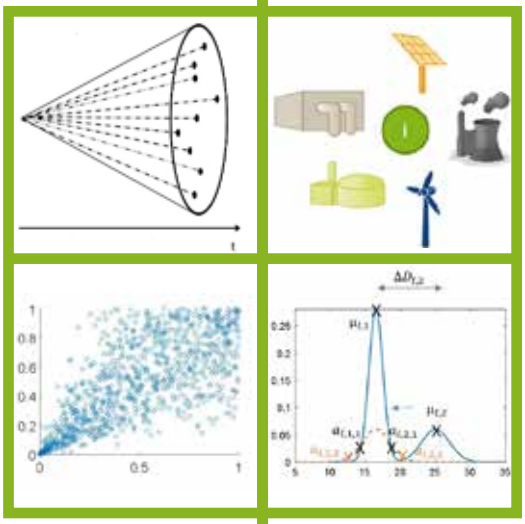
Marie-Louise Kloubert

# Probabilistische Modellierung zur Analyse des Einflusses unsicherer Eingangsgrößen auf das elektrische Übertragungsnetz

Band 11



Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen, Energieeffizienz und Energiewirtschaft

**Probabilistische Modellierung zur Analyse des Einflusses unsicherer Eingangsgrößen auf das elektrische Übertragungsnetz**

Von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von

Marie-Louise Kloubert, M. Sc.

aus Essen

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Januar 2019

Dortmunder Beitäge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz und
Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik

Band 11

**Marie-Louise Kloubert**

# Probabilistische Modellierung zur Analyse des Einflusses unsicherer Eingangsgrößen auf das elektrische Übertragungsnetz

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2019

**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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6597-8
ISSN 2567-2908

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

# Kurzfassung

Moderne Erzeuger und Verbraucher elektrischer Energie führen zu veränderten Lastflusssituationen im elektrischen Energienetz. Der Zubau von Erzeugungsanlagen und die resultierende - oftmals wetterabhängige - Energieerzeugung sind hierbei schwierig zu prognostizieren. Ebenso unterliegt auch die Entwicklung der Lastnachfrage großen Unsicherheiten. Die Investitionsentscheidungen zur Gewährleistung einer zuverlässigen Energieversorgung muss der Netzplaner daher unter Berücksichtigung dieser unsicheren Entwicklungen treffen. Übertragungsnetzbetreiber begegnen dieser Aufgabe typischerweise durch die Definition von drei oder vier Szenarien, in denen sie unterschiedliche installierte Leistungen je Erzeugungs- und Verbrauchstyp festlegen. Hieraus leiten sie für jedes Szenario je einen konkreten Erzeugungspark ab und ermitteln auf Basis von Klimadaten eines (zufällig gewählten) historischen Referenzjahres die zukünftigen Leitungsbelastungen im Netz. Aufgrund der Vielzahl von unsicheren Eingangsgrößen führt dieses Vorgehen zu einer unvollständigen Unsicherheitsbetrachtung und birgt so die Gefahr von Fehlinvestitionen.

Zur detaillierten Analyse der unsicheren Eingangsgrößen wird in dieser Arbeit daher ein probabilistisches Modell entwickelt, das die unsicheren Eingangsgrößen funktional abbildet und so die mathematische Bestimmung ihrer Auswirkungen auf das Netz ermöglicht. Der erste Baustein besteht aus einem gekoppelten Szenario-Copulamodell zur Abbildung der unsicheren Eingangsgrößen. Im Gegensatz zu bestehenden Untersuchungen wird bewusst eine Vielzahl von Szenarien erstellt und deren Realisationswahrscheinlichkeiten auf Basis des bestehenden Erzeugungsparks bestimmt. Im zweiten Modellbaustein wird darauf aufbauend eine neue approximative Lastflussrechnungsmethode entwickelt sowie eine Monte-Carlo-Simulation nach der Latin-Hypercube-Samplingmethode modelliert. Der Vergleich der Ergebnisse mit denen einer klassischen Monte-Carlo-Simulation zeigt, dass beide Verfahren sich zur Unsicherheitsanalyse eignen und gleichzeitig eine starke Reduktion der Anzahl an Rechenoperationen erlauben. Die approximative Lastflussrechnungsmethode wird im letzten Baustein des Modells zur Analyse der Auswirkungen unsicherer Eingangsgrößen verwendet und zur Bewertung vorgeschlagener Maßnahmen für den praxisbezogenen Anwendungsfall des deutschen Übertragungsnetzes im Jahr 2025 eingesetzt. Hierbei zeigt das Modell den signifikanten Einfluss bisher vernachlässigter unsicherer Eingangsgrößen - wie beispielsweise die regionale Verortung des Zu- und Rückbaus von Energienanlagen - auf.

# Abstract

New electrical energy producers and consumers evoke new load flow situations in the electrical energy grid. The expansion of new energy producers and their resulting - often weather depending - energy productions are difficult to forecast. Likewise, the development of the demand is extremely uncertain. Thus, the grid planners need to make investment decisions under these uncertain circumstances to ensure a reliable energy supply. Transmission system operators cope with this task by defining three or four scenarios, in which they fix the installed capacity for each producer and consumer type. Herefrom, they deduce a concrete generator park for each scenario and determine on the basis of historical climate data from one (randomly selected) reference year the expected future line loads on all lines. Due to the high amount of uncertain input variables this procedure leads to an incomplete analysis of uncertainty and possible unprofitable investments.

For a detailed analysis of the uncertain variables, a probabilistic model is developed to model the uncertain input data and the resulting load in the grid. Its first component is a coupled scenario-copula-model to represent the uncertain input variables. In contrast, to existing examinations a high amount of scenarios are consciously generated and the probability of realization is determined based on the existing generation park. In the second model block, a new approximate load flow method is developed and a Monte Carlo approach based on Latin Hypercube sampling is modelled. They are contrasted to a classical Monte Carlo approach and are valued to be qualified for the uncertainty analysis. They reduce the amount of needed calculations strongly. Then, the approximate method is used to analyse the influence of the uncertain input variables on the transmission grid for Germany as a test case for the year 2025 and to evaluate the measures in the last model block. The model demonstrates the significant influence of nowadays disregarded uncertain input variables as e.g. the regionalization of conventional and renewable power plants.

# Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie$^3$) an der TU Dortmund entstanden. Für die schönen und bereichernden Jahre möchte ich mich bei folgenden Personen bedanken:

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Christian Rehtanz, der mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben hat. Mit fachlichen Diskussionen und Ratschlägen stand er mir jederzeit beiseite und gab mir die Chance zur wissenschaftlichen Weiterentwicklung auf internationalen Fachkonferenzen und Forschungsaufenthalten. Für das mir entgegengebrachte Vertrauen bei der Bearbeitung von Studien und Forschungsprojekten sowie für die Freiheit, mich in meinem Forschungsschwerpunkt zu entfalten, möchte ich mich herzlich bedanken.

Vielen Dank auch an Herrn Professor Albert Moser, Leiter des Instituts für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen, für die intensive Auseinandersetzung mit meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Ein weiteres Dankeschön gilt Herrn Dr. Alexander Dürre, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät Statistik der TU Dortmund, für die konstruktiven Diskussionen und für die Durchsicht des Manuskripts.

Weiterhin möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen am ie$^3$ für die gute Zusammenarbeit danken sowie meiner Familie und Freunden für ihre Unterstützung. Insbesondere danke ich meinem Freund Maik für das geduldige Lesen meiner Veröffentlichungen und der Dissertationsschrift.

# Inhaltsverzeichnis

**KURZFASSUNG** ..... I

**ABSTRACT** ..... II

**DANKSAGUNG** ..... III

**1 EINLEITUNG** ..... 1

**2 MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN** ..... 5

**2.1 Wahrscheinlichkeitsverteilungen** ..... 5
2.1.1 Eigenschaften und Grundkonzepte ..... 6
2.1.1.1 Momente ..... 6
2.1.1.2 Kumulanten ..... 8
2.1.2 Unimodale Wahrscheinlichkeitsverteilungen ..... 9
2.1.2.1 Normalverteilung ..... 9
2.1.2.2 Weibullverteilung ..... 10
2.1.2.3 Nichtparametrische Dichteschätzung ..... 11
2.1.3 Multimodale Wahrscheinlichkeitsverteilungen ..... 11
2.1.3.1 Dip-Test ..... 12

**2.2 Multivariate Analyseverfahren** ..... 13
2.2.1 Korrelationsanalyse ..... 14
2.2.1.1 Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient ..... 14
2.2.1.2 Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman ..... 15
2.2.2 Copula ..... 15
2.2.2.1 Paar-Copula Konstruktionen ..... 17
2.2.3 Clustertechnik ..... 19
2.2.3.1 k-means-Clustering ..... 19
2.2.3.2 Clusterindizes ..... 20
2.2.4 Szenariotechnik ..... 21

**3 ANALYSE ZUM STAND DER TECHNIK** ..... 24

**3.1 Szenariobasierte Netzplanung** ..... 25

**3.2 Modelle zur Abbildung unsicherer Eingangsgrößen** ..... 26

**3.3 Lastflussrechnung ... 28**
3.3.1 Deterministische Lastflussrechnung ... 29
3.3.1.1 Power Transfer Distribution Factors ... 35
3.3.2 Monte-Carlo-Simulation ... 36
3.3.2.1 Verfahren zur Generierung zufälliger Stichproben ... 36
3.3.2.2 Latin-Hypercube-Stichprobenverfahren ... 37
3.3.3 Probabilistische analytische Methoden ... 38
3.3.3.1 Faltungstechnik ... 38
3.3.4 Probabilistische approximative Methoden ... 39
3.3.4.1 Point-Estimate-Methode ... 39

**3.4 Fazit ... 45**

**4 MODELLIERUNG UNSICHERER EINGANGSGRÖßEN ... 47**

**4.1 Abbildung der Unsicherheiten der Gruppe eins: Ausgestaltung des Erzeugungsparks und der Spitzenlasten ... 48**
4.1.1 Zieldefinition und Problemanalyse ... 49
4.1.2 Umfeldanalyse ... 50
4.1.3 Ausprägungsanalyse ... 52
4.1.3.1 Deskriptoren für Kraftwerke auf Basis konventioneller Energieträger ... 54
4.1.3.2 Deskriptoren für Erneuerbare Energienanlagen ... 56
4.1.3.3 Deskriptor für Spitzenlasten ... 58
4.1.4 Annahmenbündelung ... 59
4.1.4.1 Erstellung der Unterszenarien „konventionelle Kraftwerke“ ... 59
4.1.4.2 Erstellung der Unterszenarien „EEA“ ... 61
4.1.4.3 Erstellung der Hauptszenarien ... 61
4.1.5 Szenariointerpretation ... 61
4.1.6 Störfallanalyse ... 62
4.1.7 Auswirkungsanalyse ... 62
4.1.8 Maßnahmenplanung ... 62

**4.2 Abbildung der Unsicherheiten der Gruppe zwei: Energieerzeugung und -abnahme ... 64**
4.2.1 Modellierung einer C-vine Copula zur Abbildung der Unsicherheiten der Gruppe zwei ... 64
4.2.1.1 Wettercharakteristiken ... 65
4.2.1.2 Lastverläufe ... 71
4.2.1.3 Energieimporte und -exporte ... 72
4.2.1.4 C-vine Copula ... 73
4.2.2 Validierung des Modells ... 75
4.2.3 Diskussion zu Einsatzmöglichkeiten des Modells ... 77

**4.3 Zusammenführung der Modelle und Modellierung weiterer unsicherer Eingangsgrößen ... 79**
4.3.1 Modellparametrierung für die Einspeisung aus Erneuerbaren Energienanlagen ... 80
4.3.2 Modellierung fehlender Auslandsaustäusche ... 81
4.3.3 Modellierung des Kraftwerkseinsatzes konventioneller Kraftwerke ... 83

4.3.4 Regionalisierung der elektrischen Last ... 84

**4.4 Zusammenfassung ... 84**

**5 WEITERENTWICKLUNG DER POINT-ESTIMATE-METHODE ... 87**

**5.1 Detaillierte Modellierung zur Berücksichtigung (korrelierter) multimodal verteilter Eingangsgrößen (DMKMVE) ... 87**

5.1.1 $2m + x$ Point-Estimate-Methode ... 88

5.1.2 $s -$ Gram Charlier Expansionsmethode ... 90

5.1.3 Korrelation ... 91

**5.2 Anwendungsbeispiel ... 92**

**5.3 Anpassung der DKMVE zur Anwendung in großen Netzen (MKMVE) ... 95**

5.3.1 Einflussanalyse ... 95

5.3.2 Umsetzung der MKMVE ... 96

**5.4 Zusammenfassung ... 97**

**6 UNTERSUCHUNG DER UNSICHERHEITEN IM DEUTSCHEN ÜBERTRAGUNGSNETZ ... 100**

**6.1 Annahmen und Daten ... 101**

**6.2 Analyse der Knotenleistungen ... 103**

6.2.1 Multimodal verteilte Knotenleistungen ... 105

**6.3 Vergleich der probabilistischen Modelle ... 107**

6.3.1 MCSZS ... 109

6.3.2 LHS ... 112

6.3.3 MKMVE ... 115

6.3.3.1 Robuste Netzplanung ... 119

6.3.4 Fazit ... 121

**6.4 Unsicherheitsanalyse ... 122**

**6.5 Maßnahmenbewertung ... 130**

**6.6 Zusammenfassung ... 133**

**7 FAZIT UND AUSBLICK ... 135**

**LITERATURVERZEICHNIS ... 141**

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ... 151**

**FORMELZEICHEN** ..... 153

**INDIZES** ..... 157

**ANHANG** ..... 159

Lebenslauf ..... 191

Wissenschaftliche Publikationen ..... 193

Wissenschaftliche Studien ..... 195

Betreute wissenschaftliche Arbeiten ..... 197