

Chris Kittl

Entwurf und Validierung eines
individualitätszentrierten,
interdisziplinären Energiesystemsиму-
lators basierend auf ereignisdiskreter
Simulation und Agententheorie

Band 25



**Entwurf und Validierung eines individualitätszentrierten,
interdisziplinären Energiesystemsensors basierend auf
ereignisdiskreter Simulation und Agententheorie**

Von der
Fakultät für Elektro- und Informationstechnik
der
Technischen Universität Dortmund
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Chris Kittl
aus Unna

Dortmund, 2021

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff
Tag der mündlichen Prüfung: 22. Dezember 2021

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz

Band 25

Chris Kittl

**Entwurf und Validierung eines
individualitätszentrierten, interdisziplinären
Energiesystemsensors basierend auf
ereignisdiskreter Simulation und Agententheorie**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8463-4

ISSN 2567-2908

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

Kurzfassung

Das Energiesystem ist Rückgrat menschlichen Lebens. Eine Fehlfunktion kann erhebliche Folgen für lebenswichtige Leistungen, wie die Trinkwasser- oder Nahrungsversorgung haben. Eingriffe müssen deshalb vor der Durchführung qualifiziert werden. Zu diesem Zweck scheidet das praktische Experimentieren aus. Etablierte Alternativen sind die Modellierung und Simulation, also das Experimentieren mit einem virtuellen Abbild des Systems. Die stetig wachsende Komplexität und Heterogenität des Energiesystems fordert die bekannten Simulationsansätze heraus.

Diese Arbeit zeigt, wie das zunehmend komplexere und interdisziplinäre Energiesystem effizient, praktikabel und vor allem valide abgebildet werden kann. Die Arbeit leistet zwei konkrete Beiträge durch Weiterentwicklung des Simulationsframeworks SIMONA: Ein generalisiertes, der Agententheorie und ereignisdiskreten Simulation folgendes Modell, ermöglicht die Abbildung einer Vielzahl individueller und rationaler Systemteilnehmer sowie ihres kollektiven Verhaltens. Es reduziert den Modellierungsaufwand und unterstützt eine effiziente Simulation. Darüber hinaus erlauben äquivalente und validierte Transformatormodelle die effiziente Kopplung von Teilmodellen für Netzebenen im Rahmen des Dekompositionsansatzes von SIMONA.

Abstract

Human live is nearly impossible without an energy system. A malfunction poses severe risks to essential services like water and food supply. Every adaption needs accreditation before it is applied. Obviously, practical experimentation is not the method of choice. Modelling and simulation, which is experimenting with a virtual copy, are established alternatives. However, steadily increasing complexity and heterogeneity challenge known approaches.

This thesis contributes to efficient, practical and validated modelling and simulation of an increasingly complex and interdisciplinary energy system. The contribution is twofold and made by further development of the simulation framework SIMONA: A generalized system participant model, based on agent theory and discrete event simulation, eases the modelling process. Moreover, it allows for an efficient simulation. It enables representation of individuality and rationality of a huge number of participants and therefore provides means to examine their collective behavior. Secondly, equivalent and validated transformer models provide efficient coupling of partial models for grid levels within the decomposition principle applied by SIMONA.

Danksagung

*„If you always do what you've always done,
you'll always get what you've always got.“*

Henry Ford

Ein Promotionsverfahren ist nicht nur das Fachliche, sondern vor allem auch eine Zeit der persönlichen Entwicklung. Während meiner Tätigkeit am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft hatte ich die Gelegenheit mich mit diversen Themen zu beschäftigen und entsprechend vielfältig fachlich sowie persönlich weiterzuentwickeln. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Christian Rehtanz, der mich mit diesen Aufgaben betraute und mit seinem weitreichenden Vertrauen diese freie Entfaltung ermöglichte. Er war durch seine wertschätzenden und wertvollen Ratschläge ein hervorragender Begleiter meines Promotionsverfahrens. Ebenso gilt mein Dank Professor Sebastian Lehnhoff für seine geschätzten Einblicke in die Informatik während der gemeinsamen Forschung sowie für die Übernahme des Korreferats.

Besonders glücklich schätze ich mich für die Kolleginnen und Kollegen im SIMONA-Team sowie der Forschungsgruppe Verteilnetzplanung und -betrieb. Sie zeigen, wie aus unterschiedlichen Kompetenzen ein starkes Team entsteht, an dem jeder Einzelne wächst. Der offene und aufrichtige Umgang miteinander haben mich geprägt. Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Johannes Hiry, mit dem ich in dieser Zeit sehr eng und vertrauensvoll zusammenarbeiten konnte. Seine nicht enden wollende Begeisterung für die Sache und sein ausgeprägtes Demokratieverständnis schätze ich sehr und haben mich immer inspiriert. Ebenso danke ich den vielen Studentinnen und Studenten, die im Rahmen ihrer Tätigkeit oder Abschlussarbeit halfen die Forschung voran zu treiben.

Darüber hinaus haben viele Menschen im Hintergrund zu meinem Vorhaben beigetragen: Die vielen Gespräche in den Forschungsprojekten, beim Austausch über Forschungsideen und so fort haben mich viele Perspektiven kennenlernen lassen. Mein besonderer Dank gilt aber denjenigen, die durch ihr ausführliches Lektorat und kritisches Hinterfragen dieser Monografie zur verständlichen Strukturierung meiner Gedanken beigetragen haben. Ohnehin undenkbar wäre dieses Vorhaben ohne die Unterstützung meiner Familie und Freunde. Deshalb danke ich meinen Eltern und meiner Freundin Marina sehr, dass sie in dieser Zeit immer an mich geglaubt, mich unterstützt und mir den Rücken freigehalten haben.

Unna, im Dezember 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Grundlagen der Modellierung und Simulation	7
2.1	Grundkonzepte und Begriffe	7
2.1.1	Entitäten und Zusammenhänge	7
2.1.2	Modellierung	10
2.1.3	Simulation	11
2.1.4	Verifikation, Validierung und Akkreditierung	12
2.2	Ereignisdiskrete Modellierung und Simulation	15
2.2.1	Klassische ereignisdiskrete Modellierung	15
2.2.2	Netzwerkgekoppelte ereignisdiskrete Modellierung	17
2.2.3	Ereignisdiskrete Simulation	18
2.3	Aktor- und Agentenbasierte Modellierung und Simulation	19
2.3.1	Gemeinsame Eigenschaften von Aktoren und Agenten	19
2.3.2	Aktorspezifische Eigenschaften	20
2.3.3	Agentenspezifische Eigenschaften	21
2.3.4	Kritische Diskussion	22
2.4	Ereignisdiskreter und agentenbasierter Ansatz	23
	Conclusio	24
3	Modellierung und Simulation von Energiesystemen	25
3.1	Stand von Wissenschaft und Technik	25
3.1.1	Einordnung in die Taxonomie	25
3.1.2	Aktuelle und offene Forschungsfragen	28
3.1.3	Relevante Arbeiten	33
3.2	Das Simulationsframework SIMONA	35
3.2.1	Intendierter experimenteller Rahmen	35
3.2.2	Diskussion der bestehenden Ansätze	37
3.2.3	Grundkonzepte	38
3.3	Stationäre Leistungsflussrechnung	39
3.3.1	Mathematisches Modell	39
3.3.2	Eigenschaften des mathematischen Modells	42
3.3.3	Mathematische Verfahren als Simulatoren	44
	Conclusio	50

4	Transformormodelle für eine verteilte Leistungsflussrechnung	51
4.1	Verteilter Rückwärts-Vorwärts-Suchalgorithmus	51
4.1.1	Modellpartitionierung	52
4.1.2	Simulationsablauf	54
4.1.3	Kommunikative Kopplung der Teilmodelle	56
4.2	Zweiwicklungstransformatoren	58
4.2.1	Modellierung	58
4.2.2	Verifikation und Validierung	61
4.3	Dreiwicklungstransformatoren	69
4.3.1	Modellierung	69
4.3.2	Verifikation und Validierung	72
	Conclusio	79
5	Generalisierung der Systemteilnehmermodellierung	81
5.1	Spezifikation von Modellanforderungen	81
5.1.1	Anforderungen an den Modellierungsprozess	82
5.1.2	Inhaltliche Modellanforderungen	83
5.1.3	Bedarfsorientierte Modellstrukturklassen	87
5.2	Generalisiertes Systemteilnehmermodell	90
5.2.1	Modellbestandteile im SIMONA-Framework	90
5.2.2	Agentenimplementierung als endlicher Automat	92
5.2.3	Agenteninitialisierung nach Modellstrukturklasse	94
5.2.4	Reaktion auf externe Ereignisse	95
5.2.5	Reaktion auf interne Ereignisse	103
	Conclusio	108
6	Demonstration der praktischen Anwendung	111
6.1	SimBench Simulationsmodelldatenbank	111
6.2	Validierung des nominellen Betriebspunkts	112
6.3	Praxisbeispiel: Untersuchung eines Anschlussesuchens	115
6.3.1	Bewertung des Basiszustands	118
6.3.2	Bewertung des Zustands bei Zubau der Windenergieanlage	120
6.3.3	Bewertung des $(n - 1)$ -Falls	122
	Conclusio	126
7	Zusammenfassung und Ausblick	129
7.1	Zusammenfassung	129
7.2	Beiträge zu Wissenschaft und Technik	130

7.3 Forschungsausblick	135
Literaturverzeichnis	139
Nachweis wissenschaftlicher Tätigkeit	157
Abkürzungsverzeichnis	165
Symbolverzeichnis	167
Abbildungsverzeichnis	171
Tabellenverzeichnis	175
A Technische Daten zur Validierung der Transformatormodelle	177
A.1 Zweiwicklungstransformator	177
A.2 Dreiwicklungstransformator	179
B Details zum Anwendungsfall	181