

Massimo Genoese

**Energiewirtschaftliche Analysen  
des deutschen Strommarkts  
mit agentenbasierter Simulation**



**Nomos**

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildungen  | 15 |
| Tabellen   | 19 |
| Abkürzungen  | 21 |
| 1 Einleitung   | 23 |
| 1.1 Ausgangslage und Problemstellung   | 23 |
| 1.2 Zielsetzung und Lösungsweg   | 24 |
| 2 Rahmenbedingungen und Entwicklungen in der deutschen Elektrizitätswirtschaft             | 27 |
| 2.1 Gesetzliche Regelungen zur Liberalisierung des Energiesektors                          | 27 |
| 2.2 Übersicht über ausgewählte Marktplätze für den Stromhandel in Deutschland              | 30 |
| 2.2.1 Terminmarkt  | 31 |
| 2.2.2 Spotmarkt  | 31 |
| 2.2.3 Intraday-Markt   | 32 |
| 2.2.4 Regelenergiemärkte   | 33 |
| 2.2.5 Ablauf des Marktgeschehens   | 38 |
| 2.3 Wettbewerbliche Elektrizitätsmärkte und Marktmacht                                     | 39 |
| 2.3.1 Messung von Marktmacht   | 41 |
| 2.3.2 Studien zu Marktmacht auf dem deutschen Strommarkt                                   | 44 |
| 2.4 Die Entwicklung des Emissionshandels   | 46 |
| 2.4.1 Hintergrund des Emissionshandels   | 46 |
| 2.4.2 Ausgewählte Aspekte des Kyoto-Protokolls   | 47 |
| 2.4.3 EU-Emissionshandel und Burden-Sharing  | 48 |
| 2.4.4 Umsetzung des Emissionshandels in Deutschland  | 49 |
| 2.4.4.1 Treibhausgas-Emissionsgesetz   | 49 |
| 2.4.4.2 Nationale Allokationspläne   | 50 |
| 2.4.5 Kritische Betrachtung des europäischen Emissionshandelssystems                       | 53 |
| 2.4.6 Emissionsminderungsbestrebungen nach 2012  | 55 |
| 2.4.7 Wechselwirkungen zwischen Brennstoff-, Strom- und CO <sub>2</sub> -Zertifikatpreisen | 55 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.5     | Ausgewählte Förderinstrumente in der Elektrizitätswirtschaft                        | 58 |
| 2.5.1   | Erneuerbare-Energien-Gesetz   | 58 |
| 2.5.2   | Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz  | 59 |
| 2.6     | Zusammenfassung   | 60 |
| 3       | Investitionsentscheidungen in der Elektrizitätswirtschaft                           | 61 |
| 3.1     | Charakterisierung von Investitionsentscheidungen                                    | 61 |
| 3.2     | Unsicherheitsfaktoren bei Investitionsentscheidungen                                | 63 |
| 3.2.1   | Stromgestehungskosten von Kraftwerken   | 63 |
| 3.2.2   | Entwicklung der Strompreise   | 65 |
| 3.2.3   | Energiepolitische Rahmenbedingungen   | 65 |
| 3.2.4   | Wettbewerbsintensität und Verhalten der Wettbewerber                                | 66 |
| 3.2.5   | Entwicklung der erneuerbaren Energien   | 67 |
| 3.2.6   | Entwicklung der Nachfrage   | 68 |
| 3.2.7   | Entwicklung der Kraftwerkstechnik   | 69 |
| 3.3     | Berücksichtigung von Unsicherheiten bei Investitionsentscheidungen                  | 71 |
| 3.4     | Das Konzept des Peak-Load-Pricing   | 73 |
| 3.5     | Versorgungssicherheit und Investitionsanreize in deregulierten Elektrizitätsmärkten | 75 |
| 3.5.1   | Steuerung der langfristigen Versorgungssicherheit durch Marktparameter              | 76 |
| 3.5.2   | Zahlungen für installierte Kapazität  | 78 |
| 3.5.3   | Weitere Mechanismen zur Erhöhung von Versorgungssicherheit                          | 81 |
| 3.6     | Zusammenfassung   | 81 |
| 4       | Modelle für die Simulation des Elektrizitätssektors                                 | 83 |
| 4.1     | Anforderungen an Modelle des Stromsektors   | 83 |
| 4.2     | Überblick über Energiemodelle   | 84 |
| 4.2.1   | Energiesystemmodelle (Bottom-Up-Modelle)  | 84 |
| 4.2.1.1 | Optimierende Energiesystemmodelle   | 85 |
| 4.2.1.2 | Simulationsmodelle  | 86 |
| 4.2.1.3 | Vergleich von optimierenden Modellen und agentenbasierter Simulation                | 87 |
| 4.2.2   | Weitere Modellierungsansätze  | 89 |
| 4.3     | Schwächen etablierter Ansätze und Auswahl eines Modelltyps                          | 90 |
| 4.4     | Agentenbasierte Simulation in der Energiewirtschaft                                 | 91 |
| 4.4.1   | Modelle mit kurzfristigem Betrachtungshorizont zur Analyse von Märkten              | 92 |
| 4.4.1.1 | Analyse von Marktmacht und Markteffizienz   | 92 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.4.1.2 | Berücksichtigung von Netzengpässen bei der Analyse von Marktmacht und Markteffizienz | 97  |
| 4.4.1.3 | Analyse der Marktausgestaltung mittels Kopplung an weitere Modelle                   | 99  |
| 4.4.1.4 | Vertragswechselverhalten von Konsumenten   | 100 |
| 4.4.2   | Modelle zur Analyse der langfristigen Entwicklung von Märkten                        | 101 |
| 4.4.2.1 | Modellierung von Investitionsentscheidungen  | 101 |
| 4.4.2.2 | Modellierung von sektorübergreifenden Aspekten                                       | 103 |
| 4.4.3   | Schlussfolgerungen   | 103 |
| 5       | Entwicklung des agentenbasierten Simulationsmodells PowerACE                         | 109 |
| 5.1     | Überblick über das Modell  | 109 |
| 5.2     | Mathematische Modellbeschreibung   | 114 |
| 5.2.1   | Modellierung der Märkte  | 114 |
| 5.2.2   | Modellierung der Energieversorgungsunternehmen                                       | 117 |
| 5.2.2.1 | Bietstrategien der Agenten auf den Märkten   | 117 |
| 5.2.2.2 | Simulation des Kraftwerkseinsatzes   | 126 |
| 5.2.2.3 | Modellierung der strategischen Ausbauplanung   | 126 |
| 5.2.2.4 | Integration eines Reinforcement Learning Algorithmus in das Modell                   | 129 |
| 5.2.3   | Modellierung weiterer relevanter Marktteilnehmer                                     | 132 |
| 5.2.3.1 | Anbieter von Strom aus erneuerbaren Energiequellen                                   | 133 |
| 5.2.3.2 | Akteure der Elektrizitätsnachfrage   | 133 |
| 5.2.3.3 | Allokation von Emissionsberechtigungen   | 134 |
| 5.3     | Datenbasis für das Modell  | 134 |
| 5.3.1   | Analyse und Modellierung des Kraftwerksparks   | 134 |
| 5.3.1.1 | Wirkungsgrade  | 135 |
| 5.3.1.2 | Variable und fixe Kosten   | 138 |
| 5.3.1.3 | Verfügbarkeit von thermischen Kraftwerken  | 139 |
| 5.3.1.4 | Laständerungsverhalten   | 139 |
| 5.3.2   | Entwicklung des Kraftwerksparks  | 140 |
| 5.3.2.1 | Sterbelinien des deutschen Kraftwerksparks   | 141 |
| 5.3.2.2 | Geplanter Zubau von konventionellen Kraftwerken                                      | 142 |
| 5.3.2.3 | Konventionelle Technologieoptionen für das Modell                                    | 143 |
| 5.3.3   | Brennstoffpreise   | 143 |
| 5.3.4   | CO <sub>2</sub> -Preise  | 144 |
| 5.3.5   | Elektrizitätsnachfrage   | 145 |
| 5.3.6   | Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen   | 146 |
| 5.3.7   | Stromaußenhandel   | 149 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 5.4     | Implementierung und Benutzeroberfläche des Modells                      | 150 |
| 5.4.1   | Datenhaltung  | 150 |
| 5.4.2   | Szenario- und Parameterdefinition                                       | 151 |
| 5.4.3   | Simulation  | 151 |
| 5.4.4   | Auswertung  | 152 |
| 5.5     | Zusammenfassung   | 153 |
| 6       | Kurzfristige Simulation des Strommarktes                                | 155 |
| 6.1     | Validierung des Modells   | 155 |
| 6.1.1   | Validierung der simulierten Strompreise                                 | 155 |
| 6.1.2   | Validierung von Elektrizitätsproduktion und CO <sub>2</sub> -Emissionen | 159 |
| 6.1.3   | Statistische Validierung des Modells                                    | 161 |
| 6.2     | Analyse von Einflussfaktoren auf den Strompreis                         | 163 |
| 6.2.1   | Höhe der Einpreisung des CO <sub>2</sub> -Preises                       | 163 |
| 6.2.1.1 | Technologieunabhängige Einpreisung                                      | 164 |
| 6.2.1.2 | Technologiespezifische Einpreisung                                      | 167 |
| 6.2.1.3 | Windfall Profits  | 168 |
| 6.2.1.4 | Zusammenfassung   | 173 |
| 6.2.2   | Marktmacht auf dem deutschen Strommarkt                                 | 173 |
| 6.2.2.1 | Diskussion der Ergebnisse der Strommarktsimulation 2005 und 2006        | 174 |
| 6.2.2.2 | Strukturelle Marktmacht auf dem deutschen Strommarkt                    | 176 |
| 6.2.2.3 | Ausübung von Marktmacht   | 178 |
| 6.2.2.4 | Zusammenfassung   | 181 |
| 6.2.3   | Auswirkungen der Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen  | 182 |
| 7       | Simulation von Investitionsentscheidungen                               | 185 |
| 7.1     | Rahmenannahmen der langfristigen Simulation                             | 185 |
| 7.1.1   | Brennstoff- und CO <sub>2</sub> -Zertifikatepreisvariationen            | 185 |
| 7.1.2   | Entwicklung von Nachfrage und erneuerbaren Energien                     | 187 |
| 7.2     | Zum Einfluss von Allokationsverfahren auf Investitionsentscheidungen    | 188 |
| 7.2.1   | Betrachtete Allokationsszenarien  | 189 |
| 7.2.2   | Entwicklung des Energiesystems  | 190 |
| 7.2.3   | Entwicklung der Strompreise   | 193 |
| 7.2.4   | Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen                             | 195 |
| 7.2.5   | Zusammenfassung   | 196 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 8     | Schlussfolgerungen und Ausblick   | 199 |
| 8.1   | Das entwickelte Modell zur Abbildung des liberalisierten deutschen Strommarktes | 199 |
| 8.2   | Kritische Würdigung und Grenzen der Aussagefähigkeit des entwickelten Modells   | 200 |
| 8.3   | Schlussfolgerungen aus den Modellrechnungen                                     | 201 |
| 8.4   | Einsatz des Modells als Experimentallabor in der Lehre                          | 203 |
| 8.5   | Ausblick auf zukünftige Forschungsvorhaben                                      | 204 |
| 8.5.1 | Weitere Anwendungsgebiete für das bestehende Modell                             | 205 |
| 8.5.2 | Methodische Weiterentwicklungen   | 205 |
| 9     | Zusammenfassung   | 209 |
| A     | Appendix A  | 213 |
| A.1   | CO <sub>2</sub> -Einsparpotential der Industrie                                 | 213 |
| A.2   | Stromaustauschprofil einer Frühlings- und Herbstwoche                           | 213 |
| A.3   | Angekündigte und kürzlich realisierte Kraftwerksneubauten in Deutschland        | 214 |
| A.4   | Reststrommengen der deutschen Kernkraftwerke                                    | 215 |
| A.5   | Benutzeroberflächen PowerACE  | 216 |
| A.6   | Oberfläche für die Verwaltung der Batch-Runs                                    | 216 |
|       | Literaturverzeichnis  | 217 |