



Multiskalare Modellierung integrierter Energie- und Elektrizitätssysteme

Thiemo Christian Pesch

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 485

ISBN 978-3-95806-452-2

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung
Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE)

Multiskalare Modellierung integrierter Energie- und Elektrizitätssysteme

Thiemo Christian Pesch

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 485

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-452-2

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Kurzfassung	VII
Abstract	IX
Nomenklatur	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Ausgangslage	1
1.2 Problemstellung und Motivation	3
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Energietechnische Grundlagen	7
2.1 Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie.....	7
2.1.1 Thermische Kraftwerke	8
2.1.2 Nicht-thermische Kraftwerke und Stromerzeugungsanlagen.....	17
2.1.3 Flexibilitätsoptionen	20
2.2 Übertragungssysteme für elektrische Energie.....	21
2.2.1 Drehstrom-Hochspannungs-Übertragung.....	22
2.2.2 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	23
2.3 Struktur der elektrischen Energieversorgung	24
2.3.1 Netzebenen	24
2.3.2 Netztopologien.....	25
2.3.3 Systemverbund.....	26
2.4 Netzbetriebsmittel	29
2.4.1 Leitungen.....	29
2.4.2 Transformatoren	31
2.4.3 Schaltanlagen	33

2.5	Technische Versorgungssicherheit	34
2.5.1	(n-1)-Ausfallkriterium	34
2.5.2	Strombelastbarkeit der Betriebsmittel	35
2.5.3	Kurzschlussleistung	36
2.5.4	Spannungsstabilität	37
2.5.5	Frequenzhaltung	38
3	Energiewirtschaftliche Grundlagen	43
3.1	Handelsplätze für elektrische Energie	43
3.1.1	Großhandelsmärkte	44
3.1.2	Regelleistungsmärkte	47
3.2	Funktionsweise des internationalen Stromaustausches	47
3.2.1	Ermittlung der verfügbaren Übertragungskapazitäten	48
3.2.2	Vergabe der verfügbaren Übertragungskapazitäten	51
3.2.3	Marktkopplung	52
3.3	Entwicklung des europäischen Elektrizitätsbinnenmarkts	53
3.3.1	Regionale Elektrizitätsinitiativen	54
3.3.2	Kopplung der europäischen Day-ahead-Märkte	55
3.3.3	Kopplung der europäischen Intraday-Märkte	56
4	Modellierung von Energie- und Elektrizitätssystemen	57
4.1	Ziele der Energie- und Elektrizitätssystemmodellierung	57
4.2	Charakteristika von Zukunftsanalysen und Modellierungsansätzen	59
4.2.1	Prognose versus Szenario	59
4.2.2	Normativ versus explorativ	60
4.2.3	Intertemporal versus myopisch	61
4.3	Modellierungsansätze und Modellklassen	61
4.3.1	Top-down-Modelle	62
4.3.2	Bottom-up-Modelle	63

4.4	Betrachtungsbereiche und Systemgrenzen	65
4.4.1	Energiesystem	65
4.4.2	Elektrizitätssystem	67
4.5	Skalen, Skalenebenen und Multiskalarität der Modellierung.....	70
4.6	Stand der Modellierung von Energie- und Elektrizitätssystemen.....	73
4.6.1	Übersicht bestehender Energie- und Elektrizitätssystemmodelle.....	73
4.6.2	Betrachtungsbereiche und Systemgrenzen	75
4.6.3	Zeitliche und räumliche Skalenebenen	77
4.7	Kritischer Diskurs und abgeleiteter Entwicklungsbedarf	81
5	Modellpaket zur multiskalaren Analyse integrierter Energie- und Elektrizitätssysteme	85
5.1	Modellpaket zur Integration der einzelnen Modelle	85
5.1.1	Kurzbeschreibung der enthaltenen Modelle	86
5.1.2	Struktur des Modellpakets	90
5.1.3	Rückkopplung und Konvergenz	92
5.1.4	Multiskalarität des integrierten Modellpakets	94
5.2	Energiesystemmodell für Deutschland – IKARUS-LP	95
5.2.1	Modellaufbau und Struktur.....	95
5.2.2	Sektoren und Untersektoren.....	97
5.2.3	Modellkalibrierung	102
5.3	Modelle zur zeitlichen und räumlichen Entfaltung der Residuallast	102
5.3.1	Zeitliche Entfaltung des Stromverbrauchs in Deutschland	104
5.3.2	Räumliche Entfaltung des Stromverbrauchs in Deutschland.....	110
5.3.3	Zeitliche Entfaltung der Stromerzeugung aus EE-Anlagen in Deutschland.....	114
5.3.4	Räumliche Entfaltung der Stromerzeugung aus EE-Anlagen in Deutschland	118
5.3.5	Zeitliche Entfaltung des Stromverbrauchs in Rest-Europa.....	129
5.3.6	Zeitliche Entfaltung der Stromerzeugung aus EE-Anlagen in Rest-Europa	130
5.3.7	Zeitliche Entfaltung der Residuallasten.....	131

5.4	Elektrizitätsmarktmodell für Europa	133
5.4.1	Modellierungsansatz und Systembereich.....	133
5.4.2	Mathematische Formulierung des Elektrizitätsmarktmodells	136
5.4.3	Mathematische Lösung des Revisions- und Kraftwerkseinsatzproblems	158
5.4.4	Struktur des entwickelten Elektrizitätsmarktmodells	161
5.4.5	Datengrundlage und getroffene Modellannahmen	164
5.4.6	Grafische Darstellung	172
5.4.7	Modellvalidierung.....	173
5.5	Übertragungsnetzmodell für Deutschland.....	176
5.5.1	Modellierungsansatz und Systembereich.....	177
5.5.2	Mathematische Formulierung des Netzmodells	179
5.5.3	Mathematische Lösung des Lastflussproblems.....	186
5.5.4	Struktur des entwickelten Übertragungsnetzmodells.....	204
5.5.5	Datengrundlage und getroffene Modellannahmen	216
5.5.6	Grafische Darstellung	224
5.5.7	Modellverifikation	228
6	Exemplarische Untersuchungen	231
6.1	Basisszenario: Effiziente Umsetzung der Energiewende.....	231
6.1.1	Rahmenszenario und Annahmen	231
6.1.2	Variante 1: Rechenergebnisse mit IKARUS-LP	242
6.1.3	Variante 2: Rechenergebnisse des integrierten Modellpakets	247
6.2	Szenario A: Verzögerter Netzausbau in Deutschland.....	275
6.3	Szenario B: Neubau eines Kernkraftwerks in Polen	279
7	Zusammenfassung und Ausblick	283
7.1	Die Modellentwicklungen dieser Arbeit.....	283
7.2	Ergebnisse der exemplarischen Untersuchungen.....	285
7.3	Methodischer Ausblick und weiterführende Anwendungsgebiete	288

Inhaltsverzeichnis	XV
Literaturverzeichnis	291
Abbildungsverzeichnis	317
Tabellenverzeichnis	327
A Anhang zur Entwicklung der Netztopologie	329
B Anhang zu den Ergebnissen des Basisszenarios	333
C Anhang zu den Ergebnissen des Szenarios A	377

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 485
ISBN 978-3-95806-452-2