Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

REINER LEMOINE STIFTUNG

Guido Pleßmann

Modeling decarbonization pathways of Europe‘s electricity supply system until 2050

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Fakultät II – Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften
Department für Informatik

Modeling decarbonization pathways of Europe's electricity supply system until 2050

Von der Fakultät für Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg zur Erlangung des Grades und Titels eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation von

Guido Pleßmann

geboren am 8.9.1986 in Göttingen

Gutachter
Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn
Prof. Dr. Carsten Agert

Tag der Disputation
16. April 2019

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

Guido Pleßmann

Modeling decarbonization pathways of Europe's electricity supply system until 2050

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Oldenburg, Univ., Diss., 2019

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6793-4
ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Girona den 27.9.2018,

Guido Pleßmann

Zusammenfassung

Der voranschreitende Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen für das Wohlergehen der Menschheit dar. Auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse, insbesondere durch die des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), wurden globale und multinationale Abkommen zur langfristigen Stabilisierung des weltweiten Klimas vereinbart. Das globale Klimaschutzabkommen von Paris im Jahr 2015 zielt auf eine Begrenzung der globalen Erderwärmung von maximal 2°C – bevorzugt höchsten 1,5°C – bis 2100 ab. Um dies zu erreichen hat die EU umfassende Emissionsminderungsziele von -80 % bis -95 % bis zum Jahr 2050 in Energie- und nicht-Energiesektoren vereinbart. Von diesem Ziel leiten sich unterschiedliche Minderungsziele für einzelne Sektoren ab. Für die Erreichung der langfristigen Emissionsminderung werden schrittweise kurzfristigere Ziele für einzelne Mitgliedsstaaten vereinbart. Ein Masterplan für die konkrete Realisierung der sektoralen Emissionsminderungsziele bis zum Jahr 2050 liegt allerdings bisher nicht vor. Dabei wird insbesondere die zweite Hälfte der Umsetzungsphase des Klimaschutzabkommens verschärfte Herausforderungen mit sich bringen. Im Bereich der Energieversorgungssektoren betrifft dies insbesondere den Stromsektor, da dieser mit besonders strengen Minderungszielen belegt ist und zusätzlich eine Verlagerung von Lasten aus anderen Energiesektoren zu erwarten sind.

Eine kostengünstige Umsetzung der Klimaschutzziele im Stromsektor benötigt eine optimierte Planung und Strategie. Langfristige Planungs- und Abschreibungszeiträume für Kraftwerke und ein tiefgreifender technologischer Wandel erzeugen ein komplexes und dynamisches Umfeld. Kurzfristige Entscheidungen haben Auswirkungen auf die mittel- und langfristige Energieversorgungsstruktur. Daher unterstützen modellbasierte Studien zum Umbau der Energieversorgungsinfrastruktur politische Planungsprozesse und geben Einblicke in entscheidungsrelevante technisch-ökonomischer Zusammenhänge. Trotz einer Vielzahl an Studien zur zukünftigen Europäischen Energie- und insbesondere Stromversorgung, besteht zu wenig Kenntnis über den schrittweisen Wandel im Stromversorgungssystem. Dies betrifft insbesondere die Übergangspfade hin zu einem klimafreundlichen System und die technologischen Veränderungen in der Phase ab 2030.

Um diese Lücke zu füllen, skizziert diese Arbeit kostengünstige Dekarbonisierungspfade für

den europäischen Stromsektor zur Erreichung der EU-Treibhausgasminderungsziele. Diese Pfade beschreiben die Umstrukturierung der Energieversorgungsinfrastruktur hinsichtlich Investitionen in Kraftwerks-, Energiespeicher-, und Übertragungsnetzkapazitäten in 5-Jahres-Schritten bis zum Jahr 2050. Zur Ermittlung dieser Pfade wurde das mehr-perioden, mehr-regionen Energiesystemmodell elesplan-m für den europäischen Stromsektor entwickelt und angewendet. Basierend auf linearer Programmierung ermöglicht es kostenoptimale Investitionsentscheidungen unter Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu treffen. Dafür wurden Referenzjahre in stündlicher Auflösung berechnet.

Die analysierten Übergangspfade, die zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2050 um -98 % bezogen auf 1990 führen, zeigen, dass erhebliche Investitionen mit der Umstrukturierung der europäischen Stromversorgung verbunden sind. Stromerzeugung aus Photovoltaik (PV) und Windenergieanlagen wird den Großteil der Gesamtstromerzeugung ausmachen. Dazu werden 1.430 GW Windenergieanlagen und 1.260 GW PV-Anlagen im Jahr 2050 benötigt. Um dies zu erreichen, muss ein durchschnittlicher jährlicher Ausbau von ca. 40 GW/a beider Technologien erfolgen. Eine verstärkte internationale Kooperation in der Stromversorgung durch den Ausbau der Grenzüberschreitenden Übertragungsnetzkapazitäten begünstigt die kosteneffiziente Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen im Stromsektor. Energiespeicher in einer Größenordnung von 43 GW Pumpspeicherkraftwerken, 230 GW Batteriespeichern und 260 GW Power-to-gas werden im Jahr 2050 benötigt, um Schwankungen in der Energieversorgung auszugleichen. Die Analyse verschiedener Sensitivitäten verdeutlicht, dass langfrist-Energiespeicher, z.B. Power-to-gas, zur Erreichung von einer Treibhausgasemissionsminderung von -88 % und weniger erforderlich sind. Emissionsintensive Kohleverstromung muss spätestens Mitte der 2030er Jahre beendet werden, um den Dekarbonisierungspfad zu realisieren. Insgesamt ist ein Anstieg der Stromgestehungskosten von rund 60 % zu erwarten. Analysierte Szenarien weisen diesbezüglich einen Schwankungsbereich von +/- 10 % auf, womit die Kostensteigerung als erwartbar angesehen werden kann. Unter Berücksichtigung externer Kosten zeigt sich ein anderes Bild. Werden steigende Brennstoffkosten, Folgekosten des Klimawandels und weitere externe Kosten berücksichtigt, entsprechen diese nahezu der Steigerung der Stromgestehungskosten des dekarbonisierten Stromsystems.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lässt sich schlussfolgern, dass ein verlässlicher politischer Rahmen für die erfolgreiche Umsetzung der Klimaschutzvorhaben notwendig ist. Ein europaweiter Umsetzungsplan zur Realisierung der Klimaschutzziele im Stromsektor ermöglicht koordinierte Maßnahmen in einzelnen Ländern und kann zu einem insgesamt kostengünstigen Übergang führen. Die Schaffung eines verlässlichen Investitionsumfeldes ist notwendig für Investoren, um einen Anreiz für Investitionen in Kraftwerks- und Speicherprojekte zu bieten. Ferner muss sichergestellt werden, dass notwendige Technologien, wie z.B. Power-to-gas, und ausreichend Produktionskapazitäten für bspw. Windenergie- und PV-Anlagen verfügbar sind. Sofortiges Handeln ist erforderlich, um Klimaschutz im Rahmen der 2°C Ziele zu realisieren. Investitionen in fossile Kraftwerkstechnologien, die bald nicht mehr wirtschaftlich nutzbar sind, müssen vermieden und auf der anderen Seite Investitionen in erneuerbare Technologien gestärkt werden.

Abstract

Climate change is one of the most challenging issues faced by humankind today. Scientific evidence regarding the existence of anthropogenic climate change was proven by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Based on the evidence, negotiations led to international agreements on the long-term stabilization of the climate system. In 2015, a limit on the global average temperature increase was set to 2°C, preferably 1.5°C, until 2100. To achieve this goal on a European scale, the EU agreed to reduce total greenhouse-gas (GHG) emissions by 80 to 95 % by 2050. Thereof, emission targets for individual sectors were derived. The effort is shared among member countries. Individual intermediate targets are being continually negotiated. However, a holistic plan that sets the pathway for implementing effective measures to achieve the GHG emission reduction targets in all sectors by 2050 is missing. It is expected that challenges to achieve the reduction will increase in the last twenty years due to the growing integration of variable renewable energy sources. In addition, anticipated demand shift from other sectors to the electricity sector and relatively strict reduction targets in the latter corroborate the priority to decarbonize the electricity sector.

The cost-effective implementation of measures to achieve the GHG emission reduction targets requires a strategy based on optimal planning. Long-term economic depreciation of power plants and a radical technological change create a dynamic and a complex environment. Decisions taken on short-term scale affect the design of the electricity system on a long term. Therefore, model-based studies help to unveil insights about the transition towards a decarbonized electricity supply and provide important information for planning of the future electricity system. Despite the large number of studies on the future of the electricity sector, cost-effective decarbonization pathways to achieve the GHG emission reduction goals are insufficiently explored. Successive transformation planning of the European electricity system is needed in order to achieve the GHG emission reduction targets by 2050.

This thesis assesses cost-optimal decarbonization pathways for the European electricity sector to meet emission reduction targets by 2050. These pathways outline the transformation of the electricity supply infrastructure in successive 5-years increments until 2050. It includes

investments in power plants, energy storage facilities, and the transmission system. For assessing these pathways, the multi-period, multi-region energy system model elesplan-m for European electricity sector was developed and used. This computer model is based on linear programming allowing the assessment of investment decisions constrained by technical and economic circumstances. These decisions are evaluated based on analyzing the electricity supply on an hourly scale for each reference year.

The analyzed decarbonization pathways show that enormous effort is required to cut GHG emissions in the European electricity sector by 98 % by 2050 relative to 1990 levels. According to the investigated pathways, electricity generation by wind and photovoltaic (PV) power will meet the majority of the electricity demand by 2050. This requires 1,430 GW of wind power and 1,260 GW of PV power to be installed by 2050. Therefore, capacity of both technologies needs to be extended by approximately 40 GW on average per year. Enhanced international cooperation through the extension of cross-border transmission capacities allows a cost-effective implementation of climate protection measures in the electricity sector. The proposed electricity system design for 2050 includes 43 GW of pumped-hydro storage, 230 GW of battery energy storage systems, and 260 GW of power-to-gas (PtG) to balance supply and demand mismatches. Several sensitivity scenarios show that PtG is required to achieve climate change mitigation beyond the GHG reduction of 88 %. Carbon-intense electricity generation technologies, such as coal power, must be abandoned around 2035 to realize effective decarbonization. Cost of electricity supply is very likely to increase by approximately 60 % until 2050. The sensitivity scenarios show the cost increase only deviates by +/- 10 % relative to the reference case. If rising fuel prices, costs due to the impact of climate change, and other external costs would be incorporated in the cost of electricity supply, costs would be comparable to the expected cost increase of deploying renewables.

Based on the results of this thesis, it can be concluded that a reliable political framework is required for a successful implementation of GHG reduction measures in the European electricity supply sector. A European-wide agenda to decarbonize the electricity sector allows cost-effective coordinated actions. A guaranteed reliable environment attracts investors to finance power plants, energy storage systems, and transmission system projects. Furthermore, it must be guaranteed that required technologies, i.e. power-to-gas, and manufacturing capacities for PV and wind power, are available. Immediate action is needed to realize climate change mitigation within the 2°C limits. Among other requirements, investments in coal power must be avoided and replaced by investments in renewable energy.

Acknowledgements

This thesis was made possible through the guidance, help, and support of many people. I am thankful for that and would like to express my gratitude in detail. First of all, I would like to thank the *Reiner Lemoine Stiftung* for funding this project. Without the generous scholarship, this thesis would never have been started. I truly appreciate being supervised by Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn and Prof. Dr. Carsten Agert. Thank you for the supervision, critical feedback on various stages of the thesis, and always looking for pragmatic approaches to overcome obstacles.

Another great source of support came from the *Reiner Lemoine Institute* (RLI). I am thankful for the workplace and it was a pleasure to work with the colleagues from RLI. Some colleagues supported this thesis in particular who must mentioned. Dr. Philipp Blechinger unofficially supervised the work at the RLI. It's a pleasure to have such an amazing colleague who always comes with good advices, positive thoughts, and a good sense of humor. It was a pleasure to learn from his experience during the joint authoring of scientific publications. He never gave up on the completion of the thesis and was a big motivational help. Prof. Dr. Jochen Bühler helped with reviewing the first draft of the thesis during our shared time at the RLI and provided helpful feedback to improve the comprehensibility of the thesis. Zakia Soomauroo, Bharadwaj Narasimhan, and Miriam Leich kindly supported the submission with a language-focused review. Thank you for spending so much time reading the entire manuscript word by word and providing suggestions to improve the linguistic quality of the thesis. I would like to thank Uwe Krien for sharing the PhD time and commonly building up energy system modeling skills at the RLI. I raise my hat to Uwe for continuing and successfully completing the side-project of publishing *oemof* - an open-source licensed library for energy system modeling which we started to develop during our PhD time at the RLI. I am thankful for the support provided by the students Finn Grohmann, Marius Köpchen, and Lotta Gruber whose theses I supervised during my doctoral studies. I would like to acknowledge Prof. Dr. Christian Breyer's support. He helped in applying for the scholarship and unofficially supervised at the RLI for the first year.

Further thanks go to the anonymous reviewers of articles I submitted. Also, the countless developers of open-source software should be mentioned here. Myriads of hours have been spent to develop so much wonderful software which facilitated me, for example, to implement an energy system model in software, plot graphs, and typeset this thesis.

Finally many thanks go to my family and my friends. I am thankful to my parents for always believing in me and supporting my work however they could. And to my dear friends, I appreciate your patience, in particular, during the final phase of completing the thesis when I was almost entirely absent. Now, I have time for you again!

Contents

Contents

List of Figures

List of Tables

Acronyms

GHG greenhouse gas

RES renewable energy sources

CCS carbon dioxide capture and storage

PV photovoltaics

CSP concentrating solar power

PHS pumped hydro storage

ENTSO-E European Network of Transmission System Operators for Electricity

EU European Union

CHP combined heat and power

CO_2 carbon dioxide

CO_2eq carbon dioxide equivalent

UK United Kingdom

LULUCF land use, land-use change and forestry

EU-ETS European Union Emission Trading System

NTC net transfer capacity

TIMES The Integrated MARKAL-EFOM System

PRIMES a computable Price-driven equilibrium Model of the Energy System and markets for Europe

POLES Prospective Outlook on Long-Term Energy Systems

MARKAL Market Allocation

EFOM Energy Flow Optimization Model

LP linear programming

elesplan-m European long-term energy system planning model

CRF	capital recovery factor
CAPEX	capital expenditures
PtG	power-to-gas
SNG	synthetic natural gas
SoC	state of charge
OCGT	open cycle gas turbine
CCGT	combined cycle gas turbine
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
WACC	weighted average cost of capital
IRENA	International Renewable Energy Agency
US	United states of America
UNFCCC	United Nations Framework Conventions on Climate Change
PEM	polymer electrolyte membrane
AEL	alkaline electrolysis
$\mathbf{OPEX_{fix}}$	fixed operational expenditures
$\mathbf{OPEX_{var}}$	variable operational expenditures
LCOE	levelized cost of electricity
IGCC	integrated gasification combined-cycle
DoD	depth of discharge
AC	alternating current
FLH	full-load hours
NaS	sodium-sulfur battery
Li-ion	lithium-ion battery
ESS	energy storage system
EIA	*Energy Information Administration*
CAES	compressed-air energy storage
pahesmf	*power and heat energy system modeling framework*
oemof	open energy modeling framework

DC	direct current
SMES	superconducting magnetic energy storage
HVDC	high-voltage direct current
GDP	gross domestic product
BAU	business as usual
BESS	battery energy storage system
GHI	global horizontal irradiance
GIS	geographical information systems
DSM	demand side management
ETSAP	Energy Technology Systems Analysis Program
IEA	International Energy Agency
LEAP	the Long-range Energy Alternatives Planning system
NEMS	National Energy Modeling System
IAM	integrated assessment model
MILP	mixed-integer linear programming
PTDF	power transfer distribution factor
TSO	transmission system operator
IAEA	International Atomic Energy Agency