
Bert Droste-Franke • Boris P. Paal • Christian Rehtanz •
Dirk Uwe Sauer • Jens-Peter Schneider • Miranda
Schreurs • Thomas Zieseimer

Balancing Renewable Electricity

Energy Storage,
Demand Side Management,
and Network Extension
from an Interdisciplinary Perspective

In collaboration with
Ruth Klüser and Theresa Noll

 Springer

Series Editor

Professor Dr. Dr. h. c. Carl Friedrich Gethmann
Europäische Akademie GmbH
Wilhelmstraße 56, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler
Germany

On Behalf of the Authors

Dr.-Ing. Bert Droste-Franke, Dipl.-Phys.
Europäische Akademie GmbH
Wilhelmstraße 56, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler
Germany

Desk Editor

Friederike Wütscher
Europäische Akademie GmbH
Wilhelmstraße 56, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler
Germany

Editing

Franziska Mosthaf, Wortschleife Augsburg
Germany

ISSN 1860-4803 e-ISSN 1860-4811
ISBN 978-3-642-25156-6 e-ISBN 978-3-642-25157-3
DOI 10.1007/978-3-642-25157-3
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Library of Congress Control Number: 2012930653

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, reuse of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilm or in any other way, and storage in data banks. Duplication of this publication or parts thereof is permitted only under the provisions of the German Copyright Law of September 9, 1965, in its current version, and permission for use must always be obtained from Springer. Violations are liable to prosecution under the German Copyright Law.

The use of general descriptive names, registered names, trademarks, etc. in this publication does not imply, even in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protective laws and regulations and therefore free for general use.

Printed on acid-free paper

Springer is part of Springer Science+Business Media (www.springer.com)



EUROPÄISCHE AKADEMIE

zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen
Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Direktor: Professor Dr. Dr. h. c. Carl Friedrich Gethmann

The Europäische Akademie

The Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen GmbH is concerned with the scientific study of consequences of scientific and technological advance for the individual and social life and for the natural environment. The Europäische Akademie intends to contribute to a rational way of society of dealing with the consequences of scientific and technological developments. This aim is mainly realised in the development of recommendations for options to act, from the point of view of long-term societal acceptance. The work of the Europäische Akademie mostly takes place in temporary interdisciplinary project groups, whose members are recognised scientists from European universities. Overarching issues, e.g., from the fields of Technology Assessment or Ethic of Science, are dealt with by the staff of the Europäische Akademie.

The Series

The series Ethics of Science and Technology Assessment (Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung) serves to publish the results of the work of the Europäische Akademie. It is published by the academy's director. Besides the final results of the project groups the series includes volumes on general questions of ethics of science and technology assessment as well as other monographic studies.

Acknowledgement

The project “Energy Storages and Virtual Power Plants for the Integration of Renewable Energies into the Power Supply. Potentials, Innovation Barriers and Implementation Strategies” was supported by the German Aerospace Center (DLR). The content of the book is only the authors' responsibility.

Preface

Electricity supply is an important economic factor, particularly in industrialised societies. With restrictions in environmental effects, particularly with respect to greenhouse gas emissions, and in resources, technological innovations are called for which can contribute to producing electricity in a more environmentally friendly way than existing systems and at the same time providing sufficient supply security and economic efficiency.

The question of challenges for innovation in the energy area was already generally discussed in Volume 18 of this book series which was also published in English translation as: “Sustainable Development and Innovation in the Energy Sector”, Springer Verlag. Based on the findings from the generic analysis in the above-mentioned study, but more focussed on specific technologies, Volume 32 concentrated on the interdisciplinary analysis of the regulation of electrical networks (“Die Regulierung elektrischer Netze. Offene Fragen und Lösungsansätze”), while Volume 36 worked on interdisciplinary perspectives of small fuel cell devices for house energy supply (“Brennstoffzellen und Virtuelle Kraftwerke. Energie-, umwelt- und technologiepolitische Aspekte einer effizienten Hausenergieversorgung”). The current study deals with an again more general problem with specific technological aspects: obtaining low-carbon strategies for balancing weather-caused fluctuations and potential gaps in supply prospectively occurring in systems with high shares of electricity production from renewable sources, particularly if wind and solar radiation are predominantly used. This purpose gains importance in view of the attempts in politics to reduce greenhouse gas emissions and, thus, such large shares of wind and solar power are envisaged for future energy systems in several countries, and particularly in the European Union.

The study presents the results of the interdisciplinary work in the project “Energy Storages and Virtual Power Plants for the Integration of Renewable Energies into the Power Supply. Potentials, Innovation Barriers and Implementation Strategies”, which was carried out by the Europäische Akademie GmbH and was funded by the German Aerospace Center (DLR). The necessary disciplinary broadness could be assured by using the instrument of ‘interdisciplinary project groups’ followed at the Europäische Akademie.

My personal thanks go to the members of the project group who coped with the task of the study, partly with strong personal engagement.

Additionally, I would like to thank the German Aerospace Center (DLR) for the financial support of the project.

The results should provide a scientific foundation for the political discussion about the integration of technologies using renewable energy sources for electricity production and hint at tangible innovation barriers. Furthermore, the study shows ways of adequately implementing strategies for low-carbon options that will be necessary with the high penetration of these technologies in future electricity systems. I hope that this book will get the attention in science, politics and the interested public it deserves.

Bad Neuenahr-Ahrweiler
August 2011

Carl Friedrich Gethmann

Foreword

Combating anthropogenic climate change is the major reason for the extensive restructuring of the electricity supply that is currently ongoing. The reduction of greenhouse gases by using renewable instead of fossil sources of energy is a widely accepted measure in this context. Respectively, the share of renewable energies is continuously increasing. In many countries, wind and solar radiation represent the major promising sources. Their availability strongly changes with weather conditions. In order to avoid that short-term fluctuations and long-term gaps in the electricity supply lead to shortages on the demand side, low-carbon technologies have to be developed which can take over the role of balancing supply and demand in such situations.

In this context several questions arise: What are the major challenges for balancing energy and power in systems with a high share of electricity produced from renewable sources? Which promising low-carbon and long-term viable technology options for this purpose exist already or can prospectively be developed within the next years? Which obstacles for adequate innovation in that area can already be anticipated now and which strategies could be followed to remove or obviate these?

In order to answer these questions, the Europäische Akademie GmbH established the interdisciplinary project group “Energy Storages and Virtual Power Plants for the Integration of Renewable Energies into the Power Supply. Potentials, Innovation Barriers and Implementation Strategies” including experts from the relevant disciplinary areas of technical engineering, environmental science, economics, political science and jurisprudence. The project group started from individual disciplinary contributions, which were further discussed and integrated with regard to the overall task and composed to a consistent study. The major findings were finally condensed in policy recommendations. Most of the interdisciplinary discussions took place during the project group meetings, which were arranged about every 2 months.

Two workshops and a conference were used to obtain additional input from experts outside the project group. The first workshop concentrated on discussing results from other studies in the area. The project group would like to thank the external experts for many valuable contributions during the first workshop: Frieder Borggreffe (Universität zu Köln), Dr. Lueder von Bremen (Universität Oldenburg),

Dr. Clemens Hoffmann (Siemens AG), Dr. Cornelius Pieper (The Boston Consulting Group) and Detlef F. Sprinz, Ph.D. (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung). Furthermore, the group is grateful to Dr. Clemens Hoffmann and the Siemens AG for providing the opportunity to use their data for setting up a first version of a pan-European optimisation model considering power production from wind and solar radiation, storage options and grid connections in parallel to this project at RWTH Aachen, the idea for which was born during the first workshop. For the comprehensive review of interim results and valuable recommendations to further work on the subject, the group thanks the participants of the second workshop: Dr. Erik Hauptmeier (RWE AG, Essen), Dr. Wolfgang Woyke (E.ON AG, München), Dr.-Ing. Michael Ritzau (Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH (BET), Aachen), Dr. Gerrit Volk (Bundesnetzagentur, Bonn), Ulla Böde (Bundesnetzagentur, Bonn), Thomas Klaus (Umweltbundesamt, Dessau), Professor Uwe Leprich (Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Saarbrücken) and Professor Joh.-Christian Pielow (Ruhr-Universität Bochum). Special thanks go to the external contributors to the spring conference of the Europäische Akademie in March 2010 for giving further insights into the studies and concepts with respect to the integration of renewable energies and in particular to the external speakers: Professor Kornelis Blok (Utrecht University), Andreas Brabeck (RWE AG, Essen), Vera Brenzel (E.ON, Düsseldorf), Jörg-Werner Haug (citiworks AG, München); Dr. Wolfram Krause (EWE AG, Oldenburg), Professor Hans Müller-Steinhagen (German Aerospace Center (DLR), Stuttgart/University of Stuttgart) and Dr.-Ing. Joachim Nitsch (German Aerospace Center (DLR), Stuttgart).

Additionally the authors express their thanks to the group member Priv.-Doz. Dr. Dietmar Lindenberger (Universität zu Köln) for his contributions in many good discussions during the meetings of the project group. Furthermore, thanks are due to Frieder Borggreffe and Dr. Matthias Leuthold for detailed discussions, especially for giving insights into aspects of energy system modelling. Many thanks go also to Dr. Stephan Lingner (Europäische Akademie GmbH) for leading the first workshop and for making his valuable comments and contributions. Finally, the group thanks both Friederike Wütscher (Europäische Akademie GmbH) for the support in the publishing process and Wortschleife Augsburg for efficiently proofreading the text.

Bad Neuenahr-Ahrweiler
August 2011

Bert Droste-Franke

Contents

1	Introduction	1
1.1	Background	1
1.2	Renewable Energies in the European Energy Mix	3
1.3	Aim and Structure of the Study	7
2	Future Perspectives of Electrical Energy Supply	9
2.1	Aims for a Long-Term Viable Development of a Renewable-Based Electricity System	9
2.1.1	Efficient Allocation and Just Distribution	10
2.1.2	An Operative Action Rule	11
2.2	Indicators for the Evaluation of Balancing Strategies	12
2.2.1	Indicators for Environmental Effects	13
2.2.2	Indicators for Resource Availability	14
2.2.3	Indicators for the Design of the Energy Supply System	16
2.3	Political Governance Towards a Renewable Energy Electricity System in Europe	17
2.3.1	Historical Background, Current Status and Development of Europe's Energy System	17
2.3.1.1	Europe's Growing Energy Dependence	17
2.3.1.2	Climate Change Constraints	18
2.3.1.3	Climate Change as a Driving Force Behind the Search for a Low-Carbon Electricity System	18
2.3.1.4	Growing Diversification of the Energy Supply	18
2.3.1.5	Trends in Renewable Energy Production in Europe	19
2.3.2	Political Governance Activities for Organising the Future Energy System	19
2.3.2.1	Regional Cooperation in Developing Renewables	19
2.3.2.2	National Actions Within the EU on Climate Change and Renewable Energy	21
2.3.2.3	European Policies for a Low-Carbon Energy Market	24
2.3.2.4	The European Energy Council of 2011	28
2.3.2.5	Moving Towards Higher Emission Reduction Targets	28

2.3.2.6	Roadmap for a Low-Carbon Economy in 2050	28
2.3.2.7	Supporting Infrastructure Development for Renewable Energy	29
2.3.2.8	Public Acceptance	29
2.3.3	Challenges Ahead	30
2.4	Economics of Storing Values	30
2.4.1	Energy Economic Background	30
2.4.2	Theory of Storing Values	32
2.4.2.1	Storing Values Without Technologies	32
2.4.2.2	Storing Values Using Technologies	33
2.5	Summary and Conclusions	35
3	Existing Energy System Studies	37
3.1	Applicability of Existing Future Energy Scenarios as Framework Conditions for the Analysis of Strategies	37
3.1.1	Energy System Modelling: A Theoretical Perspective	38
3.1.2	Basic Approaches in Energy System Analysis Followed in This Study and Data Requirements	41
3.1.3	Comparison of Relevant Energy System Analyses According to Their General Characteristics	44
3.2	The Derivation of Future Electricity Supply Parameters as Inputs for the Analysis of Balancing Strategies	49
3.2.1	Assumptions in the Political Renewable Energy Sources (RES) Scenario: Intensified Funding	51
3.2.2	Assumptions According to the Lead Scenario 2009	51
3.2.3	Effects on the Conventional Power Station Park	52
3.2.3.1	Renewable Energy Sources	52
3.2.3.2	Fuel Prices	53
3.2.3.3	Resulting Power Station Parks	55
3.2.4	Evaluation of Development Paths	56
3.3	Summary and Conclusions	58
4	Demand for Balancing Electrical Energy and Power	61
4.1	Assessing the Balancing Demand and Storage Employment Based on Scenarios for Germany	61
4.1.1	Assessing the Demand of Balancing Electrical Energy and Power	62
4.1.1.1	Effect on the Residual Load and the Available Power Station Power	62
4.1.1.2	Characteristics of Possible Wind Calms Lasting Several Days	66
4.1.1.3	Dimensioning the Necessary Storage Capacity	66
4.1.2	Estimation of the Storage Employment	70

4.2	Assessing the Storage Demand Based on an Optimised Pan-European Low-Carbon Electrical Energy Supply Strategy	73
4.2.1	General Aspects and Boundary Conditions	73
4.2.2	Power Flow Calculation	74
4.2.3	System Optimisation	76
4.2.4	Cost Data and Other Assumptions	77
4.2.5	First Model Results	79
4.2.6	Discussion of Results	79
4.3	Summary and Conclusions	81
5	Technologies for Balancing Electrical Energy and Power	83
5.1	Classification of Energy Storage Systems and Systems Offering Positive and Negative Control Power	83
5.2	Technical Description of “Electricity to Electricity” Energy Storage Technologies for a Balanced Electrical Energy and Power Supply	86
5.2.1	“Mechanical” Storage Systems for Electric Power	86
5.2.1.1	Compressed Air Energy Storage (CAES)	86
5.2.1.2	Pumped Hydropower Plants	90
5.2.1.3	Hydro Storage Systems	91
5.2.1.4	Flywheels	91
5.2.2	“Electrical” Storage Systems for Electric Power	92
5.2.2.1	Electrochemical Double-Layer Capacitors (“Supercaps”)	92
5.2.2.2	Superconducting Coils	93
5.2.3	“Chemical” Storage Systems for Electric Power	93
5.2.3.1	Lead-Acid Batteries	93
5.2.3.2	High Temperature Sodium-Based Batteries	94
5.2.3.3	Lithium-Ion Batteries	95
5.2.3.4	Nickel Cadmium (NiCd) and Nickel-Metal-Hydride (NiMH) Batteries	95
5.2.3.5	Redox-Flow Batteries	96
5.2.3.6	Hydrogen Storage Systems	97
5.3	Technical Description and Potential of “Electricity to Anything” Energy Storage Technologies for a Balanced Electrical Energy and Power Supply	99
5.3.1	DSM Industrial Sector	100
5.3.2	Balance Provision by Electrical Mobility	100
5.3.3	DSM Household Sector	101
5.3.3.1	Technical Potential of DSM in the Household Sector	101
5.3.3.2	Expected Economic Benefits from DSM in the Household Sector	105
5.3.4	Shutdown of Renewable Power Generation	108
5.3.5	Generation of Chemical Fuels such as Hydrogen, Methane or Methanol from Electricity	108

5.4	Technical Description of “Anything to Electricity” Energy Storage Technologies for a Balanced Electrical Energy and Power Supply	109
5.4.1	CHP Plants with Thermal Storage	109
5.4.2	Conventional Power Plants Using Fossil, Nuclear, Hydro or Biofuels	113
5.5	Conclusions on Options for Demand Response and Demand-Side Management	113
5.6	Life Cycle Cost Analysis of Storage Technologies	114
5.7	Assessment of Future Viability of the Technologies’ Environmental Issues, Resource Use and System Characteristics ...	119
5.7.1	Methodology and Data Applied for Quantitative Assessment	120
5.7.2	Environmental Impacts	120
5.7.2.1	Assessment Methodology and Assumptions	120
5.7.2.2	Environmental External Costs of Balancing Technologies	123
5.7.2.3	Environmental Impacts of Balancing Technologies Differentiated into Categories	126
5.7.3	Resource Use	128
5.7.3.1	Types and Amounts of Resources Required	128
5.7.3.2	Current Availability of Relevant Mineral Resources	129
5.7.3.3	Resource Potentials for the Production of Balancing Technologies	131
5.7.4	System Characteristics Relevant for Society	134
5.7.4.1	Supply Reliability	135
5.7.4.2	Risk Avoidance	137
5.7.4.3	Openness to Options	137
5.7.5	Conclusions on the Future Viability of Various Approaches to Energy Storage	138
5.8	Summary and Conclusions	138
6	Technology of Electricity Networks and Economical Impacts	143
6.1	Assessment of Technical Barriers Considering the Total System Including Network Requirements	143
6.1.1	Interaction of Load Control with the Distribution Network	143
6.1.2	Transmission Network Expansion	149
6.2	Economical Impacts of Balancing Activities at the Daily and Seasonal Scales	154
6.2.1	Distribution Network Requirements for Avoiding Restrictions	154
6.2.2	Effects of the Transmission Network Expansion Measures	158

6.2.3	Conclusions on Economical Impacts of Balancing Activities	160
6.3	Summary and Conclusions	160
7	Economic Analysis and Policy	163
7.1	Problems in a Market Economy without Economic Policy: Weather-Based Supply and Culturally Caused Demand Fluctuations	163
7.1.1	The Insurance Function of the Market	163
7.1.2	Fluctuations and Smoothing of Electricity Demand: Energy Saving Reduces the Demand for Storage Facilities	164
7.1.3	Fluctuations and Smoothing of Supply	166
7.1.4	Coordination of Supply and Demand	166
7.1.5	Aspects of Long-Run Developments	167
7.1.6	Towards a Theory of Location for Storage Facilities	168
7.2	Analysis of Economic Framework Conditions	169
7.2.1	Introduction: The Theory of Economic Policy	169
7.2.2	The Theory of Economic Policy in the Area of Environmental and Technology Problems	170
7.2.2.1	Tradable CO ₂ Permits, Taxes and Other Instruments	170
7.2.2.2	Research and Technical Progress: Trusting Markets Only Versus Support for Complementary Technologies?	171
7.2.2.3	Beyond Pigovian Corrections	172
7.2.2.4	Policies for Imported Resources and Political Risks	172
7.2.3	The Current Practice of Government Support	172
7.2.4	Stylised Views on Economic Policy: First Best, Second Best, History and Transition	173
7.2.4.1	First Best	173
7.2.4.2	Second Best	174
7.2.4.3	Historical Heritage	175
7.2.4.4	Transition to Science Based Views	175
7.2.5	Economic Policy Recommendations	176
7.3	Summary and Conclusions	177
8	Legal Analysis of Balancing Strategies	179
8.1	Introductory Remarks	179
8.2	Energy Storage	180
8.2.1	Centralised Storage Systems	180
8.2.1.1	Planning and Licensing	180
8.2.1.2	Regulatory Incentives	181
8.2.1.3	Access	181
8.2.1.4	Unbundling	184

8.2.2	Decentralised Storage Systems, Especially E-mobility	185
8.2.2.1	Legal Relationships	185
8.2.2.2	Contractual Relationships Within Networks	187
8.2.2.3	Questions Concerning Data Protection	189
8.3	Balancing Strategies in Distribution Grids	190
8.3.1	Smart Meter	190
8.3.1.1	Topics Regarding Data Protection	191
8.3.1.2	Contractual Relationships in Networks	195
8.3.2	Smart Grid/Demand-Side Management	195
8.3.2.1	Data Protection	196
8.3.2.2	Contractual Relationships in Networks	196
8.4	Transmission Network Expansion	196
8.4.1	The Status Quo for Planning and Licensing of Network Expansion	197
8.4.2	The Status Quo of Investment Regulation as Part of Economic Energy Regulation	200
8.4.2.1	Unbundling	201
8.4.2.2	Network Investment Duties for TSOs	201
8.4.2.3	Investment Planning Duties of TSOs as an Instrument of Reflexive Steering	203
8.4.2.4	Investment Incentives and Securing Investments as an Aspect of Price Regulation	205
8.4.3	Concepts for a Reform of Planning, Licensing and Regulating of Network Expansion	207
8.4.3.1	National Concepts	207
8.4.3.2	European Concepts	209
8.4.4	Summary and Conclusions	211
9	Conclusions and Recommendations	213
9.1	Overall Aim and Results	213
9.2	Challenges and Recommendations	214
9.2.1	Development of Technical Infrastructure	215
9.2.2	Framework Conditions and Organisational Aspects	217
9.2.2.1	Market Conditions for Balancing Technologies	217
9.2.2.2	Specific Support for the Application of Balancing Technologies	220
	References	223
	Glossary	233
	List of Authors	241
	Appendix	245
	Further volumes of the series Ethics of Science and Technology Assessment (Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung)	251

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Ein wesentliches Ziel der Umstrukturierung des Elektrizitätssystems in Deutschland und Europa ist die Reduzierung der erzeugten Umweltbelastung, vor allem durch Treibhausgase, auf ein langfristig zukunftsfähiges Maß. Es wurden Minderungsziele für Emissionsmengen festgelegt, deren Einhaltung langfristig zu einer akzeptablen Belastung von Umwelt und Gesellschaft führen soll. Eine wichtige Grundlage für die Einhaltung dieser Ziele ist die schrittweise Entwicklung eines Elektrizitätssystems, das zukünftig den Anforderungen von ökonomischer Effizienz, Umweltfreundlichkeit und Versorgungssicherheit gerecht werden kann. Die vorliegende Studie skizziert ein solches System basierend auf verfügbaren Szenarien. Der Schwerpunkt liegt dabei auf technischen Systemen zur Unterstützung der eigentlichen Elektrizitätserzeugung wie Energiespeichern und Netzausbau.

In der Studie werden Technologien diskutiert, mit denen die Nachfrage und das Angebot an Elektrizität ausgeglichen werden, womit die Nutzung großer Mengen Elektrizität aus erneuerbaren Energien ermöglicht werden kann. Zunächst werden normative Ziele für das zukünftige Elektrizitätssystem vorgestellt und die derzeitige Entwicklung in Politik, Gesellschaft und Technologien beschrieben; es folgt ein Überblick über bestehende relevante Energiesystemstudien. Diese Arbeiten dienen als Grundlage für weitere Analysen, anhand derer der Bedarf an Ausgleichskapazität in Systemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energien in der Elektrizitätserzeugung abgeschätzt wird, Potentiale verschiedener Technologien diskutiert werden, Anforderungen an elektrische Netze ermittelt werden, Kosten und Politikoptionen untersucht werden, wichtige regulatorische Aspekte behandelt werden und, abschließend, Empfehlungen zu den identifizierten Herausforderungen formuliert werden. Maßgeblich für die Untersuchungen ist der Stand der gesetzlichen Regelungen im April 2011.

Ziele für eine zukunftsfähige Entwicklung und der Status Quo von Elektrizitätssystemen in Europa

Zur Ableitung grundlegender normativer Ziele für ein zukunftsfähiges Elektrizitätssystem werden in der Studie die fundamentalen wirtschaftlichen Prinzipien der effizienten Allokation und der gerechten Verteilung herangezogen. Diese werden operationalisiert, um politisches Handeln und Optionen für ein zukünftiges Elektrizitätssystem einordnen und bewerten zu können. Aus ökonomischer Sicht bestehen verschiedene Zielkonflikte zwischen technischer Effizienz, niedrigen Preisen und umweltseitigen Belastungsgrenzen. Diese können aufgelöst werden, indem man eine Handlungsregel in vier absteigenden Prioritäten formuliert (s. Abschnitt 2.1 im Haupttext):

1. Schutz der Umwelt und damit der Gesellschaft vor inakzeptablen Auswirkungen;
2. Erhaltung des Gesamtwerts des adäquat bewerteten produzierten und natürlichen Kapitals;
3. Maximierung der gesamten Wohlfahrt derzeitiger und zukünftiger Generationen unter Einhaltung der ersten zwei Prioritäten;
4. gerechte Verteilung von Grundlagen in der Gegenwart.

Durch die Heranziehung entsprechender Indikatoren kann die Handlungsregel für die Bewertung von Technologien, politischen Handelns und politischer Entwicklungen verwendet werden. In der Studie werden dazu die drei Bereiche Schutz der Umwelt, Ressourcennutzung/-verfügbarkeit und Systemcharakteristiken im Hinblick auf die Gesellschaft unterschieden (s. Abschnitt 2.2 im Haupttext).

Eine Analyse der politischen Prozesse der vergangenen etwa zwanzig Jahre in dieser Studie (s. Abschnitt 2.3 im Haupttext) zeigt Entwicklungen und Versäumnisse in der Energiepolitik auf. Einige Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt. Experten befürchten, dass durch den beobachteten Klimawandel inakzeptable Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft entstehen könnten. Deshalb wurden von der internationalen Gemeinschaft Grenzen für die Emission von "Treibhausgasen" politisch definiert und gesetzlich festgelegt. Diese dienen auch als Basis für die Festlegung von Quoten auf den Anteil erneuerbarer Energien im Energiesystem. Bereits heute ist in Europa ein starker Anstieg in der Verwendung erneuerbarer Energien für die Stromproduktion zu verzeichnen, der sich vermutlich weiter fortsetzen wird. Allerdings bestehen nach wie vor große Herausforderungen für die Politik, z.B. die Stärkung des internationalen Elektrizitätsmarktes. Dafür sollten vor allem weitere europäische Länder in den Markt einbezogen werden, wozu ein Ausbau der technischen Infrastruktur, in erster Linie die Erweiterung der elektrischen Netze, erforderlich wird. Zusätzlich sollte untersucht werden, inwiefern die gegenwärtig wachsende Zuständigkeit Europas in der Regelung von Energiefragen weiter verstärkt werden sollte. Die Erfahrung zeigt außerdem, dass einige Großprojekte, die aus langfristig umweltseitiger und gesellschaftlich normativer Sicht akzeptiert oder sogar gewünscht werden, in Teilen der Bevölkerung auch auf Ablehnung stoßen. Das gilt unter anderem auch

für Technologien, die für eine weitere Ausweitung der Nutzung erneuerbarer Energien notwendig sind. Deswegen werden adäquate Prozeduren für die Beteiligung von Interessensvertretern an Entscheidungsprozessen erforderlich sein.

Theoretische Untersuchungen der Speicherung von Elektrizität als Mittel zur Speicherung ökonomischer Werte (s. Abschnitt 2.4 im Haupttext) zeigen auf, dass drei Optionen in einem System mit einem hohen Anteil von Elektrizität aus Wind- und Solarkraft verfolgt werden können, um Nachfrage und Angebot von Elektrizität auszugleichen. Die erste sieht vor, die internationalen Netzverbindungen, vor allem das Übertragungsnetz, auszubauen und die Installation von Windkraftanlagen und solar betriebenen Anlagen so anzupassen, dass ein großes Potential für den Stromaustausch bei regional unterschiedlichem Elektrizitätsbedarf entsteht. Die zweite Option besteht darin, konventionelle Kraftwerke über die ohnehin benötigte Kapazität hinaus zusätzlich allein für den Ausgleich vorzuhalten. Die dritte beinhaltet den Aufbau von Energiespeicheroptionen inklusive Nachfragesteuerung.

Bestehende Energiesystemanalysen

Hinsichtlich der technischen und ökonomischen Potentiale für den regionalen Ausgleich von Elektrizitätsnachfrage und -angebot wird deutlich, dass Kontinente die richtigen geographischen Skalen für Energiesystemanalysen sind. Jedoch liegt die Energiepolitik in Europa nach wie vor vorwiegend in den Händen der jeweiligen souveränen Staaten. Daher werden in dieser Studie in erster Linie nationale Energieszenarien für die interdisziplinäre Analyse herangezogen. Deutschland wird als ein Fallbeispiel für eine große europäische Nation mit einer starken Ökonomie und gleichzeitig ambitionierten Zielen bezüglich der Nutzung erneuerbarer Energien analysiert.

Eine Bestandsaufnahme (s. Abschnitt 3.1 im Haupttext) zeigt, dass in den vorhandenen Analysen des deutschen Elektrizitätssystems, die zur Politikberatung herangezogen werden, im Wesentlichen zwei Ansätze verfolgt werden: Während die Entwicklungen in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren, also bis 2020 bzw. 2030, hauptsächlich durch zeitlich explorative Szenarien, die auf ökonomischer Optimierung basieren, untersucht werden, werden langfristige Analysen mit Blick auf 2050 durchgeführt, indem zunächst Zielsysteme definiert und dann mögliche Pfade zu ihrer Realisierung analysiert werden. Ein Vergleich der einschlägigen Studien zeigt die Wichtigkeit weiterer Offenlegungen der Annahmen, der Verwendung konsistenter Parameter und der Durchführung weiterer Sensitivitätsanalysen für die Interpretation der Ergebnisse mit dem Ziel der Politikberatung und für die Kombination der Aussagen aus den sich prinzipiell ergänzenden Studien.

Für die Systemanalysen in dieser Studie wird folgender Ansatz verfolgt: zuerst wird eine Analyse der Zielsituation, in der ein langfristig zukunftsfähiges System zur Elektrizitätsversorgung erreicht ist, durchgeführt. Dazu werden potentielle zukünftige Elektrizitätssysteme auf ihren Bedarf und die Potentiale von Technologien für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage elektrischer Energie hin untersucht. In einem zweiten Schritt werden dann Maßnahmen identifiziert, die bereits heute

erfolgen könnten, um adäquate Rahmenbedingungen für die erforderlichen Innovationsprozesse zu gewährleisten.

Da in der vorliegenden Studie keine Gesamtkonzepte zukünftiger Elektrizitätssysteme inklusive der Erzeugung neu zu entwickeln waren und sie sich vielmehr auf die Betrachtung ergänzender Technologien zum Ausgleich von elektrischer Energie bei einem hohen Anteil erneuerbarer Energien konzentrieren soll, wurden zwei bereits vorhandene Studien als Grundlage für die Analysen herangezogen (s. Abschnitt 3.2 im Haupttext): Das “Leitszenario 2009” als Pfadanalyse (genauer: “roadmapping”-Ansatz, Nitsch and Wenzel 2009) und ein exploratives politisches Szenario mit ambitionierten Umweltzielen (Szenario “III” von Lindenberger et al. 2008). Auf ihrer Basis wurden für die zwei zukünftigen Jahre 2030 und “2040+”³ Anforderungen an den Ausgleich des Angebots und der Nachfrage elektrischer Energie untersucht. Als erstes Ergebnis aus der Analyse der Anlagenparks ergibt sich, dass im Falle des Leitszenarios im Zieljahr 2040+ zusätzliche Maßnahmen wie der Bau von Speichersystemen, Lastmanagement oder Absicherung der Importe von Strom aus erneuerbaren Energien notwendig sind, um ein funktionierendes System zu realisieren.

Bedarf an Ausgleich elektrischer Energie und Leistung bei einem hohen Anteil erneuerbarer Energien im System

Eine genaue Analyse der technischen Charakteristika der zwei ausgewählten Szenarien für Deutschland im Hinblick auf die residuale Last, d.h. der Last, die zeitweise nicht durch die Kraftwerke im System abgedeckt werden kann, auf Basis repräsentativer Tage (“Typtage”) (s. Abschnitt 4.1.1.1 im Haupttext) ergab für das Leitszenario ein maximales Leistungsdefizit zur Deckung von Lücken im Stromangebot in 2030 von 7 GW und in 2040+ von 18 GW. Der maximale zeitweise Überschuss an elektrischer Leistung ergab sich in 2030 zu 13,7 und in 2040+ zu 24 GW. Dabei kann elektrische Energie in Höhe von 4 TWh (2030, 1,4 Prozent der jährlichen Einspeisung aus erneuerbaren Energien) bzw. 21 TWh (2040+, 4,7 Prozent der jährlichen Einspeisung aus erneuerbaren Energien) nicht im System genutzt werden. Diese Zahlen zeigen bereits, dass ein gewisses Potential für die Nutzung von Speichertechnologien besteht.

Die Auslegung der Speicheroptionen ist hauptsächlich bestimmt durch die Menge zusätzlicher Leistung und Energie, die für den Ausgleich von Windstillen benötigt wird (s. Abschnitte 4.1.1.2 und 4.1.1.3 im Haupttext). Die Analyse von Windstillen verschiedener Stärken und Längen zeigt, dass eine reine Abdeckung des zusätzlichen Leistungsbedarfs durch Speicher in der Summe eine Speicherleistung von 18 GW in 2030 und 35 GW in 2040+ erfordern würde. Die Energiekapazität der Speicheroptionen müsste insgesamt 600 GWh in 2030 und 1.700 GWh in 2040+ betragen, um die jeweils maximal benötigte Energiemenge abdecken zu können.

³ 2040+ entspricht einer Situation in einem Jahr um 2040 oder später.

In den Betrachtungen für 2030 wird die zur Abdeckung von Produktionseinbrüchen notwendige Dimension des Gesamtspeichers durch eine Windstille bestimmt, in der 5 Prozent der installierten Leistung über 87 Stunden nicht überschritten werden (d.h.: bei der 87 Stunden lang eine Reduktion um mindestens 95 Prozent zu beobachten ist). In 2040+ ergibt sich die Dimensionierung der Speicher durch eine Windstille mit 218 Stunden Länge und mindestens 80 Prozent Reduktion der Leistung. Die Anforderungen können in dem Maße verringert werden in dem gesicherte Elektrizität importiert werden kann.

Unter der beispielhaften Annahme der Nutzung von Druckluftspeichern ("Compressed Air Energy Storages" (CAES)) und der Vernachlässigung der Reduktion von Spitzen bei der Berechnung der Erzeugungskosten wurde der finanzielle Gewinn durch die Speichernutzung ermittelt (s. Abschnitt 4.1.2 im Haupttext). Die Berechnungen ergeben, dass im Fall von 15 GW zusätzlich installierter Speicherleistung in 2040+ die Reduktionen in den Erzeugungskosten die Annuitäten des Investments übersteigen. Das bedeutet, dass Druckluftspeicher mit den angenommenen Charakteristiken selbst ohne die Berücksichtigung von Preisen, die in Spitzenlastzeiten erzielt werden können, ökonomisch betrieben werden könnten.

Zusätzlich zu dieser Analyse von bestehenden Szenarien für Deutschland wurde im Projekt ein pan-europäischer Modellansatz entwickelt und parallel dazu numerisch umgesetzt (s. Abschnitt 4.2 im Haupttext). Mit ihm wird das System bestehend aus Elektrizitätserzeugung aus Wind und Sonneneinstrahlung, Elektrizitätsnetzen und Energiespeichern auf der Basis stündlicher meteorologischer Daten für sieben Jahre unter technischer sowie kostenseitiger Annahmen für ein zukünftiges Jahr um 2040 und später (2040+) optimiert. Vorgaben durch historisch gewachsene Energiesysteme, wie die Zahl und Art bereits bestehende Kraftwerke, werden dabei vernachlässigt, womit für die Optimierung zunächst keine Restriktionen außer Wetterbedingungen, spezifischen Kosten und verfügbaren Technologien bestehen. Der Modellmechanismus fußt auf einem genetischen Algorithmus, der iterativ "Individuen" optimiert, die sich durch verschiedene Charakteristiken des Energiesystems auszeichnen und in Form von Kostenwerten ausgedrückt werden. Mit dem Modell wurden erste Berechnungen durchgeführt.

Technologien für den Ausgleich elektrischer Energie und Leistung

Die Betrachtung der Eigenschaften verschiedener Technologien, die prinzipiell für den Ausgleich elektrischer Energie und Leistung herangezogen werden können, zeigt, dass ihre Verwendbarkeit stark von der jeweiligen Aufgabe abhängt. Technische Optionen wie Speichertechnologien aber auch Lastmanagement und konventionelle Kraftwerke können daher gut kategorisiert werden, indem ihre Charakteristiken im Hinblick auf die folgenden Bereiche angegeben werden (s. Abschnitte 5.1 bis 5.5 im Haupttext):

- A) Typ und Einsatzort des Speichersystems,
- B) Dauer und Häufigkeit des Speicherangebots,
- C) Form der gespeicherten und der bereitgestellten Energie.

Die Simulation der Realisierung für typische Fälle erlaubt es, potentielle zukünftige Kosten abzuschätzen (s. Abschnitt 5.6 im Haupttext). Auf Basis der Analyse ergeben sich folgende Aussagen für die untersuchten drei verschiedenen Aufgaben. Die Annahmen für die technischen Anforderungen sind jeweils in Klammern dargestellt:

- *Langzeitspeicherung (Leistung⁴: 500 MW, verfügbare Energie: 100 GWh, 1,5 Zyklen pro Monat):*

Für diese Aufgabe scheinen Kosten von 10 €-Cent/kWh erreichbar zu sein, wenn Elektrizität in Form von Wasserstoff gespeichert wird. Dieser Wert ist deutlich geringer als die abgeschätzten Kosten für Druckluftspeicher (CAES) (ca. 23 €-Cent/kWh). Die Potentiale in Deutschland sind hoch. Im Gegensatz dazu sind die Kosten für Pumpspeicherkraftwerke mit 5 €-Cent/kWh zwar geringer, aber die Potentiale in Deutschland sind sehr beschränkt. Bei Nutzung von Potentialen außerhalb Deutschlands, z.B. in Skandinavien, muss außerdem berücksichtigt werden, dass dazu ein entsprechender Ausbau des Übertragungsnetzes notwendig ist. Sollte sogar eigens für die Nutzung des Speichers eine Netzverbindung gebaut werden müssen und sollte diese nur für diesen Speicher genutzt werden, können die Gesamtkosten dieselbe Höhe erreichen wie die für die Speicherung in Wasserstoff.

- *Lastausgleich im Übertragungsnetz (Leistung: 1 GW, verfügbare Energie: 8 GWh, 1 Zyklus pro Tag):*

Für diese Aufgabe sind ebenfalls Pumpwasserkraftwerke interessant. Sie können voraussichtlich zu denselben niedrigen Kosten wie im Fall der Langzeitspeicherung betrieben werden. Zusätzlich käme der Einsatz von Druckluftspeichern, besonders der adiabatisch arbeitenden Varianten, mit erreichbaren Kosten unter 5 €-Cent/kWh in Frage. Des Weiteren können Batterien gut für den Lastausgleich genutzt werden, obwohl sie voraussichtlich höhere Kosten als die anderen zwei Optionen aufweisen werden. Dafür haben sie den Vorteil, auch Primärreserve bereitstellen zu können.

- *Bereitstellung von Spitzenlast (peak shaving) in den Verteilnetzen (Leistung: 100 kW, verfügbare Energie: 250 kWh, 2 Zyklen pro Tag):*

In diesem Bereich konkurrieren verschiedene Batterietechnologien miteinander, insbesondere Zinc-Brom-, Vanadium-Redox-Flow-, Lithium-Ionen-, Nickel-Cadmium-, Blei-Säure- und Natrium-Schwefel- oder Natrium-Nickel-Chlorid-Technologien. Aus heutiger Sicht werden die erreichbaren spezifischen Kosten für Natrium-Systeme am niedrigsten eingeschätzt, gefolgt von der Blei-Säure-Technologie, welche heute die kostengünstigste Variante darstellt.

Zusätzlich zu den kostengünstigen Optionen werden voraussichtlich auch Potentiale durch Doppelnutzung von Speichern wie Batterien in Elektrofahr-

⁴ Für die Definition der Aufgaben sind Ladungs- und Entladungsleistung als gleich angenommen worden.

zeugen und stationäre Batterien in Gebäuden, die z.B. zur Ergänzung kleiner Photovoltaikanlagen eingesetzt werden, in Zukunft relevant werden. Das gesamte Potential von Lastmanagement inklusive der Steuerung von Elektrofahrzeugen, Kraftwärmekopplungsanlagen, Industrielasten, Wärmepumpen und weißer Ware (Kühlschränke, Waschmaschinen, etc.) wird theoretisch auf etwa 16 bis 23 GW abgeschätzt. Unter Berücksichtigung der begrenzten Akzeptanz beim Konsumenten reduziert es sich auf etwa 10 GW. Neben der Installation von Speicheroptionen wird es aus technischer, ökonomischer und rechtlicher Sicht zusätzlich notwendig sein, Wind- und Solaranlagen bei extremen Angebotsspitzen abzuschalten.

Abschätzungen der Zukunftsfähigkeit von Speichersystemen auf Basis von Daten zu Lebenszyklusanalysen zeigen, dass die erwarteten starken Reduktionen in der Menge der CO₂-Emissionen im Energiesystem voraussichtlich dazu führen werden, dass die bei Produktionsprozessen von Materialien wie Nickel und Blei entstehenden Emissionen relevanter werden (s. Abschnitt 5.7.2 im Haupttext). Aufgrund hoher SO₂-Emissionen in einigen wichtigen Prozessen könnten u.a. entsprechende Auswirkungen auf Ökosysteme an Bedeutung gewinnen.

Durch die zukünftig geringere Ausbeutung fossiler Energieressourcen rückt die Nutzung und Verfügbarkeit von mineralischen Ressourcen stärker in den Fokus. Dies gilt insbesondere für die Produktion und den Betrieb neuer Energietechnologien, unter anderem solcher, die zum Ausgleich von elektrischer Energie und Leistung verwendet werden können. Die Analyse der Verfügbarkeit mineralischer Ressourcen unter Berücksichtigung der statischen Reichweite, regionaler Konzentrationen von Reserven, Preise und Preisänderungen (s. Abschnitt 5.7.3 im Haupttext) zeigt, dass von den analysierten Rohstoffen lediglich Titan unproblematisch ist, während einzelne wenige Probleme mit Lithium, Vanadium, Arsen, Nickel und Zirkonoxid absehbar sind. Nimmt man den heutigen Ressourcenbedarf für die Herstellung und den Betrieb von Batterien auch für zukünftige Technologien an, wird die Verwendung der untersuchten Batterietechnologien Lithium-Typ-, Blei-Säure- und Vanadium-Akkumulatoren in großen Mengen langfristig hohe Recyclingraten und möglicherweise die Substitution derzeit benötigter Mineralien erfordern.

Die Analyse der Systemcharakteristik der betrachteten Ausgleichstechnologien anhand typischer, hier verwendeter Indikatoren für diesen Bereich kommt vor allem für kleine modulare Systeme zu einem positiven Ergebnis (s. Abschnitt 5.7.4 im Haupttext). Bei großen zentralen Systemen kann es zu höherer Importabhängigkeit kommen; es muss ein größerer Aufwand betrieben werden, um ausreichend Redundanz im System vorzuhalten, und die begrenzte Akzeptanz der lokalen Bevölkerung ist zu berücksichtigen, wodurch voraussichtlich die Nutzung partizipativer Elemente in den Entscheidungsverfahren wichtig sein wird. Zusätzlich müssen adäquate Maßnahmen ergriffen werden, um das Risiko von Unfällen unter plötzlicher Abgabe gespeicherter Energie gering zu halten. Um zu vermeiden, dass die Entwicklung von Ausgleichsoptionen für Angebot

und Nachfrage von elektrischer Energie behindert wird, müssen die implementierten Fördersysteme technologieneutral gestaltet werden.

Implikationen für Elektrizitätsnetze

Die Ausweitung der Nutzung erneuerbarer Ressourcen für die Elektrizitätsproduktion und die Anwendung der oben diskutierten Ausgleichsoptionen erfordern zusätzlich einen Ausbau der Elektrizitätsnetze. Das betrifft sowohl das Übertragungsnetz als auch die Verteilnetze, sowohl national als auch international.

Eine Untersuchung technischer Restriktionen in Verteilnetzen (s. Abschnitt 6.1.1 und 6.2.1 im Haupttext) zeigt auf, dass die Kapazitäten bei Nutzung von Laststeuerung ("demand side management") wegen der ansteigenden Gleichzeitigkeit der Lasten voraussichtlich schnell erschöpft sein werden. Die Verletzung operativer Grenzen kann dadurch verhindert werden, dass Last und Erzeugung im Verteilnetz koordiniert werden. Um die Umsetzung der Laststeuerung im Hinblick auf ihren Nutzungskomfort zu optimieren, sollte sie so weit wie möglich automatisiert werden. Für die notwendige Verstärkung der Verteilnetze werden Kosten von 1.000 € pro Haushalt abgeschätzt, die bei Ausnutzung des Potentials Laststeuerung voraussichtlich ab 2020 zu investieren sind. Diese sind im Vergleich zu den jährlich eingesparten Erzeugungskosten von ungefähr 18 € pro Haushalt hoch.

Basierend auf Berechnungen für das Übertragungsnetz mit Hilfe von Profilen typischer Tage ("Typtage") (s. Abschnitt 6.1.2 und 6.2.2 im Haupttext) ist langfristig dessen Erweiterung um etwa 3.000 km oder mehr notwendig, um der räumlichen Verschiebung der Erzeugung aufgrund des substantiellen Anstiegs operativer Off-Shore-Windanlagen gerecht zu werden. Die Beschränkung der Anlayse auf Typtage bedeutet, dass durch diese errechnete Erweiterung allerdings maximal nur etwa 70 Prozent der insgesamt installierten Windkraftleistung übertragen werden können. In seltenen Extremsituationen, in denen die Leistung 70 Prozent der Maximalleistung übersteigt, müssten daher Windkraftanlagen abgeschaltet werden, um Schäden am Übertragungsnetz zu vermeiden. Für die Abschätzung der Werte wird außerdem angenommen, dass kein starker Austausch von elektrischer Energie mit Nachbarländern stattfindet. Andere Studien, die auch die netzseitige Abdeckung extremer Einspeisesituationen und einen starken Austausch mit Nachbarländern für die Abschätzung des Ausbaubedarfs vorsehen, kommen zu einer Erweiterung von etwa 3.500 Kilometern, die bereits in 2020 notwendig sein werden.

Unter Berücksichtigung der derzeitigen und voraussichtlich zukünftigen Entwicklung der Netztechnologien erscheint aus heutiger Sicht die Verwendung einer Kombination von konventionellen Drehstromfreileitungen mit Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) am plausibelsten. Aus Rechnungen auf Basis von Typtagen ergeben sich damit langfristig (2040+) Investitionskosten von sechs bis acht Milliarden € bzw. entsprechend etwa 0,2 bis 0,35 €-Cent pro kWh eingespeister Windenergie.

Wirtschaftspolitische Optionen für die Nutzung von Speichersystemen

Die theoretische Analyse möglicher Probleme einer Marktwirtschaft angesichts wetterabhängiger Elektrizitätserzeugung und kulturell beeinflusster Nachfragefluktuationen (s. Abschnitt 7.1 im Haupttext) zeigt, dass mit dem Einsatz von Ausgleichstechnologien im Elektrizitätssystem verschiedene Nutzen verbunden sind. Durch die Verbesserung der Infrastruktur über nationale Grenzen hinweg könnten die Fluktuationen durch Lieferungen aus Regionen mit Angebotsüberschuss in Regionen mit Angebotsdefizit gedämpft werden. Sowohl Stromanbieter als auch -händler könnten an dem Betrieb von Speichersystemen interessiert sein. Während Anbieter die Systeme voraussichtlich nahe der Erzeugung installieren werden, werden Händler sie eher in Kundennähe platzieren. Netzbetreiber könnten Speicheranlagen idealerweise in Bereichen hoher Netzin stabilität aufstellen. Allerdings ist es Netzbetreibern aufgrund der “Unbundling”-Richtlinie der Europäischen Union derzeit nicht erlaubt Speicheranlagen in nennenswertem Umfang zu betreiben.

Die Anwendung von Energiespeichern führt zu einigen Systemverbesserungen, mit denen politische Eingriffe in den Markt gerechtfertigt werden können (s. Abschnitt 7.2 im Haupttext). Die Stabilität der Energiebereitstellung wird erhöht, Umweltexternalitäten – vor allem die durch Klimawandel hervorgerufenen – werden reduziert, durch einen erhöhten Anteil dezentraler Anlagen kann eine Monopolmacht in Zeiten knappen Angebots reduziert werden und die Anwendung von Technologien mit nicht versicherbaren Risiken (Kernkraftwerke) können reduziert oder im Fall von Deutschland ersetzt werden. Aufgrund historisch gewachsener Förderstrukturen werden andere Technologien im Energiebereich bereits staatlich gefördert. Daher ist derzeit aus praktischen Gründen zusätzlich eine Förderung von Ausgleichstechnologien notwendig, die über die der Forschung, Entwicklung und Demonstration hinausgeht.

Rechtliche Analyse der Rahmenbedingungen

Einige der aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen sollten im Zusammenhang mit der Realisierung von Strategien zum Ausgleich von Nachfrage und Angebot elektrischer Energie bereits jetzt untersucht werden. Die rechtswissenschaftlichen Analysen in der vorliegenden Studie werden unterteilt in Aspekte zentraler Speichersysteme (Abschnitt 8.2 im Haupttext), dezentraler Speichersysteme inklusive Lastmanagement sowie “intelligenter” Netze (Abschnitt 8.3 im Haupttext) und der Erweiterung des Übertragungsnetzes (Abschnitt 8.4 im Haupttext). Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Im Bereich zentraler Speichersysteme sollte sowohl im derzeitigen Recht als auch im noch zu gestaltenden Recht geklärt werden, ob die Anwendung von Speichertechnologien der Erzeugerseite oder der Netzseite zugeordnet werden soll. Ihre rechtliche Klassifikation hat insbesondere Auswirkungen auf die Bewertung zivilrechtlicher Fragen wie z.B. die der diskriminierungsfreien Nutzung, des

diskriminierungsfreien Zugangs und der Entflechtung (“Unbundling”). Es können verschiedene negative Anreize und Barrieren durch die derzeitige Gesetzgebung identifiziert werden, die Auswirkungen auf Investitionen in Speichertechnologien haben. Die in erster Linie betroffenen Akteure sind Erzeuger von Elektrizität aus erneuerbaren Energien und Übertragungsnetzbetreiber, die aufgrund des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) Strom aus erneuerbaren Energien kaufen und vermarkten müssen. Zusätzlich könnte ein spezielles Planungsregelwerk für die Nutzung von Untergrundressourcen helfen, potentielle Konflikte zwischen den einzelnen Nutzern und zwischen Nutzern und den jeweiligen Landeigentümern zu entschärfen. Um die Entwicklung von Speichertechnologien nicht durch die Gesetzgebung zu behindern, sollten entsprechende negative Anreize beseitigt werden.

Im Bereich dezentraler Speichersysteme, insbesondere bei der Elektromobilität, intelligenten Netzen und allgemeiner beim Lastmanagement, müssen vertragliche Fragen in Verbindung mit ganz neuen Akteuren und Netzwerken hinsichtlich der Sorgfaltspflichten, Kooperation und Information sowie Nutzungsbedingungen beantwortet werden. Außerdem stellt sich durch die Möglichkeiten, weitreichende und sehr detaillierte individuelle Profile der Mobilität und Energienutzung zu generieren, die Frage, inwieweit die derzeitige Gesetzgebung im Bereich des Datenschutzes dazu geeignet ist, mit der Menge und Qualität der Daten sowie mit den neuen Arten der Datenerfassung, -aufarbeitung und -nutzung legitim umzugehen. Neue Ansätze für Lösungen innerhalb und außerhalb des gesetzlichen Rahmens werden berücksichtigt werden müssen.

Derzeitige Verfahren für den Ausbau von Übertragungsnetzen sind sehr divers und in bestimmten Bereichen dysfunktional. Besonders problematisch erscheinen punktuelle Investitionspflichten von Netzbetreibern, die zivilrechtlich behandelt werden und bei denen gesamtwirtschaftliche Aspekte nicht adäquat berücksichtigt werden (z.B. § 9 EEG). Hier wird ein umfassenderer und systematischerer Ansatz benötigt. Auf nationaler Ebene könnte die Situation durch ein fundamentales Reformmodell für strategische Investitionsprojekte in Übertragungsleitungen verbessert werden. Einige Verbesserungen und Standardisierungen, z.B. in Bezug auf Richtlinien guter Praxis bei öffentlichen Anhörungen, könnten den Umgang bei Konflikten mit der betroffenen lokalen Bevölkerung verbessern. Die Möglichkeiten für Reformen auf europäischer Ebene sind begrenzt. Jedoch wäre eine bessere Koordination auf dieser Ebene sinnvoll.

Herausforderungen und Empfehlungen

Die Anforderungen an den Ausgleich elektrischer Energie im System werden mit steigendem Anteil von Elektrizität aus erneuerbaren Energien zunehmen. Allerdings zeigt die obige Zusammenfassung der Analysen in dieser Studie bereits, dass einige Herausforderungen mit der Nutzung alternativer Optionen, die niedrige CO₂-Emissionen aufweisen, verbunden sind. Zu diesen gehören Energiespeicher inklusive Lastmanagement sowie die Überinstallation der Erzeugungskapazität

zusammen mit einem entsprechenden Netzausbau. Zur Gewährleistung einer stabilen Elektrizitätsversorgung müssen dabei die verschiedenen Standorte in Europa und die relevanten Zeitskalen von Sekunden zu Tagen und Wochen berücksichtigt werden.

Im Folgenden werden die 13 identifizierten Herausforderungen mit entsprechenden Empfehlungen, die aus der Studie abgeleitet wurden (s. Abschnitt 9.2 im Haupttext), zusammengefasst aufgelistet.

Herausforderung 1: Bereitstellung ausreichender Speicherkapazität in Deutschland

- Ein *Mix verschiedener Speicheroptionen*, der auf die Netzrestriktionen abgestimmt ist, sollte installiert werden um die Abschaltung von Windkraftanlagen in der Spitzenerzeugung zu verhindern und die Anwendung von kohlenstoffarmen Alternativen zum Schließen von Angebotslücken zu ermöglichen.
- *Internationale Netzwerke* sollten etabliert werden, um große Speicherpotentiale in einigen europäischen Ländern weiterzuentwickeln und nutzbar zu machen.
- *Die Überinstallation* der Kapazität von Wind- und Solar-Kraftwerken zusammen mit der Gewährleistung ausreichender Übertragungskapazität sollte als Option berücksichtigt werden.
- *Alternative technische Optionen*, wie etwa die Nutzung der Gasnetze für die Speicherung von Energie, sollten weiter analysiert werden.
- *Negative Anreize in der rechtlichen Regulierung* sollten beseitigt und in Zukunft vermieden werden.
- *Forschung, Entwicklung und Demonstration der Technologien* sollten intensiviert werden, um die Kosten der Speichertechnologien zu reduzieren.

Herausforderung 2: Realisierung technischer Potentiale dezentraler Optionen

- *Automatisierte technische Lösungen* für die Steuerung von Lasten sollten entwickelt werden, um Minderungen im Nutzungskomfort zu vermeiden.
- *Flexible Tarife* sollten eingeführt werden, um die Wahrnehmung von Knappheiten und temporären Variationen im Wert elektrischer Energie zu steigern.
- *Datenanforderungen* für Steuerungsvorgänge sollten minimiert und adäquate Datenschutzbestimmungen eingerichtet werden.
- *Forschung, Entwicklung und Demonstration für die Standardisierung* sollten vor allem im Bereich automatisierten Lastmanagements weiter vorangetrieben werden.

Herausforderung 3: Management der Umwelt- und Ressourcennutzung

- Durch eine *geeignete Gestaltung* der Technologien sollten potentielle Hemmnisse durch die limitierte Verfügbarkeit benötigter Ressourcen oder durch das Auftreten von Umwelteffekten bei Massenbedarf bereits frühzeitig berücksichtigt werden.
- *Kontinuierliche Beobachtungen* der Ressourcennutzung und der Märkte während der Entwicklung sollten erfolgen.
- *Forschung, Entwicklung und Demonstration in den Bereichen Recycling von Sekundärrohstoffen und Substitute* sollte erfolgen und wo notwendig sollten entsprechende Prozesse eingerichtet werden.

Herausforderung 4: Bereitstellung ausreichender Netzwerkkapazitäten für den Transport von Elektrizität

- Eine *Beschleunigung von Planungsprozeduren* sollte durch die Einführung strukturierter Mechanismen erreicht werden.
- Eine *Stärkung der nationalen und europäischen Interessen* im Verhältnis zu regionalen Interessen sollte über die Reformierung des Regulierungssystems erreicht werden.
- *Forschung und Entwicklung sollte durch den Regulator unterstützt werden*, indem die entstehenden Kosten im Rahmen der Kostenerstattung akzeptiert werden.

Herausforderung 5: Adäquate Berücksichtigung von Ausgleichsstrategien in Regelwerken

- *Zuordnungen und Definitionen* im Zusammenhang mit Ausgleichstechnologien sollten in den entsprechenden Regelwerken geklärt werden.
- Entscheidungen über die *Zuordnung von Speicheranlagen* zur Netz- oder zur Erzeugungsebene sollten vom Gesetzgeber getroffen werden.

Herausforderung 6: Gestaltung eines europäischen Energiemarkts

- *Austausch von Elektrizität* sollte ermöglicht werden, indem das Übertragungsnetz weiter ausgebaut wird.
- Ein *Rahmen für eine kohlenstoffarme Energieversorgung* sollte für Europa implementiert werden, der umfassend, langzeitorientiert und weitreichend bzw. ehrgeizig ist und über 2020 hinaus geht.
- *Europas Elektrizitätsmärkte* sollten weiter integriert werden.

Herausforderung 7: Beseitigung überholter Subventionen und Steuern

- *Optimale ökonomische Rahmenbedingungen* sollten hergestellt werden, indem überholte Subventionen und Steuern schrittweise zurückgenommen und konsistente Maßnahmen wie Demonstrationsprojekte und zeitlich beschränkte Startsubventionen eingeführt werden.
- *Historisch gewachsenen Missständen in den Rahmenbedingungen* sollte durch zeitlich begrenzte Subventions- und Steuerausgestaltungen begegnet werden.

Herausforderung 8: Umwandlung von Markt-Externalitäten in Kosten und Erlöse

- *Sozioökonomischer Nutzen* sollten internalisiert werden, indem entsprechende Märkte und Kompensationsmechanismen eingerichtet werden.
- *Kosten von Systemdienstleistungen* sollten internalisiert werden, indem Mechanismen eingeführt werden, über die Stromerzeuger für die geleisteten Dienstleistungen, die sie für einen reibungslosen Betrieb der Kraftwerke benötigen, inklusive der Netze, zahlen müssen.
- *Vorteile durch Koordination* der Produktion von Elektrizität aus erneuerbaren Energien mit dem Netzmanagement und der Nutzung von Speichern sollten im Hinblick auf die Realisierung zusätzlichen Nutzens untersucht werden.
- *Mögliche Geschäftsmodelle* sollen im Detail analysiert werden.
- *Detaillierte Systemanalysen von Nutzen* durch die Anwendung von Ausgleichsstrategien sollten als Basis für Politikentscheidungen durchgeführt werden.

Herausforderung 9: Handhabung neuer komplexer Marktstrukturen

- *Vertragliche Herausforderungen auf neuen Märkten* sollten im Detail analysiert werden.
- *Generelle rechtliche Maßnahmen für neue Märkte* sollten entwickelt werden.

Herausforderung 10: Stärkung wissenschaftlicher Beratung im Bereich der Ausgleichsstrategien

- Die *Energiesystemanalyse* sollte durch intensive Forschung mit umfassenden Modellen und unter der koordinierten Kooperation relevanter Institutionen verbessert werden.

- *Großprojekte zur Energiesystemmodellierung* sollten durchgeführt und Vorteile ihrer Institutionalisierung, die regelmäßige Aktualisierungen und Beobachtung der Systementwicklungen erlauben würde, untersucht werden.
- Die *europäische Perspektive*, unter der Berücksichtigung nationaler Politiken, sollte für eine erweiterte Energiesystemanalyse verpflichtend sein.
- Die *benötigte installierte Leistung und Energiekapazität* sollten in zukünftigen Studien als Hauptaspekte im Detail analysiert werden.

Herausforderung 11: Adäquate Unterstützung der Verwendung neuer Technologien

- *Startsubventionen* sollten eingeführt werden, die auf Marktmechanismen basieren, und automatisch auf das Niveau der Kompensation von Externalitäten abgesenkt werden, um die Verwendung vielversprechender Technologien adäquat zu fördern.
- *Investitionen in Forschung, Entwicklung und Demonstration für Speichersysteme* sollten erhöht werden.

Herausforderung 12: Adäquate Unterstützung von Langzeitinvestitionen

- *Politische Entscheidungen über Rahmenbedingungen* auf nationaler und internationaler Ebene sollten zuverlässig und langfristig sowie in Übereinstimmung mit der europäischen Wettbewerbspolitik festgelegt werden.
- Eine *verlässliche Basis für Entscheidungen über Rahmenbedingungen* sollte durch erweiterte Energiesystemanalysen geschaffen werden.

Herausforderung 13: Umgang mit Konflikten bei Großprojekten

- *Adäquate Mechanismen für die Beteiligung* betroffener Parteien und der breiteren Öffentlichkeit im Entscheidungsprozess sollten eingerichtet werden.
- *Die Einrichtung eines speziellen Planungsregelwerks für Untergrundressourcen* sollte auf ihr Potential zur Vermeidung möglicher Konflikte der relevanten Interessengruppen hin analysiert werden.
- *Maßnahmen zur Konfliktlösung* wie die Gewährung adäquater Kompensationsmaßnahmen sollten weiter analysiert und, wo sinnvoll, angewandt werden.

List of Authors

Droste-Franke, Bert, Dr.-Ing., Dipl.-Phys., studied physics with the second subject economics at the Universität Göttingen and the Universität Heidelberg, 1996 graduation with a diploma thesis on aircraft-based measurements of trace gases in the upper troposphere prepared at the Max-Planck-Institute for Nuclear Physics in Heidelberg, 2004 doctoral thesis in engineering science on the quantification of environmental damages as contribution to environmental accounting at the Universität Stuttgart. 1996–2006 scholarship and research assistant at Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) of the Universität Stuttgart: working in/leading projects and consulting activities, amongst others for the European Commission, national institutions, and the Worldbank Group, in the area of the assessment of environmental impacts and damage costs caused by economic activities as well as developing further the widely-used integrated software tool “EcoSense” and working on model integration. Since 2006 project coordinator and researcher at the Europäische Akademie GmbH in interdisciplinary projects dealing with the implementation of energy technologies aiming at a viable future energy system, particularly with respect to electricity supply.

Research areas: technology assessment with focus on energy systems; environmental physics; environmental economics.

Paal, Professor Dr. Boris P., M.Jur. (Oxford), holds a Chair in Civil Law and Business Law, Media and Information Law and is Director of the Institute of Media and Information Law at the University of Freiburg. Paal graduated with the First State Exam in Law, Dept. I: Private Law (1999) and holds the degree of a doctor in Law (2001) from the University of Konstanz. He studied European Law and Comparative Law as a postgraduate at Oxford University, Magdalen College, and holds the degree of a Magister Juris (2001) from Oxford University. During his legal clerkship at the Higher Regional Court Düsseldorf, Paal worked with major law firms such as Hoelters&Elsing and Hengeler Mueller; he completed the Second Legal State Exam in Law in 2003. Afterwards he worked as a senior research assistant and prepared his habilitation thesis on Competition Law and Media Law at the universities of Konstanz (2004) and Heidelberg (2004–2008).

In 2009 Paal was granted the *venia legendi* for “Civil Law, Commercial Law, Business Law, International Private Law and Media Law” by the University of

Heidelberg. Also in 2009 he was appointed a full Professor of Law for Civil Law and Business Law, Media and Information Law in Freiburg. Paal's main areas of research are Civil Law, Business Law, Media Law and International Private Law.

Rehtanz, Professor Dr.-Ing. Christian, received his diploma degree in electrical engineering at the TU Dortmund University, Germany, in 1994 and his Ph.D. in 1997. In 2003 he received the *venia legendi* in electrical power systems at the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETHZ). From 2000 on he worked at ABB Corporate Research, Switzerland. He became head of technology for the global ABB business area of power systems in 2003 and director of ABB Corporate Research in China in 2005.

Since 2007 Rehtanz has been head of the Institute of Power Systems and Power Economics at the TU Dortmund University. In addition he has been scientific advisor of the ef.Ruhr GmbH, a joint research company of the three universities of Bochum, Dortmund and Duisburg-Essen (University Alliance Metropolis Ruhr), since 2007. He is Adjunct Professor at the Hunan University in Changsha, China.

Rehtanz' research activities in the field of electrical power systems and power economics include technologies for network enhancement and congestion relief like stability assessment, wide-area monitoring, protection, and coordinated network-control as well as integration and control of distributed generation and storages. He holds the MIT World Top 100 Young Innovators Award 2003 and is author of more than 150 scientific publications, three books and 17 patents and patent applications.

Sauer, Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Dirk-Uwe, born in Mannheim in 1969, studied physics at the Universität Darmstadt from 1989 to 1994. He accomplished his diploma thesis from 1992 to 1994 at the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE in Freiburg (Breisgau) on "Modelling and simulation of systems and components of autonomous photovoltaic power supply systems". After that he worked as research scientist and senior scientist at Fraunhofer ISE until 2003, being head of the group "Storage systems" from 2000 to 2003. In parallel, from 2001 to 2003, Sauer was head of the interdisciplinary working group on "Off-grid and rural electrification" and managing director of the "Club for rural electrification".

In 2003 he received his doctorate (Dr. rer. nat.) at the Universität Ulm. The topic of his thesis was "Optimisation of the usage of lead-acid batteries in photovoltaic-hybrid systems with special emphasis on battery ageing". In October 2003 Sauer was appointed for junior-professorship and in 2009 for university professorship at the RWTH Aachen University for "Electrochemical energy conversion and storage systems" (Faculty for Electrical Engineering and Information Technology). His main areas of work pertain to electrochemical energy storage (batteries) and autonomous power supply systems.

Schneider, Professor Dr. jur. Jens-Peter, (born 1963) holds a chair in Public Law, European Information and Infrastructure Law at the University of Freiburg; he is also co-director of the Institute of Media and Information Law at the

University of Freiburg. Until 2010 he was professor of German and European Administrative Law at the University of Osnabrück and functioning as co-director of the European Legal Studies Institute. From 1993 until 2000 he was Reader in Law at the University of Hamburg and Research Fellow at the Centre for Environmental Law as well as at the Centre for Research in Law and Innovation. Besides he received offers for professorships at the universities of Bielefeld (1999), Erfurt (1999) and Speyer (2009).

He studied law (and economics) at the Universities of Marburg and Freiburg (Germany), holds a doctor in law from the University of Freiburg (Germany) (Dr. iur.), worked as a junior lawyer in state and federal ministries as well as in the City attorney's office of San Francisco and habilitated at the University of Hamburg (Germany).

Schreurs, Professor Miranda, Ph.D., became Director of the Environmental Policy Research Center and Professor of Comparative Politics at the Freie Universität Berlin in 2007. Prior to this she was an Associate Professor of Comparative Politics at the University of Maryland, College Park. Her Ph.D. is from the University of Michigan (1996). In 2008, she was appointed as a member of the Advisory Council on the Environment, a consultative committee of the German Federal government. In 2011, she became chair of the European Environment and Sustainable Development Advisory Councils, a network of approximately 25 advisory councils across Europe. In this year, she was also appointed by Chancellor Angela Merkel to the Ethic Commission on a Safe Energy Supply, charged with advising the German government with advice regarding energy questions in the post-Fukushima era. She was the 2009–2010 Fulbright New Century Scholar Program's Distinguished Leader and in this capacity co-ordinated the programs activities on the Role of the University as Knowledge Center and Innovation Driver.

Ziesemer, Professor Dr. rer. pol. Thomas, has been an Associate Professor of Economics since December 1996. He studied economics at the Universities of Kiel (1974–1975) and Regensburg (1975–1978) in Germany. From 1982 to 1989 he was employed at the University of Regensburg, where he completed his doctoral dissertation on Economic Theory of Underdevelopment in 1985. Since December of 1989, he has been successively an Assistant Professor of International Economics, Associate Professor of Microeconomics (1994–97), Maastricht University, and is currently Associate Professor of Economics all at the School of Business and Economics, Maastricht University. In November 1996 he received his “Habilitation” from the Free University Berlin in 1996. His fields of interest include Development, International and Environmental Economics, Growth, and Technical Change.

Further volumes of the series **Ethics of Science and Technology Assessment** (Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung)

- Vol. 1: A. Grunwald (ed) *Rationale Technikfolgenbeurteilung. Konzeption und methodische Grundlagen*, 1998
- Vol. 2: A. Grunwald, S. Saupe (eds) *Ethik in der Technikgestaltung. Praktische Relevanz und Legitimation*, 1999
- Vol. 3: H. Harig, C. J. Langenbach (eds) *Neue Materialien für innovative Produkte. Entwicklungstrends und gesellschaftliche Relevanz*, 1999
- Vol. 4: J. Grin, A. Grunwald (eds) *Vision Assessment. Shaping Technology for 21st Century Society*, 1999
- Vol. 5: C. Streffer et al., *Umweltstandards. Kombinierte Expositionen und ihre Auswirkungen auf den Menschen und seine natürliche Umwelt*, 2000
- Vol. 6: K.-M. Nigge, *Life Cycle Assessment of Natural Gas Vehicles. Development and Application of Site-Dependent Impact Indicators*, 2000
- Vol. 7: C. R. Bartram et al., *Humangenetische Diagnostik. Wissenschaftliche Grundlagen und gesellschaftliche Konsequenzen*, 2000
- Vol. 8: J. P. Beckmann et al., *Xenotransplantation von Zellen, Geweben oder Organen. Wissenschaftliche Grundlagen und ethisch-rechtliche Implikationen*, 2000
- Vol. 9: G. Banse, C. J. Langenbach, P. Machleidt (eds) *Towards the Information Society. The Case of Central and Eastern European Countries*, 2000
- Vol. 10: P. Janich, M. Gutmann, K. Pries (eds) *Biodiversität. Wissenschaftliche Grundlagen und gesellschaftliche Relevanz*, 2001
- Vol. 11: M. Decker (ed) *Interdisciplinarity in Technology Assessment. Implementation and its Chances and Limits*, 2001
- Vol. 12: C. J. Langenbach, O. Ulrich (eds) *Elektronische Signaturen. Kulturelle Rahmenbedingungen einer technischen Entwicklung*, 2002
- Vol. 13: F. Breyer, H. Kliemt, F. Thiele (eds) *Rationing in Medicine. Ethical, Legal and Practical Aspects*, 2002
- Vol. 14: T. Christaller et al., *Robotik. Perspektiven für menschliches Handeln in der zukünftigen Gesellschaft*, 2001

- Vol. 15: A. Grunwald, M. Gutmann, E. Neumann-Held (eds) *On Human Nature. Anthropological, Biological, and Philosophical Foundations*, 2002
- Vol. 16: M. Schröder et al., *Klimavorhersage und Klimavorsorge*, 2002
- Vol. 17: C. F. Gethmann, S. Lingner (eds) *Integrative Modellierung zum Globalen Wandel*, 2002
- Vol. 18: U. Steger et al., *Nachhaltige Entwicklung und Innovation im Energiebereich*, 2002
- Vol. 19: E. Ehlers, C. F. Gethmann (eds) *Environmental Across Cultures*, 2003
- Vol. 20: R. Chadwick et al., *Functional Foods*, 2003
- Vol. 21: D. Solter et al., *Embryo Research in Pluralistic Europe*, 2003
- Vol. 22: M. Decker, M. Ladikas (eds) *Bridges between Science, Society and Policy. Technology Assessment – Methods and Impacts*, 2004
- Vol. 23: C. Streffer et al., *Low Dose Exposures in the Environment. Dose-Effect Relations and Risk-Evaluation*, 2004
- Vol. 24: F. Thiele, R. A. Ashcroft (eds) *Bioethics in a Small World*, 2004
- Vol. 25: H.-R. Duncker, K. Pries (eds) *On the Uniqueness of Humankind*, 2005
- Vol. 26: B. v. Maydell, K. Borchardt, K.-D. Henke, R. Leitner, R. Muffels, M. Quante, P.-L. Rauhala, G. Verschraegen, M. Żukowski, *Enabling Social Europe*, 2006
- Vol. 27: G. Schmid, H. Brune, H. Ernst, A. Grunwald, W. Grünwald, H. Hofmann, H. Krug, P. Janich, M. Mayor, W. Rathgeber, U. Simon, V. Vogel, D. Wyrwa, *Nanotechnology. Assessment and Perspectives*, 2006
- Vol. 28: M. Kloepfer, B. Griefahn, A. M. Kaniowski, G. Klepper, S. Lingner, G. Steinebach, H. B. Weyer, P. Wysk, *Leben mit Lärm? Risikobeurteilung und Regulation des Umgebungslärms im Verkehrsbereich*, 2006
- Vol. 29: R. Merkel, G. Boer, J. Fegert, T. Galert, D. Hartmann, B. Nuttin, S. Rosahl, *Intervening in the Brain. Changing Psyche and Society*, 2007
- Vol. 31: G. Hanekamp (ed) *Business Ethics of Innovation*, 2007
- Vol. 32: U. Steger, U. Büdenbender, E. Feess, D. Nelles, *Die Regulierung elektrischer Netze. Offene Fragen und Lösungsansätze*, 2008
- Vol. 33: G. de Haan, G. Kamp, A. Lerch, L. Martignon, G. Müller-Christ, H. G. Nutzinger, *Nachhaltigkeit und Gerechtigkeit. Grundlagen und schulpraktische Konsequenzen*, 2008
- Vol. 34: M. Engelhard, K. Hagen, M. Boysen (eds) *Genetic Engineering in Livestock. New Applications and Interdisciplinary Perspectives*, 2008
- Vol. 35: M. Engelhard, K. Hagen, R. B. Jørgensen, R. Pardo Avellaneda, E. Reh binder, A. Schnieke, F. Thiele, *Pharming. Promises and risks of biopharmaceuticals derived from genetically modified plants and animals*, 2008
- Vol. 36: B. Droste-Franke, H. Berg, A. Kötter, J. Krüger, K. Mause, J.-C. Pielow, I. Romey, T. Ziesemer, *Brennstoffzellen und Virtuelle Kraftwerke. Energie-, umwelt- und technologiepolitische Aspekte einer effizienten Hausenergieversorgung*, 2009

- Vol. 37: M. Bölker, M. Gutmann, W. Hesse (eds) *Information und Menschenbild*, Berlin 2010
- Vol. 38: C. Streffer, C. F. Gethmann, G. Kamp, W. Kröger, E. Rehbinder, O. Renn, K.-J. Röhlig, *Radioactive Waste. Technical and Normative Aspects of its Disposal*, Berlin 2011
- Vol. 39: S. Hiekel, *Grundbegriffe der grünen Gentechnik. Wissenschaftstheoretische und naturphilosophische Grundlagen*, Berlin 2011
- Vol. 40: B. Droste-Franke, B. P. Paal, C. Rehtanz, D. U. Sauer, J.-P. Schneider, M. Schreurs, T. Ziesemer, *Balancing Renewable Electricity. Energy Storage, Demand Side Management and Network Extension from an Interdisciplinary Perspective*, Berlin 2012

Also the following studies were published by Springer:

Environmental Standards. Combined Exposures and Their Effect on Human Beings and Their Environment, 2003, Translation Vol. 5

Sustainable Development and Innovation in the Energy Sector, 2005, Translation Vol. 18

F. Breyer, W. van den Daele, M. Engelhard, G. Gubernatis, H. Kliemt, C. Kopetzki, H. J. Schlitt, J. Taupitz, *Organmangel. Ist der Tod auf der Warteliste unvermeidbar?* 2006