

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Hintergrund und Motivation . . . . .  | 1         |
| 1.2      | Zielsetzung und Struktur der Arbeit . . . . .   | 4         |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen einer nachhaltigen Energieversorgung</b>  | <b>8</b>  |
| 2.1      | Nachhaltige Energieversorgung . . . . .   | 8         |
| 2.1.1    | Nachhaltige Entwicklung . . . . .   | 8         |
| 2.1.2    | Nachhaltigkeit in der Energieversorgung . . . . .   | 11        |
| 2.1.3    | Indikatorensätze . . . . .  | 13        |
| 2.2      | Grundlagen der Szenarienentwicklung . . . . .   | 15        |
| 2.2.1    | Erstellungsprozess und Typologien von Szenarien . . . . .   | 16        |
| 2.2.2    | Methoden der Szenarienentwicklung . . . . .   | 19        |
| 2.3      | Grundlagen der Wertschöpfungsrechnung . . . . .   | 20        |
| 2.4      | Grundlagen der multikriteriellen Optimierung . . . . .  | 23        |
| 2.4.1    | Optimierungs- bzw. Lösungsverfahren . . . . .   | 25        |
| 2.5      | Stand der Forschung zur Modellierung regionaler Energiesysteme . .                                | 33        |
| 2.5.1    | Abgrenzung der Themenstellung . . . . .   | 37        |
| <b>3</b> | <b>Modellierung des regionalen Energiesystems</b>   | <b>38</b> |
| 3.1      | Regionale Abgrenzung der Untersuchungsregion . . . . .  | 38        |
| 3.2      | Abbildung des elektrischen Energiebedarfs . . . . .   | 39        |
| 3.2.1    | Allgemeiner elektrischer Energiebedarf . . . . .  | 39        |
| 3.2.2    | Profil der allgemeinen elektrischen Last . . . . .  | 41        |
| 3.2.3    | Elektrischer Energiebedarf neuer Stromanwendungen . . . . .                                       | 43        |
| 3.3      | Modellierung der regionalen Leistungsbereitstellung dezentraler Energiewandlungsanlagen . . . . . | 48        |
| 3.3.1    | Windenergie . . . . .   | 48        |
| 3.3.2    | Photovoltaik . . . . .  | 55        |
| 3.3.3    | Bioenergieanlagen . . . . .   | 56        |
| 3.3.4    | KWK-Anlagen . . . . .   | 57        |
| <b>4</b> | <b>Potentialanalyse</b>   | <b>58</b> |
| 4.1      | Abgrenzung des Potentialbegriffs . . . . .  | 59        |
| 4.2      | Automatisierte Ermittlung der Windenergiepotentiale . . . . .                                     | 60        |
| 4.2.1    | Datengrundlage . . . . .  | 62        |
| 4.2.2    | Kriterien für die Bestimmung des Flächenpotenzials . . . . .                                      | 64        |
| 4.2.3    | Bestimmung des verfügbaren Flächenpotentials . . . . .  | 66        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.2.4    | Windenergieanlagenallokation . . . . .  | 81         |
| 4.3      | Ermittlung der Photovoltaik-Potentiale . . . . .  | 87         |
| 4.3.1    | Automatisierte Ermittlung der PV-Freiflächenpotentiale . . .                              | 87         |
| 4.3.2    | Potential für PV-Dachflächenanlagen . . . . .   | 91         |
| 4.4      | Ermittlung von Bioenergiepotentialen . . . . .  | 91         |
| 4.5      | Zusammenfassung . . . . .   | 96         |
| <b>5</b> | <b>Formulierung von Zukunftsszenarien für regionale Energiesysteme</b>                    | <b>98</b>  |
| 5.1      | Strategien zur Erstellung regionaler Energieszenarien . . . . .                           | 98         |
| 5.2      | Erstellung von Zielszenarien . . . . .  | 100        |
| 5.2.1    | Variable Restriktionen und Kriterien . . . . .  | 101        |
| 5.2.2    | Fortschreibung der elektrischen Energienachfrage . . . . .                                | 105        |
| 5.3      | Definition von Zielindikatoren . . . . .  | 108        |
| 5.3.1    | Regionaler Autarkiegrad als energietechnischer Indikator . . .                            | 109        |
| 5.3.2    | Ökologische Indikatoren . . . . .   | 110        |
| 5.3.3    | Ökonomische Indikatoren . . . . .   | 122        |
| 5.3.4    | Zusammenfassung . . . . .   | 139        |
| <b>6</b> | <b>Entwicklung eines multikriteriellen Optimierungsmodells</b>                            | <b>140</b> |
| 6.1      | Optimierungsziel und Entscheidungsgrößen . . . . .  | 141        |
| 6.2      | Zeitliche und räumliche Modellstruktur . . . . .  | 143        |
| 6.3      | Formale Beschreibung des Optimierungsmodells . . . . .                                    | 145        |
| 6.3.1    | Methodischer Ablauf . . . . .   | 145        |
| 6.3.2    | Mathematische Formulierung . . . . .  | 147        |
| 6.3.3    | Bilanzierung der Leistungsflüsse . . . . .  | 152        |
| 6.3.4    | Auswertung der Optimierungsergebnisse . . . . .   | 153        |
| 6.3.5    | Zusammenfassung der verwendeten Entscheidungsvariablen,<br>Parameter und Mengen . . . . . | 154        |
| 6.4      | Implementierung des MOPS-Modells . . . . .  | 157        |
| <b>7</b> | <b>Fallstudie Landkreis Ahrweiler</b>   | <b>158</b> |
| 7.1      | Rahmendaten des Landkreises . . . . .   | 158        |
| 7.1.1    | Ausgangssituation und Potentiale erneuerbarer Energien . . .                              | 160        |
| 7.2      | Beschreibung der Zielszenarien . . . . .  | 165        |
| 7.3      | Anwendung des MOPS-Modells und Ergebnisse . . . . .                                       | 170        |
| 7.3.1    | Präferiertes Technologieportfolio und Szenarienvergleich . . .                            | 176        |
| 7.3.2    | Nachhaltigkeitsbewertung der Szenarien . . . . .  | 179        |
| 7.4      | Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse . . . . .                                   | 186        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>8 Zusammenfassung, Diskussion und kritische Würdigung</b> | <b>189</b> |
| 8.1 Zusammenfassung . . . . .                                | 189        |
| 8.2 Diskussion, kritische Würdigung und Ausblick . . . . .   | 193        |
| <b>Literatur</b>   | <b>201</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                                 | <b>219</b> |
| <b>Symbolverzeichnis</b>                                     | <b>220</b> |
| <b>A Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis</b>               | <b>225</b> |
| <b>B Verwendete Simulationsparameter</b>                     | <b>228</b> |
| <b>C Lebenslauf</b>  | <b>229</b> |