | 131        |
| 6.1.1    | Gasturbine mit isochorer Wärmezufuhr .....           | 131        |
| 6.1.2    | Gasturbine mit isobarer Wärmezufuhr .....            | 134        |
| 6.1.3    | Thermodynamische Varianten .....                     | 136        |
| 6.1.3.1  | Zwischenkühlung .....                                | 136        |
| 6.1.3.2  | Zwischenerhitzung .....                              | 136        |
| 6.1.3.3  | Luftvorwärmung .....                                 | 137        |
| 6.1.4    | Realer Gasturbinen-Prozess .....                     | 139        |
| 6.1.5    | Umwelteinflüsse .....                                | 140        |
| 6.2      | Aufbau moderner stationärer Gasturbinen .....        | 140        |
| 6.3      | Verdichter .....                                     | 142        |
| 6.4      | Turbine in der Gasturbinenanlage .....               | 142        |
| 6.5      | Brennkammer .....                                    | 144        |
| 6.5.1    | Silobrennkammer .....                                | 144        |
| 6.5.2    | Ringbrennkammer .....                                | 145        |
| 6.5.3    | Schadstoffminimierung .....                          | 145        |
| 6.6      | Sonstige Komponenten .....                           | 147        |
| 6.7      | Jet-Gasturbinen, Aeroderivate .....                  | 147        |
| 6.8      | Mikro-Gasturbinen .....                              | 148        |
| 6.9      | Gasturbine mit getrennter Nutzleistungsturbine ..... | 149        |
| 6.10     | Gasturbinen mit geschlossenem Kreislauf .....        | 149        |
| 6.11     | Gasturbine mit interner Kohleverbrennung .....       | 150        |
| 6.11.1   | Gasturbine mit Kohlestaubfeuerung .....              | 151        |
| 6.11.2   | Gasturbine mit Kohlevergasung .....                  | 151        |
| 6.12     | Betriebsverhalten .....                              | 151        |
| 6.13     | Entwicklungen .....                                  | 152        |
|          | Übungsaufgaben .....                                 | 152        |
|          | Literatur .....                                      | 155        |
|          | Anhang .....                                         | 156        |

|          |                                                                 |     |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| <b>7</b> | <b>Kombinationskraftwerke</b> .....                             | 158 |
| 7.1      | Gas- und Dampfkraftwerke .....                                  | 158 |
| 7.1.1    | Schaltungsmöglichkeiten .....                                   | 159 |
| 7.1.2    | Prinzipielle Zusammenhänge .....                                | 160 |
| 7.1.3    | Eindruckprozess .....                                           | 162 |
| 7.1.4    | Zwei- und Mehrdruckprozesse .....                               | 165 |
| 7.1.5    | Einwellenanlagen .....                                          | 167 |
| 7.1.6    | Abhitzeessel .....                                              | 167 |
| 7.1.7    | Regelung, Betriebsverhalten .....                               | 169 |
| 7.1.8    | Entwicklungen .....                                             | 171 |
| 7.2      | Gasturbine mit interner Abwärmenutzung (Cheng-Cycle) .....      | 172 |
| 7.3      | Kombination von zwei Dampf-Kraftwerken .....                    | 174 |
| 7.4      | Verbrennungsmotor und Dampfkraftwerk .....                      | 175 |
| 7.5      | Kombinationen mit ORC-Kraftwerk .....                           | 175 |
|          | Übungsaufgaben .....                                            | 175 |
|          | Literatur .....                                                 | 177 |
| <b>8</b> | <b>Stationäre Kolbenmotoren für energetischen Einsatz</b> ..... | 179 |
| 8.1      | Otto-Motor .....                                                | 179 |
| 8.2      | Diesel-Motor .....                                              | 184 |
| 8.3      | Stirling-Motor .....                                            | 187 |
| 8.4      | Gasmotoren .....                                                | 190 |
| 8.4.1    | Brenngase .....                                                 | 190 |
| 8.4.2    | Technische Besonderheiten des Gasmotors .....                   | 192 |
| 8.5      | Dual Fuel (Zweistoff-Motor, Feuerstrahl-Motor) .....            | 195 |
| 8.6      | Hybridmotoren .....                                             | 196 |
| 8.7      | Notstromaggregate .....                                         | 200 |
| 8.8      | Emissionsminderung .....                                        | 201 |
| 8.8.1    | Otto-Motor .....                                                | 202 |
| 8.8.2    | Diesel-Motor .....                                              | 203 |
| 8.8.3    | Gasmotoren .....                                                | 204 |
| 8.9      | Motorregelung für energetische Zwecke .....                     | 206 |
|          | Übungsaufgaben .....                                            | 207 |
|          | Literatur .....                                                 | 208 |
| <b>9</b> | <b>Brennstoffzellen (von Prof. Dr.-Ing. U. Schelling)</b> ..... | 211 |
| 9.1      | Historie der Brennstoffzellen .....                             | 211 |
| 9.2      | Funktionsprinzip und Klassifizierung .....                      | 213 |
| 9.3      | Thermodynamische Grundlagen .....                               | 214 |
| 9.4      | Wirkungsgrad von Brennstoffzellen .....                         | 216 |
| 9.5      | Typisches Betriebsverhalten .....                               | 217 |
| 9.6      | Anwendungsgebiete und Stand der Entwicklung .....               | 219 |
| 9.6.1    | Die Alkalische Brennstoffzelle, Typ AFC .....                   | 221 |
| 9.6.2    | Die Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle, Typ PEFC .....          | 222 |
| 9.6.3    | Die Phosphorsaure Brennstoffzelle, Typ PAFC .....               | 228 |
| 9.6.4    | Die Schmelzkarbonat Brennstoffzelle, Typ MCFC .....             | 230 |
| 9.6.5    | Die Oxidkeramische Brennstoffzelle, Typ SOFC .....              | 232 |
|          | Übungsaufgaben .....                                            | 238 |
|          | Literatur .....                                                 | 239 |

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>10 Kraft-Wärmekopplung und Blockheiz-Kraftwerke BHKW</b> .....                                                               | 241 |
| 10.1 Wärmeauskopplung bei Dampfkraftwerken .....                                                                                | 242 |
| 10.1.1 Gegendruckbetrieb .....                                                                                                  | 242 |
| 10.1.2 Entnahme- und Anzapfbetrieb .....                                                                                        | 244 |
| 10.2 Wärmeauskopplung bei Gasturbinen .....                                                                                     | 246 |
| 10.3 Wärmeauskopplung bei Kombikraftwerken (GuD) .....                                                                          | 247 |
| 10.4 Wärmeauskopplung bei Kolbenmotoren .....                                                                                   | 248 |
| 10.5 Wärmeauskopplung bei anderen Prozessen .....                                                                               | 250 |
| 10.6 Dimensionierung von BHKW .....                                                                                             | 251 |
| 10.7 Klimatisierung (Kälteerzeugung) durch Abwärme und Wärmepumpen .....                                                        | 253 |
| 10.7.1 Kompressions-Kältemaschinen .....                                                                                        | 255 |
| 10.7.2 Absorptions-Kältemaschinen .....                                                                                         | 255 |
| 10.8 Wärmepumpen .....                                                                                                          | 257 |
| 10.9 Kraft-Wärme-Kälte-Verbund .....                                                                                            | 259 |
| Übungsaufgaben .....                                                                                                            | 260 |
| Literatur .....                                                                                                                 | 263 |
| <b>11 Wasserkraftwerke</b> .....                                                                                                | 264 |
| 11.1 Nutzbare Wasserenergie .....                                                                                               | 265 |
| 11.2 Laufwasserkraftwerke .....                                                                                                 | 267 |
| 11.3 Turbinen für Wasserkraftwerke .....                                                                                        | 268 |
| 11.3.1 Kaplan-Turbinen .....                                                                                                    | 270 |
| 11.3.2 Ossberger-Turbinen (Banki-Turbinen) .....                                                                                | 272 |
| 11.3.3 Francis-Turbinen .....                                                                                                   | 272 |
| 11.3.4 Dériaz-Turbinen .....                                                                                                    | 273 |
| 11.3.5 Pelton-Turbinen .....                                                                                                    | 273 |
| 11.3.6 Turgo-Turbine .....                                                                                                      | 275 |
| 11.3.7 Schrauben- oder Kegelturbine .....                                                                                       | 275 |
| 11.4 Gezeiten-Kraftwerke .....                                                                                                  | 276 |
| 11.5 Meereswellen-Kraftwerke .....                                                                                              | 278 |
| 11.6 Meeresströmungs-Kraftwerke .....                                                                                           | 280 |
| 11.7 Ozeanthermische Kraftwerke .....                                                                                           | 280 |
| Übungsaufgaben .....                                                                                                            | 281 |
| Literatur .....                                                                                                                 | 283 |
| Anhang 11.1 Herleitung Euler'sche Turbinenhauptgleichung .....                                                                  | 284 |
| Anhang 11.2 Herleitung der Energie von Meereswellen .....                                                                       | 285 |
| <b>12 Solartechnik (von Prof. Dipl.-Ing. E. Bollin)</b> .....                                                                   | 286 |
| 12.1 Überblick .....                                                                                                            | 286 |
| 12.2 Solare Strahlung .....                                                                                                     | 288 |
| 12.2.1 Grundlagen .....                                                                                                         | 288 |
| 12.2.2 Das Strahlungsangebot auf die Erde .....                                                                                 | 288 |
| 12.2.3 Wichtige Begriffe und Größen im Umgang mit Solarstrahlung .....                                                          | 291 |
| 12.2.4 Messgeräte zur Erfassung der Globalstrahlung .....                                                                       | 292 |
| 12.3 Solarthermische Energienutzung .....                                                                                       | 294 |
| 12.3.1 Übersicht .....                                                                                                          | 294 |
| 12.3.2 Sonnenkollektoren .....                                                                                                  | 295 |
| 12.3.3 Charakterisierung von Kollektoren oder die Bestimmung<br>der Nutzleistungen und des Wirkungsgrades von Kollektoren ..... | 297 |

|           |                                                                                          |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.3.4    | Kollektortestverfahren .....                                                             | 299        |
| 12.3.5    | Bauarten von Sonnenkollektoren .....                                                     | 299        |
| 12.3.6    | Solarthermische Systeme .....                                                            | 300        |
| 12.3.7    | Solarthermische Großanlagen zur Trinkwarmwasserbereitung .....                           | 300        |
| 12.3.8    | Spezifische Kennwerte von solarthermischen Anlagen zur<br>Trinkwarmwasserbereitung ..... | 302        |
| 12.3.9    | Beispiel einer solarthermischen Großanlage zur Trinkwasserbereitung ..                   | 304        |
| 12.4      | Photovoltaik .....                                                                       | 307        |
| 12.4.1    | Einführung .....                                                                         | 307        |
| 12.4.2    | Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle .....                                         | 308        |
| 12.4.3    | Solarzellentechnologie .....                                                             | 308        |
| 12.4.4    | Leistungsfähigkeit von Solarzellen .....                                                 | 309        |
| 12.4.5    | Verschalten von Solarzellen .....                                                        | 311        |
| 12.4.6    | Photovoltaische Systeme .....                                                            | 315        |
| 12.4.7    | Netzparallele PV-Anlagen .....                                                           | 315        |
| 12.4.8    | Evaluation von PV-Systemen .....                                                         | 317        |
| 12.5      | Solarthermische Kraftwerke .....                                                         | 317        |
| 12.5.1    | Zur Einführung .....                                                                     | 317        |
| 12.5.2    | Solarturmkraftwerke .....                                                                | 318        |
| 12.5.3    | Parabolrinnenkraftwerke .....                                                            | 319        |
| 12.5.4    | Fresnel-Kollektoren .....                                                                | 320        |
| 12.5.5    | Dish-Stirling-Systeme .....                                                              | 321        |
| 12.5.6    | Aufwindkraftwerke .....                                                                  | 321        |
| 12.5.7    | Projekt DESERTEC .....                                                                   | 322        |
|           | Übungsaufgaben .....                                                                     | 325        |
|           | Literatur .....                                                                          | 325        |
| <b>13</b> | <b>Windenergie .....</b>                                                                 | <b>327</b> |
| 13.1      | Grundlagen .....                                                                         | 327        |
| 13.2      | Windleistung und nutzbare Leistung .....                                                 | 329        |
| 13.3      | Bauarten von Windkonvertern .....                                                        | 329        |
| 13.3.1    | Widerstandsläufer .....                                                                  | 329        |
| 13.3.2    | Auftriebsläufer .....                                                                    | 330        |
| 13.3.3    | Darrieus-Rotor .....                                                                     | 333        |
| 13.4      | Charakteristik von Windturbinen .....                                                    | 334        |
| 13.5      | Regelung und Netzeinbindung .....                                                        | 335        |
| 13.5.1    | Windnachführung .....                                                                    | 335        |
| 13.5.2    | Optimaler Betrieb .....                                                                  | 336        |
| 13.5.3    | Sicherheitsabregelung .....                                                              | 336        |
| 13.5.4    | Teillastbetrieb .....                                                                    | 337        |
| 13.5.5    | Energiewandlung – Netzeinbindung .....                                                   | 337        |
| 13.6      | Windparks .....                                                                          | 339        |
| 13.6.1    | Landgebundene Windparks .....                                                            | 340        |
| 13.6.2    | Off-Shore-Windparks .....                                                                | 341        |
| 13.6.3    | Netzanbindung von Windparks .....                                                        | 342        |
| 13.7      | Sonstige Konzepte zur Windenergienutzung .....                                           | 343        |
|           | Übungsaufgaben .....                                                                     | 344        |
|           | Literatur .....                                                                          | 347        |
|           | Anhang .....                                                                             | 348        |

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>14 Energetische Verwertung von Biomasse</b> .....                      | 350 |
| 14.1 Thermische Verfahren .....                                           | 351 |
| 14.1.1 Pyrolyse .....                                                     | 352 |
| 14.1.2 Verbrennung .....                                                  | 352 |
| 14.1.3 Thermische Vergasung .....                                         | 353 |
| 14.2 Bakterielle Vergasung .....                                          | 355 |
| Übungsaufgaben .....                                                      | 357 |
| Literatur .....                                                           | 358 |
| <b>15 Geothermie</b> .....                                                | 360 |
| 15.1 Potenzial der Geothermie .....                                       | 360 |
| 15.2 Geothermische Kraftwerkskonzepte, Überblick .....                    | 362 |
| 15.3 Direkte Dampfentspannung .....                                       | 364 |
| 15.4 Flushprinzip .....                                                   | 364 |
| 15.5 Binärprinzip: ORC und KALINA .....                                   | 365 |
| 15.5.1 Organic Rankine Cycles ORC .....                                   | 365 |
| 15.5.2 Kalina-Prozess .....                                               | 368 |
| 15.6 Hot-Dry-Rock-Verfahren, HDR .....                                    | 370 |
| 15.7 Geokomprimierte nasse Felder .....                                   | 371 |
| 15.8 Kraft-Wärme-Kopplung mit geothermischer Energiequelle .....          | 372 |
| 15.9 Hybridsysteme .....                                                  | 372 |
| 15.10 Rein geothermische Nutzung .....                                    | 373 |
| 15.11 Umweltaspekte .....                                                 | 373 |
| 15.12 Risiken .....                                                       | 373 |
| Übungsaufgaben .....                                                      | 374 |
| Literatur .....                                                           | 376 |
| <b>16 Energetische Müllverwertung</b> .....                               | 378 |
| 16.1 Müllkraftwerke mit traditionellen Öfen .....                         | 379 |
| 16.2 Pyrolyse .....                                                       | 380 |
| 16.3 Thermoselect-Verfahren .....                                         | 381 |
| 16.4 Schwel-Brenn-Verfahren .....                                         | 382 |
| 16.5 Deponiegas/Klärgas-Kraftwerke .....                                  | 383 |
| Übungsaufgaben .....                                                      | 385 |
| Literatur .....                                                           | 386 |
| <b>17 Energieverteilung</b> .....                                         | 387 |
| 17.1 Elektrische Netze (von Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz) .....              | 387 |
| 17.1.1 Grundlagen elektrischer Netze .....                                | 387 |
| 17.1.2 Netzbetrieb vor Liberalisierung des Strommarktes .....             | 394 |
| 17.1.3 Netzbetrieb nach Liberalisierung des Strommarktes .....            | 396 |
| 17.1.4 Netzbetrieb bei hohem Anteil von EEG-Einspeisungen .....           | 398 |
| 17.1.5 Netzbetrieb bei hohem Anteil von Elektromobilität .....            | 399 |
| 17.1.6 Zukünftige Herausforderungen für den Netzbetrieb: Netzausbau ..... | 401 |
| 17.1.7 Speicherung und steuerbare Lasten:                                 |     |
| Aktuelle Situation und Ausblick .....                                     | 402 |
| 17.1.8 Training des Operativpersonals .....                               | 404 |

|           |                                                                                             |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 17.1.9    | Der Beitrag von Hybrid- oder virtuellen Kraftwerken bzw. SMART- oder Micro-Grids .....      | 404        |
| 17.1.10   | Anforderungen an die konventionelle Erzeugung .....                                         | 408        |
| 17.2      | Mineralöltransport .....                                                                    | 410        |
| 17.3      | Erdgastransport .....                                                                       | 410        |
| 17.4      | Wärmetransport .....                                                                        | 412        |
|           | Übungsaufgaben .....                                                                        | 414        |
|           | Literatur .....                                                                             | 417        |
| <b>18</b> | <b>Energiespeicherung .....</b>                                                             | <b>419</b> |
| 18.1      | Systeme zur Speicherung elektrischer Energie (von Prof. Dr. rer. nat. H. J. Allelein) ..... | 419        |
| 18.1.1    | Übersicht und Anwendungsbereiche .....                                                      | 419        |
| 18.1.2    | Systeme und Strukturen der Speicherung elektrischer Energie .....                           | 421        |
| 18.1.3    | Systeme für Tageslastausgleich .....                                                        | 422        |
| 18.1.3.1  | Pumpspeicherkraftwerk .....                                                                 | 422        |
| 18.1.3.2  | Kraftwerksketten .....                                                                      | 425        |
| 18.1.3.3  | Druckluftspeicherkraftwerke .....                                                           | 426        |
| 18.1.3.4  | Batteriespeicher .....                                                                      | 428        |
| 18.1.4    | Systeme für Wochen- und Jahreslastausgleich .....                                           | 430        |
| 18.1.5    | Systeme zur Bereitstellung der Wirkleistungssekundenreserve .....                           | 432        |
| 18.1.5.1  | Schwungradspeicher .....                                                                    | 432        |
| 18.1.5.2  | Supraleitender magnetischer Energiespeicher SMES .....                                      | 433        |
| 18.1.6    | Systeme zur Sicherung der unterbrechungsfreien Stromversorgung .....                        | 435        |
| 18.1.6.1  | Batteriespeicher .....                                                                      | 435        |
| 18.1.6.2  | Kondensatoren .....                                                                         | 435        |
| 18.1.7    | Vergleich relevanter Speichertechnologien .....                                             | 436        |
| 18.2      | Speicherung der Brennstoffe .....                                                           | 437        |
| 18.2.1    | Kohlelagerung .....                                                                         | 437        |
| 18.2.2    | Flüssige Brennstoffe (Erdöl und Mineralölprodukte) .....                                    | 438        |
| 18.2.3    | Gasförmige Brennstoffe .....                                                                | 439        |
| 18.3      | Wärmespeicher .....                                                                         | 441        |
| 18.3.1    | Speicherung fühlbarer Wärme .....                                                           | 441        |
| 18.3.2    | Speicherung latenter Wärme .....                                                            | 443        |
|           | Übungsaufgaben .....                                                                        | 444        |
|           | Literatur .....                                                                             | 445        |
| <b>19</b> | <b>Liberalisierung der Energiemärkte (von Dipl.-Ing. H. Oehler) .....</b>                   | <b>446</b> |
| 19.1      | Rahmenbedingungen .....                                                                     | 446        |
| 19.1.1    | Struktur der Stromversorgung in Deutschland .....                                           | 446        |
| 19.1.2    | Änderungen der Rahmenbedingungen seit der Liberalisierung .....                             | 449        |
| 19.1.3    | Liberalisierung des Messwesens .....                                                        | 452        |
| 19.2      | Entwicklung auf dem Strommarkt .....                                                        | 456        |
| 19.2.1    | Preisentwicklung .....                                                                      | 456        |
| 19.2.2    | Konsequenzen für die Unternehmen .....                                                      | 459        |
| 19.3      | Entwicklung auf dem Gasmarkt .....                                                          | 460        |
| 19.4      | Ausblick .....                                                                              | 463        |
|           | Übungsaufgaben .....                                                                        | 463        |
|           | Literatur .....                                                                             | 464        |

---

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>20 Kyoto-Protokoll</b> .....                                                         | 467 |
| 20.1 Globale Erwärmung und Treibhausgase GHG .....                                      | 467 |
| 20.2 Geschichte des Kyoto-Protokolls .....                                              | 469 |
| 20.3 Maßnahmen zur GHG Minderung .....                                                  | 471 |
| 20.3.1 Emissionshandel .....                                                            | 471 |
| 20.3.2 Allokation der Emissionen .....                                                  | 472 |
| 20.3.3 Preis der Emissionszertifikate .....                                             | 472 |
| 20.3.4 Joint Implementation (JI) .....                                                  | 473 |
| 20.3.5 Clean Development Mechanism (CDM) .....                                          | 473 |
| 20.3.6 CO <sub>2</sub> -Senken, Landnutzung: LULUCF .....                               | 474 |
| 20.4 Kontrolle und Zertifizierung .....                                                 | 475 |
| 20.4.1 Compliance Committee .....                                                       | 475 |
| 20.4.2 Ernannte Nationale Autoritäten<br>„Designated National Authorities“ DNA .....    | 475 |
| 20.4.3 Ernannte Operative Organisationen<br>„Designated Operational Entities“ DOE ..... | 475 |
| 20.4.4 Rolle der Weltbank .....                                                         | 476 |
| 20.5 Diskussion .....                                                                   | 476 |
| Übungsaufgaben .....                                                                    | 477 |
| Literatur .....                                                                         | 478 |
| Anhang .....                                                                            | 479 |
| <b>Lösungen der Übungsaufgaben</b> .....                                                | 480 |
| <b>Sachwortverzeichnis</b> .....                                                        | 531 |