

Helge Pluntke

Designkriterien für Elektrizitätsübertragungsnetze mit hohem Anteil erneuerbarer Erzeugung

Band 13

Designkriterien für Elektrizitätsübertragungsnetze mit hohem Anteil erneuerbarer Erzeugung

vom

Fachbereich für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing Helge Wolfgang Pluntke
geb. in Schönebeck (Elbe)

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Juli 2021
Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr. rer. nat Marco Rahm

Prüfungskommission:
Vorsitz: Prof. Dr. habil. Ping Zhang
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Albert Moser

D386

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und
Energiemanagement

Band 13

Helge Pluntke

**Designkriterien für Elektrizitätsübertragungsnetze
mit hohem Anteil erneuerbarer Erzeugung**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8191-6

ISSN 2366-4967

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement der Technischen Universität Kaiserslautern und wurde während meiner anschließenden Beschäftigung als Projektleiter Netzstrategie der e-netz Süd Hessen AG in Darmstadt zu Ende geführt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow, für die exzellente Betreuung dieser Arbeit und die damit verbundenen hilfreichen Diskussionen, Anregungen und Hinweise. Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Moser danke ich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats und seine äußerst hilfreichen Anmerkungen zu dieser Arbeit. Frau Prof. Dr. habil. Zhang danke ich für die Wahrnehmung des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen an der TU Kaiserslautern für die stets vertrauensvolle und motivierende Zusammenarbeit beim Aufbau des Lehrstuhls und seiner erfolgreichen Etablierung in den Bereichen Forschung und Lehre. Ebenso danke ich meinen Kollegen von der e-netz Süd Hessen AG und insbesondere meinem Vorgesetzten Dr.-Ing. Markus Brandl für die wertvollen Anregungen und Hinweise, die sich aus vielen Gesprächen abseits des Tagesgeschäfts für diese Arbeit ergeben haben.

Die Idee zu dieser Arbeit entstand in Folge der VDE ETG-Studie „Energiespeicher für die Energiewende“ als lehrstuhlinternes Forschungsprojekt. Die angewandten Modelle und Verfahren wurden im Rahmen zahlreicher studentischer Arbeiten entwickelt. Für ihren unglaublichen Fleiß und ihre Kreativität möchte ich mich ausdrücklich bei Robert Epp, Christoph Berg und Arnel Touembou Weme (Netzmodell), Lena Kuhn (Szenario 2050), Jan Reiff (Kraftwerkseinsatzplanung), Maximilian Heilmann und Marc Heck (Betriebsmitteldimensionierung) sowie Florian Diel und Robin Mautes (automatisierte Netzplanung) ganz herzlich bedanken.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern und Großeltern, die mich auf meinem Lebensweg stets unterstützt und den Grundstein für meinen Werdegang gelegt haben. Mein größter Dank gilt jedoch meiner Frau Dana, die mich auf dem langen Weg zur Promotion mit unglaublich viel Verständnis unterstützt und mir stets den Rücken freigehalten hat. Meiner Tochter Anna danke ich dafür, dass sie unsere Zukunft bereichert und die Zeit nicht langweilig werden lässt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Energiepolitische Rahmenbedingungen in Deutschland und Europa	1
1.2	Das deutsche Höchstspannungsnetz	2
1.2.1	Aufbau und Aufgaben	2
1.2.2	Treiber des Netzausbaus	4
1.2.3	Anforderungen an den Netzausbau	5
1.3	Designkriterien für Übertragungsnetze	6
1.3.1	Einordnung in den Planungsprozess	6
1.3.2	Motivation und Ziel der Arbeit	7
1.3.3	Aufbau der Arbeit	8
2	Methodischer Ansatz	11
2.1	Beschreibung des Gesamtprozesses	11
2.2	Verfahren zur Kraftwerks- und Speichereinsatzplanung	16
2.2.1	Energiewirtschaftliche Grundlagen	16
2.2.2	Speichereinsatzplanung	20
2.2.3	Vorläufige Kraftwerkseinsatzplanung	29
2.2.4	Finale Kraftwerkseinsatzplanung	31
2.3	Verfahren zur Zielnetzplanung	35
2.3.1	Eigenschaften des Netzausbauproblems	35
2.3.2	Mögliche Lösungsverfahren	37
2.3.3	Bewertung der Lösungsverfahren	40
2.3.4	Automatisierter Netzplanungsprozess	44
2.3.5	Erstellung von Ausbauplanreihen	54
3	Ausgangssituation der Netzplanung	57
3.1	Energiewirtschaftliches Szenario	57
3.1.1	Eigenschaften	57
3.1.2	Bruttostromverbrauch und Lastverlauf	58

3.1.3	Dargebotsabhängige Brutto-EE-Stromerzeugung und -Einspeiseverlauf	60
3.1.4	Kraftwerks- und Speichereinsatz	62
3.2	Vorbereitung der Netzberechnung	64
3.2.1	Beschreibung des Startnetzmodells	64
3.2.2	Regionalisierung der Lastverläufe	66
3.2.3	Regionalisierung der EE-Einspeiseverläufe	67
3.3	Resultierende Engpässe im Startnetzmodell	68
4	Dimensionierung der Netzbetriebsmittel	70
4.1	Drehstromfreileitungen	70
4.1.1	Vorteile gegenüber anderen Übertragungstechnologien	70
4.1.2	Stand der Technik und Entwicklungspotential	70
4.1.3	Investitions- und Betriebskosten	72
4.1.4	Auslegung des Drehstromfreileitungs-Typs	72
4.2	Hochspannungsgleichstromübertragung	74
4.2.1	Vorteile gegenüber der Drehstromhochspannungsübertragung	74
4.2.2	Stand der Technik und Entwicklungspotential	74
4.2.3	Investitions- und Betriebskosten	77
4.2.4	Auslegung der HGÜ-Typen	78
4.3	Gasisolierte Leitungen	81
4.3.1	Vorteile gegenüber klassischer Drehstromübertragung	81
4.3.2	Stand der Technik und Entwicklungspotential	81
4.3.3	Investitions- und Betriebskosten	82
4.3.4	Auslegung der GIL-Typen	83
4.4	Transformatoren und Schaltfelder	84
5	Ergebnisse der Zielnetzplanung	85
5.1	Vorbemerkung	85
5.2	Homogene Ausbaupläne aus automatisierter Netzplanung	85
5.2.1	Ausbauplan <i>AC_OHL_380kV</i>	85

5.2.2	Ausbauplan <i>DC_OHL_4GW</i>	88
5.2.3	Ausbauplan <i>DC_OHL_6GW</i>	90
5.2.4	Ausbauplan <i>DC_CBL_4GW</i>	92
5.2.5	Ausbauplan <i>DC_CBL_6GW</i>	94
5.2.6	Ausbauplan <i>GIL_4GW</i>	97
5.2.7	Ausbauplan <i>GIL_6GW</i>	99
5.2.8	Vergleich der homogenen Ausbaupläne	101
5.3	Kritische Würdigung der automatisierten Netzplanung.....	108
5.3.1	Einfluss des Betrachtungsgebiets auf das Planungsergebnis	108
5.3.2	Einfluss der PSO-Aktualisierungsvorschrift auf das Planungsergebnis	110
5.3.3	Einfluss der Zubaureihenfolge auf das Planungsergebnis.....	111
5.3.4	Einfluss der Test-NFF auf das Planungsergebnis	111
5.4	Homogene Ausbaupläne aus manueller Überarbeitung.....	112
5.4.1	Vorgehensweise	112
5.4.2	Ausbauplan <i>AC_OHL_380kV*</i>	114
5.4.3	Ausbauplan <i>DC_OHL_6GW*</i>	116
5.4.4	Ausbauplan <i>DC_CBL_6GW*</i>	118
5.4.5	Gesamtkosten	119
5.4.6	Fazit	121
5.5	Heterogene Ausbauplanreihen	121
5.5.1	Vorbemerkung	121
5.5.2	Ausbauplanreihe <i>DC_OHL_6GW*</i>	122
5.5.3	Ausbauplanreihe <i>DC_CBL_6GW*</i>	124
6	Ableitung von Designkriterien.....	127
7	Zusammenfassung.....	132
8	Literaturverzeichnis	136
9	Abbildungsverzeichnis	151
10	Tabellenverzeichnis	154

11	Formelzeichen und Nebenzeichen	156
12	Abkürzungsverzeichnis	159
13	Extended Abstract	162
13.1	Introduction	162
13.2	Methodological Approach	163
13.3	Initial Situation for Transmission System Planning	164
13.4	Dimensioning of Network Components	165
13.5	Expansion Planning Results	165
13.6	Design Criteria	166
14	Anhang	167
14.1	Ausgangssituation der Netzplanung	167
14.1.1	Herleitung der Bruttostromverbräuche	167
14.1.2	Herleitung der EE-Anteile	169
14.1.3	Herleitung der EE-Mixe	174
14.1.4	Herleitung des konventionellen Kraftwerks- und Speicherparks	185
14.1.5	Technische Details des Kraftwerks- und Speicherparks	186
14.1.6	Brennstoff- und CO ₂ -Preise	186
14.1.7	Szenario auf einen Blick	187
14.1.8	Detailbeschreibung des Startnetzmodells	189
14.1.9	Liste der Startnetzmaßnahmen	190
14.1.10	Karte der Bevölkerungsdichte Europas auf NUTS-2-Ebene	193
14.1.11	Karte des Onshore-Windpotentials Europas auf NUTS-2-Ebene	194
14.1.12	Karte des Photovoltaik-Potentials Europas auf NUTS-2-Ebene	195
14.1.13	Detailbeschreibung des Ausgangszustands im Startnetzmodell	196
14.2	Dimensionierung der Netzbetriebsmittel	197
14.2.1	Teilinvestitionskosten der DHÜ- und HGÜ-Freileitungstypen	197
14.2.2	Entwicklung der VSC-Investitionskostenfunktion	198
14.2.3	Teilinvestitionskosten HGÜ-Kabeltypen	199

14.2.4	Kostenbestandteile der GIL	201
14.2.5	Dimensionierung der Transformatoren und Schaltfelder	202
14.2.6	Technische Daten des Leitungstyps <i>AC_OHL_380kV</i>	204
14.2.7	Technische Daten des Leitungstyps <i>DC_OHL_4GW</i>	205
14.2.8	Technische Daten des Leitungstyps <i>DC_OHL_6GW</i>	206
14.2.9	Technische Daten des Leitungstyps <i>DC_CBL_4GW</i>	207
14.2.10	Technische Daten des Leitungstyps <i>DC_CBL_6GW</i>	208
14.2.11	Technische Daten des Leitungstyps <i>GIL_4GW</i>	209
14.2.12	Technische Daten des Leitungstyps <i>GIL_6GW</i>	210
14.3	Heterogene Ausbaupläne	211
14.3.1	Ausbauplanreihe <i>DC_OHL_6GW*</i>	211
14.3.2	Ausbauplanreihe <i>DC_CBL_6GW*</i>	222
15	Lebenslauf	233