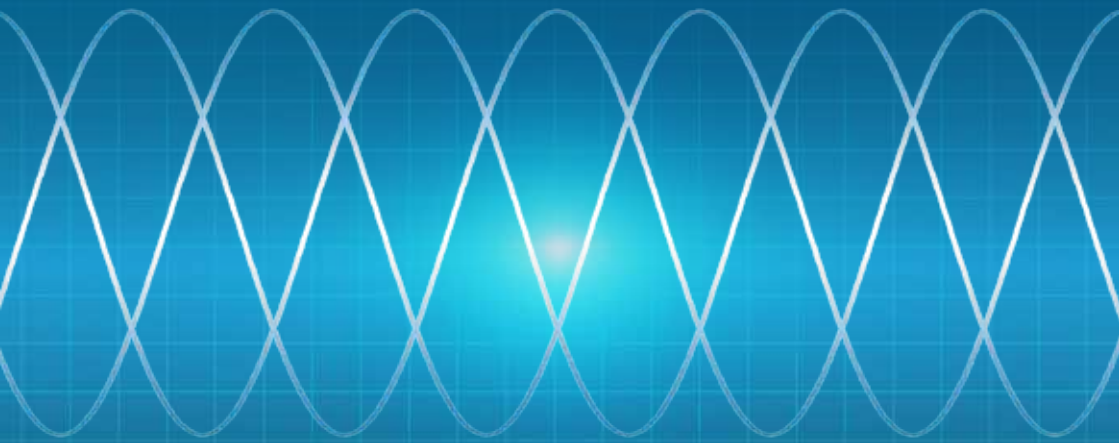
ES+EM Forschungsberichte
Lehrstuhl für Energiesysteme
und Energiemanagement

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

Dominik Wäresch

Entwicklung eines Verfahrens zur dreiphasigen Zustands-schätzung in vermaschten Niederspannungsnetzen

Band 4



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Entwicklung eines Verfahrens zur dreiphasigen Zustandsschätzung in vermaschten Niederspannungsnetzen

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

von
M. Sc. Dominik Michael Wäresch
geb. in Schwetzingen

Tag der mündlichen Prüfung:	29. Januar 2018
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky
Prüfungskommission:	
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
1. Berichterstattender:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow
2. Berichterstattender:	Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek

D386

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiemanagement

Band 4

Dominik Wäresch

Entwicklung eines Verfahrens zur dreiphasigen Zustandsschätzung in vermaschten Niederspannungsnetzen

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5828-4
ISSN 2366-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit sowie viele wertvolle Hinweise, Anregungen und Diskussionen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek danke ich für die Übernahme des Koreferats und das Interesse an meiner Arbeit.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement danke ich für die harmonische Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht dabei an Herrn Robert Brandalik für die zahlreichen gewinnbringenden Gespräche und das freundschaftliche Miteinander. Weiterhin danke ich allen Studenten und im besonderen Maße den Herren Daniel Henschel und Philipp Maïno, die mit ihrem Engagement maßgeblich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Wesentliche Inhalte der Arbeit sind im Rahmen des Forschungsprojektes *SmartSCADA* erstellt worden. Den Beteiligten der Projektpartner IDS GmbH, SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG, COMback GmbH sowie meteocontrol GmbH danke ich für die erfolgreiche und stets freundliche Zusammenarbeit.

Ein großer Dank gebührt meinen Eltern, die mich in jeder Hinsicht auf meinem Lebensweg gefördert und unterstützt haben. Bei Herrn Ramon Meyer bedanke ich mich für die unzähligen Stunden des Austausches und dafür, dass ich mich immer auf ihn verlassen kann. Meinem Schwiegervater, Herrn Andreas Sange, danke ich des Weiteren für den unermüdlichen tatkräftigen und moralischen Beistand.

Schließlich bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner Frau Carolin, die mir während meines Studiums und bei der Erstellung dieser Arbeit auch in schwierigsten Zeiten mit viel Liebe, Zuversicht und Verständnis beistand. Meinem Sohn Jonas danke ich dafür, dass er mir mit seinem Lachen jeden Tag aufs Neue Kraft schenkt und mich das wirklich Wichtige im Leben erkennen lässt.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Herausforderungen des Niederspannungs-Netzbetriebes 1
1.2 Erfassung von Netzbetriebsgrößen in Niederspannungsnetzen 3
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit 5

2 Grundlagen und Stand der Technik **7**
2.1 Aufbau und Betrieb von Niederspannungsnetzen 7
2.1.1 Allgemeine Netzmerkmale 7
2.1.2 Netzbetriebsmittel 7
2.1.2.1 Ortsnetzstationen 7
2.1.2.2 Niederspannungsleitungen 8
2.1.2.3 Überstrom-Schutzeinrichtungen 9
2.1.2.4 Endverschlüsse und Kabelmuffen 9
2.1.2.5 Kabelverteilerschränke 10
2.1.2.6 Hausanschlusskästen und Hauptverteilungen 10
2.1.3 Netztopologien 10
2.1.4 Netzform in Niederspannungsnetzen 11
2.1.5 Charakteristiken des Netzbetriebes 12
2.1.6 Mathematische Netznachbildung 13
2.1.6.1 Knotenadmittanzmatrix 13
2.1.6.2 Vereinfachte Bestimmung der komplexen Netzknotenspannungen 16
2.1.6.3 Verfahren der symmetrischen Komponenten 17
2.1.6.4 Ersatzschaltbild von Niederspannungsleitungen 19
2.1.6.5 Mathematische Nachbildung des Gesamtnetzes 21
2.2 Erfassung von Netzbetriebsgrößen durch Smart Meter 21
2.2.1 Aufbau, Funktionsweise und Eigenschaften von Smart Metern . 21
2.2.2 Übertragung von Smart-Meter-Messdaten 22
2.3 Grundlagen der Zustandsschätzung 23
2.3.1 Aufgaben der Netzzustandsschätzung 23
2.3.2 Netzzustandsschätzung als Optimierungsproblem 24
2.3.3 Mess- und Ersatzwertarten 25

2.3.4 Arten und Eigenschaften von Zustandsschätzverfahren 26
2.3.4.1 Weighted-Least-Square-Normalform 26
2.3.4.2 Augmented-Matrix-Verfahren 27
2.3.5 Grundlagen der Bad-Data-Erkennung 29
2.4 Entwicklungsstand von Verteilnetz-Zustandsschätzsystemen 30
2.4.1 Allgemeine Erfassung von Netzbetriebsgrößen in Verteilnetzen 30
2.4.2 Zustandsschätzsysteme in Mittelspannungsnetzen 31
2.4.3 Systeme zur Netzgrößenbestimmung in Niederspannungsnetzen 33

3 Netzzustandsschätzkonzept auf Basis von Smart-Meter-Daten 35
3.1 Anforderungen der Niederspannungs-Netzzustandsschätzung 35
3.2 Festlegung und Genauigkeit der Systemausgangsgrößen 37
3.2.1 Ergebnisgrößen der Netzzustandsschätzung 37
3.2.2 Perspektivische Genauigkeit der Netzzustandsschätzergebnisse 38
3.2.2.1 Annahmen zur Ermittlung der Schätzgenauigkeit 38
3.2.2.2 Genauigkeit bei stochastischen Messfehlern 38
3.2.2.3 Genauigkeit bei systematischen Mittelwertbildungsfehlern 40
3.2.2.4 Gesamtgenauigkeit 41
3.3 Auswahl verfügbarer Systemeingangsgrößen 42
3.4 Entwicklung eines Messkonzeptes 44
3.5 Grundprozess des Netzzustandsschätzsystems 47

4 Vorverarbeitung der Systemeingangsdaten 49
4.1 Plausibilisierung von Mess- und Prognosedaten 49
4.2 Prozess zur Gewinnung von Ersatzmesswerten 50
4.2.1 Grundlagen der Ersatzmesswerte 50
4.2.2 Ersatzmesswerte für Ortsnetzstationen 50
4.2.3 Ersatzmesswerte für Photovoltaikanlagen 51
4.2.3.1 Allgemeiner Prozess der Ersatzmesswertermittlung . . . 51
4.2.3.2 Bestimmung der zeitlich maximalen Einspeiseleistung . 52
4.2.3.3 Berücksichtigung der aktuellen Wetterverhältnisse 53
4.2.3.4 Nachbildung des Blindleistungsverhaltens von Erzeugungsanlagen 54
4.2.3.5 Berücksichtigung von Einspeisebegrenzung, Einspeisemanagement und Speichereinsatz 54
4.2.3.6 Spannungs- und Stromersatzwerte von Erzeugungsanlagen 55

4.2.4 Ersatzmesswerte für Haushaltslasten 57
4.2.5 Näherungsweise Vorbestimmung von Spannungswinkeln 58
4.3 Topologiefehler-Lokalisierung 59
4.3.1 Typen und Auswirkungen von Topologiefehlern 59
4.3.2 Basismethoden zur Lokalisierung von Topologiefehlern 61
4.3.3 Knotenspannungsanalyse zur Topologiefehler-Lokalisierung . . 62
4.3.3.1 Beschreibung von Spannungsbetragsdifferenzen 62
4.3.3.2 Charakteristiken von Spannungsbetragsdifferenzen . . . 64
4.3.3.3 Überprüfung galvanischer Verbindungen 66
4.3.3.4 Gesamtprozess zur Topologiefehler-Lokalisierung 68

5 Algorithmus zur dreiphasigen Netzzustandsschätzung 71
5.1 Bereitstellung und Strukturierung der Eingangsdaten 71
5.1.1 Spannungs- und Stromgrößen in Leitergrößen 71
5.1.2 Eingangsgrößen in symmetrischen Komponenten 72
5.2 Mathematische Beschreibung des Optimierungsproblems 73
5.2.1 Optimierung auf Basis des Augmented-Matrix-Ansatzes 73
5.2.2 Aufbau der Elemente beim Augmented-Matrix-Ansatz 74
5.3 Analyse der Netzbeobachtbarkeit und Ersatzwertnutzung 79
5.4 Lösung des linearen Optimierungsproblems 79
5.5 Lokalisierung und Behandlung grob falscher Messwerte 80
5.5.1 Bestimmung der normierten Residuen in Leitergrößen 80
5.5.2 Bad-Data-Detektions- und Behandlungsprozess 82
5.6 Bereitstellung der Systemausgangsdaten 83
5.7 Gesamtprozess zur Netzzustandsermittlung 84

6 Simulative Systemverifikation 85
6.1 Prozess der simulativen Systemverifikation 85
6.2 Struktur und Eigenschaften des Testnetzes 86
6.3 Allgemeiner Testdatensatz 88
6.4 Lokalisierung von Topologiefehlern 89
6.4.1 Testspezifikation und Simulationsdurchführung 89
6.4.2 Testergebnisse zur Topologiefehler-Lokalisierung 92
6.4.2.1 Erkennung von Leiterunterbrechungen 92
6.4.2.2 Lokalisierung von Leitervertauschungen 95
6.4.3 Ergebnisbewertung 95

6.5 Ermittlung des Netzzustandes 95
6.5.1 Testspezifikation und Simulationsdurchführung 95
6.5.2 Testergebnisse und Ergebnisbewertung 96
6.6 Erkennung grob falscher Messwerte 97
6.6.1 Allgemeine Testspezifikation und Simulationsdurchführung . . 97
6.6.2 Bestimmung von Bad-Data-Erkennungsgrenzen 98
6.6.3 Erkennungskriterium grober Stromgrößen-Messfehler 102
6.6.4 Einfluss des Netzzustands auf die Erkennung grob falscher Messfehler 103
6.6.5 Erkennung von ein- und mehrfach grob falschen Messfehlern . 105
6.6.6 Ergebnisbewertung 108

7 Funktionstest im realen Netzbetrieb 109
7.1 Systemintegration und allgemeine Testziele 109
7.2 Lokalisierung von Topologiefehlern 110
7.2.1 Testspezifikation und Vorgehensweise 110
7.2.2 Testergebnisse und Ergebnisbewertung 111
7.3 Ermittlung des Netzzustands 112
7.3.1 Testspezifikation und Vorgehensweise 112
7.3.2 Testergebnisse und Ergebnisbewertung 113
7.4 Erkennung grob falscher Messwerte 114
7.4.1 Testspezifikation und Vorgehensweise 114
7.4.2 Testergebnisse und Ergebnisbewertung 115

8 Zusammenfassung 117

9 Literaturverzeichnis 121

10 Abbildungsverzeichnis 133

11 Tabellenverzeichnis 135

12 Abkürzungsverzeichnis 137

13 Verzeichnis der Variablen, Indizes und Symbole 139

14 Allgemeiner Anhang 145
14.1 Komplexe Stromgrößen im Zeigerdiagramm 145

14.2 Leitungsparameter von Niederspannungskabeln 147
14.3 Messgenauigkeit von Smart Metern 148
14.4 Ersatzmesswerte für Ortsnetzstationen 150
14.5 Zeitlich maximale Einspeiseleistung von Photovoltaikanlagen 154
14.6 Genauigkeit der Nachbildung von Photovoltaikanlagen 159
14.7 Netzverluste in teilvermaschten Niederspannungsnetzen 164
14.8 Statistische Analyse von Knotenspannungen 165
14.8.1 Verteilung der Spannungsbeträge 165
14.8.2 Ideale Korrelationskoeffizienten von Spannungsbeträgen 167
14.9 Strombetragsfehler in symmetrischen Komponenten 169
14.10 Standardabweichungen von Residuen in symmetrischen Komponenten 171

15 Mathematischer Anhang 175
15.1 Ermittlung der Residuen-Kovarianzmatrix 175
15.2 Auswirkung von Spannungsmessfehlern bei Zweigstromberechnungen 179
15.3 Messgenauigkeiten von berechneten Wirk- und Blindstromwerten . . . 182
15.3.1 Einführung in die Problematik 182
15.3.2 Wirk- und Blindstromgenauigkeit bei leiterbezogenen Leistungs- und Spannungsbetragsmessungen 182
15.3.3 Wirk- und Blindstromgenauigkeit bei aggregierten Werten für Blindleistungsimport und -export 186
15.4 Allgemeine Berechnung des Sonnenstandes nach DIN 5034 188
15.5 Phasenverschiebungswinkel-Fehler aufgrund von Messabweichungen 191
15.5.1 Mathematische Beziehungen für Phasenverschiebungswinkel-Fehler 191
15.5.2 Praktische Werte von Phasenverschiebungswinkel-Fehlern . . . 195
15.6 Messgenauigkeiten-Transformation in symmetrische Komponenten . . 196
15.6.1 Einführung in die Problematik 196
15.6.2 Messgenauigkeiten im Mitsystem 197
15.6.3 Messgenauigkeiten im Gegensystem 198
15.6.4 Messgenauigkeiten im Nullsystem 199
15.7 Verfahren zur Strombetrags-Linearisierung 200
15.8 Mathematische Herleitung der Messmodellmatrizen 202
15.8.1 Grundlagen 202
15.8.2 Messmodellmatrizen für Spannungsbetragsmessungen 203
15.8.3 Messmodellmatrizen für Wirk- und Blindstrommessungen . . . 204

15.8.4 Messmodellmatrizen für Strombetragsmessungen 205
15.9 Rücktransformation normierter Residuen in Leitergrößen 207

16 Anhang zur simulativen Systemvalidierung **209**
16.1 Validierung der Leiterunterbrechungs-Erkennung 209
16.2 Ermittlung der Güte der Netzzustandsschätzung 212
16.3 Test der Erkennung grob falscher Messfehler 214

17 English Summary **221**

18 Lebenslauf **225**