Deutschlands Stromversorgung im Jahr 2050

—

Ein szenariobasiertes Verfahren zur vergleichenden Bewertung von Systemvarianten und Flexibilitätsoptionen

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Benedikt Lunz

aus Neustadt an der Aisch

Berichter:

Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Albert Moser

Tag der mündlichen Prüfung:

03. Juni 2016

Benedikt Lunz

Deutschlands Stromversorgung im Jahr 2050

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

AACHENER BEITRÄGE DES ISEA

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h.c. Rik W. De Doncker
Leiter des Instituts für Stromrichtertechnik und
Elektrische Antriebe der RWTH Aachen (ISEA)
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2016
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4627-4
ISSN 1437-675X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Referent im Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina und der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften entstanden.

Prof. Dirk Uwe Sauer danke ich dafür, dass er es mir ermöglicht hat, Teil dieses Projektes gewesen zu sein. Außerdem möchte ich mich für die gute Betreuung und sein persönliches Engagement für das Thema bedanken. Vielen Dank ebenfalls an Prof. Albert Moser für die Übernahme des Korreferats und seine hilfreichen Kommentare.

Die Arbeit im Kreise der Referenten des Akademienprojektes habe ich immer als sehr positiv empfunden. Deshalb gilt mein Dank allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Projekts, allen voran Dr. Berit Erlach für die vielen Diskussionen, die wir telefonisch oder persönlich geführt haben. Arjuna Nebel und den Kollegen vom Wuppertal Institut danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit im Bereich der Szenarienanalyse und Residuallastberechnung. Philipp Stöcker hat durch seine wertvollen Matlab-Implementierungsarbeiten und guten Ideen für die Modellierung sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Dafür und für das Durchhaltevermögen beim nächtlichen Berechnungsmarathon der Projektklausurtagung herzlichen Dank!

Meinem langjährigen Bürokollegen Dirk Magnor danke ich für die zügige Durchsicht der Arbeit und seine konstruktiven Anmerkungen. Mein Dank auch an alle ISEAnerinnen und ISEAner insbesondere in der Hüttenstraße, die dazu beigetragen haben, dass ich mich gerne an die Zeit am Institut zurückerinnere. Die gemeinsamen Bunchie-Aktionen sind einfach unvergessen!

Meiner Familie möchte ich für die große Unterstützung während der Studiums- und Promotionszeit danken. Sie waren immer zur Stelle, wenn Ablenkung oder Hilfe nötig waren.

Nicht zuletzt gilt mein unendlicher Dank meiner Frau Jutta und unserer Tochter Klara. Deren Rückhalt und die Perspektive, wieder gemeinsame Wochenenden verbringen zu können, haben sicher entscheidend zum zügigen Abschluss der Arbeit beigetragen.

Nürnberg, 24. Juni 2016 Benedikt Lunz

Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....
Inhaltsverzeichnis i
1. Einleitung 1
2. Szenarienanalyse 5
2.1 Flexibilitätsbedarf in der Literatur 5
2.2 Szenariokorridor 9
2.3 Ergänzende Szenarien 14
3. Residuallastberechnung 17
3.1 Prinzip 17
3.2 Geografische Verteilung 18
3.3 Wind 21
3.4 Photovoltaik (PV) 22
3.5 Laufwasserkraft 24
3.6 Last 25
3.7 Ergebnisse 25
3.8 Diskussion 27
4. Kostenbasierte Technologiezuordnung 31
4.1 Vorüberlegungen 31
4.2 Übersicht 33
4.3 Residuallastzerlegung 34
4.4 Technologiemodellierung 35
4.5 Einstellen der CO_2-Emissionsvorgabe 49
4.6 Diskussion 50
5. Technologien 53
5.1 Allgemeine Parameter und Annahmen 54
5.2 Laufwasserkraft 57
5.3 Fluktuierende Erneuerbare Energien 58
5.4 Positive Flexibilitätsbereitstellung aus fossilen und biogenen Energieträgern 59
5.5 Positive Flexibilitätsbereitstellung aus Geo- und Solarthermie 64
5.6 Positive und negative Flexibilitätsbereitstellung 67
5.7 Negative Flexibilitätsbereitstellung 74
6. Ergebnisse 79
6.1 Berechnungsfälle 79
6.2 Einstellung des CO_2-Emissionsziels 80
6.3 Residuallastauswertung 81

6.4 Vergleichsszenarien ... 84
6.5 Referenzparametersatz ... 90
6.6 Sensitivitätsanalyse ... 92
6.7 Technologiefortschritt ... 102
7. Anwendungsbeispiel: Energiepolitische Fragestellungen ... 107
7.1 Abhängigkeit von der CO_2-Emissionsreduktion ... 107
7.2 Sehr hohe CO_2-Emissionsreduktion ... 112
7.3 Verzicht auf Erdgasimporte ... 114
7.4 Einflussfaktor Biomasse ... 118
7.5 Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) und Solarthermie (CSP) ... 121
7.6 Verwendung von Überschüssen ... 123
7.7 Schwache Vernetzung ... 129
8. Weitergehende Optimierungspotenziale ... 137
8.1 Kombinierter Betrieb Speicher-Kraftwerk zur Bedienung eines Leistungsbandes ... 137
8.2 Kombinierter Betrieb Speicher-Kraftwerk in oberen Leistungsbändern ... 142
8.3 Fazit ... 146
9. Zusammenfassung ... 149
Literaturverzeichnis ... 155
Eigene Veröffentlichungen ... 162
A Anhang ... 167
A.1 Abkürzungen ... 167
A.2 Charakteristika der Leistungsbänder ... 168
A.3 Technologieparameter für die Modellrechnungen ... 170
A.4 Berechnungsfälle ... 178
A.5 Installierte Leistungen und Energiemengen der Szenarien ... 179
A.6 Ergebnistabelle Referenzszenario P0 für die Szenarien S1, S3, S4, S6, S9 ... 179
A.7 Power-to-Gas ... 182
B Lebenslauf ... 187