

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>Einführung: Wohlstand, Wachstum und der Klimawandel</b>   | 1  |
|          | Die ökonomischen Folgen des Klimawandels   | 1  |
|          | Wirtschaftliche Umwälzungen durch Skaleneffekte und Lernkurven   | 4  |
|          | Warum erleben nicht alle Technologien oder Branchen beeindruckende Fortschritte durch Lernkurven?          | 7  |
|          | Die Rolle staatlicher und privater Institutionen in der Entwicklung von Technologien                       | 8  |
|          | Literatur  | 11 |
| <b>2</b> | <b>Von der Hunderte Millionen Jahre alten CO<sub>2</sub>-Speicherung zum menschengemachten Klimawandel</b> | 13 |
|          | Seit wann wissen wir vom menschengemachten Klimawandel?  | 14 |
|          | Der Treibhauseffekt ist ein natürliches Phänomen, aber sein Ausmaß ist menschengemacht                     | 15 |
|          | Woher haben fossile Brennstoffe ihren Namen?   | 22 |
|          | Fossile Energien sind zu günstig und werden preiswerter statt teurer                                       | 25 |
|          | Neue Märkte braucht das Land   | 30 |
|          | Literatur  | 34 |
| <b>3</b> | <b>Geothermische Energie: der schlafende Riese unter den erneuerbaren Energien</b>                         | 37 |
|          | Erneuerbare Energie aus dem Inneren des Planeten   | 38 |
|          | Was ist Geothermie?  | 39 |

v

|   |    |
|---|----|
| Vorteile der Geothermie für Investoren, Verbraucher und die Umwelt  | 40 |
| Standorte weltweit und in Deutschland   | 41 |
| Risiken der geothermischen Energie und Wege zu ihrer Überwindung  | 42 |
| Der Unfall von Staufen im Breisgau  | 43 |
| Das Erdbeben in Pohang  | 44 |
| Das wirtschaftliche Potenzial der geothermischen Energie  | 47 |
| Die Wertschöpfungskette der geothermischen Industrie  | 49 |
| Geothermie als Energiespeichermöglichkeit   | 54 |
| Kombination von Geothermie mit Wärmepumpen  | 54 |
| Digitale Technologien   | 55 |
| Synergien zwischen Regierung, Wirtschaft und Wissenschaft:  |    |
| Der Schlüssel zur kosteneffizienten und globalen Geothermie-Nutzung   | 56 |
| Exponentielles Wachstum in der Geothermie?  | 58 |
| Potenzielle für Geschäftsentwicklung und Innovation   | 60 |
| Methoden der Standortsuche  | 60 |
| Innovationen bei Bohrtechnologien   | 61 |
| Betrieb der Anlagen   | 63 |
| Verbesserte Nutzung der Geothermie  | 65 |
| Die Zukunft der Geothermie  | 66 |
| Wann ist der richtige Zeitpunkt für den Einstieg privater Investoren?   | 67 |
| Ausblick: Bringt das Jahr 2050 autonome Bohrroboter, Energiegewinnung im Einklang mit der Natur und eine Versorgung abgelegener Regionen? | 68 |
| Literatur   | 69 |
| <b>4 Biomasse, Biokraftstoffe und Biogas</b>  | 73 |
| Biomasse: die älteste Energiequelle der Menschheit  | 74 |
| Holznutzung zur Bekämpfung des Klimawandels   | 75 |
| Energie aus Mais, Raps und anderen Feldfrüchten   | 76 |
| Energie aus Abfällen  | 77 |
| Energie aus dem Meer  | 79 |
| Konversion von Biomasse   | 82 |
| Biomasse in Verbindung mit Kohlenstoffabscheidung und Speicherung   | 85 |
| Wirtschaftliches Potenzial durch technologische Innovationen  | 85 |

|   |     |
|---|-----|
| Ausblick: Rural Renaissance: Biomasse als Grundlage einer nachhaltigen Zukunft für alle             | 89  |
| Literatur   | 90  |
| <b>5 Die drei Säulen der Sonnenenergie: Photovoltaik, Photothermie und Concentrated Solar Power</b> | 93  |
| Arten von Solarenergie  | 94  |
| Die Entwicklung der PV: Von teuer zu billig   | 94  |
| Globale Unterschiede der Effizienz der Photovoltaik   | 96  |
| Hochleistungs-Solarmodule für die gewerbliche Anwendung   | 101 |
| Überwachungssysteme   | 105 |
| Wirtschaftliches Potenzial durch technologische Innovationen  | 106 |
| Agri-PV   | 109 |
| PV in der modernen Architektur  | 111 |
| Floating PV auf dem Wasser  | 113 |
| Maximum Power Point Tracking (MPPT)   | 116 |
| Verunreinigung von Solarmodulen   | 117 |
| Trackinglösungen  | 119 |
| Photovoltaisch-thermische (PVT) Systeme   | 120 |
| Recycling   | 121 |
| Photothermie  | 122 |
| Concentrated Solar Power (CSP)  | 124 |
| Geschäftsmodelle für Start-ups, Investoren und Konzerne   | 128 |
| Ausblick: Die Kraft der Sonne – Mobilisierung des Potenzials der PV in Wüstengebieten               | 130 |
| Literatur   | 131 |
| <b>6 Windenergie</b>  | 137 |
| Die am schnellsten wachsende erneuerbare Energiequelle an Land und auf See                          | 138 |
| GROWIAN-ein verkanntes Pionierprojekt mit großer Wirkung  | 139 |
| Windenergie an Land und auf See, im äußersten Süden und in Wüsten                                   | 140 |
| Technologietrends   | 145 |
| Welche Länder und Unternehmen führen bei der Windenergie?   | 147 |
| Wirtschaftliches Potenzial durch technologische Innovationen  | 149 |
| Geschäftsmodelle für Start-ups, Investoren und Konzerne   | 152 |
| Potenzielle zukünftige Geschäftsmodelle   | 154 |

## VIII Inhaltsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Ausblick: Die Umgestaltung der Meere: Eine Welt der nachhaltigen Energie- und Nahrungsmittelproduktion                                  | 154 |
| Literatur   | 156 |
| <b>7 Wasserkraft und Meeresenergie</b>  | 159 |
| Wasserkraft: eine Energiequelle mit Geschichte  | 160 |
| Speicherkraftwerke, Pumpspeicher, Laufwasserkraftwerke und Mehrzweckstaudämme   | 161 |
| Perspektive der Wasserkraft in einer Welt zunehmender intermittierender Energien  | 163 |
| Finanzielle Anreize für Pumpspeicherkraftwerke  | 165 |
| Wirtschaftliches Potenzial der Wasserkraft durch technologische Innovationen  | 165 |
| Ausblick: Eine durch Wasserkraft und nachhaltige Wassersysteme geeinte Welt   | 169 |
| Die Kraft des Meeres als Strom- und Antriebsquelle  | 171 |
| Wasserturbinen  | 174 |
| Flutanlagen   | 176 |
| Wellenkraftwerke  | 176 |
| OTEC-Systeme  | 177 |
| Herausforderungen der Meeresenergie   | 178 |
| Evolution vom kleinskaligem Energy Harvesting zu großflächigen Meeresenergieanlagen   | 180 |
| Ansätze zur technologischen Weiterentwicklung   | 181 |
| Wirtschaftliche Chancen der Meeresenergie für Start-ups, Investoren und Großunternehmen   | 182 |
| Ausblick: Meeresenergie – die unsichtbare erneuerbare Energie für den Erhalt wertvoller Küstenlandschaften und historischer Stadtbilder | 183 |
| Literatur   | 185 |
| <b>8 Regelkraftwerke und netzgekoppelte Speicherung</b>   | 189 |
| Speicherung und Verwandlung von elektrischer Energie  | 190 |
| Kosteneffizienz und wirtschaftlicher Betrieb von Energiespeichersystemen  | 192 |
| Heutige Energiespeicher   | 194 |
| Mechanische Speicher  | 196 |
| Elektrochemische Speicher (Batterien)   | 200 |
| Redox-Flow-Batterien  | 201 |
| Fortgeschrittene Batteriemanagement- und Energiemanagementsysteme   | 205 |

|  |     |
|--|-----|
| Elektrostatische und elektromagnetische Speicher   | 206 |
| Thermische Speicher  | 208 |
| Ansatzpunkte für eine technologische Weiterentwicklung   | 209 |
| Ausblick: Energiespeicherung und Steuerung<br>transformieren das Energiesystem                       | 210 |
| Literatur  | 212 |
| <b>9 Geographische Herausforderungen und Innovationen<br/>in der Energieübertragung</b>              | 217 |
| Energieerzeugung und -transport: Ein Wandel von<br>Nachbarschaft und Distanz                         | 218 |
| Effizienter Energietransport durch Pipelines   | 222 |
| H <sub>2</sub> -Transport mit Eisenbahn und Schiffen   | 223 |
| Stromleitungen   | 225 |
| Frequenzstabilität im Stromnetz  | 230 |
| Ansätze zur technologischen Weiterentwicklung  | 234 |
| Chancen für Erfinder, Start-ups und Unternehmen  | 238 |
| Ausblick: Vision 2050 – Eine Revolution in der<br>Stromübertragung                                   | 240 |
| Literatur  | 242 |
| <b>10 Sektorkopplung für Klimaneutralität</b>  | 245 |
| Die Rolle der Sektorkopplung in der Energiewende   | 246 |
| Transformation der Wärmeenergieversorgung in<br>Haushalten und der Industrie                         | 247 |
| Grundprinzipien der Wärmepumpentechnologie   | 248 |
| Großwärmepumpen in der Industrie   | 251 |
| Technische Innovation und Weiterentwicklung  | 252 |
| Wärmepumpen, intermittierende erneuerbare Energien<br>und die Zukunft thermischer Energiespeicherung | 254 |
| Innovationspotenzial und neue Geschäftschancen bei<br>Wärmepumpen und Wärmespeichern                 | 255 |
| H <sub>2</sub> als Rohstoff ersetzt fossile Brennstoffe  | 257 |
| Bedeutung von H <sub>2</sub>   | 258 |
| Erzeugung von Grünem H <sub>2</sub>  | 259 |
| H <sub>2</sub> -Transport  | 261 |
| Umwandlung in Ammoniak   | 262 |
| Power to Gas und Power to Liquid   | 264 |
| Energieverluste bei der Verwendung von grünem<br>H <sub>2</sub> und synthetischen Kraftstoffen       | 266 |
| Dekarbonisierung des Verkehrssektors   | 267 |

**X      Inhaltsverzeichnis**

|  |            |
|--|------------|
| H <sub>2</sub> -Tanks  | 269        |
| Neue Verkehrskonzepte  | 270        |
| Dekarbonisierung der produzierenden Industrie  | 272        |
| Bauwirtschaft und Zementindustrie  | 274        |
| Stahlindustrie   | 275        |
| Chemieindustrie  | 276        |
| Chancen für Erfinder, Start-ups und große Unternehmen  | 278        |
| Ausblick: Die klimaneutrale Transformation im Verbund von Heizen, Verkehr und Industrie – eine Vision für das Jahr 2050                | 281        |
| Literatur  | 284        |
| <b>11 Abscheidung und Nutzung von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub></b>  | <b>291</b> |
| Die Notwendigkeit der CO <sub>2</sub> -Abscheidung   | 292        |
| Natürliche Methoden zur CO <sub>2</sub> -Abscheidung   | 293        |
| Sümpfe und Feuchtgebiete als Kohlenstoffspeicher   | 294        |
| Aufforstung und CO <sub>2</sub> -senkende Plantagen  | 296        |
| Kohlenstoffspeicherung im Humus  | 299        |
| Mineralisierung von CO <sub>2</sub>  | 300        |
| Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)  | 301        |
| Geschäftsmodelle des Carbon Farming  | 302        |
| Was können Wissenschaftler und Forscher zu Sümpfen, Mooren und Feuchtgebieten und dem Zuwachs an Humus in den Böden beitragen?         | 306        |
| Wie können Start-ups und Unternehmen von Aufforstung, Erhalt der Feuchtgebieten profitieren oder neue Sumpfgebiete und Moore schaffen? | 307        |
| Carbon Capture and Storage als technischer Prozess   | 309        |
| CCS: Abscheidung von CO <sub>2</sub> direkt an der Quelle  | 310        |
| Pyrolyse als Alternative zu CCS  | 311        |
| Perspektiven der Oxyfuel-CCS-Technologie   | 312        |
| Unterirdische Speicherung  | 313        |
| Ansätze zur Abscheidung oder Vermeidung von CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O   | 315        |
| Direct Air Capture von Methan. Ist ein effizienter Ansatz möglich?   | 315        |
| Emissionsquellen von CH <sub>4</sub>   | 316        |
| Identifizierung von CH <sub>4</sub> -Emissionsquellen  | 318        |
| Verhinderung von CH <sub>4</sub> -Emissionen   | 320        |
| Methanotrophie   | 320        |

|  |     |
|--|-----|
| CH <sub>4</sub> -Produktion in Feuchtgebieten und Mooren   | 322 |
| Unterschiede und Gemeinsamkeiten in der Vermeidung der Emission von CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O | 323 |
| Ausblick: Aus Ödland werden im Jahr 2050 blühende Feuchtgebiete, Sümpfe und Moore                        | 324 |
| Literatur  | 326 |
| <b>12 Weiterentwicklung der Kernenergie – eine teure Investition, die alte Versäumnisse beseitigt</b>    | 331 |
| Viele relevante Länder stufen Kernenergie als einen wichtigen Lösungsweg der Klimakrise ein              | 332 |
| Kernenergie: Ausnahme in der Welt des exponentiellen Wachstums klimaneutraler Energien                   | 334 |
| Kernenergie, die Kraft, die in winzigen Atomkernen steckt  | 334 |
| Brutreaktoren  | 335 |
| Thorium als Kernbrennstoff   | 337 |
| Minor Actinides: radioaktive, toxische und langlebige Abfälle der Kernenergie                            | 338 |
| Generationen der Kernkraftwerkstechnik   | 338 |
| MSR als Kernreaktoren der vierten Generation   | 342 |
| Bill Gates und die Kernenergie   | 343 |
| Endlagerung ist keine dauerhafte Lösung für kerntechnische Abfälle                                       | 344 |
| Reduzierung langlebiger Isotope in Brutreaktoren   | 345 |
| Spallationsquellen   | 346 |
| Wasserkühlung von Kernkraftwerken  | 348 |
| Ansätze zur technologischen Weiterentwicklung  | 350 |
| Ausblick: Eine sichere Zukunft ohne Endlager durch Umwandlung radioaktiver Abfälle                       | 353 |
| Literatur  | 354 |