

# Inhaltsverzeichnis

---

|       |                                                                            |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | <b>Physikalische Grundlagen der Energieumwandlung</b> .....                | 1  |
| 1.1   | <b>Energie im physikalischen Kontext</b> .....                             | 2  |
| 2     | <b>Fossile Energieträger</b> .....                                         | 5  |
| 2.1   | <b>Kohlekraftwerke</b> .....                                               | 7  |
| 2.2   | <b>Erdöl und Erdgas</b> .....                                              | 10 |
| 2.3   | <b>CO<sub>2</sub> Abtrennung und Speicherung</b> .....                     | 11 |
| 3     | <b>Erneuerbare Energien</b> .....                                          | 13 |
| 3.1   | <b>Die Sonne</b> .....                                                     | 14 |
| 3.2   | <b>Solarenergie</b> .....                                                  | 18 |
| 3.2.1 | Konzentration und Prozesstemperatur .....                                  | 19 |
| 3.2.2 | Solarthermische Kraftwerke .....                                           | 19 |
| 3.3   | <b>Photovoltaik</b> .....                                                  | 21 |
| 3.3.1 | Aufbau von Solarzellen aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien .....   | 23 |
| 3.3.2 | Photovoltaik Kraftwerke .....                                              | 25 |
| 3.4   | <b>Windkraftanlagen</b> .....                                              | 26 |
| 3.4.1 | Aufbau einer Windkraftanlage .....                                         | 28 |
| 3.4.2 | Der Rotor .....                                                            | 29 |
| 3.4.3 | Triebstrang und Generator .....                                            | 31 |
| 3.4.4 | Steuerung und Anlagenmanagement .....                                      | 32 |
| 3.4.5 | Turm und Fundamente .....                                                  | 32 |
| 3.5   | <b>Wasserkraft</b> .....                                                   | 34 |
| 3.5.1 | Laufwasserkraftwerke .....                                                 | 34 |
| 3.5.2 | Speicherwasserkraftwerk .....                                              | 35 |
| 3.5.3 | Pumpspeicherkraftwerke .....                                               | 36 |
| 3.5.4 | Gezeitenkraftwerke .....                                                   | 37 |
| 3.6   | <b>Biomasse</b> .....                                                      | 38 |
| 3.7   | <b>Sonstige</b> .....                                                      | 42 |
| 3.7.1 | Aufwindkraftwerk .....                                                     | 42 |
| 3.7.2 | Wellenkraftwerke .....                                                     | 43 |
| 3.7.3 | Meereswärmekraftwerke .....                                                | 44 |
| 3.7.4 | Osmosekraftwerke .....                                                     | 45 |
| 3.7.5 | Tiefe Geothermie .....                                                     | 45 |
| 4     | <b>Energie aus der Kernspaltung</b> .....                                  | 47 |
| 4.1   | <b>Grundlagen der Kernspaltung und Kernbrennstoffe</b> .....               | 49 |
| 4.2   | <b>Radioaktivität</b> .....                                                | 51 |
| 4.2.1 | Radioaktives Zerfallsgesetz und Masse für radioaktive Zerfälle .....       | 51 |
| 4.2.2 | Formen der Radioaktivität .....                                            | 52 |
| 4.2.3 | Wechselwirkung von Radioaktivität mit Materie und deren Maßeinheiten ..... | 52 |
| 4.2.4 | Natürliche und künstliche Quellen der Radioaktivität im Vergleich .....    | 55 |

|       |                                                                                    |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3   | <b>Grundlagen der Kernspaltung und Kernbrennstoffe</b> .....                       | 57 |
| 4.3.1 | Vorräte und Verbrauch von Kernbrennstoffen .....                                   | 58 |
| 4.3.2 | <i>Anreicherung vor dem Einsatz und Herstellung von Brennelementen</i> .....       | 59 |
| 4.4   | <b>Kernreaktoren</b> .....                                                         | 60 |
| 4.4.1 | Grundprinzip .....                                                                 | 60 |
| 4.4.2 | Übersicht über in Betrieb befindliche Reaktortypen .....                           | 60 |
| 4.4.3 | Schnelle Reaktoren .....                                                           | 62 |
| 4.4.4 | <i>Graphitmoderierte Reaktoren</i> .....                                           | 62 |
| 4.4.5 | Hochtemperaturreaktoren (HTR) .....                                                | 63 |
| 4.4.6 | Fortentwicklung bestehender Reaktoren .....                                        | 63 |
| 4.5   | <b>Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen</b> .....                               | 65 |
| 4.6   | <b>Transport und Endlagerung radioaktiver Abfälle</b> .....                        | 66 |
| 4.6.1 | Transport aktiven Materials .....                                                  | 66 |
| 4.6.2 | Endlagerung radioaktiver Abfälle .....                                             | 67 |
| 4.6.3 | Einlagerung in Gesteinsformationen .....                                           | 68 |
| 4.6.4 | Partitionierung und Transmutation .....                                            | 70 |
| 4.6.5 | Transmutationsreaktor .....                                                        | 71 |
| 4.7   | <b>Zukunft der weltweiten Nutzung nuklearer Energie</b> .....                      | 71 |
| 5     | <b>Energie aus Kernfusion</b> .....                                                | 73 |
| 5.1   | <b>Grundlagen der Kernfusion</b> .....                                             | 74 |
| 5.2   | <b>Fusionsreaktor Sonne (vgl. Abschn. 3.1)</b> .....                               | 76 |
| 5.3   | <b>Vorräte und Aufwand zur Erzeugung von Fusionsbrennstoffen</b> .....             | 77 |
| 5.4   | <b>Fusion im magnetischen Einschluss und Trägheitsfusion</b> .....                 | 77 |
| 5.4.1 | Tokamak .....                                                                      | 77 |
| 5.4.2 | Stellarator .....                                                                  | 79 |
| 5.4.3 | Plasmaheizung .....                                                                | 80 |
| 5.4.4 | Modell eines Fusionskraftwerks (magnetischer Einschluss) .....                     | 80 |
| 5.4.5 | Sicherheits- und Umweltaspekte der Kernfusion mit<br>magnetischem Einschluss ..... | 81 |
| 5.5   | <b>Trägheitsfusion</b> .....                                                       | 81 |
| 5.5.1 | Prinzip der laserinduzierten Fusion .....                                          | 81 |
| 5.5.2 | Experimente zur laserinduzierten Fusion .....                                      | 82 |
| 5.6   | <b>Myon katalytische Fusion</b> .....                                              | 82 |
| 6     | <b>Energiespeicher</b> .....                                                       | 85 |
| 6.1   | <b>Elektrische Energiespeicher</b> .....                                           | 86 |
| 6.2   | <b>Elektrochemische Speicher</b> .....                                             | 88 |
| 6.3   | <b>Pump- und Druckluftspeicherkraftwerke</b> .....                                 | 91 |
| 6.4   | <b>Wasserstoff-Speicherung</b> .....                                               | 91 |
| 6.5   | <b>Thermische Speicher</b> .....                                                   | 92 |
| 6.5.1 | Sensible Wärmespeicher .....                                                       | 92 |
| 6.5.2 | Latentwärmespeicher .....                                                          | 93 |
| 6.5.3 | Thermochemische Speicher .....                                                     | 94 |
| 7     | <b>Elektrische Energieversorgung</b> .....                                         | 95 |
| 7.1   | <b>Produktion</b> .....                                                            | 96 |
| 7.2   | <b>Verteilung</b> .....                                                            | 97 |

|          |                                                                                                                |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.2.1    | Spannungsebenen.....                                                                                           | 98         |
| 7.2.2    | Kabel und Leitungen.....                                                                                       | 99         |
| 7.2.3    | Hochspannungs-Gleichstromübertragung .....                                                                     | 101        |
| 7.2.4    | Netzkonfiguration .....                                                                                        | 102        |
| 7.2.5    | Niederspannungsnetz .....                                                                                      | 103        |
| 7.2.6    | Smart Grids.....                                                                                               | 104        |
| 7.2.7    | Sektorenkopplung.....                                                                                          | 105        |
| <b>8</b> | <b>Risiken der Energieerzeugung und Auswirkungen auf<br/>Klima und Umwelt.....</b>                             | <b>107</b> |
| 8.1      | <b>Der Erntefaktor .....</b>                                                                                   | <b>109</b> |
| 8.1.1    | Energiedichten .....                                                                                           | 110        |
| 8.2      | <b>Der Begriff Risiko.....</b>                                                                                 | <b>111</b> |
| 8.2.1    | Gesellschaftliche Akzeptanz.....                                                                               | 112        |
| 8.2.2    | Restrisiko.....                                                                                                | 112        |
| 8.3      | <b>Auswirkungen auf Atmosphäre und Klima .....</b>                                                             | <b>113</b> |
| 8.3.1    | Der Strahlungshaushalt der Erde.....                                                                           | 113        |
| 8.3.2    | Der natürliche Treibhauseffekt .....                                                                           | 115        |
| 8.3.3    | Der anthropogene Treibhauseffekt am Beispiel von CO <sub>2</sub> .....                                         | 118        |
| 8.4      | <b>Natürliche Schwankungen des CO<sub>2</sub>-Gehalts und dessen<br/>Auswirkungen auf die Temperatur .....</b> | <b>119</b> |
| 8.5      | <b>Vorhersagen des globalen Klimas der Zukunft durch<br/>Computermodelle.....</b>                              | <b>120</b> |
| 8.5.1    | Klimamodelle.....                                                                                              | 121        |
| 8.5.2    | Vorhersagen des International Committee on Climate Changes (IPCC).....                                         | 121        |
| 8.5.3    | Anthropogene Einflussnahmen: Brandrodung und Energieverbrauch.....                                             | 122        |
| 8.5.4    | Umweltbelastungen aus dem Verbrauch fossiler Energien .....                                                    | 126        |
| 8.5.5    | Möglichkeiten der Rückhaltung von CO <sub>2</sub> und anderer Treibhausgase .....                              | 128        |
| 8.6      | <b>Ozonabbau durch Freisetzung atmosphärisch relevanter Spurengase .....</b>                                   | <b>130</b> |
| 8.6.1    | Ozonschicht und Chapman-Zyklus.....                                                                            | 130        |
| 8.6.2    | Katalytischer Ozonabbau.....                                                                                   | 130        |
| 8.6.3    | Polares Ozonloch .....                                                                                         | 132        |
| 8.7      | <b>Politische Maßnahmen zur Schadensbegrenzung bei<br/>Treibhauseffekt und Ozonloch.....</b>                   | <b>135</b> |
| 8.7.1    | Klimarahmenkonvention von 1992 .....                                                                           | 135        |
| 8.7.2    | Kyoto-Protokoll (Februar 2005) .....                                                                           | 136        |
| 8.7.3    | Klimaschutzabkommen von Paris (Dezember 2015).....                                                             | 136        |
| 8.7.4    | Montrealer Protokoll.....                                                                                      | 137        |
| 8.8      | <b>Umweltaspekte der Nutzung der Kernenergie .....</b>                                                         | <b>137</b> |
| 8.8.1    | Kerntechnische Anlagen im Normalbetrieb.....                                                                   | 138        |
| 8.8.2    | Große nukleare Störfälle der Kernenergienutzung .....                                                          | 138        |
| 8.8.3    | Risikoanalysen für Störfälle.....                                                                              | 149        |
|          | <b>Serviceteil</b>                                                                                             |            |
|          | <b>Literatur .....</b>                                                                                         | <b>154</b> |
|          | <b>Sachverzeichnis .....</b>                                                                                   | <b>159</b> |