

Pierre Laurenz

Energiewende Deutschland

Kann der Strommarktsimulator GemCast den zukünftigen
Energienmix und Strompreis zuverlässig berechnen?

Reihe Nachhaltigkeit

Band 64



Laurenz, Pierre: Energiewende Deutschland. Kann der Strommarktsimulator GemCast den zukünftigen Energiemix und Strompreis zuverlässig berechnen?, Hamburg, Diplomica Verlag GmbH 2016

Buch-ISBN: 978-3-95934-992-5

PDF-eBook-ISBN: 978-3-95934-492-0

Druck/Herstellung: Diplomica® Verlag GmbH, Hamburg, 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.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica Verlag GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte vorbehalten

© Diplomica Verlag GmbH

Hermannstal 119k, 22119 Hamburg

<http://www.diplomica-verlag.de>, Hamburg 2016

Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Ziel der Studie	1
1.2 Aktueller Stand der Forschung	2
1.3 Aufbau des Buches	4
2 Grundlagen zum Verständnis der Studie	5
2.1 Der deutsche Strommarkt	5
2.1.1 Das Merit-Order-Modell	8
2.2 Der Simulator GemCast	9
2.3 Methodik zur Validierung von GemCast	14
2.3.1 Programmverifikation	15
2.3.2 Rückvergleich: Trend- und Fein-Fall	15
2.3.3 Fehlertoleranz: Welche Verhaltensunterschiede zwischen Strommarkt und GemCast sind akzeptabel?	18
3 Daten für die Validierung	19
3.1 Kraftwerkspark konventioneller Energieträger	19
3.2 Grenzkosten	20
3.2.1 Wirkungsgrade	21
3.2.2 Spezifische CO ₂ -Emissionen	22
3.2.3 Brennstoffpreise	23
3.2.4 Betrieb und Wartung	23
3.2.5 Preise für Emissionsrechte	23
3.2.6 Sonderfälle: Kernkraftwerke und sonstige Kraftwerke	24
3.3 Stromnachfrage	25
3.4 Erzeugung aus Erneuerbaren Energien	26
3.5 Historischer Strompreis und Energiemix	27
4 Validierungsergebnisse	29
4.1 Trend-Fall: Grober Rückvergleich von 2006 bis 2013	29
4.1.1 Strompreis im Trend-Fall	30
4.1.2 Exkurs: Der Einfluss von Steinkohlekraftwerken auf den Strompreis	33

4.1.3	Energiemix im Trend-Fall	34
4.2	Fein-Fall: Genauer Rückvergleich für 2013 und 2014	35
4.2.1	Energiemix im Fein-Fall	36
4.2.2	Saisonaler Strompreis	38
4.2.3	Strompreis im Tagesverlauf	43
4.2.4	Überlagerung von saisonalen und täglichen Effekten	48
4.3	Szenariofehler	50
5	Diskussion der Ergebnisse: Ist GemCast valide?	57
5.1	Ausblick: Wie kann die Glaubwürdigkeit von GemCast verbessert werden?	59
6	Fazit	63
	Literatur	65
	Anhang	71
A.1	Zusätzliche Abbildung zum Trend-Fall	71
A.2	Zusätzliche Abbildungen zum Fein-Fall	72
A.2.1	Fein-Fall im Überblick	72
A.2.2	Fein-Fall: Charakteristische Monate	73
A.2.3	Fein-Fall: Charakteristische Wochen	76
A.2.4	Fein-Fall: Merit-Order GemCast vs. Real	79
A.2.5	Fein-Fall: Abweichung von GemCast 2013 und 2014 über Last, Residual- last, EE-, Wind- & PV-Erzeugung	81
A.2.6	Sonstige Abbildungen	84
A.3	Datenpaket	87

Abbildungsverzeichnis

1	Merit-Order als Grundlage für die Berechnungen von GemCast	9
2	Vereinfachter Simulationsablaufplan von GemCast	10
3	Grafische Benutzeroberfläche von GemCast	11
4	Mittlere Grenzkosten von Steinkohlekraftwerken sowie Entwicklung der Preise für Emissionsrechte und Steinkohle	21
5	Strompreis im Trend-Fall: Spotmarkt vs. GemCast	31
6	Trend-Fall: Strom-, Brennstoff- und Emissionsrechtepreise	32
7	Preise im Trend-Fall und Häufigkeit der Preisbestimmung je nach Kraftwerkstyp	33
8	Mittlere Grenzkosten von Steinkohlekraftwerken im Trend-Fall und diverse Preisverläufe	34
9	Erzeugungsmengen nach Energieträger pro Jahr im Trend-Fall	36
10	Erzeugungsmengen nach Energieträger pro Monat im Fein-Fall	37
11	Verfügbarkeit und Auslastung von Kernkraftwerken 2013	38
12	Verfügbarkeit und Auslastung von Braunkohlekraftwerken 2013	38
13	Fein-Fall: Prozentuale Abweichung der Stromerzeugung durch Braunkohle und Kernkraft sowie Lastverlauf	39
14	Fein-Fall: Spotmarkt-Preis vs. GemCast-Preis mit Lastverlauf	41
15	Merit-Order 2013: Spotmarkt vs. GemCast, Jan.–März & Okt.–Dez.	42
16	Merit-Order 2013: Spotmarkt vs. GemCast, Apr.–Sept.	42
17	Fein-Fall 2013 & 2014: Täglicher Preis- und Lastverlauf im Mittel	43
18	Fein-Fall 2013 & 2014: Abweichung des täglichen Preis- und Lastverlaufs vom jeweiligen Mittelwert	44
19	Fein-Fall 2014: Abweichung von GemCast über Residuallast	45
20	Fein-Fall: Windige Woche mit wenig Sonneneinstrahlung	46
21	Fein-Fall: Woche mit der geringsten mittleren Abweichung	47
22	Fein-Fall 2014: Abweichung von GemCast über Winderzeugung	49
23	Fein-Fall 2014: Abweichung von GemCast über PV-Erzeugung	49
24	GemCast-Preis mit Last als Projektion von 2014 und mit historischer Last . . .	51
25	Verschiedene GemCast-Preise für 2013, alle Variationen von Trend- und Fein-Fall	52

Tabellenverzeichnis

1	Ähnliche Projekte im Überblick	3
2	Ein- und Ausgabeparameter von GemCast	12
3	Statistische Werte zum Strompreis im Trend-Fall	31
4	Statistische Werte zum Strompreis im Fein-Fall	40
5	Statistische Werte zum Szenariofehler im Trend-Fall	52
6	Statistische Werte zum Szenariofehler in 2013	53

Abkürzungsverzeichnis

BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BK	Braunkohle
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNetzA	Bundesnetzagentur
CSP	Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DTU	Technical University of Denmark
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneubare-Energien-Gesetz
EEX	European Energy Exchange
ENTSO-E	Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber
EPEX SPOT	European Power Exchange
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
GemCast	Simulation of the German electricity market
GK	Grenzkosten
GuD	Gas- und Dampfturbinen
IER	Institutes für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
IIRM	Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagements
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
IZES	Institut für ZukunftsEnergieSysteme
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KW	Kraftwerk
MOEZ	Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PV	Photovoltaik

SK	Steinkohle
TKSS	Thomas Kast Simulation Solutions
UDE	Universität Duisburg-Essen
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
ZIRIUS	Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart
ZNES	Zentrum für nachhaltige Energiesysteme

1 Einleitung

Der deutsche Strommarkt ist im Umbruch – die Energiewende hat begonnen. Die Nutzung von konventionellen Energieträgern verliert zunehmend an Akzeptanz und die Erneuerbaren Energien sollen sie nach und nach ersetzen. Diese Umstrukturierung ist sehr komplex und der Umfang ist enorm. Um diese gesamtgesellschaftliche Herausforderung bewältigen zu können, ist es notwendig einen Weg zu finden, der ökologisch, volkswirtschaftlich und sozial verträglich ist. Dazu müssen mögliche Entwicklungspfade untersucht und bewertet werden. An dieser Stelle knüpft diese Studie an.

Mit dem Simulationsprogramm GemCast können Szenarien über die zukünftige Entwicklung des Strommarktes erstellt werden. Solche Szenarien ermöglichen es, verschiedene Umbaupfade des Kraftwerksparks zu vergleichen und Trendvorhersagen zu treffen. Dazu berechnet GemCast für einen vorgegebenen Zeitraum bei jedem Zeitschritt – beispielsweise stündlich – den Spotmarkt-Strompreis sowie den Energiemix. Dabei werden jeweils alle eingesetzten konventionellen Kraftwerke dokumentiert. Die Ergebnisse lassen Rückschlüsse über das Ausmaß des CO₂-Ausstoßes zu. Auch Änderungen der Preisniveaus an der Börse werden ersichtlich, wodurch gleichzeitig die damit verbundenen Auswirkungen auf die EEG-Umlage und die Haushaltsstrompreise geschätzt werden können. Neben dem Preisniveau können auch zukünftige Preisverläufe abgebildet werden, wodurch beispielsweise die Rentabilität von Energiespeichern abgeschätzt werden kann.

Die durch GemCast gewonnenen Erkenntnisse könnten also zu verschiedenen Diskussionen bzgl. des Strommarktes beitragen. So wurde beispielsweise noch nicht abschließend geklärt, ob das gegenwärtige Strommarktmodell bei zunehmender Einspeisung durch Erneuerbare Energien optimal funktioniert. In diesem Zusammenhang werden derzeit unterschiedliche Alternativen besprochen, beispielsweise eine Weiterentwicklung des derzeitigen Strommarktdesigns. Darüber hinaus könnte geprüft werden, ob und unter welchen Voraussetzungen die Versorgungssicherheit gewährleistet ist.

Die Simulationsergebnisse bzw. Szenarien sind nur dann aussagekräftig, wenn GemCast überprüft bzw. validiert wurde. Dazu werden die Ausgabeparameter der Simulation mit jenen des abgebildeten realen Systems verglichen und die Abweichungen bewertet. Genau das ist der Kern dieser Studie. Die Frage lautet also: „Wie glaubwürdig ist GemCast?“.

1.1 Ziel der Studie

Bislang ist unklar, inwieweit GemCast plausible Ergebnisse berechnet. In dieser Studie soll die Realitätstreue von GemCast gemessen werden. Dazu soll zunächst geklärt werden, ab welcher Grenze das Programm valide ist. Anschließend soll die Validität anhand eines Rückvergleichs ermittelt werden. D. h. die Vergangenheit wird simuliert und die Ergebnisse werden mit

historischen Werten verglichen. Sollten die „Vorhersagen“ in die Vergangenheit korrekt sein, sollte es möglich sein mit GemCast auch zukünftige Entwicklungen abzuschätzen. Dabei muss zusätzlich sichergestellt werden, dass GemCast auch bei möglichen Marktveränderungen, die es in der Vergangenheit nicht gegeben hat, realistisch arbeitet. Dazu soll die Arbeitsweise von GemCast im Detail erfasst und mit den Mechanismen am Strommarkt verglichen werden.

Um mit GemCast Szenarien zu erstellen, müssen die Eingabeparameter des Programms an der angenommenen zukünftigen Entwicklung ausgerichtet werden. Dazu werden historische Datensätze angepasst. Um beispielsweise das Jahr 2025 zu simulieren, können Daten aus 2015 genutzt werden. Diese werden entsprechend der angenommenen Entwicklung angepasst. Somit fungiert in diesem Beispiel das Jahr 2015 als Referenzjahr. Durch den Rückvergleich ist es möglich, den Einfluss dieses Vorgehens zu beurteilen: Wird ein Jahr aus der Vergangenheit einmal mit genauen historischen Daten simuliert und anschließend ein zweites Mal mit angepassten Referenzdaten eines anderen Jahres, gibt der Vergleich der Ergebnisse Aufschluss über Abweichungen, die durch dieses Vorgehen entstehen. Dieser hier sogenannte *Szenariofehler* soll ebenfalls abgeschätzt werden.

1.2 Aktueller Stand der Forschung

Die Tabelle 1 auf der folgenden Seite gibt einen Überblick über ähnliche Strommarktsimulationen. Dabei wird unter anderem jeweils der Grundaufbau des zugrunde gelegten Modells angegeben. GemCast basiert auf einem partiellen Gleichgewichtsmodell. In jedem Berechnungszeitpunkt sind die Stromerzeugungsmenge und die Stromnachfrage gleich groß bzw. im Gleichgewicht. Dabei werden vorgegebene angenommene zukünftige Entwicklungen untersucht. Im Gegensatz dazu werden in vielen anderen Projekten lineare Optimierungsmodelle zugrunde gelegt. Dabei soll eine gewählte Zielfunktion bei gegebenen Restriktionen maximiert oder minimiert werden. Dadurch kann beispielsweise berechnet werden, wie sich der Strommarkt entwickeln müsste, um, je nach Zielvorgabe, optimal zu funktionieren. Darüber hinaus gibt es Agentenbasierte Modelle. Dabei werden die verschiedenen Marktakteure als Agenten programmiert, die durch unterschiedliche Entscheidungsmerkmale gekennzeichnet sind. Das Systemverhalten ergibt sich dann aus dem Zusammenspiel dieser Agenten. Der dadurch i. d. R. höhere Komplexitätsgrad soll eine genauere Abbildung des realen Systems ermöglichen.

Eine genaue Beschreibung der einzelnen Projekte sowie ein Vergleich mit GemCast war aufgrund der verfügbaren Ressourcen in dieser Studie nicht möglich. Die Übersicht dient als Ausgangspunkt für weitergehende Nachforschungen. Vermutlich birgt der Austausch und die Zusammenarbeit mit diesen Projekten ein großes Potenzial.