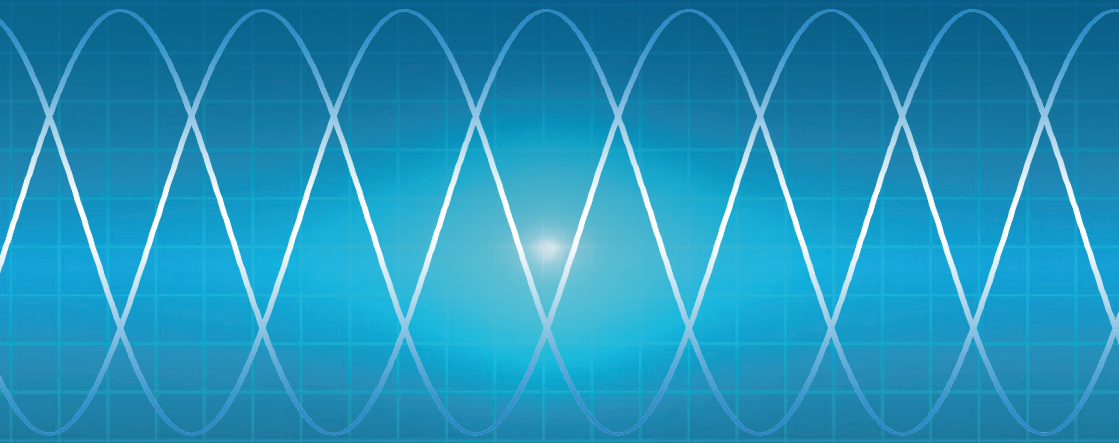
ES+EM Forschungsberichte
Lehrstuhl für Energiesysteme
und Energiemanagement

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow

Philipp Hinkel

Innovative Awareness- und Decision-Support-Tools für Control-Center-Anwendungen bei stark gestörten Netzzuständen

Band 10



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Innovative Awareness- und Decision-Support-Tools für Control-Center-Anwendungen bei stark gestörten Netzzuständen

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

von
Dipl.-Ing. Philipp Hinkel
geb. in Worms

Tag der mündlichen Prüfung:	14.12.2020
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky
Prüfungskommission:	
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Götz
1. Berichterstattender:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow
2. Berichterstattender:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik

D386

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiemanagement

Band 10

Philipp Hinkel

Innovative Awareness- und Decision-Support-Tools für Control-Center-Anwendungen bei stark gestörten Netzzuständen

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., 2020

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 978-3-8440-7834-3
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 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow, für die konstruktive Betreuung der Arbeit, seine methodischen und analytischen Hinweise, Anregungen und Diskussionen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik danke ich für die Übernahme des Koreferats und die hervorragende Zusammenarbeit im gemeinsamen Forschungsprojekt „RestoreGrid4RES“.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl danke ich für die harmonische und kollegiale Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an die Kollegen des TSO-Teams, die durch ihre fachliche Expertise zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Die wesentlichen Inhalte der Arbeit sind im Rahmen von Forschungsprojekten erstellt worden. Allen beteiligten Projektpartnern der Amprion GmbH, der Netz Oberösterreich GmbH, der KNG-Kärnten Netz GmbH, der Westnetz GmbH und der TU Wien danke ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit. Ebenfalls möchte ich mich bei den Mitarbeitern der DUtrain GmbH, insbesondere bei Andreas, ausdrücklich bedanken, die mich immer tatkräftig unterstützt haben.

Zudem freue ich mich im Schwimm- und Triathlon-Team der Technischen Universität Kaiserslautern viele Freunde und einen sportlichen Ausgleich gefunden zu haben.

Darüber hinaus möchte ich meinen Eltern, Birgita und Bernd, meinem Bruder Andreas und meinen Freunden ganz besonders danken, die mittelbar einen Beitrag zur Erstellung der Arbeit leisteten, indem sie mich während meiner gesamten Promotion unterstützt haben.

Schließlich bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner Frau Luisa, die mich jeden Tag zum Lachen bringt.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation und Problemstellung 1
1.2 Ziel der Arbeit 4
1.3 Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit 4

2 Netzwiederaufbau **7**
2.1 Netzzustände 7
2.2 Blackout-Mechanismus und Störungsszenarien 9
2.2.1 Blackout-Mechanismus 9
2.2.2 Störungsszenarien 10
2.3 Physikalische Phänomene und technische Herausforderungen im Netzwiederaufbau 11
2.3.1 Überblick 11
2.3.2 Spannungs- und Stromphänomene 11
2.3.3 Frequenzphänomene 12
2.3.4 Technische Herausforderung von Betriebsmitteln 14
2.3.5 Netzschutz 15
2.4 Netzwiederaufbaustrategien und -konzepte 15
2.4.1 Basisstrategien 15
2.4.2 Ergänzende Strategien 18
2.5 Ablauf eines Netzwiederaufbaus 20

3 Control Center Tools für den Netzwiederaufbau **23**
3.1 Stand der Technik 23
3.2 Aufbau und Ziele 24
3.3 Awareness-Tool 25
3.3.1 Aufbau, Ziele und Anforderungen 25
3.3.2 Berechnung der Netzkenngrößen 26
3.3.2.1 Frequenzstabilität 26
3.3.2.1.1 Einführung 26
3.3.2.1.2 Statische Frequenzstabilität 26
3.3.2.1.3 Dynamische Frequenzstabilität 27

3.3.2.1.4 Analyse der Frequenzstabilität 33
3.3.2.2 Maximal zulässige Laständerung 36
3.3.2.3 Maximal zulässige negative Residuallaständerung 37
3.3.2.4 Strangknoten 37
3.3.2.5 Wirkleistungsflexibilitätsdiagramm 39
3.3.2.6 Wiederversorgungsgrade 40
3.3.2.7 Betriebsmittelübersicht 41
3.3.3 Security-Check 41
3.4 Decision-Support-Tool 42
3.4.1 Aufbau, Ziele und Anforderungen 42
3.4.2 Autonome Handlungskategorien 44
3.4.2.1 Übersicht 44
3.4.2.2 Wiederversorgung von Residuallasten 47
3.4.2.3 Frequenzrückführung 53
3.4.2.4 Vorbereitung von Wirkleistungsbereitstellung 55
3.4.2.5 Spannungsoptimierung 57
3.4.2.6 Erhöhung der Blindleistungsreserven 60
3.4.2.7 Netzvermaschung 63
3.4.2.8 Spannungsfortschaltung 67
3.4.2.9 Zielvorgabe 69
3.4.2.10 Synchronisation eigener Inseln 70
3.4.2.11 Startnetze 73
3.4.2.11.1 Konzeptgemäße Startnetze 73
3.4.2.11.2 Berechnung alternativer Startnetze 73
3.4.3 Interaktionen 76
3.4.3.1 Übersicht 76
3.4.3.2 Spannungsvorgabe 78
3.4.3.3 Synchronisation 80
3.4.3.4 Netzvermaschung 84
3.4.4 Minimum-Regret-Bewertungsprinzip 87

4 Verifizierung und Validierung der Tools 91
4.1 Simulationsumgebung 91
4.1.1 Aufbau 91
4.1.2 Simulationsmodelle 92
4.1.2.1 Mitteleuropäisches Übertragungsnetzmodell 92

4.1.2.2 Verteilnetzmodelle 95
4.1.2.2.1 KNG-Kärnten Netz GmbH 95
4.1.2.2.2 Netz Oberösterreich GmbH 96
4.1.3 DUtrain Power System Handler 97
4.1.4 Prototypische Implementierung der Tools 98
4.1.4.1 Awareness-Tool 98
4.1.4.2 Decision-Support-Tool 99
4.2 Verifizierung 102
4.2.1 Methodik 102
4.2.2 Testszenario zur Detailanalyse 103
4.2.3 Simulationsergebnisse 103
4.3 Validierung 112
4.3.1 Zielstellung 112
4.3.2 Theoretische Grundlagen 112
4.3.2.1 Qualitativ-induktive und quantitativ-deduktive Forschung 112
4.3.2.2 Deskriptiv- und Inferenzstatistik 113
4.3.2.3 Stichprobenarten 113
4.3.2.4 Methoden der Datenerhebung 114
4.3.2.5 Fragen- und Antwortformate 114
4.3.2.6 Skalenniveaus 114
4.3.3 Entwicklung der Nutzerumfrage 115
4.3.3.1 Allgemeine Fragen 115
4.3.3.2 Fragen zum Awareness-Tool 116
4.3.3.3 Fragen zum Decision-Support-Tool 117
4.3.4 Durchführung der Nutzerumfrage 118
4.3.4.1 Teilnehmende und Testszenarien 118
4.3.4.2 Durchführungsrahmen 119
4.3.5 Auswertung der Nutzerumfrage 119
4.3.5.1 Methodik 119
4.3.5.2 Charakterisierung der Teilnehmenden 120
4.3.5.3 Bewertung des Awareness-Tools 120
4.3.5.4 Bewertung des Decision-Support-Tools 121
4.3.5.5 Fazit 125

5 Zusammenfassung und Ausblick 127

Literaturverzeichnis **133**

Abbildungsverzeichnis **143**

Tabellenverzeichnis **147**

Abkürzungsverzeichnis **149**

Symbolverzeichnis **151**

Extended Abstract **157**

Introduction 157

Power system restoration 158

Control center tools for power system restoration 159

Verification and validation of the tools 162

Summary and outlook 163

Anhang **165**

Veröffentlichungen **175**

Studentische Arbeiten **177**

Lebenslauf **179**