

Dennis Klein

Optimierungsgestützte Modellumgebung zur Bestimmung des Ausbaubedarfs elektrischer Übertragungsnetze

Band 18



Optimierungsgestützte Modellumgebung zur Bestimmung des Ausbaubedarfs elektrischer Übertragungsnetze

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

DISSERTATION

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

von
Dennis Klein, M.Sc.
aus Hagen

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

Tag der mündlichen Prüfung: 12.08.2020

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

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

Band 18

Dennis Klein

**Optimierungsgestützte Modellumgebung zur
Bestimmung des Ausbaubedarfs elektrischer
Übertragungsnetze**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7596-0

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 den folgenden Personen, ohne die diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Zuerst gilt mein Dank meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz, der mir während dieser Zeit enorme Möglichkeiten eröffnete und mir dabei stets sein vollstes Vertrauen aussprach. Insbesondere möchte ich mich für die damit verbundenen Freiräume sowie den immer ehrlichen und fruchtbaren Austausch bedanken.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser, Leiter des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats sowie die hiermit verbundenen, erkenntnisreichen Diskussionen.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen des ie³ sowie den weiteren wissenschaftlichen Mitstreitern möchte ich mich für die Zusammenarbeit sowie die vielen schönen Erlebnisse während der Zeit am Institut bedanken. Besonders danken möchte ich Dr.-Ing. Christopher Spieker, Dr.-Ing. Volker Liebenau und Björn Matthes, M. Sc., die wesentlich zu den Inhalten dieser Arbeit durch den wissenschaftlichen Austausch und die intensive Zusammenarbeit beigetragen haben. Zudem danke ich Dr. rer. oec. Fabian Baier, Maximilian Krause, M.Sc., David Kröger, M. Sc., und Jan Peper, M. Sc., für die Durchsicht der Arbeit.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, die mir in all der Zeit stets den notwendigen Rückhalt und die Motivation für die Vollendung der Arbeit gegeben hat - allen voran meiner Ehefrau Luisa für die aufopferungsvolle Zeit sowie meinen Kindern Othilia und Erich. Ich liebe euch.

Dortmund, im August 2020
Dennis Klein

Kurzfassung

Veränderte Transportanforderungen an das elektrische Übertragungsnetz erfordern einen Ausbau der Netzinfrastruktur, um eine sichere, wirtschaftliche und nachhaltige Energieversorgung zu gewährleisten. Der erforderliche Netzausbau wird in der langfristigen Netzentwicklungsplanung ermittelt, welche durch vielfältige Einflussfaktoren und zahlreiche Prozessschritte charakterisiert ist. Der letzte Planungsschritt, die Ableitung des notwendigen Ausbaubedarfs, erfolgt überwiegend auf Basis von Expertenwissen ohne Anwendung automatisierter Verfahren. Folglich ist das Planungsergebnis im Hinblick auf Transparenz, Objektivität und Optimalität zu hinterfragen.

In dieser Arbeit wird eine optimierungsgestützte Modellumgebung zur automatisierten Bestimmung des notwendigen Netzausbaubedarfs entwickelt. Diese enthält sowohl mathematische Modelle zur Lösung des Netzplanungsproblems als auch Verfahren zur Reduzierung der Problemkomplexität. In der Folge können realitätsnahe Planungsprobleme gelöst werden, wie durch einen detaillierten Anwendungsfall auf das deutsche Übertragungsnetz demonstriert wird. Exemplarisch werden die Vorteile des automatisierten Ansatzes im Hinblick auf Sensitivitätsbetrachtungen dargestellt, indem die Auswirkungen verschiedener Nutzungsgrade netzbetrieblicher Freiheiten auf den Netzausbaubedarf analysiert werden.

Abstract

Due to changing transmission demands, the electrical transmission system requires expansion in order to guarantee a secure, economically efficient and sustainable energy supply. The planning of this network expansion is characterized by a variety of factors and numerous process steps. The last planning step, identification of the necessary expansion measures, is mainly based on human expert knowledge without the application of automated methods. Thus, it becomes necessary to scrutinize the transparency, objectivity and optimality of the planning result.

Within the underlying thesis, an optimization-based model environment is developed for the automated determination of the necessary network expansion. It contains models for the solution of the planning problem as well as procedures for the reduction of the problem complexity. Subsequently, realistic planning problems can be solved, as is demonstrated in a detailed use case on the German transmission grid. The advantages of the automated approach with regards to sensitivity considerations are exemplarily shown by analyzing the effects of different approaches to transmission system operations on the network expansion.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Kurzfassung und Abstract	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielstellung	3
1.3 Inhalt und Struktur der Arbeit	4
2 Analyse der Problemstellung	7
2.1 Langfristige Übertragungsnetzausbauplanung	7
2.1.1 Planungsprozess in Deutschland	8
2.1.2 Angewandte Verfahren zur Ermittlung des Ausbaubedarfs .	13
2.2 Stand der Forschung	19
2.2.1 Modellbasierte Netzausbauplanung	19
2.2.2 Ansätze zur Reduktion der Eingangsdaten	29
2.3 Ableitung des Forschungsbedarfs	32
3 Modellumgebung	35
3.1 Übersicht	35
3.1.1 Spezifisches Planungsproblem und Lösungsansatz	35
3.1.2 Mathematische Beschreibung der Eingangsdaten	38
3.2 Module zur Ausbauplanung	42
3.2.1 Betriebsoptimierung	42
3.2.2 Ausbauoptimierung	49
3.3 Module zur Komplexitätsreduktion	56
3.3.1 Netzsituationswahl	57
3.3.2 Engpassanalyse	62
3.3.3 Netzreduktion	68
4 Anwendung	83
4.1 Benchmarknetz	83
4.1.1 Szenariobeschreibung	84
4.1.2 Ergebnisse	87
4.1.3 Diskussion der Ergebnisse	103
4.2 Deutsches Übertragungsnetz 2030	105
4.2.1 Szenariobeschreibung	105
4.2.2 Ergebnisse	116

4.2.3	Diskussion der Ergebnisse	128
5	Resümee	131
5.1	Zusammenfassung	131
5.2	Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf	134
	Literaturverzeichnis	137
	Symbolverzeichnis	153
	Anhang A: Inhaltliche Ergänzungen	157
	Anhang B: Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	165
	Anhang C: Lebenslauf	169