

# Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung von Wirkleistungsmargen im Übertragungsnetz

vom

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

der Technischen Universität Kaiserslautern

zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

M. Sc. Hendrik Acker

geb. in Ludwigshafen am Rhein

Tag der mündlichen Prüfung: 15.01.2016

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr.-Ing. Hans D. Schotten

Prüfungskommission

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. habil. Ping Zhang

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz

D386



Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und  
Energiemanagement

Band 2

**Hendrik Acker**

**Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung von  
Wirkleistungsmargen im Übertragungsnetz**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4311-2

ISSN 2366-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl „Energiesysteme und Energiemanagement“ der Technischen Universität Kaiserslautern.

Ich bedanke mich bei Prof. Wolfram H. Wellßow für die Möglichkeit zur Promotion an seinem Lehrstuhl und die vielen Hinweise und Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit.

Zusätzlich möchte ich mich bei Herrn Joachim Vanzetta und seinem Team dafür bedanken, dass ich von ihrer Erfahrung in der Netz- und Systemführung profitieren durfte und mir im Rahmen des gemeinsamen Projektes viele wichtige Einblicke in die Praxis ermöglicht wurden.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl „Energiesysteme und Energiemanagement“ möchte ich für die gute und kollegiale Zusammenarbeit danken. In besonderem Maße gilt mein Dank Herrn Sönke Loitz für die vielen Stunden des Gedankenaustausches und der Diskussionen.

Abschließend bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich zu jeder Zeit und in allen Bereichen unterstützt haben und immer eine Quelle meiner Motivation waren.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Ziel und Gliederung der Arbeit.....	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Grundlagen zur Systemführung im Übertragungsnetz.....	5
2.1.1	Aufbau und Funktion des Übertragungsnetzes .....	5
2.1.2	Aufgaben der Systemführung.....	6
2.1.3	Netzsicherheitsrechnung .....	8
2.2	Stabilität in Übertragungsnetzen.....	12
2.2.1	Klassifizierung der Stabilitätsarten.....	12
2.2.2	Polradwinkelstabilität .....	12
2.2.3	Frequenzstabilität.....	13
2.2.4	Spannungsstabilität .....	13
2.3	Verfahren zur Untersuchung der Spannungsstabilität.....	16
2.3.1	Einordnung der verschiedenen Verfahren.....	16
2.3.2	Arbeitspunktbasierende Verfahren .....	18
2.3.2.1	Berechnung von Indizes auf Basis des Spannungsabfalls .....	18
2.3.2.2	Berechnung von Indizes auf Basis von Sensitivitäten.....	19
2.3.2.3	Berechnung eines Indexes auf Basis der MW/MVar Verluste ..	20
2.3.3	Auslenkungsbasierende Verfahren .....	21
2.3.3.1	Leistungsflussbasierte P/V-Analyse.....	21
2.3.3.2	Leistungsflussbasierte Q/V-Analyse .....	22
2.3.3.3	Continuation Power Flow .....	23
2.3.3.4	Einsatz von Optimierungsverfahren.....	24
2.4	Anforderungen an ein Werkzeug zur Überwachung des Systemzustandes .....	25
<b>3</b>	<b>Erweiterung der Netzsicherheitsrechnung um ein Verfahren zur Bestimmung der Wirkleistungsmargen im Übertragungsnetz</b>	<b>27</b>
3.1	Motivation zur Bestimmung der Wirkleistungsmargen .....	27
3.2	Definition eines Systemzustandsmodells .....	28
3.3	Modellierung relevanter Systemkomponenten .....	32
3.3.1	Netzelemente .....	32
3.3.2	Benachbarte Netze .....	33
3.3.3	Unterlagerte Netze .....	33
3.3.4	Konventionelle Erzeugungseinheiten .....	35
3.3.5	Erneuerbare Erzeugungseinheiten .....	38
3.3.6	Nachbildung des Schutzkonzeptes .....	38

3.4	Bestimmung von Wirkleistungsmargen mit der P/V-Analyse.....	39
3.4.1	Funktionsweise der P/V-Analyse.....	39
3.4.2	Prinzipieller Ablauf des Verfahrens.....	40
3.5	Bildung von Regionen.....	41
3.6	Modellierung eines Leistungsaustauschs.....	42
3.6.1	Das Prinzip des Leistungsaustauschs.....	42
3.6.2	Varianten der P/V-Analyse.....	44
3.6.3	Simulation eines ungerichteten Leistungsaustauschs.....	45
3.6.4	Simulation eines gerichteten Leistungsaustauschs.....	47
3.7	Präsentation der Ergebnisse.....	48
3.8	Reduktion des Rechenaufwandes.....	52
3.8.1	Notwendigkeit.....	52
3.8.2	Identifizierung von Optionen.....	53
3.8.3	Beschreibung der Optionen.....	53
3.8.3.1	Elimination von nicht benötigten Rechnungen.....	53
3.8.3.2	Reduktion von Ausfallsituationen durch Vorauswahl.....	56
3.8.3.3	Reduktion der Anzahl untersuchter Regionen.....	58
3.8.3.4	Wahl der Abbruchkriterien.....	58
3.8.3.5	Wahl der Schrittweite.....	59
3.8.3.6	Parallelisierung.....	59
3.8.3.7	Optimierte Implementierung.....	60
<b>4</b>	<b>Simulationsrechnungen mit der P/V-Analyse</b>	<b>67</b>
4.1	Verifikation der P/V-Analyse als Werkzeug zur Ermittlung von Wirkleistungsmargen.....	67
4.1.1	Vorgehensweise und Beschreibung des verwendeten Netzmodells.....	67
4.1.2	Event-Graph der Ergebnisse.....	68
4.1.3	Detaillierte Auswertung.....	69
4.1.3.1	Szenario 1.....	69
4.1.3.2	Szenario 2.....	71
4.1.3.3	Szenario 3.....	73
4.1.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	75
4.2	Anwendung der P/V-Analyse auf ein großes Netzmodell.....	75
4.2.1	Beschreibung des verwendeten Netzmodells.....	75
4.2.2	Simulation eines ungerichteten Leistungsaustauschs.....	77
4.2.2.1	Übersicht über die Ergebnisse.....	77
4.2.2.2	Ergebnisse der Simulation eines Wirkleistungsimports der Region 15.....	78
4.2.2.3	Ergebnisse der Simulation eines Wirkleistungsexports der Region 3.....	80

4.2.2.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse der Simulation.....	82
4.2.3	Simulation eines gerichteten Leistungsaustauschs .....	83
4.2.3.1	Übersicht über die Ergebnisse für Region 3 .....	83
4.2.3.2	Betrachtung des Leistungsaustauschs von Region 3 nach Region 17.....	85
4.2.3.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse .....	87
4.2.4	Variation der Schrittweite .....	88
4.3	Untersuchung einer gleichzeitigen Veränderung mehrerer Regionen .....	89
4.3.1	Ziel der Untersuchung und Eingangshypothese .....	89
4.3.2	Vorgehensweise.....	90
4.3.3	Ergebnisse der Untersuchungen an Region 1 .....	90
4.3.4	Ergebnisse der Untersuchungen an Region 3 .....	92
4.3.5	Ergebnisse der Untersuchungen an Region 17.....	94
4.3.6	Fazit der Untersuchung .....	95
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>97</b>
5.1	Erfüllung der Anforderungen .....	97
5.2	Rechenzeit der P/V-Analyse.....	98
5.3	Vergleich zwischen ungerichtetem und gerichtetem Leistungsaustausch .....	99
5.4	Räumliche Korrelation des Prognosefehlers der Erzeugung aus EE .....	100
5.5	Größe der gebildeten Regionen .....	101
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>103</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>119</b>
<b>10</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>122</b>
<b>11</b>	<b>Liste der Formelzeichen und Indizes</b>	<b>123</b>
11.1	Formelzeichen.....	123
11.2	Indizes .....	124
<b>12</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>125</b>
<b>13</b>	<b>Anhang</b>	<b>127</b>
13.1	Details zum Netzmodell für die Verifikation der P/V-Analyse.....	127
13.2	Simulationsergebnisse der gleichzeitigen Veränderung mehrerer Regionen.....	128