

Casimir Lorenz

Balancing Reserve Provision in a Decarbonized Electricity Sector

A Model-Based Analysis of Upcoming
Challenges and Opportunities

BALANCING RESERVE PROVISION IN A
DECARBONIZED ELECTRICITY SECTOR
A MODEL-BASED ANALYSIS OF UPCOMING
CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

vorgelegt von

M. Sc.

Claudio Casimir Lucas Lorenz

geboren in Frankfurt am Main

von der Fakultät VII – Wirtschaft und Management
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Wirtschaftswissenschaften

– Dr. rer. oec. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Georg Meran

Gutachter: Prof. Dr. Christian von Hirschhausen

Gutachterin: Prof. Dr. Claudia Kemfert (Hertie School of Governance)

Gutachter: Prof. Dr. Karsten Neuhoff

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 20. April 2017

Berlin 2017

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

Casimir Lorenz

**Balancing Reserve Provision
in a Decarbonized Electricity Sector**

A Model-Based Analysis of Upcoming
Challenges and Opportunities

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5426-2

ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Zusammenfassung

Diese Dissertation analysiert die Chancen und Herausforderungen bei der Regelleistungsbereitstellung im dekarbonisierten Stromsektor mit Hilfe von Stromsektormodellen. Der erste Teil konzentriert sich auf mögliche Dekarbonisierungspfade für den Elektrizitätssektor. Dazu wird das dynamische Investitions- und Kraftwerkeinsatzmodell (dynELMOD) für Europa entwickelt, welches Investitionen in konventionelle und erneuerbare Erzeugungstechnologien, Speicherkapazitäten und grenzüberschreitende Kapazitäten im Stromnetz erlaubt. Es wird dabei von einem Emissionspfad eingeschränkt, welcher eine nahezu vollständige Dekarbonisierung erreicht. Die Modellergebnisse zeigen, dass im Jahre 2050 erneuerbare Energien den Großteil der Stromproduktion in Europa ausmachen werden und gleichzeitig ein Ausstieg aus der Kernenergie und fossile Brennstoffen erfolgt. Im darauf folgenden Kapitel wird dynELMOD angewendet, um die Implikationen unterschiedlicher Annahmen zur Voraussicht der Akteure auf dem Transformationspfad zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass ein hohes Risiko besteht, dass Investitionen “gestrandet” sind, wenn bei den Akteuren nicht von Anfang an ein Glaube an ein striktes Emissionsziel besteht.

Der zweite Teil konzentriert sich auf die Implikationen eines dekarbonisierten Kraftwerkssportfolios auf die Regelleistungsbereitstellung. In einem ersten Schritt wird das Kraftwerkeinsatzmodell (ELMOD-MIP) entwickelt, welches es erlaubt, detaillierte Flexibilitätseinschränkungen der Kraftwerke und der Regelleistungsbereitstellung abzubilden. Analysiert wird der Einfluss eines sich wandelnden Kraftwerkssportfolios auf Regelleistungspreise in Deutschland bis zum Jahre 2025 unter Berücksichtigung möglicher Regelleistungsbereitstellung durch Windkraftanlagen. Die Ergebnisse zeigen Preissteigerungen, falls keine Beteiligung von Windkraftanlagen an der Regelleistungsbereitstellung angenommen wird. Mit einer Beteiligung von zehn Prozent der Windkraftanlagen können die Regelleistungskosten um bis zu 40% reduziert werden. Das darauffolgende Kapitel untersucht verschiedene Ausprägungen grenzüberschreitender Kooperationen bei der Regelleistungsbereitstellung in Deutschland, Schweiz und Österreich. ELMOD-MIP wird erweitert, um den Austausch von Regelleistung und Regelenergie abzubilden. Die Modellergebnisse bestätigen, dass eine verstärkte Kooperation bei der Regelleistungsbereitstellung vorteilhaft ist; die Kosteneinsparungen jedoch stark vom Grad der Kooperation und den Kraftwerkssportfolios der teilnehmenden Länder abhängig sind. Das letzte Kapitel erweitert die Diskussion um eine langfristige Betrachtung der Regelleistungsbereitstellung im Jahre 2050 und analysiert dazu zukünftige Entwicklungen auf Regelleistungsmärkten. DynELMOD wird erweitert um die Entwicklung der Regelleistungsbereitstellung und den Einfluss von hohen Anteilen von erneuerbaren Energien darauf zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kosten für Regelleistungsbereitstellung für ein rein erneuerbares Elektrizitätssystem im Jahre 2050 gegenüber heute nicht ansteigen müssen. Lediglich für Ausnahmesituationen sind zusätzliche Investitionen in Speicherkapazitäten notwendig.

Stichwörter: Stromsektor, Investitionsmodell, Dekarbonisierung, Energiewende, Transformationspfad, Regelleistung, Regelenergie, Open Source, Regionale Kooperation.

Abstract

This dissertation analyzes the future balancing reserve provision in a decarbonized electricity sector and therefore develops and applies electricity sector models.

The first part focuses on the pathways for a decarbonization of the electricity sector. It starts with the development of the dynamic investment and dispatch electricity model (dynELMOD) for Europe. The model decides upon investments into conventional and renewable power plants, storage capacities and the electricity grid, constrained by an emission path, that reaches almost complete decarbonization. The model results show, that until 2050 renewable energy sources will provide the majority of the electricity generation in Europe and nuclear energy and fossil fuels are phased out gradually. In the following chapter dynELMOD is applied to analyze the implications of different assumptions on the foresight of the actors, such as perfect foresight, myopic foresight, and a budgetary approach on the transformation pathway. The results reveal insights into the potential of stranded assets when future tightening of the emission target are not considered by the actors.

The second part focuses on the implications of a decarbonized generation portfolio for balancing reserve provision. It begins with a development of the unit-commitment model (ELMOD-MIP), which allows for a detailed depiction of power plant flexibility constraints and balancing capacity reservation. The model is used to analyze the influence of a changing power plant portfolio on prices and allocation of balancing reserves in Germany until 2025. Furthermore, the influence of wind power providing positive and negative reserves is analyzed. The results show a price increase, in case no new market participants are allowed to enter the balancing market. The participation of up to ten percent of wind turbines can reduce the cost for balancing provision by up to 40 %. The following chapter expands the analysis towards different degrees of cross-border cooperation within balancing reserves in the region of Austria, Germany and Switzerland. ELMOD-MIP is extended to represent cross-border interaction of balancing reserves provision and applied to scenarios with differing levels of cooperation. The model results confirms that increased cooperation in balancing markets is highly beneficial; still the degree of cost savings depends highly on the depth of cooperation and the countries' different power plant portfolios. The last chapter expands the discussion of balancing reserve provision to the long-term perspective of 2050. Possible developments in balancing reserve provision are assessed and transformed into quantitative scenarios. An enhanced version of dynELMOD is used to analyze these developments and the influence of high renewable-shares jointly. The results show that balancing reserve cost can be kept at current levels for a renewable electricity system until 2050. Only rarely, additional storage investments are required for balancing reserve provision.

Keywords: Electricity sector, investment model, decarbonization, renewable transformation pathways, balancing reserves, open source, regional cooperation.

Acknowledgements

First of all, I would like to thank my colleagues from the Workgroup for Infrastructure Policy at the TU Berlin and at the Department for Energy, Transport, Environment at the DIW Berlin for a very inspiring working environment and valuable feedback starting from the first day as a research assistant in 2011. The same colleagues made the various conference-, field-, bike- and very important ski-trips unforgettable. Special thanks go to my colleague and co-author Clemens for nearly five years of constant and fruitful joint working which laid the foundation of this dissertation. Furthermore, I would like to thank Claudia Kemfert and Karsten Neuhoff as my committee members and most of all my supervisor Christian von Hirschhausen for guiding my research activities and for his continuous support. In addition, I would like to thank the Reiner Lemoine Stiftung for the very generous financial support that allowed me to conduct my research independently. Last but not least, I would like to thank my family and friends who always believed in me and gave me the strength and support to bring this dissertation to a successful end.

Table of Contents

Table of Contents	i
List of Figures	v
List of Tables	ix
List of Abbreviations	xi
1. Introduction	1
1.1. Motivation and research question	2
1.2. Pathways towards a decarbonized electricity sector in Europe	4
1.2.1. Influence of boundary conditions	6
1.2.2. Influence of model characteristics	7
1.3. Balancing reserves within a decarbonized electricity sector	9
1.3.1. Types and allocation methods of balancing reseres	9
1.3.2. Cost components and drivers for balancing reserve provision .	11
1.3.3. Developments in balancing reserve markets	11
1.3.4. Analyzing balancing reserves in electricity sector models . . .	13
1.4. Thesis overview with contributions and publications	14
1.4.1. Two chapters on the future generation portfolio in Europe . .	14
1.4.2. Three chapters on the challenges and opportunities for balancing reserve provision	16
1.5. Research outlook	20
Part I Pathways towards a decarbonized electricity sector in Europe	23
2. A dynamic investment and dispatch Model (dynELMOD)	25
2.1. Introduction	26
2.1.1. Modeling the European electricity sector	27
2.1.2. Transparency and open source models	27
2.2. Large variety of investment models	28
2.2.1. Model configuration is crucial	30
2.3. The model dynELMOD	31
2.3.1. Methodology and calculation procedure	31
2.3.2. dynELMOD model formulation	34
2.3.3. Model options	40

2.4. Data	42
2.4.1. Generation	43
2.4.2. Demand development and sector coupling	49
2.4.3. Grid	50
2.4.4. Time series	50
2.4.5. Other	52
2.5. Time series reduction	54
2.5.1. Previous work	54
2.5.2. Our time series reduction approach	55
2.5.3. Time series reduction results	58
2.6. Results	60
2.6.1. Investment and generation results in the standard scenario	60
2.6.2. Grid	62
2.6.3. Detailed dispatch results for selected countries	65
2.6.4. Varying the inputs and calculation options	68
2.6.5. Discussion of limitations	73
2.7. Conclusion	75
3. Scenarios for decarbonizing the European electricity sector	77
3.1. Introduction	78
3.2. Model and Data	78
3.2.1. dynELMOD: a model of the European electricity sector	78
3.2.2. Data	80
3.3. Scenarios	81
3.4. Results	82
3.4.1. European electricity under emission constraints	82
3.4.2. Reduced foresight leads to stranded investments	84
3.4.3. Emissions comparison	85
3.4.4. Emissions in the Emission Budget scenario	86
3.5. Discussion	86
3.5.1. Operating a low-carbon electricity system in 2050	86
3.5.2. Costs and prices to 2050	89
3.6. Conclusion	90
Part II Balancing reserves within a decarbonized electricity sector	93
4. Wind providing balancing reserves	95
4.1. Introduction	96
4.2. Methodology	99
4.2.1. The model ELMOD-MIP	100
4.2.2. Determining the cost of balancing reserves	101
4.2.3. Anticipating balancing reserve activations	103
4.2.4. Computational complexity	105
4.2.5. Mathematical formulation	105
4.3. Scenarios and data	112
4.3.1. Boundary conditions	112

4.3.2. Potentials and challenges for wind turbines providing balancing reserves	113
4.3.3. Future balancing reserve demand	114
4.4. Results and discussion	116
4.4.1. Balancing reserve provision	118
4.4.2. The system cost of balancing reserves	120
4.4.3. Prices on balancing reserve markets	122
4.4.4. Discussion of limitations	126
4.5. Conclusions	126
5. Options for cross-border balancing reserve provision	129
5.1. Introduction	130
5.1.1. Cooperation efforts for balancing reserve provision in Europe	131
5.1.2. Literature on cross-border balancing reserve provision	133
5.2. Methodology	135
5.3. Model implementation	137
5.4. Scenarios	139
5.5. Data and application to model region	140
5.6. Results and discussion	142
5.6.1. Cost for balancing reserve provision	142
5.6.2. Model limitations	149
5.6.3. Implementation issues	150
5.7. Conclusion	150
6. Balancing reserves within a decarbonized European electricity system	153
6.1. Introduction	154
6.2. Balancing market developments	156
6.2.1. Balancing reserve dimensioning and sizing horizon	156
6.2.2. Renewables and storage as new market participants	158
6.2.3. Cross-border cooperation	160
6.2.4. Scenarios and sensitivities	162
6.3. Methodology	162
6.3.1. dynELMOD	162
6.3.2. Extension of dynELMOD	163
6.4. Data and application	168
6.5. Results	169
6.6. Conclusion	174
A. Appendix to Chapter 4 and 5	175
A.1. Nomenclature	175
B. Appendix to Chapter 2	179
B.1. Nomenclature	179
References	183