

Inhaltsverzeichnis

Teil I Grundlagen

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einführung | 3 |
| 1.1 | Energieströme der Erde | 12 |
| 1.1.1 | Das Energiesystem Erde | 13 |
| 1.1.2 | Kohlendioxidemission, Auswirkungen auf das Klima | 17 |
| 1.2 | Kraftwerke und Umwelt | 22 |
| 1.3 | Energieumwandlung | 24 |
| 1.4 | Energieverbrauch bei der Energiegewinnung | 25 |
| 1.5 | Verbundnetz, Anforderungen an Kraftwerke | 27 |
| 1.6 | Fazit | 33 |
| | Literatur | 34 |
| 2 | Energiequellen | 35 |
| 2.1 | Fossile Brennstoffe | 38 |
| 2.1.1 | Kohlen | 39 |
| 2.1.2 | Erdöl | 44 |
| 2.1.3 | Erdgas | 46 |
| 2.1.4 | Umweltbelastung durch die Nutzung fossiler Brennstoffe | 47 |
| 2.2 | Nukleare Brennstoffe | 51 |
| 2.2.1 | Ressourcen an Kernbrennstoffen | 52 |
| 2.2.2 | Brennstoffkreislauf für Leichtwasserreaktoren | 53 |
| 2.2.3 | Umweltbelastungen durch die Nutzung der Kernenergie | 55 |
| 2.3 | Geothermie | 56 |
| 2.3.1 | Umweltbelastungen durch die Nutzung der Erdwärme | 59 |
| 2.4 | Sonnenenergie | 60 |
| 2.4.1 | Umweltbelastungen durch die Nutzung von Wind und Sonne | 64 |
| 2.5 | Fazit | 64 |
| | Literatur | 65 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3 | Umwandlung von Wärme in Arbeit | 67 |
| 3.1 | Der Dampfkraftprozess | 71 |
| 3.1.1 | Der ideale Clausius-Rankine-Prozess | 71 |
| 3.1.2 | Irreversible Zustandsänderungen | 76 |
| 3.2 | Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades | 78 |
| 3.2.1 | Grundsätzliche Gesichtspunkte | 78 |
| 3.2.2 | Erhöhung des Frischdampfzustandes | 79 |
| 3.2.3 | Zwischenüberhitzung | 80 |
| 3.2.4 | Regenerative Speisewasservorwärmung | 83 |
| 3.2.5 | Einfluss des Kondensatordruckes | 87 |
| 3.2.6 | Kraft-Wärme-Kopplung | 88 |
| 3.3 | Kreisprozesse mit homogenen Medien – Gasturbinenprozess | 89 |
| 3.3.1 | Der Joule-Prozess | 89 |
| 3.3.2 | Verbesserungsmöglichkeiten für den Joule-Prozess | 92 |
| 3.3.3 | Sonderformen des Gasturbinenprozesses | 96 |
| 3.4 | Fazit | 97 |
| | Literatur | 98 |

Teil II Nutzung fossiler Brennstoffe

| | | |
|----------|--|-----|
| 4 | Dampfkraftwerke | 101 |
| 4.1 | Stoff- und Energieströme in einem Dampfkraftwerk | 105 |
| 4.2 | Aufbau eines Kraftwerksblocks | 107 |
| 4.2.1 | Aufgabenstellung | 107 |
| 4.2.2 | Gesamtanordnung | 107 |
| 4.2.3 | Ausführungsbeispiel eines Dampfkraftprozesses | 109 |
| 4.3 | Realisierung und Kosten | 112 |
| 4.4 | Fazit | 114 |
| | Literatur | 114 |
| 5 | Grundlagen der Verbrennungstechnik | 115 |
| 5.1 | Energiebilanz der Verbrennung | 117 |
| 5.2 | Stoffbilanz der Verbrennung | 117 |
| 5.2.1 | Elementare Verbrennungsrechnung | 117 |
| 5.2.2 | Statistische Verbrennungsrechnung | 123 |
| 5.2.3 | Stoffdaten für Rauchgas | 124 |
| 5.3 | Anmerkungen zum Verbrennungsablauf | 128 |
| 5.4 | Fazit | 132 |
| | Literatur | 132 |
| 6 | Feuerungssysteme und -anlagen | 133 |
| 6.1 | Feuerungssysteme für feste Brennstoffe | 135 |
| 6.1.1 | Rostfeuerungen | 135 |
| 6.1.2 | Staubfeuerungen | 140 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.1.3 | Wirbelschichtfeuerungen | 170 |
| 6.2 | Feuerungssysteme für Öl und Gas | 180 |
| 6.3 | Verluste bei der Verbrennung | 183 |
| 6.4 | Fazit | 183 |
| | Literatur | 184 |
| 7 | Dampferzeuger | 185 |
| 7.1 | Dampferzeugersysteme | 186 |
| 7.1.1 | Einleitung | 186 |
| 7.1.2 | Naturumlauf | 186 |
| 7.1.3 | Zwangumlauf | 193 |
| 7.1.4 | Zwangdurchlauf | 194 |
| 7.1.5 | Zwangdurchlauf mit Vollastumwälzung | 198 |
| 7.2 | Der Verdampfungsprozess | 200 |
| 7.2.1 | Strömungsformen und Wärmeübergang in den Verdampferrohren | 200 |
| 7.2.2 | Durchfluss und Massenstromdichte im Verdampfer | 205 |
| 7.2.3 | Wasser/Dampftrennung | 206 |
| 7.3 | Konvektivheizflächen | 211 |
| 7.3.1 | Allgemeines | 211 |
| 7.3.2 | Wärmeübergang | 212 |
| 7.3.3 | Rohrwandtemperaturen | 214 |
| 7.3.4 | Überhitzer | 215 |
| 7.3.5 | Zwischenüberhitzer | 217 |
| 7.4 | Überhitzeranordnung und Kesselbauart | 219 |
| 7.5 | Energiebilanz und Wirkungsgrad | 222 |
| 7.5.1 | Begriffsbestimmungen | 223 |
| 7.5.2 | Wärmetechnische Auslegung | 227 |
| 7.6 | Regelung von Dampferzeugeranlagen | 228 |
| 7.6.1 | Einleitung | 228 |
| 7.6.2 | Das Mehrgrößensystem Zwangdurchlaufdampferzeuger | 229 |
| 7.6.3 | Dampf temperaturregelung | 233 |
| 7.6.4 | Besonderheiten beim Trommelkessel | 235 |
| 7.6.5 | Andere Dampferzeuger-Regelkreise | 236 |
| 7.7 | Festigkeitsberechnung von Druckteilen | 236 |
| 7.7.1 | Werkstoffe | 236 |
| 7.7.2 | Festigkeitsnachweis | 239 |
| 7.7.3 | Wärmespannungen | 241 |
| 7.8 | Fazit | 246 |
| | Literatur | 247 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 8 | Dampfturbinen | 249 |
| 8.1 | Elementare Theorie axialer Strömungsmaschinen | 251 |
| 8.2 | Optimale Geschwindigkeitsverhältnisse, Stufenzahl | 258 |
| 8.3 | Verluste und Wirkungsgrad | 260 |
| 8.4 | Betriebsweise und Regelung von Dampfturbinen | 261 |
| 8.4.1 | Festdruckbetrieb | 262 |
| 8.4.2 | Gleitdruckbetrieb | 263 |
| 8.4.3 | Modifizierter Gleitdruck | 264 |
| 8.5 | Aufbau einer Dampfturbine | 265 |
| 8.6 | Sicherheitseinrichtungen, Umleitstation, Anfahren | 268 |
| 8.7 | Fazit | 269 |
| | Literatur | 270 |
| 9 | Kühlsystem | 271 |
| 9.1 | Systemaufbau einer Kondensatoranlage | 272 |
| 9.2 | Kondensatorbauarten | 273 |
| 9.2.1 | Mischkondensatoren | 273 |
| 9.2.2 | Oberflächenkondensatoren | 275 |
| 9.3 | Rückkühlanlagen | 278 |
| 9.3.1 | Ablaufkühlung | 278 |
| 9.3.2 | Kreislaufkühlung | 282 |
| | Literatur | 282 |
| 10 | Speisewasserversorgung | 283 |
| 10.1 | Speisewasser | 283 |
| 10.2 | Schutzschichtbildung | 286 |
| 10.3 | Vorwärmer | 287 |
| 10.4 | Speisepumpen | 291 |
| | Literatur | 292 |
| 11 | Rauchgasreinigung | 293 |
| 11.1 | Entstaubung | 293 |
| 11.1.1 | Kennzeichnung des Flugstaubes | 293 |
| 11.1.2 | Entstaubungssysteme | 294 |
| 11.2 | Entschwefelung | 298 |
| 11.3 | Stickoxidreduktion | 302 |
| 11.4 | Entsorgung der Rückstände | 303 |
| 11.5 | Fazit | 304 |
| | Literatur | 304 |
| 12 | Dynamik der MW-Erzeugung in Dampfkraftwerken | 305 |
| 12.1 | Modellbildung | 306 |
| 12.1.1 | Allgemeines | 306 |
| 12.1.2 | κ_D -Theorie | 307 |
| 12.1.3 | Kesselmodelle | 312 |

| | |
|---|-----|
| 12.1.4 Modell des Dampferzeugers mit Turbogruppe | 319 |
| 12.2 Fazit | 321 |
| Literatur | 322 |
| 13 Die letzte Herausforderung für kohlegefeuerte | |
| Kraftwerke: CO₂-Sequestrierung | 323 |
| 13.1 CO ₂ -Abtrennung | 324 |
| 13.1.1 Abscheideanlagen | 324 |
| 13.1.2 Verbrennung mit Sauerstoff | 326 |
| 13.1.3 Brennstoffumwandlung | 327 |
| 13.2 Transport, Speicherung, Risiken | 328 |
| 13.3 Fazit | 331 |
| Literatur | 332 |
| 14 Nutzung fossiler Brennstoffe in Gas- und | |
| Dampfturbinenkraftwerken | 333 |
| 14.1 Kohlevergasung | 335 |
| 14.1.1 Aufbau einer Gasturbine | 339 |
| 14.2 Kombinierte Kraftwerksprozesse mit Gas- und Dampfturbinen | 343 |
| 14.2.1 Gas- und Dampfturbinenprozess mit nichtbefeuertem | |
| Abhitzeessel | 343 |
| 14.3 Kombikraftwerke mit aufgeladener Feuerung und | |
| Heißgasreinigung | 352 |
| 14.3.1 Allgemeines | 352 |
| 14.3.2 Anlagen mit aufgeladener Wirbelschicht | 353 |
| 14.3.3 Anlagen mit aufgeladenen Staubfeuerungen | 354 |
| 14.4 Andere Vorschaltprozesse | 354 |
| 14.4.1 Allgemeines | 354 |
| 14.4.2 Zweistoff-Kraftwerksprozesse mit Kalium und Wasser .. | 356 |
| 14.5 Energiespeicherung mit Luftspeicher-Gasturbinenkraftwerken | 357 |
| 14.6 Fazit | 359 |
| Literatur | 359 |
| 15 Alternative Prozesse zur Nutzung fossiler Brennstoffe | 361 |
| 15.1 Brennstoffzellen | 361 |
| 15.1.1 Grundlagen | 361 |
| 15.1.2 Thermodynamik der Brennstoffzelle | 363 |
| 15.1.3 Typenvielfalt | 367 |
| 15.1.4 Aufbau eines Brennstoffzellenkraftwerks | 372 |
| 15.1.5 Fazit | 373 |
| 15.2 Magnetohydrodynamische Energiewandler | 374 |
| 15.2.1 Grundlagen | 374 |
| 15.2.2 MHD-Kraftwerke | 381 |
| 15.2.3 Fazit | 383 |
| Literatur | 383 |

Teil III Nutzung nuklearer und regenerativer Energien

| | | |
|-----------|---|-----|
| 16 | Kernspaltung | 387 |
| 16.1 | Grundlagen | 387 |
| 16.1.1 | Kernaufbau, Kernreaktionen | 387 |
| 16.1.2 | Induzierte Kernspaltung | 393 |
| 16.1.3 | Kettenreaktion | 396 |
| 16.1.4 | Spaltreaktionen | 397 |
| 16.1.5 | Nachwärme | 407 |
| 16.1.6 | Konversion und Brüten | 407 |
| 16.2 | Aufbau von Kernreaktoren | 408 |
| 16.2.1 | Allgemeines | 408 |
| 16.2.2 | Reaktoren für Kraftwerke | 410 |
| 16.3 | Grundzüge der Reaktorwärmetechnik | 412 |
| 16.3.1 | Leistungsdichte | 412 |
| 16.3.2 | Druckwasserreaktor | 415 |
| 16.3.3 | Siedewasserreaktor | 417 |
| 16.3.4 | Brutreaktoren | 420 |
| 16.3.5 | Hochtemperaturreaktoren | 421 |
| 16.4 | Entsorgung | 423 |
| 16.5 | Sicherheit und Risiken | 425 |
| 16.5.1 | Vorbemerkung | 425 |
| 16.5.2 | Reaktorsicherheit | 425 |
| 16.6 | Fazit | 429 |
| | Literatur | 430 |
| 17 | Kernfusion | 431 |
| 17.1 | Fusionsreaktoren | 434 |
| 17.1.1 | Magnetischer Einschluss | 434 |
| 17.1.2 | Trägheitseinschluss | 441 |
| 17.2 | Fazit | 442 |
| | Literatur | 442 |
| 18 | Nutzung erneuerbarer Energiequellen | 443 |
| 18.1 | Wasserkraft | 444 |
| 18.1.1 | Laufwasserkraftwerke und Speicherkraftwerke | 445 |
| 18.1.2 | Gezeitenkraftwerke | 449 |
| 18.1.3 | Wellenenergie | 452 |
| 18.1.4 | Fazit | 456 |
| 18.2 | Sonnenenergie | 456 |
| 18.2.1 | Wärmetransport durch Strahlung | 461 |
| 18.2.2 | Technische Nutzung der Sonnenenergie | 465 |
| 18.2.3 | Thermische Solarkraftwerke | 470 |
| 18.2.4 | Photovoltaische Energieumwandlung | 474 |

| | |
|--|-----|
| 18.2.5 Fazit | 482 |
| 18.3 Windenergie | 482 |
| 18.3.1 Grundlagen | 484 |
| 18.3.2 Windenergienutzung | 486 |
| 18.3.3 Betrieb von Windanlagen | 491 |
| 18.3.4 Aufwindkraftwerk | 492 |
| 18.3.5 Fazit | 494 |
| 18.4 Folgerungen für die Nutzung regenerativer Energiequellen | 495 |
| Literatur | 495 |

Teil IV Zukunftsperspektiven

| | |
|--|------------|
| 19 Status unserer Energieversorgung | 499 |
| 19.1 Gegenwärtiger Stand | 499 |
| 19.1.1 Bevölkerungsexplosion | 501 |
| 19.1.2 Warum verbrauchen moderne Gesellschaften soviel Energie? | 501 |
| 19.1.3 Die fossilen Energiequellen gehen ihrer Erschöpfung entgegen | 503 |
| 19.1.4 Gibt es Ersatz für die fossilen Energiequellen? | 504 |
| 19.1.5 Die Emission der Treibhausgase muss vermindert werden. | 507 |
| 19.2 Mögliche Entwicklungen | 508 |
| Literatur | 511 |
| A Anhang | 513 |
| A.1 h,s -Diagramm für Wasser | 514 |
| A.2 h,p -Diagramm für Wasser | 515 |
| A.3 T,s -Diagramm für Wasser | 516 |
| A.4 Dezimalfaktoren | 517 |
| A.5 Physikalische Konstanten | 517 |
| A.6 Einheiten | 518 |
| A.6.1 Basiseinheiten | 518 |
| A.6.2 Abgeleitete Einheiten | 518 |
| Sachverzeichnis | 519 |