

## 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> -Zertifikatepreisen	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	Stromtauschprofil 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