

Pierre Laurenz

# Energiewende Deutschland

Kann der Strommarktsimulator GemCast den zukünftigen Energiemix 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

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel der Studie . . . . .	1
1.2 Aktueller Stand der Forschung . . . . .	2
1.3 Aufbau des Buches . . . . .	4
<b>2 Grundlagen zum Verständnis der Studie</b>	<b>5</b>
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
<b>3 Daten für die Validierung</b>	<b>19</b>
3.1 Kraftwerkspark konventioneller Energieträger . . . . .	19
3.2 Grenzkosten . . . . .	20
3.2.1 Wirkungsgrade . . . . .	21
3.2.2 Spezifische CO <sub>2</sub> -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
<b>4 Validierungsergebnisse</b>	<b>29</b>
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
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse: Ist GemCast valide?</b>	<b>57</b>
5.1	Ausblick: Wie kann die Glaubwürdigkeit von GemCast verbessert werden? . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>63</b>
	<b>Literatur</b>	<b>65</b>
	<b>Anhang</b>	<b>71</b>
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 Emissionsrechteteile . . . . .	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

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

<b>SK</b>	Steinkohle
<b>TKSS</b>	Thomas Kast Simulation Solutions
<b>UDE</b>	Universität Duisburg-Essen
<b>ÜNB</b>	Übertragungsnetzbetreiber
<b>ZIRIUS</b>	Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart
<b>ZNES</b>	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 CO<sub>2</sub>-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.