

Bewertung von Netzausbauplänen in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung von betrieblicher Flexibilität und planerischen Unsicherheiten

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Master of Science
Jan Kellermann
aus Schwelm

Berichter: Universitätsprofessor Dr. Albert Moser
 Universitätsprofessor Dr. Markus Zdrallek

Tag der mündlichen Prüfung
11. Juli 2019

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	v
1 Einleitung	1
2 Analyse des Forschungsgegenstandes	9
2.1 Flexibilität und Flexibilitätseinsatz	9
2.2 Netzplanungsprozess in der Hochspannungsebene	10
2.2.1 Technische und wirtschaftliche Bewertung in der Netzplanung	12
2.2.2 Unsicherheiten im Netzplanungsprozess	14
2.3 Stand der Forschung	15
2.4 Ziel und Aufbau der Arbeit	18
3 Analyse der Einflussgrößen und Bewertungskriterien	19
3.1 Netznutzer in Verteilnetzen	19
3.1.1 Verbraucher und Speicher	19
3.1.2 Erzeugungsanlagen	22
3.1.3 Fazit für die Netzplanung in der Hochspannungsebene	24
3.2 Wechselwirkungen mit angrenzenden Netzen	25
3.2.1 Übertragungsnetz	25
3.2.2 Mittel- und Niederspannungsebene	27
3.2.3 Benachbarte Hochspannungsnetze	28
3.3 Technische Randbedingungen in Hochspannungsnetzen	28
3.3.1 Versorgungszuverlässigkeit	28
3.3.2 Stromgrenzwerte	29
3.3.3 Spannungsgrenzwerte	30
3.3.4 Kurzschlussströme und Schutzauslegung	31
3.3.5 Sternpunktbehandlung	31
3.4 Netzplanerische und netzbetriebliche Maßnahmen	33
3.4.1 Netzausbau und Netzverstärkung	33
3.4.2 Netzoptimierung	35
3.4.3 Auslegungsrelevante Situationen in der Netzplanung	40
3.5 Wirtschaftliche Bewertung von Netzausbauplänen	41
3.6 Anforderungen an die Modellierung und das Verfahren	43
4 Modellierung	45
4.1 Abgrenzung des Zeit- und Betrachtungsbereiches	45
4.2 Modellierung der elektrischen Netze	46
4.2.1 Hochspannungsnetz	46

4.2.2	Übertragungsnetz	47
4.2.3	Mittel- und Niederspannungsnetze	49
4.3	Modellierung der unsicheren Entwicklung der Netznutzung	51
4.4	Modellierung der Netznutzer	53
4.4.1	Verhalten der Netznutzer vor Flexibilitätäbruf	54
4.4.2	Flexibilität der Netznutzer	57
4.5	Modellierung des Netzbetriebs in der Planung	60
4.5.1	Randbedingungen im Netzbetrieb	61
4.5.2	Optimierungsmodell zur Abbildung des Flexibilitätseinsatzes	63
4.6	Wirtschaftliche Bewertung von Netzausbauplänen	72
5	Verfahren	75
5.1	Verfahrensübersicht	76
5.2	Auswahl kritischer und repräsentativer NNF	78
5.3	Simulation des Flexibilitätseinsatzes	81
5.3.1	Optimierung des Flexibilitätseinsatzes	81
5.3.2	Mengenbedingungen für den jährlichen Flexibilitätseinsatz	83
5.4	Szenarioübergreifende Bewertung im Planungszeitraum	86
5.5	Abschätzung der Folgewirkungen im Bewertungszeitraum	87
5.6	Kostenbewertung für einen Netzausbauplan	90
5.7	Verfahren zur Bestimmung von Netzausbauplänen	92
6	Exemplarische Untersuchungen	95
6.1	Eingangsdaten und Parametrierung der Szenarien	95
6.1.1	Szenarien für die Entwicklung der Versorgungsaufgabe	95
6.1.2	Netzmodell und Auswahl der Untersuchungsregionen	98
6.1.3	Berücksichtigte Ausbaumaßnahmen und Kostenparameter	101
6.2	Voruntersuchungen	102
6.2.1	Reduktion der Netznutzungsfälle	102
6.2.2	Vergleichmäßigung des Flexibilitätäbrufes im Jahresverlauf	103
6.2.3	Konvergenzverhalten bei Bewertung unter Unsicherheit	104
6.2.4	Bestimmung praxisnaher Netzausbaupläne	106
6.3	Bewertung von Netzausbaubedarf und Gesamtkosten bei Variation der Flexibilitätäberücksichtigung	108
6.3.1	Ausgestaltungsvarianten der Flexibilitätäberücksichtigung	108
6.3.2	Auswirkungen der Flexibilitätäberücksichtigung auf Ausbauentscheidungen und Kostenbestandteile	110
6.3.3	Auswirkung der Flexibilität auf Netzausbaubedarf und Gesamtkosten	114
6.3.4	Einfluss der Flexibilitätäsoptionen auf Einsatzkosten	119
6.3.5	Einfluss der Flexibilität auf Umsetzungszeitpunkte	121
6.3.6	Nutzen von Flexibilität bei Planung unter Unsicherheit	123
7	Zusammenfassung	127
8	Literaturverzeichnis	133

9 Veröffentlichungen	153
10 Studentische Arbeiten	157
Abbildungsverzeichnis	159
Tabellenverzeichnis	160
A Anhang	163
A.1 Kostenannahmen	163
A.2 Szenarien der Versorgungsaufgabe	164
A.3 Parameter der Betriebsmitteltypen	165
A.4 Überprüfung einer Verkabelung in HS-Netzen	166
A.5 Modellierung von Ladeprofilen	166