

Christopher Spieker

Europäische Strommarkt- und
Übertragungsnetzsimulation zur
techno-ökonomischen Bewertung
der Netzentwicklung

Band 14



Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen, Energieeffizienz und Energiewirtschaft

Europäische Strommarkt- und Übertragungsnetzsimulation zur techno-ökonomischen Bewertung der Netzentwicklung

Von der
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von

Christopher Spieker, M.Sc.
aus Schwelm

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser

Tag der mündlichen Prüfung: 25. März 2019

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz

Band 14

Christopher Spieker

**Europäische Strommarkt- und Übertragungsnetz-
simulation zur techno-ökonomischen Bewertung
der Netzentwicklung**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6690-6

ISSN 2567-2908

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Doktorarbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie³) der Technischen Universität Dortmund entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz, für die Betreuung dieser Arbeit. Zudem danke ich Ihm für das entgegengebrachte Vertrauen bei der Bearbeitung und Leitung von verschiedenen Studien und Gutachten sowie für die Möglichkeit, meine Forschungsergebnisse auf internationalen Fachkonferenzen vorstellen zu können.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser, Leiter des Instituts für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, danke ich für die Übernahme des Korreferats und die freundlichen Feedbackgespräche zu meiner Arbeit.

Allen ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern des ie³, vor allem den Kollegen der Forschungsgruppe „Transportnetzplanung und Energiemärkte“, danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit und die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Namentlich möchte ich mich bei Herrn Dennis Klein, M.Sc., Herrn Björn Matthes, M.Sc., und Herrn Dr.-Ing. Volker Liebenau für die zahlreichen Diskussionen und die wertvollen Ratschläge während der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Zu guter Letzt danke ich meiner Familie für die stetige Unterstützung und den starken Rückhalt insbesondere in der Endphase dieser Arbeit.

Velbert, im März 2019
Christopher Spieker

Kurzfassung

Die aktuellen Entwicklungen im europäischen Energieversorgungssystem, wie der wachsende Anteil von Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung, die voranschreitende Integration der Strommärkte und eine zunehmende Sektorkopplung, erfordern einen massiven Ausbau des elektrischen Übertragungsnetzes. Aufgrund der hohen Investitionen und der zum Teil erheblichen Umweltauswirkungen kommt der Bewertung von geplanten Netzausbauprojekten eine besondere Bedeutung zu. Sowohl im Rahmen des Netzplanungsprozesses als auch bei regulatorischen Prüfprozessen werden Simulationswerkzeuge und Bewertungskriterien benötigt, die eine technische, ökonomische und ökologische Beurteilung einzelner Projekte zulassen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Markt- und Netzsimulationsumgebung vorgestellt, die es erlaubt, die zukünftige Versorgungsaufgabe und die hieraus resultierenden Belastungszustände des europäischen Übertragungsnetzes für verschiedene Szenarien und Ausbauvarianten zu prognostizieren. Darüber hinaus werden Kriterien und Ansätze zur Bewertung von Netzausbauprojekten hinsichtlich ihres techno-ökonomischen Nutzens präsentiert, die eine Weiterentwicklung der in der Praxis angewandten Kriterien und Methoden darstellen. Hierzu gehört insbesondere die Bewertung von Interkonnektoren mittels des lastflussbasierten Kapazitätsmodells. Im Rahmen eines Anwendungsfalls werden ausgewählte Netzausbauprojekte des deutschen Netzentwicklungsplans für ein Szenario des europäischen Energieversorgungssystems im Jahr 2025 techno-ökonomisch bewertet. In diesem Zusammenhang werden die Funktionstüchtigkeit und die Analysemöglichkeiten der entwickelten Simulationsumgebung sowie die Vorzüge der vorgestellten Bewertungskriterien und -ansätze demonstriert.

Abstract

Current developments in the European energy supply system, such as the growing share of renewable energy sources in electricity generation, the advancing integration of electricity markets and increasing sector coupling, require a massive expansion of the electrical transmission grid.

Due to the high investments and the considerable environmental impacts of grid expansion, the evaluation and characterisation of grid expansion projects is of particular importance. Simulation tools and evaluation criteria permitting a technical, economic and ecological assessment of individual projects are required both for the network planning process and for regulatory review processes.

In the context of this thesis a market and network simulation framework is presented, which allows to determine the future supply task and the resulting loading conditions of the European transmission grid for different scenarios and expansion variants. In addition, criteria and approaches for evaluating grid expansion projects with regard to their techno-economic benefits are introduced, which represent a further development of the criteria and methods applied in practice. This includes, in particular, the evaluation of interconnectors using the flow-based market coupling method.

Within a European case study, selected grid expansion projects of the German grid development plan for a scenario of the European energy supply system in the year 2025 are evaluated techno-economically. In this context, the functionality and analysis options of the developed simulation framework as well as the advantages of the presented evaluation criteria and approaches are demonstrated.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit	3
2 Stand der Technik	7
2.1 Methodisches Vorgehen in der strategischen Übertragungsnetzaus- bauplanung	7
2.2 Modelle und Verfahren in der strategischen Übertragungsnetzaus- bauplanung	10
2.2.1 Modelle zur Strommarktsimulation	10
2.2.2 Modelle und Verfahren zur Netz- und Engpassmanagement- simulation	16
2.3 In der Praxis angewandte Kriterien zur Bewertung von Netzausbau- projekten	20
2.3.1 Projektbewertung bei der Erstellung des TYNDP	21
2.3.2 Projektbewertung im Rahmen des NEP-Prozesses	27
3 Markt- und Netzsimulationsumgebung MILES	31
3.1 Kraftwerkseinsatzmodell	33
3.1.1 Rollierender Optimierungsansatz	34
3.1.2 Mathematische Formulierung	35
3.1.3 Auswertung der Optimierungsergebnisse	59
3.2 Methode zur Ermittlung von Netzbetriebszuständen	60
3.2.1 Einstellung leistungsflusssteuernder Netzelemente	62
3.2.2 Verlustleistungsaufteilung	71
3.3 Internes Engpassmanagementmodell	73
3.3.1 Maßnahmen des internen Engpassmanagements und ihre Fle- xibilitätpotenziale	73
3.3.2 Mathematische Formulierung	77

4	Parameter zur Formulierung der Leistungsflussnebenbedingungen in den Optimierungsmodellen von MILES	89
4.1	Ermittlung der Sensitivitätsfaktoren	89
4.1.1	Nodale Sensitivitätsfaktoren	89
4.1.2	Sensitivitätsfaktoren leistungsflusssteuernder Netzelemente .	91
4.1.3	Sensitivitätsfaktoren zur Abbildung von Zweigausfällen . .	92
4.2	Berechnung der Wirkleistungsflüsse und maximalen Wirkleistungsübertragungskapazitäten	93
4.3	Bestimmung der Parameter des zonalen lastflussbasierten Kapazitätsmodells	95
4.3.1	Definition des Basisfalls	96
4.3.2	Lineare Abschätzung des Systemverhaltens	97
4.3.3	Vorverarbeitung der Netznebenbedingungen	102
5	Kriterien zur Bewertung von Netzausbauprojekten	107
5.1	Bewertung marktgebietsinterner Netzausbauprojekte	107
5.1.1	Überlast-Wirksamkeit	107
5.1.2	Engpassmanagement-Wirksamkeit	110
5.2	Bewertung marktgebietsübergreifender Netzausbauprojekte mittels lastflussbasiertem Kapazitätsmodell	112
5.2.1	Sozio-ökonomische Wohlfahrt und EE-Integration	112
5.2.2	Indikatoren des lastflussbasierten Kapazitätsmodells zur Wirksamkeitsanalyse	114
6	Anwendungsfall: Europäische Markt- und Netzsimulation 2025	117
6.1	Vorgehen	117
6.2	Szenariobeschreibung	120
6.2.1	Eingangsdaten der entwickelten Module	120
6.2.2	Annahmen und Parameterwahl bei der Anwendung der entwickelten Module	124
6.3	Beispielhafte Bewertung marktgebietsinterner Netzausbauprojekte .	128
6.3.1	Ergebnisse der entwickelten Module für die Referenznetzkonfiguration	129
6.3.2	Ergebnisse der Projektbewertung	136
6.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion	143
6.4	Beispielhafte Bewertung marktgebietsübergreifender Netzausbauprojekte	145
6.4.1	Ergebnisse der Marktsimulation mit hybrider Marktkopplung für die Referenznetzkonfiguration	146
6.4.2	Ergebnisse der Projektbewertung	148

6.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse	152
7 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	153
7.1 Zusammenfassung	153
7.2 Diskussion und Ausblick	155
Literaturverzeichnis	159
Symbolverzeichnis	171
Anhang A: Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	179
Anhang B: Lebenslauf	183