

# Inhalt

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Grundsätzliches zur Energie</b>  | <b>17</b> |
| 1.1      | Erscheinungsformen der Energie . . . . .  | 18        |
| 1.2      | Erhaltung der Energie . . . . .   | 21        |
| 1.3      | Physikalische Randbedingungen der Umwandlung von Energie  | 22        |
| 1.4      | Die Einteilung in Primär-, End- und Nutzenergie . . . . .   | 24        |
| 1.5      | Übersicht der natürlichen Energiequellen . . . . .  | 24        |
| 1.6      | Arten der Energieumwandlung . . . . .   | 26        |
| 1.7      | Möglichkeiten der Energiespeicherung und des Transportes . .  | 28        |
| <b>2</b> | <b>Unser heutiger Umgang mit Energie</b>  | <b>29</b> |
| 2.1      | Der Weltenergieverbrauch . . . . .  | 29        |
| 2.2      | Der Energieverbrauch in Deutschland . . . . .   | 32        |
| <b>3</b> | <b>Rahmenbedingungen für den zukünftigen Umgang mit Energie</b>                                     | <b>36</b> |
| 3.1      | Rahmenbedingungen ... der Welt . . . . .  | 36        |
| 3.1.1    | Weltbevölkerungsentwicklung . . . . .   | 36        |
| 3.1.2    | Welternährungssituation . . . . .   | 39        |
| 3.1.3    | Weltenergievorräte . . . . .  | 43        |
| 3.1.4    | Globale Umweltaspekte des Energieverbrauchs . . . . .   | 44        |
| 3.1.5    | Ansätze zur Vorhersage der Einsparpotentiale und des zukünftigen Energieverbrauchs . . . . .        | 48        |
| 3.2      | Rahmenbedingungen in Deutschland als typischem Industrieland . . . . .                              | 50        |
| 3.2.1    | Bevölkerungsentwicklungs- und -versorgungsaspekte . . . . .   | 50        |
| 3.2.2    | Rohstoffimport und Technologieexport . . . . .  | 51        |
| 3.2.3    | Regionale Umweltauswirkungen . . . . .  | 52        |
| 3.2.4    | Szenarien über <i>Wie</i> und <i>Wieviel</i> zukünftiger Energieversorgung in Deutschland . . . . . | 55        |
| 3.3      | Einsparung und Substitution als Handlungsvorgaben weltweiter Energiepolitik . . . . .               | 59        |

## 8 Inhalt

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>4</b> | <b>Fossile Energie</b>  | <b>60</b>  |
| 4.1      | Vorräte und Verbrauch . . . . .   | 60         |
| 4.1.1    | ... von Kohle . . . . .   | 60         |
| 4.1.2    | ... von Erdöl und Erdgas . . . . .  | 62         |
| 4.1.3    | ... von Methan aus tiefer Erdkruste und Methanhydrat . . . . .  | 65         |
| 4.2      | Grundsätzliches zur Umwandlung chemischer Energie . . . . .   | 66         |
| 4.2.1    | ... in Wärme . . . . .  | 67         |
| 4.2.2    | ... in Wärme in geschlossenenen Kreisläufen . . . . .   | 68         |
| 4.2.3    | ... in elektrische Energie mittels Brennstoffzellen . . . . .   | 70         |
| 4.3      | Nutzung von Kohle . . . . .   | 71         |
| 4.3.1    | ... durch Verbrennung in Ofen, Kraftwerk und Heizkraftwerk:<br>Kraft-Wärme-Kopplung und deren Randbedingungen . . . . .                               | 71         |
| 4.3.2    | Nutzung von Kohle durch Vergasung und Verflüssigung . . . . .   | 81         |
| 4.4      | Nutzung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen . . . . .   | 89         |
| 4.4.1    | Aufbereitung von Erdöl . . . . .  | 89         |
| 4.4.2    | Erzeugung von Heizwärme . . . . .   | 93         |
| 4.4.3    | Verbrennung in Motoren, Turbinen, Wärmepumpenantrieben . . . . .  | 95         |
| 4.4.4    | Antrieb von Gasturbinen und Betrieb von Magnetohydrodynamischen Wandlern . . . . .  | 97         |
| 4.5      | Umweltbelastungen aus dem Verbrauch fossiler Energien . . . . .   | 99         |
| 4.5.1    | Freisetzung toxischer Schadstoffe (Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe) bei der Nutzung fossiler Energieträger . . . . . | 100        |
| <b>5</b> | <b>Erneuerbare Energien: Solarenergie</b>   | <b>110</b> |
| 5.1      | Die Sonne als Sender von Energie . . . . .  | 110        |
| 5.2      | Die Erde als Empfänger von Energie . . . . .  | 113        |
| 5.3      | Photosynthese . . . . .   | 118        |
| 5.3.1    | Erzeugung von Biomasse: Nachwachsende Rohstoffe . . . . .   | 123        |
| 5.3.2    | Verbrennung von Biomasse . . . . .  | 126        |
| 5.3.3    | Umwandlung von Biomasse in Flüssigtreibstoffe Aethanol und Rapsmethylester . . . . .  | 128        |
| 5.3.4    | Erzeugung von gasförmigen Energieträgern . . . . .  | 131        |
| 5.4      | Nutzung über den photoelektrischen Effekt . . . . .   | 132        |
| 5.4.1    | Funktionsprinzip und Wirkungsgrade von Solarzellen . . . . .  | 133        |
| 5.4.2    | Technische Entwicklung beim Bau von Solarzellen . . . . .   | 139        |
| 5.4.3    | Nutzungsmöglichkeiten von Solarzellen . . . . .   | 140        |
| 5.5      | Nutzung des Sonnenlichtes als Wärmequelle zur Wärme- und Stromerzeugung . . . . .   | 143        |
| 5.5.1    | Wirkungsweise von Sonnenlichtkollektoren . . . . .  | 144        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.5.2    | Absorption in Flachkollektoren . . . . .  | 146        |
| 5.5.3    | Absorption direkten Sonnenlichts in konzentrierenden Kollektoren . . . . .                              | 150        |
| 5.5.4    | Aufwindkraftwerke und Sonnenteiche . . . . .  | 155        |
| 5.6      | Umweltrelevante Aspekte der Nutzung von Solarenergie . . .  | 156        |
| 5.6.1    | ... bei Biomasse: Anbau . . . . .   | 157        |
| 5.6.2    | ... bei Biomasse: Verbrennung . . . . .   | 158        |
| 5.6.3    | ... bei Solarzellenproduktion . . . . .   | 159        |
| 5.6.4    | ... bei großtechnischer Solarthermienutzung . . . . .   | 160        |
| <b>6</b> | <b>Erneuerbare Energien: Wind und Wasserkraft</b>   | <b>161</b> |
| 6.1      | Verfügbares Windpotential . . . . .   | 161        |
| 6.2      | Prinzip und Wirkungsweise von Windkraftanlagen . . . . .  | 166        |
| 6.3      | Konkrete Falluntersuchungen zu Windkraftanlagen . . . . .   | 171        |
| 6.4      | Abschätzung der Rahmenbedingungen flächendeckender Windenergienutzung am Beispiel Deutschland . . . . . | 173        |
| 6.5      | Energie aus Wassergefälle . . . . .   | 174        |
| 6.6      | Energie aus Gezeiten, Meereswellen und -strömungen . . . . .  | 179        |
| 6.7      | Umweltrelevante Aspekte der Nutzung von Wind und Wasser   | 189        |
| <b>7</b> | <b>Erneuerbare Energien: Organische Abfälle und Nebenprodukte</b>                                       | <b>192</b> |
| 7.1      | Biomethanisierung (Biogas):<br>Potentiale und Nutzungstechniken . . . . .                               | 192        |
| 7.2      | Klärschlämme und Gülle: Potentiale und Nutzungstechniken .  | 200        |
| 7.3      | Müllverbrennung: Potentiale und Nutzungstechniken . . . . .   | 201        |
| 7.4      | Umweltrelevante Aspekte der Nutzung von organischen Reststoffen . . . . .                               | 205        |
| <b>8</b> | <b>Erneuerbare Energien: Natürliche Wärmevorkommen</b>  | <b>210</b> |
| 8.1      | Wärmereservoir Erde . . . . .   | 210        |
| 8.2      | Natürliche Heißwasser-/Heißdampfquellen . . . . .   | 211        |
| 8.3      | Künstliche Entnahme von Wärme aus der Erdkruste . . . . .   | 213        |
| 8.4      | Nutzung der Wärme aus Luft, Boden und Wasser mit Wärmepumpen . . . . .                                  | 215        |
| 8.5      | Umweltrelevante Aspekte der Nutzung natürlicher Wärmevorkommen . . . . .                                | 221        |
| <b>9</b> | <b>Energie aus der Kernspaltung</b>   | <b>223</b> |
| 9.1      | Radioaktivität . . . . .  | 228        |
| 9.1.1    | Radioaktives Zerfallsgesetz und Maße für radioaktive Zerfälle   | 229        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 9.1.2     | Formen der Radioaktivität . . . . .   | 229        |
| 9.1.3     | Wechselwirkung von radioaktiver Strahlung mit Materie und deren Maßeinheiten . . . . .  | 232        |
| 9.1.4     | Natürliche und künstliche Quellen der Radioaktivität im Vergleich . . . . .             | 240        |
| 9.2       | Grundlagen der Kernspaltung . . . . .   | 244        |
| 9.3       | Kernbrennstoffe . . . . .   | 251        |
| 9.3.1     | Vorräte und Verbrauch . . . . .   | 251        |
| 9.3.2     | Anreicherung vor dem Einsatz und Herstellung von Brennelementen . . . . .               | 252        |
| 9.4       | Kernreaktoren . . . . .   | 254        |
| 9.4.1     | Grundprinzip . . . . .  | 254        |
| 9.4.2     | Übersicht über Reaktortypen . . . . .   | 255        |
| 9.4.3     | Druck-, Siede- und Schwerwasserreaktor . . . . .  | 255        |
| 9.4.4     | Graphitmoderierte Reaktoren . . . . .   | 257        |
| 9.4.5     | Hochtemperaturreaktoren . . . . .   | 259        |
| 9.4.6     | Brutreaktoren . . . . .   | 260        |
| 9.4.7     | Potential an Kernreaktoren . . . . .  | 262        |
| 9.4.8     | Evolutionäre Entwicklungsfortschreibungen . . . . .                                     | 263        |
| 9.4.9     | Revolutionäre Entwicklungsfortschreibungen: inhärent sichere Reaktoren . . . . .        | 265        |
| 9.5       | Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen . . . . .                                       | 268        |
| 9.6       | Transport aktiven Materials . . . . .   | 272        |
| 9.7       | Endlagerung radioaktiver Abfälle . . . . .  | 273        |
| 9.8       | Umweltaspekte der Nutzung der Kern(spalt)energie . . . . .                              | 277        |
| 9.8.1     | Kerntechnische Anlagen im Normalbetrieb . . . . .                                       | 277        |
| 9.8.2     | Große nukleare Störfälle . . . . .  | 279        |
| 9.8.3     | Risikoanalysen für Störfälle . . . . .  | 283        |
| <b>10</b> | <b>Energie aus der Kernfusion</b>   | <b>288</b> |
| 10.1      | Grundlagen der Kernfusion . . . . .   | 288        |
| 10.2      | Fusionsreaktor Sonne . . . . .  | 292        |
| 10.3      | Bereitstellung von Kern(fusions)brennstoffen . . . . .                                  | 293        |
| 10.4      | Fusion im magnetischen Einschluß . . . . .  | 294        |
| 10.4.1    | Stellarator . . . . .   | 295        |
| 10.4.2    | Tokamak . . . . .   | 296        |
| 10.4.3    | Ideenskizze zur Kraftwerksrealisierung . . . . .  | 298        |
| 10.5      | Plasmafusion unter Trägheitseinschluß; Fusion mit Laser- oder Teilchenbeschuß . . . . . | 300        |
| 10.6      | Myonkatalytische Fusion . . . . .   | 301        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 10.7      | Zeitrahmen für Realisierung von Fusionsreaktorkonzepten . . .  | 302        |
| 10.8      | Umweltaspekte der Energiegewinnung aus Kernfusion . . . .  | 303        |
| <b>11</b> | <b>Rahmenbedingungen für Energieeinsparung: Speicherung, Transport und rationelle Verwendung von Energie</b> | <b>304</b> |
| 11.1      | Speicherung und Transport von Wärme . . . . .  | 304        |
| 11.1.1    | Direkte Wärmespeicherung und rationeller Heizenergieeinsatz  | 304        |
| 11.1.2    | Latentwärmespeicherung . . . . .   | 314        |
| 11.1.3    | Thermochemische Energiespeicherung . . . . .   | 316        |
| 11.1.4    | Transport von Wärme (Fernwärme) . . . . .  | 317        |
| 11.2      | Speicherung und Transport von elektrischer Energie . . . . .   | 321        |
| 11.2.1    | Speicherung in Batterien, Akkumulatoren und Einsatz von Brennstoffzellen . . . . .                           | 321        |
| 11.2.2    | Speicherung in kapazitiven und induktiven Speichern . . . . .  | 334        |
| 11.2.3    | Transport in Stromleitungen: Freileitung, Erd-/Unterseekabel, supraleitende Kabel . . . . .                  | 337        |
| 11.3      | Speicherung und Transport von Brenn- und Treibstoffen . . .  | 343        |
| 11.3.1    | Speicherung von Kohlenwasserstoffen . . . . .  | 343        |
| 11.3.2    | ... von Wasserstoff in flüssiger und gasförmiger Phase . . . . .   | 344        |
| 11.3.3    | Transport fester, flüssiger und gasförmiger Brennstoffe . . . .  | 347        |
| 11.4      | Speicherung von mechanischer Energie . . . . .   | 350        |
| 11.4.1    | Pumpwasserspeicher . . . . .   | 350        |
| 11.4.2    | Schwungradspeicher . . . . .   | 350        |
| 11.4.3    | Luft- und Dampfdruckspeicher . . . . .   | 352        |
| 11.5      | Rationelle Verwendung von Energie . . . . .  | 354        |
| 11.5.1    | ... beim Stromeinsatz . . . . .  | 354        |
| 11.5.2    | ... im Verkehrsbereich . . . . .   | 356        |
| 11.5.3    | Einsparungen auf weiteren Gebiete . . . . .  | 356        |
| <b>12</b> | <b>Rahmenbedingungen für Energieeinsparung: Spezielle Techniken der Energienutzung</b>                       | <b>360</b> |
| 12.1      | Gaskinetische und thermodynamische Grundbegriffe . . . . .   | 360        |
| 12.2      | Wärme­kraft­ma­schinen . . . . .   | 367        |
| 12.2.1    | Carnotprozeß, Wirkungsgrad . . . . .   | 368        |
| 12.2.2    | WKM mit geschlossenem Kreislauf: Stirling-Motor . . . . .  | 369        |
| 12.2.3    | WKM mit geschlossenem Kreislauf:<br>Clausius-Rankine-Maschine . . . . .                                      | 370        |
| 12.2.4    | WKM mit offenem Kreislauf: Otto- und Dieselmotor . . . . .   | 373        |
| 12.2.5    | WKM mit offenem Kreislauf: Turbinen . . . . .  | 375        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 12.3      | Wärmepumpen und -transformatoren . . . . .   | 378        |
| 12.4      | Magnetohydrodynamische Wandler . . . . .   | 379        |
| 12.5      | Thermoelektrische und thermionische Energiewandler . . . . .   | 383        |
| 12.6      | Wasserstofftechnologie . . . . .   | 386        |
| 12.7      | Erzeugung von Licht . . . . .  | 393        |
| 12.8      | Elektromotoren und Generatoren . . . . .   | 397        |
| <b>13</b> | <b>Vergleich der Ergiebigkeiten verschiedener Energiequellen</b>   | <b>400</b> |
| 13.1      | Der Begriff des Erntefaktors . . . . .   | 400        |
| 13.2      | Erntefaktoren von Energiequellen im Vergleich . . . . .  | 402        |
| <b>14</b> | <b>Vergleich der Umweltbelastungen und Risiken</b>   | <b>406</b> |
| 14.1      | Der Begriff Risiko . . . . .   | 406        |
| 14.2      | Freisetzung von Wärme . . . . .  | 408        |
| 14.3      | Freisetzung toxischer und radioaktiver Schadstoffe . . . . .   | 410        |
| 14.4      | Freisetzung von atmosphärenchemisch relevanten Spurengasen   | 411        |
| 14.4.1    | Fluorierte Kohlenwasserstoffe und ihre Quellen . . . . .   | 412        |
| 14.4.2    | Distickstoffoxid und seine Quellen . . . . .   | 414        |
| 14.4.3    | Einfluß auf die stratosphärische Ozonschicht . . . . .   | 415        |
| 14.5      | Freisetzung strahlungsphysikalisch relevanter Spurengase . . .   | 417        |
| 14.5.1    | Der Mechanismus des Treibhauseffektes und seine Steuerung durch Wasserdampf, Kohlendioxid und weitere Gase . . . . . | 417        |
| 14.5.2    | Natürliche Schwankungen des CO <sub>2</sub> -Gehalts und dessen Auswirkungen auf die Temperatur . . . . .            | 421        |
| 14.5.3    | Vorhersagen der Computermodelle auf veränderte CO <sub>2</sub> -Gehalte  | 422        |
| 14.5.4    | Antropogene Einflußnahmen: Energieverbrauch und Brandrodung . . . . .  | 425        |
| 14.5.5    | Antropogene Freisetzungen weiterer relevanter Gase . . . . .   | 426        |
| 14.5.6    | Möglichkeiten der Rückhaltung von CO <sub>2</sub> und anderer Treibhausgase . . . . .                                | 426        |
| 14.5.7    | Auswirkungen auf das globale Klima der Zukunft . . . . .   | 428        |
| 14.6      | Vergleich der Schadensrisiken aller Quellen . . . . .  | 429        |
| <b>15</b> | <b>Schlußbetrachtungen</b>   | <b>433</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>434</b> |
|           | <b>Sachverzeichnis</b>   | <b>447</b> |