



C. Dieckhoff, W. Fichtner, A. Grunwald,
S. Meyer, M. Nast, L. Nierling, O. Renn,
A. Voß, M. Wietschel
(Hrsg.)

Energieszenarien

Konstruktion, Bewertung und Wirkung –
„Anbieter“ und „Nachfrager“ im Dialog

C. Dieckhoff, W. Fichtner, A. Grunwald, S. Meyer, M. Nast,
L. Nierling, O. Renn, A. Voß, M. Wietschel (Hrsg.)

Energieszenarien

Konstruktion, Bewertung und Wirkung – „Anbieter“ und „Nachfrager“ im Dialog

Energieszenarien

Konstruktion, Bewertung und Wirkung
– „Anbieter“ und „Nachfrager“ im Dialog

Christian Dieckhoff

Wolf Fichtner

Armin Grunwald

Sarah Meyer

Michael Nast

Linda Nierling

Ortwin Renn

Alfred Voß

Martin Wietschel

(Hrsg.)

Umschlag: Bildnachweise (v.o.n.u.)

© Joexx / PHOTOCASE

<http://www.photocase.com/de/photodetail.asp?i=99363>

© Rainer Sturm / PIXELIO

http://www.pixelio.de/details.php?image_id=305878&mode=search

© Thorben Wengert / PIXELIO

http://www.pixelio.de/details.php?image_id=490299&mode=search

© Marco Barnebeck / PIXELIO

http://www.pixelio.de/details.php?image_id=297420&mode=search

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

KIT Scientific Publishing

Straße am Forum 2

D-76131 Karlsruhe

www.ksp.kit.edu

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2011

Print on Demand

ISBN 978-3-86644-621-2

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| <i>Christian Dieckhoff, Armin Grunwald</i> Energieszenarien – Angebote der Wissenschaft treffen die Nachfrage der Gesellschaft. Einführung in den Tagungsband..... | 1 |
| <i>Armin Grunwald</i> Der Lebensweg von Energieszenarien – Umriss eines Forschungsprogramms..... | 11 |
| <i>Martin Schönfelder, Patrick Jochem, Wolf Fichtner</i> Energiesystemmodelle zur Szenarienbildung – Potenziale und Grenzen..... | 25 |
| <i>Martin Wietschel, Tobias Fleiter, Simon Hirzel</i> Modellierung der Energienachfrage – der wesentliche Baustein für zukünftige Energieszenarien | 41 |
| <i>Wolfgang Weimer-Jehle, Hannah Kosow</i> Gesellschaftliche Kontextszenarien als Ausgangspunkt für modellgestützte Energieszenarien | 53 |
| <i>Ulrich Fahl, Markus Blesl, Alfred Voß</i> Projecting Energy Market Trends until 2030 German Energy Outlook 2009 .. | 67 |
| <i>Franz Trieb, Tobias Naegler</i> Strom und Trinkwasser aus erneuerbarer Energie für Europa, Nordafrika und den Mittleren Osten | 75 |
| <i>Uwe Remme</i> Energy Technology Perspectives 2010. The role of energy scenarios and modelling | 89 |
| <i>Aurélie Fleury, Sven Filter, Christian Güthert</i> Energieszenarien aus der Sicht eines Energieversorgungsunternehmens - Beispiel im Strommarkt..... | 97 |
| <i>Diana Nissler</i> Energieszenarien im Umweltbundesamt..... | 103 |
| <i>Wolfgang Langen</i> Verwendung von Energieszenarien. Am Beispiel der Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung | 113 |

| | |
|--|-----|
| <i>Sven Teske</i> | |
| Energy [R]evolution Scenarios | |
| Development, Experiences and Suggestions | 121 |
| | |
| <i>Christian Dieckhoff</i> | |
| Schlussfolgerungen für Forschung und Doktorandenausbildung - | |
| Ergebnisse der Workshops..... | 141 |
| | |
| Autorenverzeichnis | 147 |

Energieszenarien – Angebote der Wissenschaft treffen die Nachfrage der Gesellschaft

Einführung in den Tagungsband

Christian Dieckhoff, Armin Grunwald

Karlsruher Institut für Technologie, Campus Nord, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland,
E-Mail: dieckhoff@kit.edu, Telefon: +49/ (0)721/ 608-26794

1 Zur Relevanz der Thematik

Im September 2010 hat die deutsche Bundesregierung ihr lange angekündigtes Energiekonzept vorgestellt. Diesem Ereignis – welches in der Öffentlichkeit fast ausschließlich unter dem Aspekt der Laufzeitverlängerung für Kernkraftwerke diskutiert wurde – ging ein anderes, direkt darauf bezogenes Ereignis voraus: Ein Konsortium deutscher Forschungsinstitute veröffentlichte einen Satz von Szenarien, der als Grundlage für das Energiekonzept herangezogen werden sollte. Diese Institute waren spezifisch beauftragt worden, Szenarien zu entwerfen, um damit eine Orientierung für das Konzept der Bundesregierung zu liefern.

Dieses Vorgehen ist mustergültig für viele Fragen der modernen Gesellschaft. Entscheidungsträger, ob Personen oder Institutionen, ob aus Politik oder Wirtschaft, holen sich wissenschaftlichen Rat ein, um ihre Entscheidungen auf eine solide Basis zu stützen. Ob es sich hierbei um Technikfolgenanalysen handelt, um Einschätzungen der Folgen des globalen Klimawandels für eine Region, um Marktaussichten für neue Dienstleistungen oder um die Analyse des demographischen Wandels: stets wird „Zukunftswissen“ (es ist durchaus umstritten, ob diesem Typ von Orientierung das Attribut „Wissen“ zugestanden werden sollte) benötigt, um Entscheidungen in der Gegenwart zu orientieren oder auch zu legitimieren.

Besonders deutlich ist dies ersichtlich, wenn es um Entscheidungen über Infrastrukturen geht, die aufgrund ihrer Kosten und Eindringtiefe in gesellschaftliche Prozesse besonders schwierig zu verändern sind. Beispielsweise sind die heutigen

Infrastrukturen der europäischen Eisenbahnen fast komplett im 19. Jahrhundert errichtet worden und stellen heute eine nur schwer veränderbare Größe dar. Ein anderes Beispiel sind die Infrastrukturen der Wasserver- und -entsorgung, die ähnlich alt sind.

Für den Energiebereich treffen die genannten Kriterien ebenfalls zu. Es geht um komplexe Infrastrukturen der Energiebereitstellung, des Transports und der Nutzung, welche die gesamte Gesellschaft durchziehen, die gleichzeitig sehr teuer und die teils nur schwer modifizierbar sind. Aktuelle Vorhaben, neue Hochspannungsleitungen zu bauen, stoßen bereits in den allerersten Planungen auf erheblichen Widerstand, genauso wie Kohlekraftwerke oder die CCS-Technologie. Der erhebliche Kapitalbedarf, z. B. für Großkraftwerke, erfordert lange Zeiträume der Nutzung und Abschreibung. Durch Entscheidungen im Energiesektor werden damit teils über Jahrzehnte dauernde Festlegungen getroffen – umso wichtiger, sich sorgfältig im Vorhinein damit zu befassen, ob und unter welchen Umständen die Erwartungen an die langen Zeiträume als erfüllbar angesehen werden können, damit die Entscheidungen möglichst „robust“ sind und sich nicht nach kurzer Zeit bereits als korrekturbedürftig herausstellen.

Diese Situation stellt die maßgebliche Erklärung dafür dar, dass wahrscheinlich in kein anderes Feld von „Zukunftswissen“ derart viel wissenschaftliche Kreativität, aber eben auch erhebliche Ressourcen investiert wurden und werden. Wissenschaftliche, in der Regel modellbasierte Energieszenarien haben sich zu einem eigenen Forschungsfeld entwickelt und erfreuen sich großer Beliebtheit bei Entscheidungsträgern, wie das eingangs erwähnte Beispiel zeigt. Dementsprechend sind in diesem Feld viele Akteure aktiv, im südwestdeutschen Bereich sind hier besonders zu nennen das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) [vgl. Möst et al. 2009], das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe, die Universität Stuttgart und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). DLR und KIT sind Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft und arbeiten zusammen mit weiteren Zentren im Programm „Technologie, Innovation und Gesellschaft“ (TIG, <http://www.kit.edu/forschen/1299.php>) unter anderem an Energieszenarien.

Gemeinsam mit ISI und Universität Stuttgart findet sich damit im südwestdeutschen Raum eine Zusammenballung von Kompetenzen im Bereich der Energieszenarien, welche Anlass gab, sich gemeinsam von unterschiedlichen Seiten her, und

damit möglichst umfassend, mit dieser Thematik zu befassen – und die Workshops zu veranstalten, deren Ergebnisse in diesem Band zusammengefasst sind.

2 Die Workshops

Energieszenarien entstehen nicht von selbst und auch nicht aus einem rein wissenschaftlichen Erkenntnisinteresse. Wie oben gesagt, sind es Anforderungen „von außen“, von Ministerien und Behörden, von Nichtregierungsorganisationen und Konzernen, von Energieversorgern und Banken. Das heißt, es gibt eine *Nachfrage-seite*, zu deren Befriedigung wissenschaftliche Institute *Angebote*, d. h. hier Energieszenarien, entwickeln und auf einem „Markt“ anbieten. Die beiden in Karlsruhe veranstalteten Workshops, deren Ergebnisse hier dokumentiert sind, waren dem Ziel gewidmet, Nachfrager und Anbieter in einen Dialog zu bringen – in einem ersten Workshop am 2. und 3. Dezember 2010 aus nationaler und in einem zweiten Workshop am 13. Januar 2011 aus internationaler Perspektive. Für beide Workshops waren die folgenden Schwerpunkte leitend:

- Anforderungen und Wünsche von „Nutzern“ von Energieszenarien an die Wissenschaft vorstellen und analysieren;
- die konkreten Formen der Nutzung von Szenarien in Entscheidungsprozessen diskutieren;
- methodische „Angebote“ und Probleme aus Sicht der Wissenschaft vorstellen und mit den „Nachfragern“ diskutieren;
- Schlüsse auf die Erwartungen von „Nutzern“ an die Qualifikation von Universitätsabsolventen und Doktoranden in diesem Feld ziehen.

Auf der Anbieterseite wurden sowohl Vertreter verschiedener einschlägiger nationaler universitärer und außeruniversitärer Forschungsinstitute als auch ein Vertreter der IEA, und damit eines internationalen Anbieters, eingeladen. Ihre Aufgabe war es, in erster Linie zu schildern, welche Methoden ihren Energieszenarien – ihrem Angebot also – zugrunde liegen und in welchen Bereichen sie selbst Entwicklungs- und Forschungsbedarf sehen. Mit dem Ziel, einen Einblick in möglichst unterschiedliche

Rezeptions- und Verwendungskontexte von Energieszenarien zu erhalten, wurden auf der Nachfragerseite Vertreter eines breiten Spektrums unterschiedlicher gesellschaftlicher Akteure eingeladen. Neben nationalen Ministerien und der Europäischen Kommission waren privatwirtschaftliche Unternehmen und eine internationale Nicht-regierungsorganisation vertreten. Sie hatten die Aufgabe, ihre Verwendungsweise von Energieszenarien zu beschreiben und auf dieser Grundlage ihren spezifischen Bedarf in Bezug auf Energieszenarien darzulegen.

Die Workshops wurden gemeinsam von den in Tabelle 1 angeführten Partnern veranstaltet. Die organisatorische Gestaltung übernahmen Linda Nierling (ITAS/KIT) und Sarah Meyer (ITAS/KIT).

Tabelle 1: Veranstalter der Workshops

| Partner | Einrichtung |
|--------------------------------|---|
| Prof. Wolf Fichtner | Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) Karlsruher Institut für Technologie (KIT) |
| Prof. Armin Grunwald | Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) Karlsruher Institut für Technologie (KIT) |
| Dipl.-Phys. Peter-Michael Nast | Institut für Technische Thermodynamik Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart |
| Prof. Ortwin Renn | Institut für Sozialwissenschaften (ZIRN) Universität Stuttgart |
| Prof. Alfred Voß | Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung Universität Stuttgart |
| Prof. Martin Wietschel | Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe |

3 Energieszenarien – Bestimmung des Gegenstandes

Nationale und internationale Energieszenarien werden seit den 1970er Jahren in großer Zahl zu unterschiedlichen energiepolitischen Fragen veröffentlicht. So wurde

etwa der regelmäßig aktualisierte World Energy Outlook der IEA/OECD¹, der in seiner jährlichen Aktualisierung heute eine der meistzitierten Szenarioanalysen zur Entwicklung des globalen Energiesystems darstellt, erstmals 1993 veröffentlicht [International Energy Agency 1993]. Die Vielfalt der heute vorliegenden und jährlich hinzukommenden Studien ist in mehreren Dimensionen heterogen und schwer überschaubar:

Hinsichtlich der thematischen Ausrichtung reicht das Spektrum von der Analyse der Konsequenzen der Durchführung einzelner politischer Maßnahmen auf nationale Energiesysteme bis zur Beschreibung möglicher Entwicklungen der globalen Energieversorgung. So wurden 2010 in den *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung* etwa die Konsequenzen alternativer Laufzeitverlängerungen von Kernkraftwerken für die deutsche Energiewirtschaft untersucht ([Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2010a], Wolfgang Langen in diesem Band), während der aktuelle *World Energy Outlook* die möglichen Entwicklungen der globalen Energieversorgung unter Berücksichtigung nationaler Klimaschutzmaßnahmen beschreibt [International Energy Agency 2010a].

Für die Erstellung von Energieszenarien kommt ein breites Spektrum unterschiedlicher Modellierungsansätze zum Einsatz. Üblicher Weise werden eher volkswirtschaftlich orientierte Top-Down-Ansätze von eher prozessorientierten Bottom-Up-Ansätzen unterschieden, wobei in beiden Gruppen wiederum unterschiedliche Modelltypen Verwendung finden (Martin Schönfelder et al. und Martin Wietschel et al. in diesem Band). Weitere Methoden stehen für den Brückenschlag zwischen diesen quantitativ arbeitenden Verfahren und qualitativen Ansätzen zu Verfügung (Wolfgang Weimer-Jehle und Hannah Kosow in diesem Band).

Auch hinsichtlich der Autoren von Energieszenarien ist ein breites Spektrum unterschiedlicher Einrichtungen erkennbar. Es reicht von transnationalen Organisationen wie im Falle des *World Energy Outlook*, über universitäre und außeruniversitäre Forschungsinstitute wie im Falle der *Energieszenarien für ein*

¹ Die als Autor ausgewiesene Internationale Energieagentur (IEA) ist eine Tochterorganisation der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD).

Energiekonzept der Bundesregierung bis hin zu internationalen Konzernen wie etwa im Falle der *Shell energy scenarios to 2050* [Shell International BV 2008].

In einer vierten Dimension sind schließlich auch die jeweiligen Konstellationen, in denen die Studien zum einen erstellt und zum anderen rezipiert und verwendet werden, sehr heterogen. Während der *World Energy Outlook* ohne externe Beauftragung aus Eigeninitiative der IEA/OECD heraus verfasst wird und einen unspezifischen Adressaten aufweist, werden etwa die *Politikszenerarien* im Auftrag des Umweltbundesamtes als Bestandteil der nationalen Berichterstattung über die Entwicklung der Treibhausgasemissionen gegenüber der Europäischen Kommission erstellt ([Umweltbundesamt 2009], Diana Nissler in diesem Band).

Wie im ersten Beitrag von Armin Grunwald geschildert wird, stellt die skizzierte mehrdimensionale Heterogenität von Energieszenarien nicht nur eine Herausforderung für eine Gegenstandsbestimmung dar, sondern verweist auf eine ganze Reihe weitgehend offener Forschungsfragen, die dem Feld der Energieszenarien zugrunde liegen. Betrachtet man Energieszenarien entlang ihres „Lebensweges“, beginnend bei ihrer Konstruktion über ihre Bewertung und endend bei ihrer Wirkung, wird deutlich, dass es sich hierbei nicht um isolierte Einzelfragen handelt, die von den beteiligten Disziplinen alleine beantwortet werden könnten. Vielmehr handelt es sich um stark miteinander verwobene Problemstellungen, die es in einem interdisziplinären Forschungsprogramm zu bearbeiten gilt.

Wenn also mit den Workshops Vertreter der Anbieter- und Nachfragerseite von Energieszenarien zum Dialog geladen wurden, so geschah dies gleichzeitig, um Experten sowohl für ihre Konstruktion als auch für ihre Wirkung in die Eruierung dieser Forschungsfragen einzubinden. Um die Problemstellungen entlang des Lebensweges in ihrer Gesamtheit erfassen zu können, wurden außerdem Vertreter der Philosophie als Experten für Fragen der Bewertung von Energieszenarien ebenfalls an den Workshops beteiligt.

4 Übersicht über die Beiträge der Workshops

Mit dem ersten Beitrag des Tagungsbandes schließt Armin Grunwald an die zuvor skizzierte Bestimmung des Gegenstandes an und stellt einen analytischen Rahmen für die kritische Auseinandersetzung mit Energieszenarien vor. Ausgehend von der Entfaltung des Bewertungsproblems von Energieszenarien stellt er ein umfassendes Forschungsprogramm vor, das ihre integrierte Analyse über ihren gesamten Lebensweg hinweg zum Ziel hat.

Für die Sortierung der weiteren Beiträge wurde die für die Workshops leitende Unterscheidung von Angebot und Nachfrage aufgegriffen, so dass zunächst Autoren aus der Wissenschaft die Perspektive der Anbieter einnehmen, indem sie methodische Aspekte und aktuelle Fallbeispiele ihrer Arbeit vorstellen. Anschließend nehmen Vertreter unterschiedlicher gesellschaftlicher Akteure die Sicht des Nachfragers ein und schildern ihren spezifischen Rezeptions- und Verwendungskontext von Energieszenarien.

Martin Schönfelder et al. geben in ihrem Beitrag einen Überblick über die unterschiedlichen computergestützten Methoden der Erstellung von Energieszenarien und stellen anschließend optimierende Energiesystemmodelle als eine dieser Methoden im Detail vor. Mit der Fokussierung auf die Modellierung der Energienachfrageseite vertiefen Martin Wietschel et al. in ihrem Beitrag die methodische Diskussion. Um unter anderem der wachsenden Bedeutung von Energieeffizienzmaßnahmen zur Erreichung von Klima- und Ressourcenschutzzielen gerecht zu werden, sehen die Autoren auch auf der Seite der Modellierung einen dringenden Bedarf der methodischen Weiterentwicklung. Wolfgang Weimer-Jehle und Hannah Kosow stellen die Cross-Impact-Bilanzierungsanalyse als eine Methode für die systematisierte Festlegung von Rahmenannahmen vor. Im Zentrum dieser methodischen Erweiterung steht die Entwicklung konsistenter Kontextszenarien, die es erlauben, auch qualitative Annahmen bei der computergestützten Modellierung in systematischer Weise zu erfassen. Dem folgt der Beitrag von Ulrich Fahl et al., in dem mit der *Energieprognose 2009* ein aktuelles Fallbeispiel vorgestellt wird [Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2010b]. Im Mittelpunkt ihrer Beschreibung steht die Diskussion der Annahmen, wie etwa die zugrunde gelegten

Laufzeitverlängerungen für Kernkraftwerke, und der Ergebnisse dieser Studie – einschließlich einer Sensitivitätsanalyse. Franz Trieb und Tobias Naegler analysieren in einer weiteren Fallstudie die Möglichkeiten einer nachhaltigen Bereitstellung von Strom und Trinkwasser für Europa, den Mittleren Osten und Nordafrika. Im Zentrum der Analyse steht ein Szenario, das ausgehend von den heutigen Gegebenheiten in den drei Regionen eine mögliche Entwicklung der Energie- und Wasserversorgung beschreibt. Anhand der *Energy Technology Perspectives 2010* der Internationalen Energieagentur erweitert Uwe Remme in seinem Beitrag den Blick auf globale Problemstellungen [International Energy Agency 2010b]. Anhand eines Energieszenarios und dessen Vergleich mit einer Referenzentwicklung wird die Möglichkeit der Erreichung einer Halbierung der energiebedingten globalen CO₂-Emissionen bis 2050 in Bezug auf 2005 diskutiert.

Die Perspektive der Nachfrager nehmen als Erste Aurélie Fleury et al. ein. Aus Sicht eines Energieversorgungsunternehmens schildern sie zum einen die Verwendung von Energieszenarien bei strategischen Entscheidungen des Unternehmens – etwa bei Investitionsentscheidungen über Kraftwerksneubauten – und formulieren hierauf aufbauend Anforderungen an Energieszenarien. Indem Diana Nissler in ihrem Beitrag die Verwendung von Energieszenarien im Umweltbundesamt schildert, wird erstmals die Perspektive eines politischen Akteurs eingenommen. Neben der vertiefenden Betrachtung von drei Studien wird die Koordination der Szenariendarbeit im Umweltbundesamt in übergreifender Weise vorgestellt. Anschließend beschreibt Wolfgang Langen – ebenfalls aus der Perspektive eines politischen Nachfragers – die Verwendung von Energieszenarien in der Entscheidungsvorbereitung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Im Zentrum stehen hierbei das Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 und die hierfür in Auftrag gegebenen Energieszenarien. Mit der Vorstellung der aktuellen Studie *Energy [R]evolution 2010* erweitert Sven Teske schließlich erneut den Blick auf die globale Perspektive [Greenpeace International und European Renewable Energy Council (EREC) 2010]. Neben einer detaillierten Vorstellung der Studie wird eingehend die historische Entwicklung des Umgangs mit Energieszenarien bei Greenpeace als einer internationalen Nichtregierungsorganisation geschildert.

Literaturverzeichnis

- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2010a, *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*, aufgerufen am 8. Dezember 2010, <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energieszenarien_2010.pdf>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2010b, *Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030. Energieprognose 2009*, aufgerufen am 8. July 2010, <http://en.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/PB_Energieprognose-2009.pdf>.
- Greenpeace International und European Renewable Energy Council (EREC) 2010, *Energy [R]evolution. A Sustainable Energy Outlook*, aufgerufen am 12. Januar 2011, <<http://www.greenpeace.org/usa/Global/usa/report/2010/6/greenpeace-energy-r-evolution.pdf>>.
- International Energy Agency 1993, *World energy outlook to the year 2010*, Paris: OECD/IEA.
- International Energy Agency 2010a, *World energy outlook 2010*, Paris: OECD/IEA.
- International Energy Agency 2010b, *Energy Technology Perspectives 2010: scenarios and strategies to 2050*, Paris.
- Möst, D, Fichtner, W & Grunwald, A (Hrsg.) 2009, *Energiesystemanalyse: Tagungsband des Workshops "Energiesystemanalyse" vom 27. November 2008 am KIT Zentrum Energie, Karlsruhe*, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Shell International BV, 2008, *Shell energy scenarios to 2050*, aufgerufen am 5. Dezember 2008, <http://www.shell.com/static/aboutshell-en/downloads/our_strategy/shell_global_scenarios/shell_energy_scenarios_2050.pdf>.
- Umweltbundesamt 2009, *Politiksznarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030*, Reihe Climate Change, Dessau.

Der Lebensweg von Energieszenarien – Umriss eines Forschungsprogramms

Armin Grunwald

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse; KIT Campus Nord, Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland
E-Mail: armin.grunwald@kit.edu, Telefon: +49 721 608 2 2500

1 Energieszenarien zur Entscheidungsorientierung

Entscheidungen in Energiepolitik, Energiewirtschaft und Energieforschung bezüglich Technologien und Infrastrukturen für Energiebereitstellung und Energieumwandlung erfolgen im Hinblick auf teils weit entfernte Zukünfte. Aufgrund der hohen Investitionskosten von Energieinfrastruktur und -bereitstellungstechnologien und der in der Regel langen Betriebsdauer einmal in Betrieb genommener Großanlagen wird durch Entscheidungen im Energiebereich die Zukunft auf lange Sicht 'festgelegt' oder wenigstens stark beeinflusst. Die langen Zeiträume bis zur Marktreife neuer Energietechnologien und bis zum Aufbau neuer Infrastrukturen führen ebenfalls zu einem hohen Bedarf an Energiezukünften, damit entsprechend langfristig geplant werden kann. Schließlich führt die zentrale Bedeutung von Energie für die Funktionsfähigkeit moderner Volkswirtschaften zu erheblichen politischen Vorsorgenotwendigkeiten, die ebenfalls der Orientierung durch Zukunftsüberlegungen bedürfen.²

Aussagen über die allmähliche Erschöpfung fossiler Energieträger, über Aussichten auf die Konkurrenzfähigkeit erneuerbarer Energieträger, die Formulierung von Klimazielen durch CO₂-Vermeidung, die Sicherung der wirtschaftlichen Versorgung angesichts geopolitischer Verschiebungen, Potentiale und Risiken der Wasserstoffwirtschaft, langfristige Überlegungen zur Rolle der Fusionstechnologie etc. – alle diese für Energiepolitik, Energiewirtschaft und die Ausrichtung der Energieforschung

² Dieser Beitrag setzt Überlegungen aus Grunwald (2009) unter Nutzung einiger Textpassagen fort und nimmt Anregungen von Ulrich Fahl, Wolf Fichtner, Michael Nast, Ortwin Renn und Martin Wietschel auf.

zentralen Aspekte bestehen im Kern aus teils weit reichenden Erwartungen an und Annahmen über zukünftige Entwicklungen. Zusammen mit Vorstellungen darüber, welche Beiträge spezifische Technologien (z. B. neue Reaktorlinien in der Kernenergie, die Geothermie oder die CCS-Technologie) in der näheren oder entfernteren Zukunft zu einer sicheren, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energieversorgung leisten können, werden in teils komplexen Verfahren „Energiezukünfte“ [Grunwald 2009] gebildet, von denen die Energieszenarien die wohl bedeutendste Teilmenge bilden.

Sie orientieren *heutige* Energieforschung, *heutige* Energiepolitik und *heutige* Entscheidungen in der Energiewirtschaft und können einerseits *normative* Szenarien sein, die z. B. bestimmten erneuerbaren Energieträgern im Jahr 2050 einen konkreten Anteil an der Gesamtenergieversorgung zuweisen und daraus Konsequenzen ableiten, was heute getan werden müsse, um dies zu realisieren [Nitsch & Rösch 2002]. Sie umfassen andererseits auch *explorative* Szenarien, welche 'mögliche' Zukünfte untersuchen und z. B. herauszufinden trachten, welche politischen oder technischen Maßnahmen in unterschiedlichen Szenarien positive Beiträge leisten können [vgl. allgemein für politische Nachhaltigkeitsstrategien Coenen & Grunwald 2003].

Energiezukünfte, insbesondere Szenarien sind *notwendig*, um rationale Entscheidungen treffen zu können. Rein normativ, d. h. auf der Basis von Zielsetzungen und anerkannten Werten, sind Fragen der Energiepolitik oder der Energiewirtschaft nicht entscheidbar. Sie bedürfen orientierender Zukunftsaussagen, z. B. über die Entwicklung des zukünftigen Energiebedarfs, über die zukünftige Verfügbarkeit neuer Technologien und ihrer Zeitrahmen oder über die zeitliche Reichweite von bisherigen Energieträgern. Es ist eine der Hauptaufgaben der Energiesystemanalyse, derartige Zukunftsaussagen, z. B. in Form von Szenarien oder Prognosen, wissenschaftlich und systematisch zu generieren, um hierdurch Entscheidungen in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft zu unterstützen [Möst & Fichtner 2009]. Die Unterstützung gegenwärtig anstehender Entscheidungen durch Zukunftsüberlegungen ist ein genereller Modus der Orientierung in modernen Gesellschaften [Luhmann 1997].

Die Erfüllung dieser Erwartungen an Energieszenarien führt jedoch auf ein erhebliches – und im Grundsatz für jede Entscheidungsorientierung durch Zukunftsbetrachtung zutreffendes – Problem. Energieszenarien sind unsicher, teils normativ

geprägt und häufig umstritten. Vielfach werden Energiezukünfte instrumentalisiert, um spezifische Ziele zu erreichen und politische oder wirtschaftliche Interessen durchzusetzen und scheinen damit der Ideologie oder der Beliebigkeit ausgesetzt zu sein [Brown et al. 2000]. So werden z. B. im Energiebereich seit Jahren inkompatible und teils extrem divergierende Szenarien gehandelt. Wenn jedoch Energieszenarien zur Orientierung von rational begründeten Entscheidungen *heute* beitragen sollen, dürfen sie zwar unterschiedlich sein – Entscheider müssen dann beurteilen, wie sie mit der Unterschiedlichkeit der Szenarien umgehen. Sie dürfen jedoch nicht beliebig oder ideologisch sein, dann wäre die erwartete Orientierung durch Szenarien bloßer Schein oder Selbstbetrug. Aus Beliebigem lässt sich nichts Belastbares schließen.

2 Auf dem Weg zur rationalen Bewertung von Energieszenarien

Daraus ergibt sich die Anforderung, Energieszenarien auf ihre „Rationalität“ hin beurteilen zu können. Entscheider, die sich an Szenarien orientieren wollen, müssen sich vor ihrer Entscheidung (z. B. über Investitionen im Kraftwerksbereich) entscheiden, auf welche Szenarien sie ihre Entscheidung abstützen wollen – und dazu müssen sie in der Vielfalt der Energieszenarien bewertende Vergleiche und letztlich eine Auswahl vornehmen. Sie müssen ggf. Energieszenarien als unpassend, als nicht belastbar oder als ideologisch erkennen und aus der Menge der für die Entscheidung zugrunde gelegten Szenarien ausschließen können. Dieses vorgelagerte Bewertungs- und Entscheidungsproblem [Grunwald 2009] ist noch kaum untersucht, obwohl es zentral für die Einlösung der Erwartungen an Szenarien ist.

Um diese unbefriedigende Situation zu verbessern, bedarf es eines besseren Verständnisses von Energieszenarien und der Verfügbarkeit von Begriffen und Verfahren zu ihrer rationalen, d. h. letztlich „trans-subjektiven“ Bewertung. Wenn man, wie oben geschehen, diese Notwendigkeit aus der Situation und der Perspektive von „Nutzern“ der Energieszenarien heraus ableitet, ergeben sich Nachfragen in zwei Richtungen: (a) in Bezug auf die Bewertung von Energieszenarien nach ihrem (kognitiven, normativen, assumptiven etc.) *Gehalt* und (b) nach ihren erwartbaren *Folgen* in der „Nutzung“ selbst, also z. B. in einer öffentlichen Debatte. Hier wird er-

sichtlich, dass die Bewertung von Energieszenarien eine Scharnierfunktion hat: sie muss einerseits „nach hinten“ schauen, auf den Gehalt und damit auf die *Entstehung* der Energieszenarien. Andererseits muss eine Bewertung der Eignung von Szenarien immer auch „nach vorne“ erfolgen und die Kontexte, Anforderungen und Bedingungen der angezielten späteren Nutzung in den Blick nehmen. Auf diese Weise zeigt sich, dass die Bewertung von Energieszenarien keine zeitlich punktuelle Angelegenheit ist, sondern dass Bewertungsverfahren den „Lebensweg“ von Energieszenarien betrachten müssen.

Der Lebensweg von Szenarien beginnt mit ihrer Erstellung auf der Basis von quantitativen Modellen oder von qualitativen Annahmen oder einer Kombination beider. Noch weiter voraus liegen grundlegende Festlegungen im Rahmen der Modellbildung, z. B. die Wahl einer „Modellphilosophie“ oder die Bestimmung der Systemgrenzen. Auf Basis dieser Entscheidung werden dann Szenarien „konstruiert“ (vgl. Kap. 3), die nach Fertigstellung auf ihren Gehalt hin bewertet werden können. In der „Nutzungsphase“ der Energieszenarien – insofern es überhaupt zu einer solchen kommt, dies dürfte nicht generell der Fall sein – haben sie dann „reale“ Folgen für Entscheidungen, für Meinungsbildung oder für die Strukturierung öffentlicher Debatten.

Das in diesem Beitrag skizzierte Forschungsprogramm zielt darauf ab, Energieszenarien entlang dieses Lebensweges systematisch zu begleiten und zu untersuchen – letztlich um dazu beizutragen, dass das oben genannte Problem der drohenden Beliebigkeit zumindest ein Stück weit behoben werden kann. Dieser Lebensweg, in dem die Bewertung wie gesagt eine Scharnierfunktion hat, wird im Folgenden näher untersucht. An dieser Stelle seien zunächst die beiden Blickrichtungen der Bewertung kurz erläutert.

(a) Fragen nach dem *Gehalt* von Energieszenarien (vgl. Kap. 3)

Die Bewertung von Energieszenarien zielt offenkundig zunächst auf ihren Gehalt, d. h. die Aussagen, die darin gemacht werden. Die erkenntnistheoretische Herausforderung ist zu prüfen, ob und wie Energiezukünfte auf ihren 'Objektivitätsgehalt' oder auf ihre 'Objektivierbarkeit' hin untersucht werden können. Können Energieszenarien überhaupt auf 'Rationalität' hin bewertet und verglichen werden? Kann wissenschaftlich, d. h. mit guten Gründen nachvollziehbar, ein 'Objektivitätsgefälle' zwischen konkurrierenden oder zumindest divergierenden Energieszenarien bestimmt werden und

können Energieszenarien auf diese Weise erkenntnistheoretisch verglichen werden? Wo liegen die Grenzen derartiger Analysen von (Energie-)Zukünften? Wie weit ist es möglich, Einseitigkeiten, ideologische Vorannahmen, Interessen und Prämissen aufzudecken und angesichts kontroverser und umstrittener Energieszenarien zu einer rationalen Beurteilung ihrer 'Qualität' zu kommen, um eine *nicht beliebige* Orientierung in anstehenden Entscheidungen zu ermöglichen?

(b) Fragen nach *Wirkungen* von Energieszenarien (vgl. Kap. 4)

Energieszenarien werden unter Aspekten der Zweckrationalität erstellt: sie sollen etwas bewirken. Eine Bewertung von Energieszenarien vor dem Hintergrund, sie mit guten Gründen für Zwecke der Entscheidungsorientierung einzusetzen, wird Einschätzungen der vermuteten Wirkungen umfassen müssen: besteht Aussicht, die verfolgten Ziele zu erreichen? Unter welchen Bedingungen ist die Zielerreichung plausibel? Kann es zu nicht intendierten Folgen der Nutzung von Energieszenarien kommen (dies dürfte hauptsächlich im politischen und öffentlichen Raum ein Thema sein, da massenmedial vermittelte Diskussionen sich nicht so selten an überraschenden Wahrnehmungen oder Wendungen festmachen)? Mit welchen realen Folgen der Nutzung von Energieszenarien ist zu rechnen?

Beide Fragerichtungen werden im Folgenden detaillierter ausgeführt, um sodann die Notwendigkeit einer den gesamten Lebensweg überblickenden Gesamtperspektive zu diskutieren.

3 Gehalt und Konstruktion von Energieszenarien

Es sind Verfahren der Bewertung von Energiezukünften gefragt, in dem ihre 'Rationalität', also ihre inter- und transsubjektive argumentative Qualität analysiert und letztlich geprüft werden könnte. Über die Qualität wissenschaftlicher Ergebnisse und Thesen, d. h. über die argumentative Geltung von Aussagen und die Berechtigung von Aufforderungen wird nach üblichem Verständnis *diskursiv* entschieden [z. B. Habermas 1988]. Ein Diskurs, der zwischen Opponenten und Proponenten unter Einhaltung von Diskursregeln erfolgt, ist das Verfahren, in dem auch die Qualität von Energieszenarien beurteilt und in dem konkurrierende Energieszenarien verglichen

werden könnten, nach Maßgabe ihrer größeren 'argumentativen Härte' und Haltbarkeit in diesem Diskurs. Die größere 'argumentative Härte' ist nicht gleichbedeutend mit der, wie dies oft verstanden wird, späteren Eintrittswahrscheinlichkeit. Was *mit Geltung* gesagt werden kann, sind nicht Behauptungen über das Eintreffen von Zukünften, sondern nur die *Erwartbarkeit* ihres Eintreffens auf der Basis des *gegenwärtigen* Wissens und *gegenwärtiger* Relevanzeinschätzungen [Lorenzen 1987; Knapp 1978].

Denn Zukunft kann aufgrund des unlösbaren Bezuges auf die sprachlichen Mittel, mit denen wir über Zukunft reden, immer nur das sein, von dem jeweils 'heute' *erwartet wird*, dass es sich ereignen wird oder kann [Grunwald 2007]. Wenn wir über den Energiemix im Jahre 2050 reden, reden wir nicht darüber wie dieser Energiemix dann 'wirklich' sein wird, sondern darüber, wie wir ihn uns *heute vorstellen*, und diese Vorstellungen gehen teils weit auseinander. Zukünfte sind damit *etwas je Gegenwärtiges* und verändern sich mit den Veränderungen der jeweiligen Gegenwart. Als Beispiel: die Energiezukünfte der 60er Jahre für das Jahr 2000 sahen anders aus als die Energiezukünfte nach den beiden Ölkrisen der 70er Jahre. Energiezukünfte für Deutschland sahen nach dem Ausstiegsbeschluss aus der Kernenergie anders aus als vorher. *Zukunft ist also nichts außerhalb der Gegenwart, sondern ein spezifischer Teil der jeweiligen Gegenwart* [Grunwald 2007].

Zukünfte wie Energieszenarien 'gibt' es nicht von sich aus, und sie entstehen nicht von selbst. Sondern sie werden 'gemacht' und sprachlich, oder sprachlich explizierbar, z. B. im Falle von mathematischen Formeln oder Diagrammen, *konstruiert*, auf mehr oder weniger komplexe Weise. Zukünfte, seien dies Prognosen, Szenarien, Pläne, Programme, spekulative Befürchtungen oder Erwartungen werden 'verfertigt' unter Verwendung einer ganzen Reihe von Zutaten wie Wissensbeständen, Werturteilen oder Annahmen. Dieser Konstruktcharakter von Zukünften, ihr Charakter als Resultate eines Konstruktionsprozesses trifft besonders sichtbar auf *Szenarien* zu. Die gängige Rede von einem 'scenario-building' verdeutlicht diesen Konstruktionsprozess [vgl. einschlägige Beispiele in Möst et al. 2009].

Konstruktionen von Energieszenarien erfolgen nach Maßgabe verfügbaren Wissens, aber auch unter der Bezugnahme auf Relevanzeinschätzungen, Werturteile und Interessen, oft im Rahmen von Aufträgen durch Entscheider in Politik und Wirt-

schaft. Wenn also für die argumentative Qualität nicht der Gehalt (im Sinne der Ergebnisse) von Energieszenarien entscheidend ist, sondern das, was in ihre Konstruktion hineingelegt wurde, stellt sich die Frage, welche Ingredienzien in die Gestaltung von Zukünften, insbesondere Energiezukünften, investiert werden. Zukünfte sind in Bezug auf ihre Wissensstruktur zunächst opake Konstrukte aus den unterschiedlichsten Bestandteilen: wissenschaftliches Wissen unterschiedlicher Quelle und Geltung, lebensweltliches Wissen, ad hoc Annahmen, Relevanzeinschätzungen, ceteris paribus-Bedingungen etc. Nicht durch Wissen gestützte Anteile werden durch mehr oder weniger gut begründbare Annahmen und evaluative Bedingungen ergänzt oder kompensiert. In einer groben Annäherung kann zunächst folgende Abstufung der Wissens- und Nichtwissensbestandteile vorgenommen werden [Grunwald 2009]:

- *gegenwärtiges Wissen*, das nach anerkannten (z. B. disziplinären) Kriterien als Wissen erwiesen ist (z. B. je nach Fragestellung aus Geologie, Wirtschaftswissenschaften, Technikwissenschaften,);
- *Einschätzungen* zukünftiger Entwicklungen, die kein gegenwärtiges Wissen darstellen, sich aber durch gegenwärtiges Wissen begründen lassen (z. B. demografischer Wandel, Energiebedarf);
- *ceteris-paribus Bedingungen*, indem bestimmte Kontinuitäten, ein 'business as usual' in bestimmten Hinsichten oder die Abwesenheit disruptiver Veränderungen als Rahmen für die prospektiven Aussagen angenommen werden;
- *ad-hoc Annahmen*, die nicht durch Wissen begründet sind, sondern die 'gesetzt' werden (wie z. B. die auch zukünftige Gültigkeit des deutschen Kernenergieausstiegs, das Nichteintreten eines katastrophalen Kometeneinschlags auf der Erde ...).

Für den Vergleich von Energieszenarien unter Geltungsaspekten ist die Qualität des enthaltenen Wissens, der Einschätzungen und der ad-hoc- und der ceteris-paribus-Annahmen und ihrer Zusammenstellung zu hinterfragen, genauso wie die diskursive Haltbarkeit der oben genannten Relevanzentscheidungen und der Anteile des Nichtwissens, insofern es sich um ein 'gewusstes' Nichtwissen handelt.

Diese Feststellung hat weit reichende Konsequenzen. Wer Geltung beanspruchend über zukünftige Entwicklungen im Energiebereich redet, muss – soweit wie vom Op-

ponenten gefordert, denn eine Vollständigkeit ist grundsätzlich nicht erreichbar – die Voraussetzungen angeben, die als Bedingungen für eine begründbare Zukunftsaussage angenommen werden müssen. Ein Diskurs um Qualitäts- und Geltungsfragen von Zukunftsaussagen wird dadurch zu einem Diskurs über die – jeweils gegenwärtig gemachten – Wissensbestandteile und Voraussetzungen, aber auch über ihre methodische Zusammenfügung, z. B. in einem Modell, die zu der Zukunftsaussage geführt haben. Ein Streit über die Qualität von Energieszenarien bezieht sich daher nicht auf die vorausgesagten Ereignisse in einer zukünftigen Gegenwart z. B. des Jahres 2050, sondern auf die Gründe, die auf der Basis gegenwärtigen Wissens und gegenwärtiger Relevanzbeurteilungen für die jeweiligen Zukünfte in Anschlag gebracht werden können und zwischen denen diskursiv abgewogen werden muss.

Ein Diskurs über den 'Objektivitätsgehalt' von Energieszenarien wird dadurch zu einem Diskurs über die – jeweils gegenwärtig gemachten – Voraussetzungen, die zu der Zukunftsaussage geführt haben. Der ‚Objektivitätsgrad‘ von Energieszenarien hängt nicht davon ab, ob die vorausgesagten Ereignisse zukünftig eintreffen (denn das ist im Vorhinein nicht 'messbar'), sondern liegt an den *gegenwärtig* angeführten Argumenten. Auf diese Weise wird zumindest programmatisch ein Weg aufgezeigt, der in Kap. 1 befürchteten Beliebigkeit der Energiezukünfte bzw. ihrem vielfach vermuteten Ideologiegehalt mit wissenschaftlichen Mitteln entgegen zu treten. In einer erkenntnistheoretischen 'Dekonstruktion' von Energieszenarien geht es darum, über ihren erkenntnistheoretischen Status und ihre argumentative Belastbarkeit etwas zu erfahren, sie letztlich daraufhin zu prüfen, in welchem Maße und bis zu welcher Grenze eine spezifische Energiezukunft wissenschaftsbasiert ist.

Es ist ersichtlich, dass eine erhebliche Wissenstiefe über die Konstruktion von Energieszenarien, über die vorgängigen Entscheidungen sowie über die „Ingredienzien“ erforderlich ist, um Aussagen zur Qualität machen zu können. Als besonders wesentlich erweisen sich Entscheidungen, die zu Beginn von Modellbildungen getroffen werden, z. B. über die Art des Modells, über die Systemgrenzen und über als relevant erachtete und daher in der Modellierung berücksichtigte Systemzusammenhänge. Hier gilt es, Wissen über den Zusammenhang der am Anfang stehenden Entscheidungen und den Ausprägungen und Ergebnissen der Szenarien bereit zu stellen, um verstehen zu können, wie bestimmte Ergebnisse zustande kommen – und um dann

entscheiden zu können, auf welche der divergierenden Szenarien man sich abstützen möchte.

4 Wirkungen und Folgen von Energieszenarien

Das eingangs erwähnte Programm, Energieszenarien sollen Orientierungen in Entscheidungen ermöglichen, ist zunächst eine normative Erwartung an ihre Funktionen. Genauere Erwartungen an Szenarien im Entscheidungskontext sind:

- **Integration:** Szenarien sollen die zukunftsorientierte Integration und Bündelung unterschiedlicher Entwicklungen, Datenbestände, Parameter etc. erlauben. Besonders im Nachhaltigkeitskontext wird immer wieder auf die Bedeutung dieser Integrationsleistung hingewiesen, um die sektoralen Betrachtungen zu überwinden.
- **Konsistenz:** Die erwähnte Integration soll auch dazu führen, dass Konsistenzprüfungen der Energiezukünfte möglich werden. Anderenfalls könnte es geschehen, dass gute Lösungen in einem Bereich mit guten Lösungen in anderen Bereichen in Widerspruch geraten, z. B. durch die Begrenztheit der natürlichen, ökonomischen oder sozialen Ressourcen.
- **Transparenz:** Energieszenarien sollen dazu beitragen, Wirkungszusammenhänge zu erkennen und zu kommunizieren, also z. B. heutige Entscheidungen mit zukünftigen Entwicklungen in Relation zu setzen.
- **Mult-Perspektivität:** Die Integration soll auch auf die Einbindung unterschiedlicher Perspektiven, z. B. von Entscheidern, Betroffenen und Stakeholdern ermöglichen, um die Zukunftsbetrachtungen robuster zu machen.
- **Szenarien als Medium demokratischer Selbstverständigung:** Szenarien wie andere Formen der „Erzählungen“ über die Zukunft sollten die demokratische Selbstverständigung unterstützen. Schließlich geht es im Bereich der Energie nicht nur um technische, sondern in hohem Maße auch um gesellschaftliche Zukünfte, die damit einer demokratischen Debatte bedürfen.

Wohlgermerkt, dies alles sind zunächst Erwartungen und nicht mehr. Ob sie in realen Kontexten eintreten und von welchen Faktoren dieses Eintreten abhängig ist, ist damit jedoch in keiner Weise gesagt. Dies zu erforschen ist eine Aufgabe der empirischen sozialwissenschaftlichen Forschung in Bezug auf die realen Folgen des Einsatzes von Energieszenarien. Mögliche Fragerichtungen dieser Forschung sind:

- auf welche Weise erfüllen Energieszenarien Orientierungsfunktionen in Entscheidungsprozessen? Welche ihrer Eigenschaften sind wesentlich, damit die Orientierungsfunktion real umgesetzt werden kann?
- von welchen Faktoren hängt es ab, *welche* Szenarien für Entscheidungszwecke herangezogen werden? Welche Rolle spielen dabei Akteursinteressen? Lassen Akteure sich von Szenarien in entscheidungsoffenen Situation orientieren oder nutzen sie Szenarien zu nachträglichen Legitimation vorab getroffener Entscheidungen? Was macht spezifische Szenarien interessant für spezifische Entscheider, um sie real als Orientierung zu verwenden?
- welche Rolle spielt die wissenschaftliche Politikberatung (z. B. am Deutschen Bundestag oder in internationalen Organisationen) in diesen Prozessen?
- auf welchen Wegen diffundieren – jenseits des klassischen Auftraggeber/Auftragnehmer-Modells – Energieszenarien in die Entscheidungsarenen und in die öffentlichen Debatten? Welche Rollen spielen Netzwerke zwischen Politik, Wissenschaft und Wirtschaft, und welche Rollen übernehmen die Medien?
- was lässt sich über die Rezeption von Energieszenarien sagen? In welcher Weise gehen die Nutzer (Politik, Wirtschaft) mit der Komplexität der Szenarien um? In welcher Weise wird diese in den Massenmedien transportiert oder wird krude „Komplexitätsreduktion“ von Szenarien hin zu Prognosen betrieben?
- wie werden Energieszenarien massenmedial kommuniziert und welche Wirkungen haben sie in der Strukturierung öffentlicher Debatten zur Energiepolitik? Können demokratietheoretisch motivierte Erwartungen einer Unter-

stützung demokratischer Zukunftsdebatten durch Energieszenarien bestätigt werden?

- gibt es in der Rezeption und Nutzung von Energieszenarien kulturelle Unterschiede, z. B. zwischen USA, Asien und Europa?

Sämtliche dieser Fragen stellen Aufgaben für empirische sozialwissenschaftliche Forschung dar. Je nach Fragestellung werden unterschiedliche Methoden verwendet werden müssen, so z. B. Medienanalyse, leitfadengestützte Interviews, Rekonstruktion von Debatten anhand von Archivmaterial oder Diskursanalyse.

5 Zum Forschungsprogramm

Der Wissensstand zu den einzelnen Stationen des Lebenswegs von Energieszenarien ist sehr unterschiedlich. Während Energieszenarien an vielen Stellen „konstruiert“ werden [Dieckhoff 2009] und entsprechend das Wissen in relativ hohem Maße vorhanden ist, sieht es bei Verfahren einer rationalen Bewertung schon deutlich schlechter aus [vgl. Grunwald 2009 und die dortige Kritik am Vorgehen der MEX-Vergleiche unterschiedlicher Energiemodelle], und für die realen Folgen der Nutzung von Energieszenarien ist kaum etwas Belastbares zu sagen. Der letztere Bereich ist vorwiegend durch normative Erwartungen gekennzeichnet (vgl. Kap. 4), zu den realen Einlösungen dieser Erwartungen und ihren Bedingungen ist jedoch empirisch so gut wie nichts bekannt. Dies führt zunächst auf ein Forschungsprogramm sui generis, das um seiner selbst willen viel versprechend ist.



Abbildung 1: Forschungsfelder im Lebensweg Ansatz von Energieszenarien

Das ist jedoch nur ein Teil der hier interessierenden Forschungsfragen. Denn, wie zu Beginn ausgeführt, erscheint es vom Standpunkt eines Nutzers von Energieszenarien in Politik, Wirtschaft oder Wissenschaft als die wichtigste Herausforderung, in der großen Vielfalt der Energieszenarien die „passenden“ – was immer das heißen mag und wie problematisch es aus manchen Perspektiven auch aussehen mag – zu identifizieren. Damit erweist sich in dieser problemorientierten Sicht die rationale Bewertung von Energieszenarien als der zentrale Ort, an dem verschiedenes zusammen kommen muss:

Wissen über die Gehalte der Energieszenarien, d. h. (nach Kap. 3) Wissen über ihre Ingredienzien inklusive der Unsicherheiten, Werte und Nichtwissensbestände;

Wissen über die möglichen oder erwartbaren Folgen im Nutzungskontext und

Wissen über adäquate Bewertungsverfahren und ihre Kriterien.

Diese Situation motiviert die Forderung nach einem phasenübergreifenden Blick auf Energieszenarien. Für die Phase der Bewertung ist es evident, dass Wissen über alle Phasen erforderlich ist. Alle Personen, die vergleichende Bewertungen von Szenarien durchführen, ob in der wissenschaftlichen Politikberatung, in Stabsabtei-

lungen der Wirtschaft oder auch Journalisten, können ihre Bewertungen, jedenfalls wenn Mindeststandards von Rationalität (also Nachvollziehbarkeit, Nicht-Beliebigkeit und Transparenz) angelegt werden, nur durchführen, wenn sie Wissen über den gesamten Lebensweg von Energieszenarien haben.

Aber auch bereits in der Konstruktionsphase der Energieszenarien kann es von Bedeutung sein, Wissen über die Mechanismen im späteren Lebensweg der Szenarien zu haben. Wenn die „Anbieter“ von Energieszenarien wissen, wie die „Nutzer“ Szenarien bewerten und einsetzen, oder wenn sie mögliche Rezeptionsgeschichten antizipieren können bzw. wissen, worauf es in Rezeption und Nutzungsphase ankommt, kann dies die Auslegung von Energieszenarien beeinflussen. Und Nutzer, die in der letzten Phase des Lebenswegs mit Szenarien arbeiten, sollten über deren erkenntnistheoretische Grundlagen und substantielle Prämissen etc. soweit informiert sein, dass sie reflektiert mit den Szenarien umgehen können.

In der Summe heißt dies, dass in einer problemorientierten Sicht alle Teilnehmer am Lebensweg von Energieszenarien auch gewisses Grundwissen über die jeweils anderen Elemente des Lebenswegs haben sollten. Nur so lassen sich „blinde Flecke“ und Einseitigkeiten vermeiden. Der Preis ist allerdings, dass die Zusammenschau der unterschiedlichen Elemente des Lebenswegs nur interdisziplinär möglich ist, was bekanntlich immer eine gewisse Mühe erfordert.

Literaturverzeichnis

- Brown, N, Rappert, B & Webster, A (eds.) 2000, *Contested Futures. A sociology of prospective techno-science*, Burlington/Ashgate.
- Coenen, R, &Grunwald, A (ed.) 2003, *Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland. Analysen und Lösungsstrategien*, Berlin.
- Dieckhoff, C 2009, „Modelle und Szenarien. Die wissenschaftliche Praxis der Energiesystemanalyse“, In *Energiesystemanalyse*, eds D Möst, W Fichtner & A Grunwald, A, Universitätsverlag Karlsruhe, S. 49-60.

- Grunwald, A 2007, „Orientierungsbedarf, Zukunftswissen und Naturalismus. Das Beispiel der „technischen Verbesserung“ des Menschen“, *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* vol. 55, no. 6, S. 949-965.
- Grunwald, A 2008, Auf dem Weg in eine nanotechnologische Zukunft. Philosophisch-ethische Fragen, Freiburg.
- Grunwald, A 2009, „Energiezukünfte vergleichend bewerten – aber wie?“, In *Energiesystemanalyse*, eds D Möst, W Fichtner & A Grunwald, A, Universitätsverlag Karlsruhe, S. 33-47.
- Habermas, J 1988, Theorie des kommunikativen Handelns, Frankfurt.
- Heinloth, K 2003, Die Energiefrage. Bedarf und Potentiale, Risiken und Kosten, Vieweg.
- Knapp, HG 1978, *Logik der Prognose*, Freiburg/München.
- Lorenzen, P 1987, Lehrbuch der konstruktiven Wissenschaftstheorie, Mannheim.
- Luhmann, N 1997, Die Gesellschaft der Gesellschaft, Frankfurt.
- Möst, D & Fichtner, W 2009, Einführung zur Energiesystemanalyse, In *Energiesystemanalyse*, eds D Möst, W Fichtner & A Grunwald, A, Universitätsverlag Karlsruhe, S. 11-32.
- Möst, D, Fichtner, W & Grunwald, A (eds.) 2009, Energiesystemanalyse. Tagungsband des Workshops „Energiesystemanalyse“ vom 27. November 2008 am KIT Zentrum Energie, Karlsruhe. Universitätsverlag Karlsruhe.
- Nitsch, J & Rösch, C 2002, Perspektiven für die Nutzung regenerativer Energien, In *Forschungswerkstatt Nachhaltigkeit*, eds A Grunwald, R Coenen, J Nitsch, A Sydow & P Wiedemann, P, Berlin, S. 297 – 319.

Energiesystemmodelle zur Szenarienbildung – Potenziale und Grenzen

Martin Schönfelder, Patrick Jochem, Wolf Fichtner

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie, Lehrstuhl für Energiewirtschaft, 76187 Karlsruhe, Deutschland,

E-Mail: {martin.schoenfelder; patrick.jochem; wolf.fichtner}@kit.edu,

Telefon: +49(0)721/608-4461/ -4460/ -4590

Kurzfassung

Energieszenarien sind eine zentrale Grundlage für viele weitreichende Entscheidungen in Politik und Wirtschaft. Zu ihrer Erstellung kommen unterschiedlich ausgeprägte Modelle zum Einsatz, die versuchen die Realität mit den wesentlichen Interdependenzen abzubilden. Die Modellierung bietet aufgrund der Möglichkeit komplexe mathematische Zusammenhänge und detaillierte techno-ökonomische Charakteristika abzubilden die Chance, heute zu treffende Entscheidungen im Hinblick auf ihre Wirkung zu bewerten und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Doch stoßen Energiesystemmodelle durch die Notwendigkeit unterschiedlicher Annahmen auch an Grenzen, welche bei der Interpretation der Ergebnisse mit einbezogen werden müssen. Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über verschiedene Modellierungsansätze und geht insbesondere auf die spezifischen Grenzen optimierender Energiesystemmodelle ein.

1 Einleitung

Energieszenarien sind von strategischer Bedeutung in Energiepolitik, Energieforschung und Industrie. Sie sollen politische Entscheidungsträger bei der Entscheidungsfindung im Umfeld internationaler, nationaler oder sektorspezifischer Fragestellungen unterstützen sowie die strategische Unternehmensführung von Banken, der Industrie und Energieversorgungsunternehmen zur Seite stehen. Je nachdem welche

Fragestellung, Annahmen und Methodik bei der Erstellung von Energieszenarien zugrunde gelegt werden, ändern sich auch deren Aussagen. Folglich muss dies bei der Interpretation von Energieszenarien auch stets berücksichtigt werden.

Eine zentrale Methode zur Erstellung von Energieszenarien stellt die auf mathematischen Modellen basierte Energiesystemanalyse dar. Generell versucht ein Modell die reale Welt und die darin auftretenden Interdependenzen in qualitativer und quantitativer Hinsicht zu beschreiben. Die Schwierigkeit besteht darin, die Realität möglichst genau, jedoch mit reduzierter Komplexität abzubilden. Deshalb müssen wichtige Eigenschaften identifiziert und abgebildet werden, während von anderen Charakteristika abstrahiert werden muss. Die konkrete Ausgestaltung der Modelle hängt daher stark von der zugrunde liegenden Fragestellung und dem betrachteten Zeithorizont ab. Prinzipiell lassen sich die Modelle in Abhängigkeit ihres Zeithorizonts in kurz-, mittel- und langfristige Modelle einteilen. Für die Erstellung von langfristigen Energieszenarien sind auf Grund langer Investitionszyklen im Energiesektor Langfristmodelle von grundlegender Relevanz. Durch deren Einsatz ist es beispielsweise möglich den Einfluss unterschiedlicher politischer Instrumente zu vergleichen und so neben energiewirtschaftlichen auch energiepolitische Aussagen zu treffen sowie Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über ausgewählte Modellierungsansätze in der Energiewirtschaft gegeben. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 ausgewählte optimierende Energiesystemmodelle und deren Eigenschaften vorgestellt, bevor in Kapitel 4 auf die Grenzen optimierender Energiesystemmodelle zur Erstellung von Energieszenarien eingegangen wird. Kapitel 5 schließt die Arbeit mit einem Fazit und Ausblick ab.

2 Charakterisierung von Energiemodellen

Im Allgemeinen können Modelle als zweckorientierte Abbildung des Originals verstanden werden zu deren Entwicklung sich ein einheitliches Vorgehen etabliert hat (vgl. Abbildung 1). Insbesondere im Falle von Energiesystemen sind Modelle von entscheidender Bedeutung, da mit ihrer Hilfe auftretende Interdependenzen abgebildet

werden können. Im Folgenden sollen diese Interdependenzen anhand eines kurzen Beispiels aus dem Bereich von Emissionsminderungsmaßnahmen erläutert werden: Unterstellt man eine Emissionsminderungskostenkurve für verschiedene Maßnahmen zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes (quantifiziert in €/t CO₂), beeinflusst die Ausführung einer Option ggf. die anzusetzenden Kosten einer anderen Maßnahme. Wird z. B. durch eine Energieträgersubstitution auf der Stromerzeugungsseite der durchschnittliche auf den Output bezogene Emissionsfaktor des Kraftwerksparks reduziert, erhöhen sich die Minderungskosten auf der Nachfrageseite, da nun beispielsweise Ersatzinvestitionen in effizientere Geräte weniger stark zur Emissionsminderung beitragen als sie es vor der Energieträgersubstitution auf der Stromerzeugungsseite getan hätten.

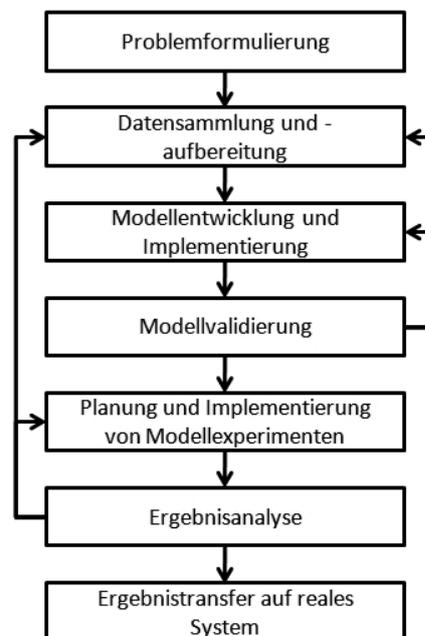


Abbildung 1: Schritte zur Durchführung einer Systemabbildung [in Anlehnung an Küll & Stähly 1999]

Von zentraler Bedeutung für die Interpretation der Ergebnisse von Modellen ist, dass diese in den meisten Fällen lediglich eine Denkhilfe darstellen und helfen sollen, Entscheidungen strukturiert und gut informiert zu treffen. Von geringerer Bedeutung sind hingegen die exakten Zahlen als Ergebnis der Modelle: „Modeling for insights, not numbers“ [Huntington et al. 1982, Bloomfield & Updegrave 1981].

Im Folgenden soll kurz anhand von drei Unterscheidungsmerkmalen (Zeithorizont, Systemperspektive und Planungsaufgabe) auf verschiedene Modellansätze mit ihren jeweiligen Eigenschaften eingegangen werden [Connolly et al. 2010].

Zeithorizont

- Ein Kurzfrist-Modell simuliert zumeist den Betrieb eines bestehenden oder fiktiven Energiesystems. Dabei wird die Struktur der Energieversorgung unter der Vorgabe eines Bedarfsszenarios simuliert. Typischerweise werden entsprechende Modelle in stündlicher Auflösung betrieben und der Betrachtungszeitraum beträgt ein Jahr.
- Ein Langfrist-Modell kombiniert die errechneten Ergebnisse für mehrere Jahre in ein Langfristszenario. Die verwendeten Zeitschritte variieren je nach Fragestellung zwischen einem und fünf Jahren. Das Ergebnis ist typischerweise ein Langfristszenario über 20 bis 50 Jahre. Diese Art von Energiemodellen ist von wesentlicher Bedeutung für die Erstellung von Energieszenarien.

Systemperspektive

- Bei der Top-Down Modellierung handelt es sich um einen makroökonomischen Ansatz der Modellbildung. Sie zeichnet sich durch einen hohen Aggregationsgrad bzgl. Produktionsfunktionen aus, während Prozess- oder Energieträgersubstitutionen in der Regel über Elastizitäten bestimmt werden [Möst & Fichtner 2009]. Gleichgewichtsmodelle sind typische Vertreter von Top-Down-Energiemodellen welche, basierend auf dem Walrasschen Gesetz, Preise auf einem (Partialmodell) oder mehreren Märkten erklären. Dabei kombinieren sie in der Regel (nahezu) perfekte Märkte mit empirischen Marktcharakteristika [Böhringer & Löschel 2004].
- Bottom-Up-Modelle greifen zur Modellierung des Energiesystems auf eine differenzierte techno-ökonomische Charakterisierung aller zugrunde liegenden Produktionsprozesse und Technologien zurück. Zur Erstellung von Energieszenarien wird vielfach auf Bottom-Up-Modelle zurückgegriffen, wenn eine detaillierte Analyse technischer Anpassungsprozesse auf exogen vorgegebene Veränderungen der Rahmenbedingungen für die

Analyse entscheidend ist. Mit Hilfe von Bottom-Up-Modellen kann die gesamte energetische Wertschöpfungskette abgebildet werden.

Planungsaufgabe

- Modelle zur Einsatzplanung optimieren den Betrieb eines exogen vorgegebenen Energiesystems. Der Planungszeitraum entsprechender Modelle bewegt sich im Bereich von wenigen Stunden bis hin zu einem Jahr. In vielen Fällen handelt es sich bei diesen Modellen um Simulationsmodelle. Einsatzplanungsmodulare sind jedoch auch in verschiedenen optimierenden Energiesystemmodellen enthalten (z. B. PERSEUS, Balmorel, vgl. Kapitel 3).
- Modelle zur Investitionsplanung optimieren die Investitionen eines Energiesystems. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wird hierbei stets ein Bottom-Up-Modellansatz verfolgt. Des Weiteren handelt es sich bei Modellen zur Investitionsplanung meist um Langfrist-Modelle.

Aus der Auflistung wird deutlich, dass im Kontext der Erstellung von Energieszenarien neben (partiellen) Gleichgewichtsmodellen wie z. B. PRIMES [Capros 2008] auch Langfrist-Modelle mit Bottom-Up-Ansatz (z. B. PERSEUS, vgl. Kapitel 3) – abhängig von der zugrundeliegenden Fragestellung – relevant sind. Makroökonomische Ansätze verzichten meist auf die detaillierte Abbildung technischer Charakteristika und eignen sich somit vor allem dazu, die Entwicklung des aggregierten Energiekonsums abzuschätzen. Um das Technologieportfolio zu ermitteln, mit dem die ermittelte Nachfrage optimal gedeckt werden soll, eignen sich hingegen technologiezentrierte Bottom-Up-Modelle. Der Fokus liegt hier auf der korrekten Abbildung der existierenden (system-)technischen Restriktionen, die den zulässigen Lösungsraum begrenzen sowie auf der Einbeziehung aller techno-ökonomischer Charakteristika der Anlagenalternativen [Enzensberger 2003]. In der Gruppe der Bottom-Up-Modelle kann des Weiteren zwischen Simulationsmodellen und optimierenden Modellen unterschieden werden, welche in Tabelle 1 einander gegenüber gestellt werden.

Tabelle 1: Vergleich eines optimierenden Energiesystemmodells mit einem Simulationsmodell; in Anlehnung an [Möst 2010]

| | Simulationsmodell | Optimierendes Modell |
|--------------------------|--|---|
| Modellphilosophie | Marktsimulation: Prognose des Marktgeschehens (inkl. Akteursverhalten) | Systemoptimierung: Anpassung eines Systems an alternative Rahmenbedingungen unter gegebener Zielfunktion |
| Modelllogik | Entscheidungsregeln simulieren Akteursverhalten und Marktplätze | Systembeschreibung (Variablen, Restriktionen, Zielfunktion) und Vergleich aller denkbaren Optionen |
| Stärken und Schwächen | Transparenz der Einzelentscheidung gut erweiterbar und anpassbar Wechselwirkungen zwischen Entscheidungsregeln ggf. unklar | Optimalität der Ergebnisse Einzelentscheidungen schwer / nicht isolierbar |
| Marktverständnis | Reale, imperfekte Märkte mit strategischem Verhalten | Perfekte Märkte mit vollständiger Information |
| Investitionsentscheidung | Anlagenbezogen (z. B. NPV) | Systembezogen (Maßnahmenbündel) |
| Strompreise | Ergebnis des simulierten Bietverhaltens | Abgeleitet aus Schattenpreisen der Nachfragedeckung |

Das Ergebnis optimierender Energiesystemmodelle ist unter anderem der Verlauf von (Des-)Investitionsentscheidungen und damit eine detaillierte Projektion der Zusammensetzung von Technologien zur Befriedigung der exogen gegebenen Nachfrageentwicklung. Der im folgenden Kapitel gegebene Überblick sowie die kritische Würdigung der Modelle in Kapitel 4 beschränkt sich auf eine Auswahl an optimierenden Energiesystemmodellen zur Szenarienerstellung mit einem Planungshorizont von größer als fünf Jahren.

3 Ausgewählte optimierende Energiesystemmodelle

Balmorel

Das Modell Balmorel (Baltic Model of Regional Energy Market Liberalization) ist ein 1999 im Rahmen des Dänischen Energieforschungsprogramms entwickeltes Energiesystemmodell. Inzwischen ist das Modell als sogenanntes „Open-Source Modell“ frei verfügbar und wird von verschiedenen Anwendern genutzt und weiterentwickelt [Ravn 2001]. Balmorel basiert auf einer mehrperiodischen linearen Optimierung mit der Zielfunktion der Minimierung der *jährlichen* entscheidungsrelevanten Systemausgaben. Es handelt sich somit um einen myopischen Modellierungsansatz, der im Gegensatz zu den sogenannten Perfect-Foresight-Modellen steht, welche die diskontierten Systemausgaben über den gesamten Betrachtungszeitraum minimieren [Ball 2006].

IKARUS

Das Modell IKARUS (Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien) wurde am Forschungszentrum Jülich in Zusammenarbeit mit mehreren wissenschaftlichen Institutionen im Rahmen eines vom BMWA geförderten Projektes entwickelt [Markewitz & Stein 2003]. Die treibende Größe des Modells ist die Befriedigung der exogen gegebenen Nachfrage nach Energie. Mittels linearer Optimierung werden die volkswirtschaftlich minimierten Kosten unter der Nebenbedingung der Befriedigung von energie- und umweltpolitischen Zielen errechnet. Es können jedoch auch andere Zielkriterien definiert werden. Im Gegensatz zu Modellen, die Investitionsentscheidungen unter perfekter Voraussicht treffen, wurde beispielsweise im Projekt „IKARUS – Energieszenarien bis 2030“ ein quasi-statischer Modellansatz verfolgt (vgl. Balmorel). Das bedeutet, dass die Optimierung nicht über einen mehrperiodischen Zeitraum, sondern für jedes Jahr getrennt erfolgt. Dies soll, gegenüber Perfect-Foresight-Modellen, realitätsnähere Szenarien erzeugen.³

³ Im Rahmen der kritischen Würdigung optimierender Energiesystemmodelle in Kapitel 4 wird der myopische Modellansatz den Perfect-Foresight-Modellen gegenübergestellt und hinsichtlich der Güte der Projektion eingeordnet.

MARKAL/TIMES

Die MARKAL/TIMES (Market Allocation/The Integrated MARKAL/EFOM System) Modellfamilie besteht aus Energie-, Ökonomie- und Umwelttools, die unter der Schirmherrschaft der IEA (International Energy Agency) entwickelt werden. Die Modelle sind sehr weit verbreitet und werden in über 70 Ländern und 250 Institutionen angewendet. Es können beliebig große und kleine Regionen modelliert werden, weshalb das Spektrum von einer weltweiten bis hin zur kommunalen Betrachtung reicht. Das Zielkriterium der Optimierung ist die Minimierung der gesamten diskontierten Systemausgaben über den gesamten Planungshorizont unter Einhaltung aller vorgegebenen politischen und physikalischen Nebenbedingungen [Hundt et al. 2010]. Somit ist die Modellfamilie in die Gruppe der Bottom-Up-Modelle und Perfect-Foresight-Modelle einzuordnen.

PERSEUS

Das Modell PERSEUS (Programme Package for Emission Reduction Strategies in Energy Use and Supply) wurde am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion des Karlsruher Instituts für Technologie entwickelt und wird im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte weiterentwickelt. Es handelt es sich um ein multi-regionales Energie- und Stoffflussmodell zur Abbildung und Analyse des Energieversorgungssektors unter alternativen Rahmenbedingungen. Die Zielfunktion des Modells ist die Minimierung aller entscheidungsrelevanten und diskontierten Systemausgaben zur Deckung der exogen vorgegebenen Nachfrage und unter Berücksichtigung aller definierten Restriktionen. PERSEUS ist somit in die Gruppe der Bottom-Up- und Perfect-Foresight-Modelle einzuordnen.

4 Grenzen optimierender Energiesystemmodelle

Energiemodelle sind eine exzellente Möglichkeit, um fundierte Aussagen über mögliche künftige Entwicklungen von Energiesystemen treffen zu können. Dies gilt insbesondere für große und komplexe Systeme, welche die Eigenschaft haben, dass viele Wechselwirkungen bestehen und somit bereits kleine technologische oder politische Veränderungen deutliche Auswirkungen zeigen können. Dies zeigt sich heute bei-

spielsweise bei der geplanten Verlängerung der Laufzeiten von Atomkraftwerken [BMU & BMWi 2010]. Sollte das entsprechende Gesetz in Kraft treten, wird dies die weitere Entwicklung der Elektrizitätserzeugung in Deutschland weitreichend verändern. An diesem Beispiel lässt sich jedoch auch eines der größten Probleme von Energiemodellen zeigen. Abhängig von den zugrunde liegenden Annahmen und der Güte der verwendeten Datensätze des jeweiligen Modells können sich stark unterschiedliche Projektionen ergeben, wie z. B. bei der Gegenüberstellung der Studien [Hundt et al. 2010] und [Fischedick et al. 2009] deutlich wird.

Zur Einordnung der Möglichkeiten und Grenzen von Energiemodellen soll deshalb im Folgenden eine kritische Würdigung am Beispiel des optimierenden Energiesystemmodells PERSEUS erfolgen. Die getroffenen Aussagen sind aus einem reinen Strommodell abgeleitet. Die meisten Aussagen lassen sich jedoch auch auf andere Energiesystemmodelle übertragen, die auf der Methode der linearen Programmierung aufbauen. Die in diesem Zusammenhang wichtigen Punkte sind:

- Die gewählten Systemgrenzen,
- die zeitliche und räumliche Differenzierung,
- das implizit unterstellte Marktverständnis und die Abbildung des Akteursverhaltens,
- der Detailgrad der Technologieabbildung sowie
- die Berücksichtigung von Unsicherheiten.

4.1 Systemgrenzen

Die Wahl der Systemgrenzen hat weitreichenden Einfluss auf die Ergebnisse eines Energiemodells. So determiniert die Wahl des geografischen Ausmaßes nicht nur die Reichweite des Modelles sondern hat auch Einfluss auf die Ergebnisse der Optimierung. Beispielsweise vernachlässigt ein Energiemodell, das sich auf Deutschland beschränkt, europaweite Ausgleichseffekte in stochastischen Prozessen wie der Windenergieeinspeisung. Somit kann z. B. ein verstärkter Zubau an Regelenergiekraft-

werken notwendig sein, der in der Realität aufgrund natürlicher Ausgleichseffekte eventuell überflüssig wäre.

Auch die Vorgabe makroökonomischer Entwicklungen stellt eine wesentliche Systemgrenze dar. Die treibende Kraft des Energiesystemmodells PERSEUS ist die exogen vorgegebene Energienachfrage. Dementsprechend finden intersektorale Interdependenzen im Modell keine Berücksichtigung. In der realen Welt hängt beispielsweise die Stromnachfrage in den verschiedenen Nachfragesektoren von der makroökonomischen Entwicklung sowie von dem unterstellten Marktpreis für Elektrizität ab. Umgekehrt wird der Strompreis jedoch bei gegebenen Erzeugungsmöglichkeiten von der Gesamtnachfrage determiniert. Eine Berücksichtigung dieses Wechselspiels ist im PERSEUS-Modell jedoch nicht möglich, da die unterstellte Stromnachfrage exogen vorgegeben ist.

4.2 Zeitliche und räumliche Differenzierung

Um die Modellgröße möglichst gering zu halten, erfolgt die zeitliche Differenzierung in PERSEUS über sogenannte Typtage. Die Typtage bilden jeweils den typischen Lastverlauf eines Tages über mehrere Zeitscheiben ab und können für jede Jahreszeit sowie für Werk- und Wochenendtage unterschiedlich angelegt werden. Durch die Wahl der Anzahl und Auflösung der Typtage kann die Komplexität des Modells stark beeinflusst werden. Somit stellt die Wahl der Anzahl der Typtage bzw. Zeitscheiben stets einen Trade-off zwischen Modellgenauigkeit und Modellkomplexität dar. Darüber hinaus verursacht die zeitliche Differenzierung über Typtage zunehmend Probleme in der Abbildung der fluktuierenden Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien. Deren Einspeisecharakteristika erfordern aufgrund des stochastischen Verlaufs eine höhere zeitliche Auflösung im Modell als es bei ausschließlich steuerbaren Stromerzeugern der Fall ist.

Neben der zeitlichen ist auch die räumliche Differenzierung entscheidend. Vor allem in größeren Modellen, z. B. wenn ganz Europa abgebildet werden soll, ist eine hohe räumliche Aggregation notwendig, da mit steigender Anzahl der definierten Regionen, für die jeweils getrennt Technologieoptionen und andere Daten hinterlegt werden können, die Modellkomplexität stark ansteigt. Zwar sind die Ergebnisse bei

starker Differenzierung aussagekräftiger, doch stoßen Modelle mit starker räumlicher Differenzierung auch schnell an die Grenzen der Lösbarkeit in vertretbarer Zeit.

4.3 Marktverständnis und Akteursverhalten

Die im optimierenden Energiesystemmodells PERSEUS verwendete systemumfassende Zielfunktion der Minimierung aller entscheidungsrelevanten diskontierten Ausgaben stellt gegenüber der realen Marktsituation eine Vereinfachung dar, da durch die Unterstellung eines ausgabenbasierten Bietverhaltens in anonymen und diskriminierungsfreien Märkten insbesondere das in der Realität auftretende strategische Verhalten von Unternehmen vernachlässigt wird. So werden zwar gesamtwirtschaftlich optimale Entscheidungen getroffen, doch müssen diese nicht notwendigerweise optimal für jeden einzelnen der modellierten Akteure sein. Es wird vielmehr eine einheitliche Strategie unterstellt, nämlich die systemkostenminimale Deckung der exogen vorgegebenen Nachfrage [Perlwitz 2007, Enzensberger 2003]. Somit unterscheidet sich der Ansatz von einer betriebswirtschaftlichen Optimierung aus Sicht des Einzelakteurs, welcher in der Realität danach strebt seinen Anlagenpark zu optimieren, jedoch nicht versucht systemoptimale Entscheidungen zu treffen.⁴

Eine weitere Problematik von Perfect-Foresight-Modellen besteht darin, dass sie auf der Annahme beruhen, dass alle Marktteilnehmer über vollständige Information und perfekte Voraussicht bzgl. aller Rahmenbedingungen (z. B. Nachfrage- und Preisentwicklungen) verfügen. In der realen Welt sind jedoch lediglich myopische Kenntnisse der Marktteilnehmer vorhanden, welche zu irreversiblen Investitionen führen können. Dies macht deutlich, dass die Systemausgaben in der realen Welt tendenziell höher ausfallen als in Perfect-Foresight-Modellen errechnet wird. Zwar trägt diesem Problem ein myopischer Modellansatz Rechnung, doch hier ist zu kritisieren, dass unterstellt wird, dass der simulierte Entscheidungsträger, der in der Realität über gute Informationen verfügt, eine weniger genaue Kenntnis der Zukunft hat als der Modellentwickler und es somit lediglich zu einer zeitverzögerten An-

⁴ Strategisches Verhalten und Interaktion zwischen Akteuren wird in anderen Ansätzen, z. B. Multiagentensimulationen, berücksichtigt [Genoese 2010]. Diese eignen sich jedoch eher für kurzfristige Betrachtungen, da die Ableitung plausibler langfristiger Akteursstrategien schwer möglich ist (vgl. Kapitel 2).

passung des Systems kommt. Dies erhöht unvermeidlich die sunk costs und somit die berechneten Systemausgaben im Vergleich zu Perfect-Foresight-Modellen [Enzensberger 2003]. Die durch Perfect-Foresight-Modelle ermittelten marginalen Kosten der Stromproduktion oder CO₂-Minderung können somit als untere Grenze für den Strom- und Zertifikatepreis interpretiert werden [Rosen 2007].

Neben den oben genannten Problemen ist bei der Modellierung mittels der linearen Programmierung der sogenannte Bang-Bang Effekt zu beobachten [Perlwitz 2007, Rosen 2007]. Der Begriff beschreibt die Problematik, dass bereits bei marginalen Variationen von Eingangsparametern oder technischen Spezifikationen extreme Veränderungen im Modellergebnis auftreten können. Das Phänomen wird durch substituierbare Alternativen verursacht, da stets die hinsichtlich ihres Beitrags zur Zielfunktion, wenn auch nur marginal, bessere Alternative bis zu eventuellen Restriktionen ausgeschöpft wird. Somit können kleinste Veränderungen im Ergebnis einen vollständigen Wechsel zwischen zwei Substituten verursachen. Bang-Bang Effekte können am wirksamsten durch die Wahl geeigneter Restriktionen verhindert oder durch die Modellstruktur zumindest auf kleine Bereiche des Systems beschränkt werden.

In optimierenden Energiesystemmodellen wird jede (Des-)Investitionsentscheidung unter rein ökonomischen Gesichtspunkten getroffen. In der Realität werden solche Entscheidungen jedoch auch stark von weiteren Einflussfaktoren bestimmt. Neben strategischen Überlegungen der Unternehmen zählen dazu auch politische Zielvorgaben, technische Restriktionen oder auch marktmanente Aspekte wie begrenzte Fertigungskapazitäten der Anlagenbauer. Um die genannten Faktoren in adäquater Weise in den Modellergebnissen widerzuspiegeln, müssen diese in geeigneter Weise in das Gleichungssystem integriert werden. Dies kann jedoch nur für einen Teil der relevanten Aspekte gelingen, da bei vielen Teilaspekten keine mathematisch exakte Abbildung möglich ist.

4.4 Detailgrad der Technologieabbildung

Je genauer die verfügbaren Technologien mit ihren Eigenschaften im Modell abgebildet werden können desto belastbarer werden die errechneten Ergebnisse. Einige Technologieaspekte können auf der Seite der Energiewandlungsanlagen in heutigen

Modellen nur näherungsweise berücksichtigt werden. Dazu gehören neben dem Anfahrverhalten von Kraftwerken beispielsweise auch Systemdienstleistungen, welche bisher nur teilweise im Modell integriert sind.

Ein weiterer Aspekt, der heute in optimierenden Energiesystemmodellen nur unzureichende Berücksichtigung findet, ist die Einbeziehung von Netzrestriktionen in die Optimierung. Durch die zunehmende räumliche Verschiebung von Erzeugungskapazitäten im Elektrizitätssektor, beispielsweise bedingt durch den starken Zubau von Windkraftanlagen im Norden Deutschlands, ergeben sich verstärkt Netzengpässe im Übertragungsnetz. Ohne adäquate Berücksichtigung dieser Engpässe kann die Optimierung zu suboptimalen Ergebnissen und somit zu falschen Aussagen hinsichtlich der zukünftigen Zusammensetzung der Stromerzeugung führen. Bisher besteht in den meisten Energiesystemmodellen die Möglichkeit, Energieaustauschkapazitäten zwischen den Regionen über interregionale Flussobergrenzen zu modellieren. Dabei wird jedoch der tatsächliche elektrische Lastfluss vernachlässigt. Da der Einfluss des Netzes auf Investitionsentscheidungen mit steigendem Anteil von fluktuierender und nicht steuerbar anfallender Windenergie ebenfalls weiter steigen wird, ist es von grundlegender Bedeutung, die technischen Eigenschaften der Netze basierend auf geeigneten Lastflussmodellen in optimierende Energiesystemmodelle zu integrieren. Erste Ansätze dazu werden beispielsweise in [Groschke et al. 2009] oder [Eßer et al. 2008] vorgestellt.

4.5 Berücksichtigung von Unsicherheiten

Viele der im Modell verwendeten Eingangsparameter sind mit teilweise schwer quantifizierbarer Unsicherheit behaftet. Beispielsweise handelt es sich bei der unterstellten Nachfrageentwicklung immer selbst um das Ergebnis eines Modells, welches wiederum mit Unsicherheit behaftete Parameter als Eingangsgröße verwendet. Aus diesem Grund werden im Zusammenhang mit Energiemodellen häufig Szenarien angewendet, durch deren Verwendung eine Bandbreite an Ergebnissen angegeben werden kann. Neben der Anwendung von Szenarien wird häufig auch eine Sensitivitätsanalyse bzgl. unsicherer Eingangsparameter angewendet. Durch die Sensitivitätsanalyse kann abgeschätzt werden, welchen Einfluss eine Änderung unsicherer Eingangsgrößen auf das errechnete Ergebnis hat. Zwar kann dadurch nicht die Unsicherheit selbst abgeschätzt

werden, doch wird deutlich, hinsichtlich welcher Parameter das Ergebnis besonders sensitiv reagiert. Eine Möglichkeit um Unsicherheiten adäquat zu berücksichtigen, welche durch relevante stochastische Teilprozesse auftreten, ist deren direkte Einbettung in die Optimierung [dargestellt in Möst & Keles 2010]. Dies bietet sich beispielsweise an um Prozesse wie die fluktuierende Einspeisung aus Windenergie in optimierenden Modellen zu berücksichtigen.

5 Fazit und Ausblick

Die Erstellung von Energieszenarien basiert in der Regel auf komplexen mathematischen Modellen, die je nach Modellansatz verschiedenen Zielen dienen. Um eine Projektion für die Zusammensetzung der Technologien zur Energiebereitstellung zu erstellen eignen sich Bottom-Up-Modelle, da sie detaillierte techno-ökonomische Daten berücksichtigen und somit unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Annahmen fundierte Aussagen hinsichtlich der Entwicklung der Energieversorgung getroffen werden können.

Da jedoch bei der modellhaften Abbildung der Realität eine Vielzahl von Annahmen getroffen werden müssen, ergeben sich zwangsläufig Ungenauigkeiten und Unsicherheiten in den errechneten Ergebnissen. Wesentliche Punkte, die zur korrekten Interpretation und Bewertung von Energieszenarien auf Basis optimierender Energiesystemmodelle beachtet werden müssen, sind:

- Die gewählten Systemgrenzen, welche die Gültigkeit der Ergebnisse ggf. auf bestimmte Regionen oder Teilmärkte beschränken,
- die zeitliche und räumliche Differenzierung,
- das implizit unterstellte Marktverständnis sowie die Abbildung des Akteursverhaltens,
- der Detailgrad der Technologieabbildung sowie
- die Berücksichtigung von Unsicherheiten hinsichtlich der Modellparameter bzw. das Einbeziehen stochastischer Prozesse in die Optimierung.

Insbesondere durch die stetige Steigerung der zur Verfügung stehenden Rechnerleistung sind für die Zukunft weitere Verbesserungen im Bereich des Detaillierungsgrades der Modelle zu erwarten. Dies trägt dazu bei, dass die errechneten Ergebnisse zunehmend genauer werden. Dennoch bleibt eine wesentliche Einschränkung, dass die Qualität der Ergebnisse stark von den getroffenen Annahmen abhängt und somit nicht zuletzt auch von subjektiven Einschätzungen des Modellierers abhängen. Des Weiteren wird es auch in Zukunft nur begrenzt möglich sein, belastbare langfristige Akteurstrategien in den Modellen zu berücksichtigen, da diese von zu vielen nicht objektivierbaren Faktoren abhängen. Somit können Szenarien erstellt mit Energiesystemmodellen immer nur eine mögliche Entwicklung darstellen.

Literaturverzeichnis

- Ball, M 2006, „Integration einer Wasserstoffwirtschaft in ein nationales Energiesystem am Beispiel Deutschlands“, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).
- Bloomfield, S & Updegrove, D 1981, “Modeling for insights, not numbers”, *New directions for higher education*, vol. 35, S.93-104.
- BMU & BMWi, 2010, *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Böhringer, C & Löschel, A 2004, Climate change policy and global trade, *ZEW Economic Studies 26*, Mannheim.
- Capros, P 2008, *The PRIMES Energy System Model*, National Technical University of Athens.
- Connolly, D, Lund, H, Mathiesen, BV & Leahy, M 2001, “A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems”, *Applied Energy*, vol.87, S.1059 – 1082.
- Enzensberger, N 2003, „Entwicklung und Anwendung eines Strom- und Zertifikatmodells für den europäischen Energiesektor“, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).
- Eßer, A, Möst, D & Rentz, O 2008, “Long-term power plant investment planning in Baden-Wuerttemberg using a GIS-based nodal pricing approach”, In: *Proceedings of the 31st IAEE International Conference*, Istanbul.

- Fischedick, M, Supersberger, N & Zeiss, C 2009, *Die Auswirkungen einer Laufzeitverlängerung der Atomkraftwerke auf erneuerbare Energien*, Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Genoese, M 2010, „Energiewirtschaftliche Analysen des deutschen Strommarkts mit agentenbasierter Simulation“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie.
- Groschke, M, Eßer, A, Möst, D & Fichtner, W 2009, “Neue Anforderungen an optimierende Energiesystemmodelle für die Kraftwerkseinsatz- und Zubauplanung bei begrenzten Netzkapazitäten“, *ZfE Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 01/2009, S.14–22.
- Hundt, M, Barth, R, Sun, N, Brand, H & Voß, A 2010, *Herausforderungen eines Elektrizitätsversorgungssystems mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien*, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, IER.
- Huntington, HG, Weyant, J & Sweeney, J 1982, “Modeling for insights, not numbers: the experiences of the energy modeling forum”, *Omega – the International Journal on Management Science*, vol. 10, no. 5, S. 449-462.
- Küll, R & Stähly, P 1999, „Zur Planung und effizienten Abwicklung von Simulationsexperimenten“, In: Biethan et al.: *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe – State of the Art und neuere Entwicklungen*, Heidelberg: Physica-Verlag, S.1-21.
- Markewitz, P, & Stein, G 2003, *Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland*, Forschungszentrum Jülich.
- Möst D & Fichtner W 2009, „Einführung zur Energiesystemanalyse“, In: *Energiesystemanalyse*, Möst, D, Fichtner, W; Grunwald, A (ed.), Universitätsverlag Karlsruhe 2009.
- Möst, D & Keles, D 2010, “A survey of stochastic modelling approaches for liberalised electricity markets”, *European Journal of Operational Research*, (2009), doi:10.1016/j.ejor.2009.11.007.
- Möst, D 2010, “Energy economics and energy system analysis. Methods for decision support and its application in energy markets”, *Kumulative Habilitationsschrift*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Perlwitz, H 2007, „Der Erdgasmarkt für den Kraftwerkssektor unter CO₂-Minderungsverpflichtungen“, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).
- Ravn, H (ed.) 2001, *Balmorel: A Model for Analyses of the Electricity and CHP Markets in the Baltic Sea Region*, Elkraft System.
- Rosen, J 2007 “The future role of renewable energy sources in European electricity supply”, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).

Modellierung der Energienachfrage – der wesentliche Baustein für zukünftige Energieszenarien

Martin Wietschel, Tobias Fleiter, Simon Hirzel

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Breslauer Straße 48, 76139
Karlsruhe, Deutschland, E-Mail: Martin.Wietschel@isi.fraunhofer.de,
Tobias.Fleiter@isi.fraunhofer.de, simon.hirzel@isi.fraunhofer.de

Einführung

Unbestritten spielen Energieeffizienzmaßnahmen auf der Nachfrageseite die wichtigste Rolle zur Erreichung ambitionierter Klima- und Ressourcenzielsetzungen. Allerdings hat sich die Energiewirtschaft in den vergangenen Jahrzehnten primär auf die Energieerzeugung fokussiert. Diese Angebotsdominanz spiegelt sich auch in den Modellen wider, die zur Erstellung von Energieszenarien für öffentliche und industrielle Auftraggeber entwickelt und eingesetzt werden. Während dort eine Vielzahl an Modellaktivitäten zu finden ist, sind methodische Ansätze und Modelle zur Abbildung der Nachfrageseite bisher weniger entwickelt und eingesetzt.

Der folgende Beitrag hat zum Ziel, die bestehenden methodischen Ansätze zur Analyse der Energienachfrageentwicklung überblicksweise darzustellen und zu bewerten, sowie einen innovativen Ansatz etwas ausführlicher vorzustellen. Dies geschieht nach einem Abriss über die Rolle der Energieeffizienz.

1 Energieeffizienz – der wichtigste Baustein einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Die Steigerung der Energieeffizienz auf der Nachfrageseite ist die mit Abstand wichtigste Maßnahme zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele. Dies zeigt eine Reihe von nationalen und internationalen Studien: So ist der wesentliche Baustein zur Erreichung des 80 % Treibhausgasminderungszieles in Deutschland bis zum Jahre

2050 im Energiekonzept der Bundesregierung die Energieeffizienz [Bundesregierung 2010]. Der Stromverbrauch soll bis 2020 gegenüber 2008 in einer Größenordnung von 10 % und bis 2050 von 25 % vermindert werden. Im Verkehrsbereich soll der Endenergieverbrauch bis 2050 um rund 40 % gegenüber 2005 zurückgehen. Der Wärmebedarf des Gebäudebestands soll bis 2050 um 80 % vermindert werden. Auch eine aktuelle Studie der IEA [IEA 2010] zeigt, dass zur Erreichung des 2-Grad-Erderwärmungszieles rund 40 % der Treibhausgasreduzierung aus der rationellen Energienachfragenutzung auf der Nachfrageseite kommen muss (Abbildung 1). Dann folgen mit Abstand der Beitrag der erneuerbaren Energien, die CO₂-Abscheidung, ein Wechsel der Brennstoffe und danach dann die Kernenergienutzung. Auch diverse Studien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zeigen vergleichbare Minderungsbeiträge [siehe beispielsweise Barker et al. 2007].

Die Energieeffizienz ist allerdings nicht nur bedeutsam zum Klimaschutz, sondern sie kann wesentlich dazu beitragen, auch der sich abzeichnenden Verknappung fossiler Ressourcen und damit einhergehender wirtschaftlicher Herausforderungen zu begegnen. Weiterhin sind viele dieser Maßnahmen mit vertretbaren wirtschaftlichen Belastungen bzw. sogar mit wirtschaftlichen Gewinnen verbunden [siehe Eichhammer et al. 2008; Wietschel 2010]. Dies stellt bezahlbare Energieausgaben trotz der notwendigen Neugestaltung der Energiesysteme auch in Zukunft sicher.

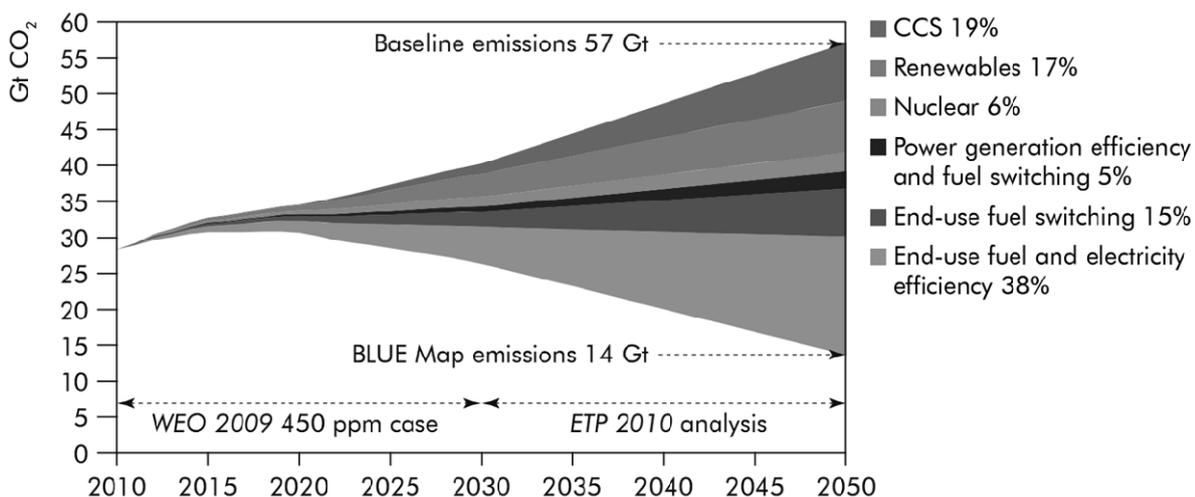


Abbildung 1: Schlüsseltechnologien für eine CO₂-Reduzierung [IEA 2010]

2 Methodische Ansätze zur Modellierung der Energienachfrage

Seit den 50er Jahren werden Modelle zur Energienachfrageprognose entwickelt. Die ersten Ansätze hierzu waren Zeitreihenanalysen und Trendprojektionen. Die entscheidenden Annahmen hierbei sind:

- Alle notwendigen Informationen zur Generierung der Prognose stecken in der Zeitreihe.
- Muster oder Musterkombinationen wiederholen sich.
- Diese können alleine auf der Basis der historischen Daten identifiziert werden.

Hierzu werden verschiedene statistische Methoden wie Trendkurven, exponentielles Glätten oder Dekomposition angewandt [siehe Zuazagoitia 1993 zu den verschiedenen Ansätzen). Die Stärke dieser Ansätze liegt darin, gute Ergebnisse für kurzfristige Voraussagen zu erzielen. Bei auftretenden Strukturbrüchen weisen sie allerdings Schwächen auf. Weiterhin erklären sie die Gründe und Treiber für die Entwicklungen nicht (fehlende Kausalitätsprüfung).

Um diesen Nachteil zu beseitigen wurden dann ökonometrische Methodenansätze entwickelt und verstärkt eingesetzt. Auf rein statischer Basis wird versucht, die Treiber zu identifizieren und somit ein besseres Verständnis über die Gründe der Entwicklungen zu erreichen. Sie basieren aber noch auf den gleichen Annahmen wie die Zeitreihen und Trendmethoden (u. a. alle Information in historischen Daten enthalten). Wenn keine Strukturbrüche vorhanden sind, erzielen sie auch gute Ergebnisse, allerdings keine besseren bzw. sogar etwas schlechtere Ergebnisse im Vergleich zu den Zeitreihenansätzen [siehe Goldfarb et al. 1988 und Huss 1985]. Weiterhin sind sie aufwändiger zu erstellen.

Kritik an den beiden bisher vorgestellten methodischen Ansätzen kam kaum auf, da die meisten der damit erstellten Energieprognosen deutlich über der tatsächlichen Entwicklung gelegen haben [Craig et al. 2002]. Sie sind nicht in der Lage, die Möglichkeiten zur Reduktion der Energienachfrage adäquat zu berücksichtigen. Gerade bei Langfrist-Prognosen wird dies deutlich. Aus dieser Kritik heraus [Chateau & Lapillonne 1978; Lapillonne & Chateau 1981] lässt sich die Entwicklung des dritten

methodischen Ansatzes erklären. Diese werden häufig als Simulationsmodelle, Endverbrauchsmodelle, technische Prozessmodelle oder Accounting-Modelle bezeichnet [Chateaux & Lappillone 1990]. Wesentliche Charakteristika dabei sind:

- Eine technologische Fokussierung, d. h. es fließen technische Parameter des modellierten Energiesystems ein (z. B. Wirkungsgrad, spezifische Energieverbräuche).
- Der Energieverbrauch wird detailliert und disaggregiert über die Analyse einzelner Verbrauchsbereiche oder Prozesse (beispielsweise Raumwärme oder die Aluminiumproduktion) abgeleitet.
- Die strukturellen Zusammenhänge der Variablen werden explizit modelliert (beispielsweise der Wärmeverbrauch über Anzahl an Wohnungen und Wohnungsgrößen).

Wegen ihrer detaillierten technologischen und sektoralen Tiefe werden diese Ansätze den Bottom-up-Methoden zugerechnet, im Gegensatz zu den ökonomischen Ansätzen, die der Top-Down-Methodik zugerechnet werden (vgl. Abbildung 2).

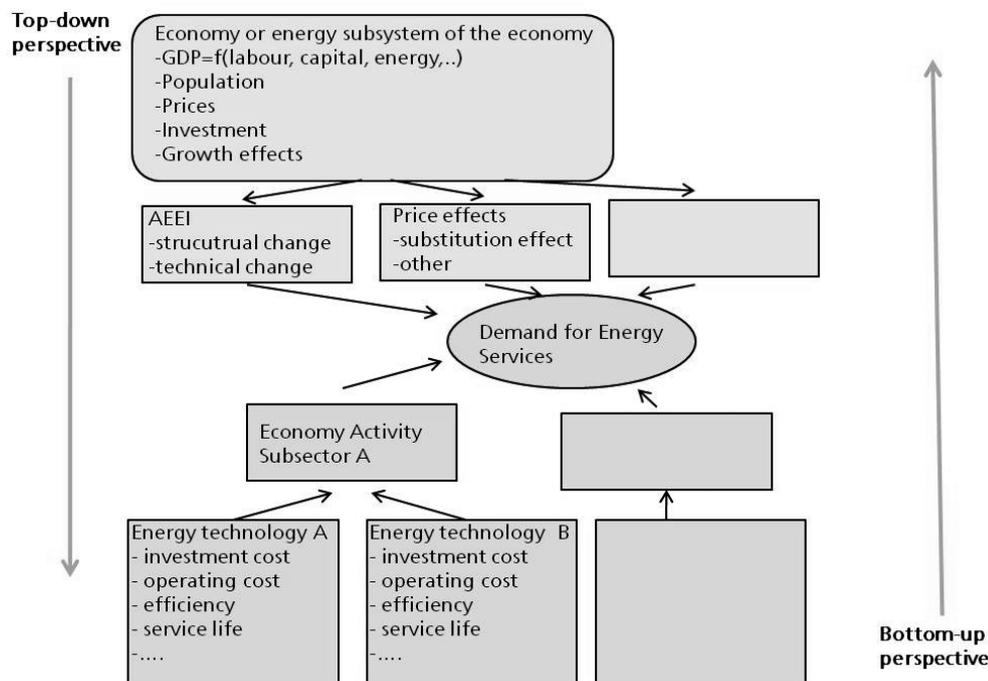


Abbildung 2: Vergleich der Bottom-up-Perspektive mit der Top-down-Perspektive zur Energienachfragemodellierung [vgl. Kavgić et al., 2010]

Auch die technologiebasierten Bottom-up Modelle können sich deutlich voneinander unterscheiden. So ist die erste Generation (häufig als Accounting-Modelle bezeichnet) noch relativ einfach aufgebaut, enthält aber bereits die typische Technologiestruktur (Beispiele sind MURE [Fraunhofer ISI et al. 2002] oder MAED [Hainoun et al. 2006]). Kosten und Energiepreise finden hier noch keinen Einfluss. Eine nächste Generation von Bottom-up Modellen ist stark an Angebotsseitige Modelle angelehnt und arbeitet mit Optimierungsalgorithmen, welche die Gesamtkosten des Energiesystems minimieren (Beispiele sind MARKAL [Gielen & Taylor 2007] oder AIM/end-use [Kainuma 2000]). Da besonders auf der Energienachfrage-seite allerdings kaum von einer Optimierung ausgegangen werden kann, wurden vielfältigste Simulationsmodelle entwickelt, die unterschiedliche Annahmen zum Verhalten der Energieverbraucher zulassen, die durchaus deutlich vom Bild des homo-economicus abweichen können (siehe z. B. SAVE production [Daniels & Van Dril 2007] oder CIMS [Jaccard 2005; Murphy et al. 2007]).

Die Stärken dieser Ansätze liegen darin, dass bestimmte neue technologische Entwicklungen wie Elektromobilität oder Wärmepumpen oder regulatorische Eingriffe wie Standards bei der Beleuchtung gut abgebildet werden können [Rivers & Jaccard 2006]. Auch Marktsättigungseffekte von Technologien (z. B. bei der Klimatisierung), physikalische Gesetzmäßigkeiten (z. B. der Carnot-Wirkungsgrad bei Verbrennungsmaschinen) oder technische Substitutionsgrenzen, beispielsweise zwischen Hochofenstahl und Elektrostahl, sind modellierbar.

Schwächen ergeben sich daraus, dass gewisse technologische Trends zu optimistisch oder pessimistisch bewertet werden können und künftig aufkommende, noch unbekannte Prozesse nicht direkt abgebildet werden. Über Zeiträume von 20 Jahren hinaus sind technologische Entwicklungen heute auch nur begrenzt vorauszusehen. Ein weiterer Nachteil ist auch das Fehlen von Preis- und Einkommenseffekten. Auch ist das Datenaufkommen sehr hoch und aufwendig zu erheben und pflegen. Dennoch sind diese Methoden sehr gut einsetzbar bei Analysen mit Horizonten von 3 bis 20 Jahren. Vergleichsstudien haben die im Durchschnitt besseren Ergebnisse gegenüber den anderen Methoden nachgewiesen [siehe Goldfarb et al. 1988 und Huss 1985]. Im folgenden Kapitel wird ein typischer Bottom-Up-Ansatz vorgestellt.

Neuere Ansätze setzen nun auf den Simulationsmodellen auf und versuchen, einige der erwähnten Schwachpunkte zu beseitigen. Diese Ansätze werden auch als Hybridmodelle bezeichnet, weil sie versuchen, verschiedene methodische Ansätze zu kombinieren. Ein Beispiel ist das kanadische Modell CIMS, welches Top-down Elemente mit Bottom-up Ansätzen in einem Hybridmodell verbindet [Jaccard 2005; Murphy et al. 2007].

3 Das Bottom-up Modell FORECAST

Im Folgenden wird das Modell FORECAST (**FOR**ecasting **E**nergy **C**onsumption **A**nalysis and **S**imulation **T**ool) vorgestellt, das einen Bottom-up-Ansatz zur Energienachfrageprognose und Identifikation von Energieeffizienzmaßnahmen ist.

Das Modell FORECAST setzt sich aus drei Einzelmodellen zusammen, die jeweils einem Energieverbrauchssektor zugeordnet sind. Diese sind die Industrie, Haushalte und der tertiäre Sektor. Da sich das Modell auf dem derzeitigen Entwicklungsstand noch auf die Stromnachfrage beschränkt, wird der Transportsektor nicht explizit modelliert. Für die drei Sektoren werden unabhängig nutzbare Teilmodelle eingesetzt, die zwar alle dem übergeordneten Ansatz der Bottom-up Modellierung untergeordnet sind, jedoch strukturell unterschiedlich aufgebaut sind, um so den Besonderheiten und Unterschieden der Sektoren Rechnung tragen zu können. Das Modell ist auf den Zeithorizont bis 2035 ausgerichtet und damit eher langfristig ausgerichtet. Der Stromverbrauch wird auf Länderebene ausgegeben. In die Berechnungen geht eine Vielzahl sowohl technischer als auch ökonomischer Eingangsparameter ein (Abbildung 3). Diese lassen sich aufteilen in Aktivitätsgrößen bzw. Treiber, wie die Anzahl der Haushalte, die Wertschöpfung oder die industrielle Produktion. Je nach Rahmendaten sind die Treiberniveaus aus übergeordneten Größen wie beispielsweise der Wertschöpfung oder der Bevölkerungsentwicklung unterschiedlich ausgestaltet.

| Größen \ Modell | Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) | Haushalte | Industrie |
|--|--|---|---|
| Haupttreiber (Aktivitätsgrößen) | - Fläche je Beschäftigtem - Anzahl Beschäftigte | - Anzahl Haushalte - Gebäudefläche | - Physische Produktion (t) - Wertschöpfung |
| Preise | - Energieträgerpreise (Gewerbe) | - n/a | - Energieträgerpreise (Industrie) - EUA Preise |
| Energiebilanzen und Emissionsfaktoren | - Eurostat Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger | - Eurostat Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger | - Eurostat Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger |
| Technologiedaten | Energiedienstleistungen: - Technologietreiber - Installierte Leistung - Jährliche Volllaststunden Einsparoptionen: - Einsparpotenzial - Kosten - Lebensdauer - Diffusion | Gerätedaten nach Effizienzklasse - Marktanteile - Spezifischer Verbrauch - Lebensdauer - Standby-Verbrauch - Standby-Zeit Gebäudebezogene Daten: - Dämmstärke - Nutzungsgrad Heizsystem - Technologieanteile für Heizung und Beleuchtung | Prozesse: - Spez. Energieverbrauch Einsparoptionen: - Einsparpotenzial - Kosten - Lebensdauer - Diffusion |

Abbildung: 3 Eingangsgrößen der Submodelle von FORECAST

Wie üblich in technologiebasierten Nachfragemodellen basieren die erstellten Energieszenarien auf detaillierten Annahmen zur Entwicklung der Technologiestruktur. Diese setzen auch für das Basisjahr voraus, dass der Energieverbrauch detaillierter auf Energiedienstleistungen und Wirtschaftszweige verteilt wird, als dies in den verfügbaren Energiestatistiken der Fall ist (z. B. EUROSTAT). Somit eignet sich die im Modell verwendete Methodik, um eine konsistente Darstellung des Energieverbrauchs nach Verwendungszwecken zu ermöglichen, insbesondere für in der Statistik wenig detailliert ausgewiesene Sektoren wie Haushalte oder der tertiäre Sektor.

Beispielhaft wird in Abbildung 4 die Aufteilung des Stromverbrauchs nach Ländern und Energiedienstleistungen dargestellt [Fleiter et al. 2010]. Während in der Energiestatistik nach EUROSTAT nur ein Wert für den gesamten Stromverbrauch im tertiären Sektor angegeben ist, wird dieser im Modell auch auf die wichtigsten Energiedienstleistungen verteilt. Diese anhand von techno-ökonomischen Parametern wie Ausstattungsraten mit elektrischen Geräten, Wirkungsgraden oder typischen Nutzungsdauern berechneten Werte stellen die Grundlage für die Erstellung von Szenarien dar. Die Szenarien variieren sich folglich in diesen Parametern und erlauben zum einen einfache Überprüfungen der Realitätsnähe der Annahmen sowie die relativ gute Abbildung der Wirkung neuer, effizienter Technologien.

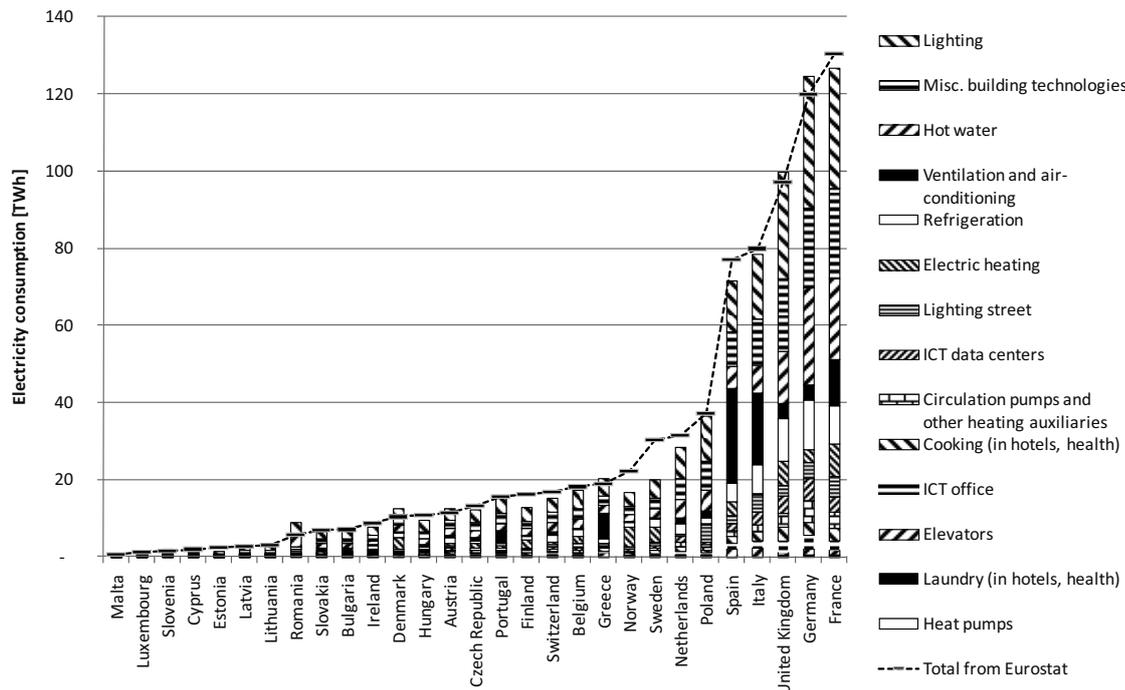


Abbildung 4: Stromverbrauch im tertiären Sektor der EU nach Ländern und Energiedienstleistungen 2007 [Fleiter et al. 2010]

In ähnlicher Weise wird auch für die Sektoren Industrie und Haushalte vorgegangen. Für das Haushalts-Submodell sind wichtige Treiber für die Energienachfrage die Anzahl der Haushalte, Ausstattungsraten und Effizienzklassen für typische Haushaltsgeräte oder die jeweilige Wohnfläche. Insgesamt lassen sich auf diese Weise Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Energienachfrage und darauf aufbauend Ableitungen hinsichtlich der Energienachfrage treffen.

Schlussfolgerungen

Der Modellierung der Nachfrageseite kommt zur Erstellung von Energieszenarien eine immer wichtigere Rolle zu, da die Reduktion der Nachfrageseite der entscheidende Baustein für eine nachhaltige Energieversorgung ist. Bisher existieren hierzu nur wenige Modelle. Bottom-up-Ansätze, die technologisch fundiert sind, oder Hybrid-Modelle erscheinen derzeit am geeignetsten für mittel- bis langfristige Prognosen zu sein. In Zukunft sollte ein stärkerer Fokus auf Modellentwicklung für die

Nachfrageprognose gelegt werden, um den Entscheidungsträgern wichtige Entscheidungsinformationen liefern zu können.

Literaturverzeichnis

- Barker T, Bashmakov, I, Bernstein, L., Bogner, JE., Bosch, PR, Dave, R., Davidson, OR, Fisher, BS, Gupta, S, Halsnæs, K, Heij, GJ, Kahn Ribeiro, S, Kobayashi, S, Levine, MD, Martino, DL, Masera, O, Metz, B, Meyer, L, Nabuurs, GJ, Najam, A, Nakicenovic, N, Rogner, HH, Roy, J, Sathaye, J, Schock, R, Shukla, P, Sims, REH, Smith, P, Tirpak, DA, Urge-Vorsatz, D & Zhou, D 2007, Technical Summary, In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds B Metz, OR Davidson, PR Bosch, R Dave & LA Meyer, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Bundesregierung 2010, *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, 28. September 2010, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Chateau, B; & Lapillonne, B 1978, Long-term energy demand forecasting A new approach, *Energy Policy*, vol. 6, no. 2, S. 140-157.
- Chateaux, B & Lappillone, B 1990, Accounting and End-Use Models. *Energy*, vol. 15, no. 3/4, S. 261-278.
- Daniels, BW & Van Dril, AWN 2007, Save production: A bottom-up energy model for Dutch industry and agriculture, *Energy Economics*, vol. 29, no. 4, S. 847-867.
- Jochem, E; Bradke, H; Cremer, C; Eichhammer, W; Köwener, D; Mannsbart, W; Radgen, P; Ragwitz, M; Schade, W; Sensfuss, F; Walz, R & Wietschel, M 2008, *Investitionen für ein klimafreundliches Deutschland. Synthesebericht, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*, Fraunhofer ISI: Karlsruhe, 25. Juli 2008.
- Fleiter, T; Hirzel, S; Jakob, M; Barth, J; Quandt, L; Reitze, F; & Toro, F 2010, Electricity demand in the European service sector: A detailed bottom-up estimate by sector and by end-use, in *Konferenzband der IEECB 13-14.04.2010*, Frankfurt.

- Fraunhofer ISI; ISIS; Enerdata; ADEME 2002, *MURE Backcasting studies*, Karlsruhe, Rome, Grenoble, Paris, aufgerufen am 14. Dezember 2010, <http://www.mure2.com/doc/MURE_Backcasting.pdf>.
- Gielen, D & Taylor, M 2007, Modelling industrial energy use: The IEAs Energy Technology Perspectives, *Energy Economics*, vol. 29, no. 4, S. 889-912.
- Goldfarb, D & Huss, WR 1988, Building scenarios for an electric utility. *Long Range Planning*, vol. 21, no. 2, April 1988, S. 78-85.
- Hainoun, A; Seif-Eldin, MK & Almoustafa, S 2006, Analysis of the Syrian long-term energy and electricity demand projection using the end-use methodology, *Energy Policy*, vol. 34, no. 14, S. 1958-1970.
- Huss, WR 1985, What makes a good load forecast?, *Public Utilities Fortnightly*, 28 November 1985.
- IEA 2010, *Energy Technology Perspectives: scenarios & strategies to 2050*, Paris: OECD/IEA.
- Jaccard, M 2005, "Hybrid energy-economy models and endogenous technological change", In *Energy and Environment*, eds R Loulou, JP Waaub & G Zaccour, New York: Springer, S. 81-109.
- Kainuma, M 2000, The AIM/end-use model and its application to forecast Japanese carbon dioxide emissions. *European Journal of Operational Research*, vol. 122, no. 2, S. 416-425.
- Lapillonne, B & Chateau, B 1981, The MEDEE models for long term energy demand forecasting, *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 15, no. 2, S. 53-58.
- Murphy, R; Rivers, N & Jaccard, M 2007, Hybrid modeling of industrial energy consumption and greenhouse gas emissions with an application to Canada. *Energy Economics*, vol. 29, no. 4, S. 826-846.
- Rivers, N & Jaccard, M 2006, Useful models for simulating policies to induce technological change, *Energy Policy*, vol. 34, no.15, S. 2038-2047.
- Swan, LG & Ugursal, VI 2009, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, S. 1819-1835.
- Wietschel, M (ed.) 2010, *Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung*, *Technologienbericht*. ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale, Stuttgart, Fraunhofer Verlag.

Zuazagoitia, J 1993, *Long-term final Energy demand analysis for Chile*, Frankfurt a. M., Peter Lang Verlag.

Gesellschaftliche Kontextszenarien als Ausgangspunkt für modellgestützte Energieszenarien

Wolfgang Weimer-Jehle, Hannah Kosow

ZIRN - Universität Stuttgart, Seidenstraße 36, 70174 Stuttgart, Deutschland,
E-Mail: wolfgang.weimer-jehle@sowi.uni-stuttgart.de, Telefon: +49 (0)711 685-84301,
hannah.kosow@sowi.uni-stuttgart.de, Telefon: +49 (0)711 685-84247

Zusammenfassung

Modellgestützte Energieszenarien sind Wenn-dann-Aussagen, die von zahlreichen expliziten wie impliziten Rahmenannahmen über politische, soziale, wirtschaftliche und technologische Entwicklungen ausgehen. Die Annahmen über den „gesellschaftlichen Kontext“ haben einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse von modellbasierten Energieszenarien. Der Umgang mit der Kontingenz, der Komplexität und Unsicherheit gesellschaftlicher Kontexte wird aber bei der Erstellung von Energieszenarien selten als eigene Analyseaufgabe verstanden und noch seltener mit einer den Modellrechnungen auch nur annähernd vergleichbaren Systematik und systemanalytischer Tiefe behandelt. Dieses Ungleichgewicht zwischen den oft nur unsystematisch analysierten Rahmenannahmen und der oft hochentwickelten eigentlichen Modellrechnung macht die Rahmenannahmen in vielen Fällen zu einer Achillesferse modellgestützter Energieszenarien.

In diesem Thesenpapier wird dargestellt, wie das Szenariokonzept auf das Problem der Rahmenannahmen selbst angewendet werden kann, und die Konstruktion von gesellschaftlichen Kontextszenarien als Ausgangspunkt für die modellgestützte Entwicklung von Energieszenarien dienen kann. Für die Konstruktion von gesellschaftlichen Kontextszenarien stehen Methoden zur Verfügung, die eine qualitative, aber dennoch systematische Aufarbeitung der kausalen Zusammenhänge zwischen den Bestandteilen des gesellschaftlichen Kontextes ermöglichen.

1 Szenarien als Element der strategischen Planung

Das Konzept des „Szenarios“ wurde in den 1950er Jahren maßgeblich von dem amerikanischen Zukunftsforscher Herman Kahn entwickelt, zunächst weitgehend im Zusammenhang mit militärstrategischen Fragestellungen, später fand das Konzept zunehmend auch im Unternehmensbereich Verbreitung [Linneman & Klein 1979, 1983, Malaska et al. 1984, Meristö 1989, Götze 1991]. Szenarien dienen dort der Unterstützung langfristiger Planungen, d. h. von Planungen, deren Umfeldbedingungen sich innerhalb des Planungszeitraums signifikant verändern können. Im Gegensatz zur Prognostik thematisiert die Szenario-Methode genau diesen „Unsicherheitskontext“ gezielt, indem sie von multiplen, alternativen Zukünften ausgeht. Ihr Ziel ist es dementsprechend nicht, die Zukunft vorherzusagen, sondern durch die Konstruktion einer Reihe von denkbaren, in sich konsistenten und mit dem vorhandenen Wissen verträglichen Zukunftsentwicklungen, den Szenarien, den Raum des Möglichen abzustecken. Dadurch werden Planer bei der Entwicklung resilienter Strategien unterstützt. Szenarien sind also, in den Worten von Porter [Porter 1985],

„an internally consistent view of what the future might turn out to be - not a forecast, but one possible future outcome“.

Sie sind Zukunftsbilder, die die grundsätzlichen Entwicklungsmöglichkeiten eines

These I: Zu den Kernaufgaben einer klassischen Szenarioanalyse als Unterstützung eines Entscheidungsprozesses gehört die (bestmögliche) Konstruktion des Unsicherheitskontextes, unter dem Entscheidungen getroffen werden müssen.

mehr oder weniger großen Weltausschnitts in groben Umrissen, aber in sich widerspruchsfrei darstellen und dadurch als Planungsgrundlage dienen können. Sie thematisieren im Gegensatz zu Prognosen nicht „... was passieren wird, sondern was passieren kann“ [Becker & List 1997]. Szenarien sind in erster Linie dort ein fruchtbares Instrument, wo Entwicklungen aufgrund ihrer

Komplexität, ihrer Störanfälligkeit oder ihrer Abhängigkeit von menschlichen Entscheidungen nicht berechenbar sind. Ein gut gewähltes und unter sorgfältiger Nutzung des vorhandenen Systemwissens konstruiertes Szenarienbündel kann Entscheidungen unterstützen, indem es

- die Kontingenz von Zukunft sichtbar macht: der Unsicherheitskontext, in dem Entscheidungen stattfinden, wird abgebildet;

- beispielhafte, in sich stimmige Zukunftsbilder bereitstellt, die die unterschiedlichen Wege, die zukünftige Entwicklungen nehmen können, begreifbar und in ihren Implikationen diskutierbar machen;
- die Bedeutung von Trendbrüchen thematisiert.

2 Szenariotechnik und Energieszenarien

Im Bereich der Energieforschung hat das Szenariokonzept eine eigenständige Rezeption erfahren, wobei die Schwerpunkte auf einer modellgestützten Systemanalyse zur quantitativen und detaillierten Darstellung möglicher Zukünfte liegen. Die Stützung auf mathematische Modelle ermöglichte der Energiesystemanalyse einen fundierten Zugang zu der Vielgestaltigkeit und Komplexität technisch-wirtschaftlichen Zusammenhänge, die das Energiesystem ausmachen. Auf der anderen Seite ist festzustellen, dass die Reflektion des Unsicherheitskontextes, das ursprünglich ein Hauptantrieb für diese Form der Zukunftsanalyse war, bei Energieszenarien selten im Fokus steht. Zwar spielen unsichere gesellschaftliche Entwicklungen in den Bereichen der Demographie, der Wirtschaft, der globalen Rohstoffmärkte, der Politik und der technologischen Innovationen eine zentrale Rolle als Rahmenannahmen für Energieszenarien. Auf die Unsicherheit dieser Rahmenbedingungen (die den Modellanwendern selbstverständlich bewusst ist) wird auch zunehmend häufiger durch Varianten- und Sensitivitätsrechnungen eingegangen [vgl. z. B. UBA 2009, BMWi 2010]. Die verwendeten Energiemodelle generieren dabei jedoch keinen Unsicherheitskontext, was als Kernaufgabe einer klassischen Szenarioanalyse gelten würde, sondern sie transformieren lediglich den von den Modellanwendern durch Varianten und Sensitivitätsanalysen vorgegebenen Unsicherheitskontext auf die energiewirtschaftliche und energietechnische Dimension.

These II: Energiemodelle generieren keinen Unsicherheitskontext. Sie transformieren Vorgaben über die Kontingenz der Zukunft auf die Ebene der energietechnischen und -wirtschaftlichen Variablen.

Die Leistung von Energiemodellen im Rahmen der Energieszenarioanalyse liegt also in der Bewältigung der Quantität und Komplexität der in der Energiesystemanalyse

relevanten technisch-wirtschaftlichen Zusammenhänge. Hierfür sind sie unverzichtbar und heute durch aufwändige Entwicklungsleistungen zu einer außerordentlichen Reife

These III: Die Ergänzung von Modellrechnungen zur Erstellung von Energieszenarien um einen vorbereitenden Arbeitsschritt zur systematischen Konstruktion von unterschiedlichen gesellschaftlichen Kontextszenarien kann daher die Aussagekraft der Gesamtanalyse erhöhen.

gelangt. Zur Aufarbeitung der Unsicherheit des gesellschaftlichen Rahmens, auf den die modellierten Energiesysteme auf ihrem Weg in die Zukunft reagieren, sind jedoch zusätzliche Anstrengungen notwendig. Hierbei könnte die Adaption von Konzepten der klassischen Szenarioanalyse ein möglicher Ansatz sein. Als Ausdrucksform für den gesuchten Unsicherheitskontext kommen dabei gesellschaftliche Kontextszenarien in Frage, die unterschiedliche gesellschaftliche Entwicklungsrichtungen in einem

jeweils intern konsistenten Verbund beschreiben und dadurch komplexe Varianten für die Rahmensetzungen eines Energiemodells bieten. Gegenüber klassischen Sensitivitätsanalysen bietet dieses Vorgehen den Vorteil, dass damit nicht nur die isolierte Wirkung einzelner oder weniger Veränderungen untersucht wird, sondern die Reaktion des Systems auf gänzlich andere Kombinationen von Rahmenbedingungen thematisiert werden kann.

3 Konstruktion von Kontextszenarien mit CIB

Kontextszenarien können grundsätzlich mit verschiedenen, in der Szenariotechnik gebräuchlichen Methoden konstruiert werden. Für das Zusammenspiel mit Modellrechnungen eignen sich jedoch besonders Verfahren, die in der Lage sind:

- auch qualitative Einsichten über gesellschaftlichen Zusammenhänge zu verwenden, um nicht dem für Kontextszenarien verhängnisvollen Zwang zu unterliegen, sich auf quantifizierbare Aspekte beschränken zu müssen [zu den Gefahren einer zu starken Konzentration auf quantitative Faktoren bei Zukunftsanalysen siehe z. B. Godet 1983];

- den Möglichkeitsraum systematisch abzusuchen, um nicht auf „ausgetretene Gedankenpfade“ begrenzt zu bleiben und um die Ausblendung nicht-intuitiver Möglichkeiten zu vermeiden;
- gesellschaftliche Kontexte selbst als Systeme zu konzeptualisieren, d. h. indirekte Wirkungen und Wirkungsrückkopplungen zu berücksichtigen, um auch in diesem Bereich eine höhere analytische Tiefe zu erreichen;
- die Szenariokonstruktion in Prozess und Ergebnis transparent und nachvollziehbar zu gestalten, so dass alle zugrundeliegenden Annahmen und Hypothesen über gesellschaftliche Zusammenhänge offengelegt sind und ihre Bedeutung für die Ergebnisse rekonstruiert werden können.

Eine Methode, die diese Anforderungen weitgehend erfüllt ist die Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB, [Weimer-Jehle 2006, 2008]). Sie wurde, neben anderen Gebieten, bereits in zahlreichen Projekten im Themenbereich Energie eingesetzt [Förster 2002, Förster & Weimer-Jehle 2004, Aretz & Weimer-Jehle 2004, Fuchs et al. 2008, Weimer-Jehle et al. 2010]. Das Verfahren beruht auf der Sammlung von hemmend/fördernd-Einschätzungen zu den Interdependenzen eines qualitativen Analyserasters und einer systematischen Durchmusterung aller kombinatorischen Konfigurationen des so definierten qualitativen Wirkungsnetzwerks. Im Folgenden wird der grundsätzliche Ablauf einer CIB-Analyse am Beispiel von Kontextszenarien für Energiemodelle skizziert. Alle dabei verwendeten Größen sind ausschließlich als Beispiel zu verstehen.

4 Kontextszenarien für modellgestützte Energieszenarioanalysen – eine Skizze

Der erste Schritt bei der Erstellung von Kontextszenarien besteht in der Zusammenstellung wesentlicher Rahmenannahmen des Energiemodells, für die eine wesentliche Unsicherheit in der Zukunftsentwicklung vorliegt. Beispiele dafür sind Bevölkerungsentwicklung, Wohnflächen, Wirtschaftsentwicklung, Importpreise für Energieträger, Politikmaßnahmen, aber auch Annahmen über technologische Verbesserungen wie Wirkungsgradsteigerungen oder Kostensenkungen. Optional kann die Analyse weiter

vertieft werden, wenn zusätzlich zu diesen unmittelbar modellrelevanten Faktoren sogenannte „Primärtreiber“ (z. B. die Dynamik gesellschaftlicher Grundwerte) aufgenommen werden, die die gesellschaftliche Entwicklung auf einer tieferen Ebene charakterisieren und einen Erklärungshintergrund für die Entwicklungen der unmittelbaren Faktoren bieten.

Im zweiten Schritt werden für jeden ausgewählten Faktor auf Basis von Literaturstudien und/oder Expertenbefragungen einige (typischerweise 2-4) repräsentative Entwicklungsalternativen festgelegt, die für jeden Faktor den Raum der zukünftig möglichen Entwicklungen für das jeweilige Thema beschreiben. Im dritten Schritt wird in einem Matrixschema eingeschätzt, ob eine bestimmte Entwicklung in einem Faktor eine bestimmte Entwicklung eines anderen Faktors fördert oder hemmt. Diese Einschätzungen erfolgen in der Regel auf einer 7-teiligen Ordinalskala von „stark hemmend“ (-3) über „kein Einfluss“ (0) bis „stark fördernd“ (+3) und können ebenfalls über Literaturstudien, mit größerer Intersubjektivität und Legitimation aber auch über Expertenworkshops, gewonnen werden.

Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus einer beispielhaften Cross-Impact Matrix zur Gewinnung von Kontextszenarien für eine Energiemodellrechnung. Sie enthält alternative Entwicklungen für typische Rahmenbedingungen von Energiemodellen, mit der Technikeinstellung jedoch auch ein Beispiel für einen „weichen“, aber relevanten Faktor, der Einfluss darauf nehmen kann welche Technologiekonzepte sich gesellschaftlich durchsetzen. Der in Abbildung 1 hervorgehobene erste Eintrag -3 im Feld „c3 wirkt auf d1“ würde das Urteil repräsentieren, dass eine schwache BIP-Entwicklung stark hemmend auf die Möglichkeit eines sehr starken Wachstums des Güterverkehrs wirken würde. Ähnlich sind auch für alle anderen Felder Einschätzungen einzutragen, wobei in der Regel auch zahlreiche Felder frei bleiben, bzw. das Urteil „kein Einfluss (0)“ vergeben wird.

Sobald alle Eintragungen in der Cross-Impact Matrix vorgenommen sind, kann die Auswertung der Matrix erfolgen. Dazu werden alle möglichen Annahmenkombinationen durchgeprüft und diejenigen Kombinationen identifiziert, die ein sich gegenseitig bestätigendes Geflecht von Annahmen bilden. Diese werden als Vorschlag des Verfahrens für in sich konsistente Szenarien interpretiert. Dieses Kriterium der inneren Konsistenz ist in der Regel außerordentlich rigide. Typischer-

weise habe auch Matrizen mit Tausenden oder Millionen von kombinatorischen Möglichkeiten nur wenige Lösungen dieser Qualität. Die Auswahlvorschrift im Detail ist in [Weimer-Jehle 2006], und auch auf der Methodenhomepage www.cross-impact.de beschrieben.

| | A. Bev | B. BIP | C. Ölpreis | D. GVL | E. Tec-E | |
|---|--|--|--|--|--|--|
| | a1 leichter Rückgang a2 mod. Rückgang a3 starker Rückgang | b1 starker Anstieg b2 mittlerer Anstieg b3 schwacher Anstieg | c1 starker Anstieg c2 mittlerer Anstieg c3 etwa konstant | d1 sehr starker Anstieg d2 starker Anstieg d3 moderater Anstieg | e1 risikoorientiert e2 risikoor. bei Großt. e3 chancenorientiert | f1 ... |
| A. Bevölkerungsentwicklung a1 leichter Rückgang (auf ca. x Mio) a2 moderater Rückgang (auf ca. y Mio) a3 starker Rückgang (auf ca. z Mio) | | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| B. BIP b1 starker Anstieg (auf ca. x G€) b2 mittlerer Anstieg (auf ca. y G€) b3 schwacher Anstieg (auf ca. z G€) | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| C. Ölpreis c1 starker Anstieg (auf ca. x \$/b) c2 mittlerer Anstieg (auf ca. y \$/b) c3 etwa konstant bei (ca. z \$/b) | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| D. Güterverkehrsleistung d1 sehr starker Anstieg (um ca. x %) d2 starker Anstieg (um ca. y %) d3 moderater Anstieg (um ca. z %) | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| E. Dominierende Technikeinstellungen e1 generell risikoorientiert e2 bei Großtechnologien risikoorientiert e3 generell chancenorientiert | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| F. ... f1 ... | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |

Abbildung 1: Ausschnitt aus einer Cross-Impact Matrix zur Erstellung von Kontextszenarien.

Als Ergebnis der Auswertung erhält man einen Satz von Szenarien, die typischerweise ein breites Spektrum von möglichen Konstellationen aufzeigen. Jedes der Szenarien kann für sich genommen der Ausgangspunkt einer Modellrechnung sein, mit der die Konsequenzen dieses spezifischen Kontextes für das Energiesystem und seine Kenngrößen ermittelt werden. Diese Übertragung kann sich direkt aus den Formulierungen ergeben (z. B. Ölpreis steigt stark auf x \$/b), teilweise erfordert es die Übersetzung in quantifizierbare Größen. Beispielsweise muss das Auftreten des Szenariomerkmals

These IV: Mit CIB konstruierte Kontextszenarien können dazu beitragen, die Unsicherheit von Modellrechnungen angemessener einzuschätzen und die Gründe für bestimmte Ergebnisse bis hinein in den gesellschaftlichen Ursachenbereich explizit und diskutierbar zu machen.

"e2 - Dominierende Technikeinstellungen: bei Großtechnologien risikoorientiert" z. B. als Präferenz von dezentralen Technologien bei F&E (Berücksichtigung im Modell z. B. durch zukünftige Technologiekosten) sowie in Gesetzgebung und Genehmigungspraxis (Berücksichtigung im Modell z. B. durch Maximalkapazitäten) übersetzt werden.

Die Vielfalt der Kontextszenarien bietet einen Ansatz, die aus ihr resultierende Varianz der Modellergebnisse nicht nur zu bestimmen, sondern auch zu interpretieren und sie mit bestimmten Ursachen und Zusammenhängen im gesellschaftlichen Raum in Verbindung zu bringen. Die Kontextszenarien ermöglichen auf diese Weise einen verbesserten Ansatz zur Einschätzung derjenigen Unsicherheit von Modellergebnissen, die auf zugrundeliegende Kontextannahmen zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 2). Sie führen außerdem ergebnisprägende Vorstellungen über gesellschaftliche Zusammenhänge aus der Zone des Impliziten und Unausgesprochenen heraus und machen sie explizit und diskutierbar.

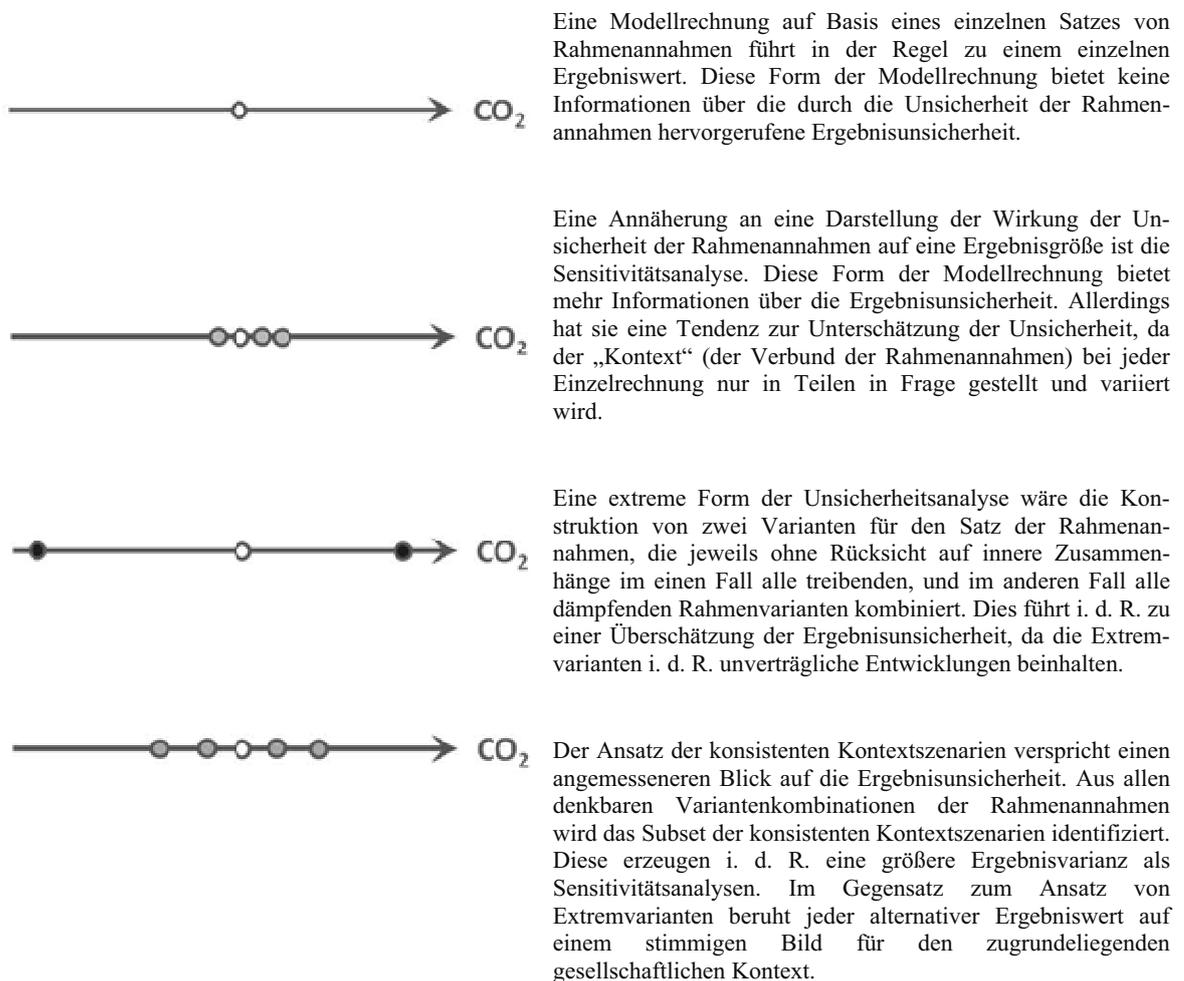


Abbildung 2: Die Verwendung von Kontextszenarien zur Abschätzung der durch Rahmenannahmen bedingten Unsicherheit von Modellergbnisgrößen (hier für das Beispiel CO₂-Emissionen). Schematische Darstellung.

Schlussbemerkungen

Der Bedeutung des gesellschaftlichen Unsicherheitskontextes wird in neuerer Zeit bei der Erstellung von Energieszenarien und -prognosen zunehmende Beachtung geschenkt. Sensitivitätsanalysen gehören heute bereits zum Standard der guten Praxis [vgl. z. B. UBA 2009, BMWi 2010]. Darauf aufbauend ermöglichen Kontextszenarien einen Schritt weiter hin zu einem umfassenden Verständnis der Unsicherheit von

Modellrechnungen und zu einer angemessenen Varianz der berücksichtigten Szenarien innerhalb einer Energieszenarioanalyse.

Das Konzept der Kontextszenarien speist sich aus zwei Quellen. Zum einen nimmt es die sehr unterschiedliche Auslegung des Konzeptes des Szenariobegriffs in verschiedenen Wissensdisziplinen in den Blick. Während im Bereich der Energieforschung modellgestützte Wenn-dann-Analysen dominieren, steht in anderen Bereichen, wie z. B. in den Managementwissenschaften, eher der Versuch, Planungen durch Erfassen der Kontingenz von Zukunftsentwicklungen resilienter zu gestalten, im Fokus. Das Konzept der Kontextszenarien ist auch der Versuch, diese andere Perspektive für das Feld der Energieszenarien fruchtbar zu machen.

Zum anderen steht das Konzept der Kontextszenarien in gewisser Weise in der Tradition der „Story and Simulation“ Ansätze [SAS, Alcamo 2008]. In diesen wird dem Umstand Rechnung getragen, dass Szenarien komplexer Umweltveränderungen weder durch reine Simulationsrechnungen noch durch rein qualitative Szenarien, sogenannte ‚Storylines‘, angemessen abgebildet werden können. Die Lösung wird in SAS durch eine Kombination beider Zugänge gesucht. Eine ähnliche Ausgangslage ist bei Energieszenarien festzustellen, weswegen sich Lösungen, die im weitesten Sinn dem SAS-Konzept folgen, naheliegend sind.

Als methodisches Mittel zur Konstruktion von Kontextszenarien bietet CIB einige günstigen Eigenschaften. Sie ist auf eine qualitative Weise systemanalytisch und verringert dadurch die konzeptuelle Diskrepanz zwischen Modell- und Kontextanalyse. Sie ist transparent in Prozeduren und Ergebnis und bietet damit eine Grundlage für einen offenen Diskussionsprozess über Energieszenarien und ihrer Rahmenannahmen. Ein technisch vorteilhafter Beitrag zur Transparenz ist auch, dass eine Basissoftware zur Auswertung von Cross-Impact Daten nach dem CIB-Verfahren frei zur Verfügung steht [Weimer-Jehle 2010], so dass allen Beteiligten und Nutzern einer Szenarioanalyse leicht die Möglichkeit zur selbstständigen Auseinandersetzung mit dem Szenariomaterial ermöglicht werden kann. Zurzeit werden an ZIRN mehrere Projekte durchgeführt, die sich mit CIB als Instrument der Kontextanalyse für Simulationsrechnungen befassen. Im Projekt LIWA werden Kontextszenarien für die Simulation der zukünftigen Wasserversorgung von Lima (Peru) erarbeitet. Im Projekt ACCESS wird die konzeptionelle Grundlage einer systematischen methodischen

Kombination von CIB und Modellrechnung/Simulation untersucht. In einem Projekt des Umweltbundesamtes sollen konsistente Rahmenszenarien für umweltbezogene Modell- und Szenarioanalysen erstellt werden.

Neben den Fortschritten, die CIB-konstruierte Kontextszenarien für die modellgestützte Energieszenarioanalyse ermöglichen, müssen auch die Grenzen dieses Zugangs diskutiert werden. Zu den wichtigsten Einschränkungen gehört es, dass die in der Cross-Impact Matrix gesammelten Zusammenhänge i. d. R. zu einem großen Teil aus Expertenurteilen bestehen, wodurch zwar intersubjektive, aber nicht ausschließlich objektive Daten in die Auswertung eingehen. Allerdings muss auch bedacht werden, dass solche, letztendlich subjektiven Anteile bei der Auseinandersetzung mit unsicheren Zukünften unabhängig vom Instrumentarium nie vollständig auszuklammern sind [vgl. z. B. Parson 2007] und dass mit Hilfe von CIB solche Einschätzungen zumindest dokumentiert und explizit gemacht werden können, die ansonsten bei der Wahl von Rahmendatensätzen möglicherweise unausgesprochen wirksam werden. Eine zweite Einschränkung besteht darin, dass CIB zwar das Idealziel hat, die Varianz möglicher Entwicklungen qualitativ zu konstruieren, dass aber auch dieses Verfahren den Möglichkeitsraum in der Realität nur unvollständig erfassen kann. Zukunft bleibt unkalkulierbar, und zukünftige Einflussfaktoren, deren Bedeutung heute auch für Experten nicht erkennbar ist, würden auch in einer CIB-Analyse unberücksichtigt bleiben, mit der Folge eines entsprechenden „blinden Flecks“ im Szenario-Set. Eine realistische Erwartung an das Verfahren ist daher nicht die Konstruktion eines vollständigen Unsicherheitskontextes, sondern die einer Verbesserung gegenüber der bisherigen Situation.

Literaturverzeichnis

- Alcamo, J 2008, “The SAS Approach: Combining Qualitative and Quantitative Knowledge in Environmental Scenarios”, In *Environmental Futures. The Practice of Environmental Scenario Analysis*, ed J Alcamo, Elsevier, S. 123-149.

- Aretz, A & Weimer-Jehle, W 2004, Cross Impact Methode, In *Der Beitrag der deutschen Stromwirtschaft zum europäischen Klimaschutz*, ed Forum für Energiemodelle und energiewirtschaftliche Systemanalyse, LIT-Verlag, Münster.
- Becker, A & List, S 1997, Die Zukunft gestalten mit Szenarien, In *Unternehmensplanung – Erfahrungsberichte aus der Praxis*, eds MP Zerres, & I Zerres, Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH.
- BMWi 2010, *Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 - Energieprognose 2009*, Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin.
- Förster, G 2002, *Szenarien einer liberalisierten Stromversorgung*, Analysen der Akademie für Technikfolgenabschätzung, Stuttgart, aufgerufen am 14. Dezember 2010, <<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/1813/>>.
- Förster, G & Weimer-Jehle, W 2004, Cross-Impact Methode, In *Energiemodelle zum Klimaschutz in liberalisierten Energiemärkten – Die Rolle erneuerbarer Energieträger*, ed Forum für Energiemodelle und energiewirtschaftliche Systemanalyse, LIT-Verlag, Münster.
- Fuchs, G; Fahl, U; Pyka, A; Staber, U; Vögele, S; Weimer-Jehle, W 2008, *Generating Innovation Scenarios using the Cross-Impact Methodology*, Department of Economics, University of Bremen, Discussion-Papers Series No. 007-2008, aufgerufen am 14. Dezember 2010, <www.wiwi.uni-bremen.de/traub/downloads/WP08-007.pdf>.
- Godet, M 1983, Reducing the Blunders in Forecasting, *Futures*, vol. 15, S. 181-192.
- Götze, U 1991, *Szenariotechnik in der strategischen Unternehmensplanung*, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden.
- Linneman, RE; Klein, HE 1979, The Use of Multiple Scenarios by U.S. Industrial Companies, *Long Range Planning*, vol. 12, S. 83-90.
- Linneman, RE; Klein, HE 1983, The Use of Multiple Scenarios by U.S. Industrial Companies: A Comparison Study 1977-1981, *Long Range Planning*, vol. 16, 94-101.
- Malaska, P; Malmivirta, M; Meristö & T; Hansen, SO 1984, Scenarios in Europe - Who Uses Them and Why?, *Long Range Planning*, vol. 17, S. 45-49.
- Meristö, T 1989, Not Forecasts but Multiple Scenarios when Coping with Uncertainties in the Competitive Environment, *European Journal of Operational Research*, vol. 38, S. 350-357.
- Parson, E; Burkett, V; Fisher-Vanden, K; Keith, D; Mearns, L; Pitcher, H; Rosenzweig, C & Webster, M 2007, *Global Change Scenarios. Their Development and Use*, Sub-report

2.1B of Synthesis and Assessment Product 2.1. by the US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington DC., USA.

Porter, M 1985, *Competitive Advantage*, Free Press, New York.

UBA 2009, Politiksznarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel, Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Weimer-Jehle, W 2006, Cross-Impact Balances: A System-Theoretical Approach to Cross-Impact Analysis, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 73, no.4, S. 334-361.

Weimer-Jehle, W; Wassermann, S & Fuchs, G 2010, Erstellung von Energie- und Innovations-Szenarien mit der Cross-Impact-Bilanzanalyse: Internationalisierung von Innovationsstrategien im Bereich der Kohlekraftwerkstechnologie, *11. Symposium Energieinnovation*, TU Graz, 10.-12.02.2010.

Weimer-Jehle, W 2010, ScenarioWizard Basic - Programm zur qualitative System- und Szenarioanalyse mit der Cross-Impact Bilanzanalyse, Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Risiko und Nachhaltige Technikentwicklung (ZIRN) der Universität Stuttgart, aufgerufen am 14. Dezember 2010, <www.cross-impact.de>.

Projecting Energy Market Trends until 2030 German Energy Outlook 2009⁵

Ulrich Fahl, Markus Blesl, Alfred Voß

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart,
70565 Stuttgart, Deutschland, E-Mail: uf@ier.uni-stuttgart.de, Telefon: +49(0)711/68587830

Abstract

Against the background of a currently shrinking contribution from indigenous energy carriers as well as increasing efforts for climate protection, the Energy Outlook 2009 [IER, RWI & ZEW 2010] assesses the development of energy supply and demand in Germany up to 2030. Two cases of energy supply in Germany are examined. The Reference Case assumes a legally regulated nuclear phase-out, whereas the Lifetime Extension Case, further divided into two variants, presumes an extension of the existing nuclear power plants' lifetime to 40 and 60 years. Sensitivity analyses evaluate the impact of alterations of key influencing parameters such as the demographic and economic development.

Keywords

Energy Market Trends, Energy Outlook, Energy Systems Modelling, Energy Policy, Sensitivity Analyses

1 Objective

Against the background of a currently shrinking contribution from indigenous energy carriers as well as increasing efforts of climate protection, the Energy Outlook 2009

⁵ Study on behalf of the Federal Ministry of Economics and Technology, Berlin

[IER, RWI & ZEW 2010] assesses the development of energy supply and demand in Germany up to 2030, and further makes an outlook up to 2050. The Outlook aims to quantify the probable development of energy consumption and energy supply in Germany given assumed energy and climate policy measures and the assumptions concerning uncertain parameters like oil prices.

2 Approach

An integrated, model-based approach is adopted to illustrate the German energy markets as part of the European energy system. This is to account for embedding the German power supply system into the European domestic market as well as to capture the effects of transnational, EU-wide regulation approaches like the European Emission Trading System in an appropriate way.

In the course of this integrated approach of analysis, two cases of energy supply in Germany are examined. They differ only in one aspect: The Reference Case assumes a legally regulated nuclear phase-out, whereas the Lifetime Extension Case, further divided into two variants, presumes an extension of the existing nuclear power plants' lifetime to 40 and 60 years.

Sensitivity analyses evaluate the impact of alterations of key influencing parameters such as the demographic and economic development. These parameters are determined on the basis of established empirical research methods.

The Energy Outlook 2009 was accompanied by a group of experienced scientists with extensive expertise in modelling and scenario analysis. The task of the group was an unbiased methodical and contextual consultation, supported by a robust validity check of the outlook.

3 Political Framework Conditions

The prescribed EU energy and climate policy objectives for Germany are taken into account in the Energy Outlook 2009: As given in the EU-wide Emission Trading

System (ETS), the participating sectors (particularly electricity generation and energy-intensive industries) must reduce their CO₂ emissions by 21 % in 2020 compared to 2005.

Furthermore, until 2020, 18 % of the gross final energy consumption in Germany should be satisfied by renewable energy technologies. The Renewable Energy Act (EEG) and the Renewable Energy Heat Act (EEWärmeG) function as instruments to achieve these objectives. Regarding the energy efficiency objectives, it is assumed that corresponding regulations, such as the German Energy Conservation Regulations (EnEV), will be further developed.

Concerning the German national objective to boost the electricity generation from CHP plants (CHP), a temporary prolongation of the CHP Act (KWKG) is expected. In addition, a strengthened European integration of the electricity market and an increase in competition in the domestic gas market are assumed.

4 Energy Prices

Considering the limited availability of crude oil, the potentials to increase supply as well as the substitution possibilities, the price of the various oil types in the OPEC basket is expected to increase to 127 \$/barrel (bbl) until 2030 in the Reference Case. Expressed in prices of 2007, this corresponds to a real oil price of 75\$/bbl.

The historically observed correlation between the crude oil prices and the consumer prices of natural gas, fuel oil, petrol, etc. is also relevant in the future.

Electricity prices are determined by fuel prices as well as legislative factors: Whereas the prescribed Renewable Energy Act (EEG) increases compensation payment, the concession levy, CHP compensation, and electricity tax remain constant in nominal terms. Electricity prices for the industrial sector and private households, apart from slight fluctuations, remain unchanged between 2012 and 2030.

In order to accommodate the uncertainty regarding the future oil price development, a second price path ("high oil price") is employed in the sensitivity analyses of the Energy Outlook 2009. There, a crude oil price of 100\$₂₀₀₇/bbl (nominal 169\$/bbl) is reached in 2030.

5 Population

The population development and the number of private households are decisive factors for the energy consumption of a country. In the Reference Case, a shrinking population by 2.5 million to 79.7 million in the year 2030 is assumed.

In contrast, the number of households increases further by 2.3 million to 42 million in 2030. This is associated with an increase in mobility needs and associated energy consumption. With the ever decreasing household size, an increase in living space per person and space heating needs is expected.

A slight increase in the passenger transport activity until 2020 is assumed. Afterwards, due to the decline in population, it dwindles again to approximately the level of 2012 until 2030.

6 Economic Development

The severe worldwide recession and the resulting slump in economic activities hit the export-oriented German economy very hard. Therefore, a shrinking of the German economy by 5.5 % in 2009 in comparison to 2008 is assumed in the Reference Case. However, a slight recovery of 0.6 % in 2010 compared to 2009 is predicted.

Consistent with the assessments of the International Monetary Fund, it is assumed in the Reference Case that the global economy returns to the original growth path in the medium term and that the integration of world markets resumes.

Owing predominately to the ageing society and the shrinking population, the available workforce falls and subsequently, a moderate contraction of the growth potential in Germany is expected. It is assumed that the annual GDP growth rates between 2012 and 2030 amount on average to 1.2 %. In comparison, the average annual economic growth since the German reunification has been 1.5 %.

The freight transport activity is heavily dependant on the development of economic production. With the beginning of the economic recovery, freight traffic increases notably again and is around 55 % higher than in 2007 with approximately 880 billion tkm in 2030.

7 Reference Case

In the reference case the primary energy consumption in Germany drops by 21 % until 2030 compared to 2007. This is accompanied by an annual increase of energy productivity by 2 %. Petroleum oil remains the most important primary energy carrier despite a consumption downturn. The share of coal in primary energy consumption declines, while the share of natural gas, due to gaining significance, increases moderately. As a whole, the dependence on energy imports (share of the net import in primary energy consumption of fossil energy carriers) increases from approximately 73 % in 2007 to nearly 87 % in 2030.

After the financial crisis, the domestic electricity demand increases parallel to a slight decrease of domestic electricity generation. Starting in 2012, demand is satisfied increasingly by electricity imports. About half of the required fossil power plant capacity in 2030 is constructed after 2012. Fossil fuels still account for 58 % of the electricity generation in 2030. Whereas the share of hard coal decreases from nearly 22 % in 2007 to 14 % in 2030, the share of natural gas increases from approximately 12 % to almost 21 % in the same period. Lignite has a share of around 22 % in 2030, almost the same share as in 2007.

There is a slight shortfall in attaining the objective of a 30 % share from renewable energy in the electricity generation in 2020. Likewise, the predefined EU objective for Germany to have a share of 18 % from renewable energy in gross final energy consumption in 2020 is just missed by a 2 % shortfall. This is despite the fact that in 2020 renewable energy covers 15 % of the final energy consumption in the heat market, rather than the required 14 %.

By means of the support measures set in the CHP Act, CHP electricity is increased continually from 76TWh in 2007 to about 118TWh in 2030. The national goal to increase the share of CHP electricity in net electricity generation from 12 % in 2008 to about 25 % until 2020 is not attained. The share of CHP electricity amounts to 19 % in 2020.

The final energy consumption falls by about 15 % until 2030 compared to 2006. This can be mainly explained by the decline in heat demand, which results in particular from increased energy efficiency in buildings. The targets of the EU Energy

Efficiency Directive to reduce the final energy consumption by 9 % until 2016 compared to the average consumption in the period 2001 to 2005 is already surpassed in 2012.

The goal stated in the Kyoto Protocol for Germany to reduce greenhouse gas emissions by 21 % by 2012 compared to 1990's level is markedly exceeded. Until 2030, greenhouse gas emissions in Germany decrease by 44 % relative to 1990. The price for emission certificates increases in real terms to approximately $40\text{€}_{2007}/\text{tCO}_2$ in 2015. After 2015, owing to the new CO_2 reduction options, the prices of the certificates decrease to $28\text{€}_{2007}/\text{tCO}_2$ until 2025. After 2030, however, drastic price surges are expected (to $53\text{€}_{2007}/\text{tCO}_2$ in 2040 and $88\text{€}_{2007}/\text{tCO}_2$ in 2050).

Due to the increasing importance of technologies for CO_2 sequestration as well as the increasing contribution from renewable energy, the energy conversion sector makes the biggest contribution to the emissions reduction.

8 Lifetime Extension Case

The extended operation of nuclear power plants leads to lower greenhouse gas emissions in Germany and lower CO_2 -prices in the European Emission Trading System than in the Reference Case. The goal achievements for renewable energy remain unaffected. In contrast, the growth of CHP electricity generation is curbed.

Despite retrofit expenses, nuclear power plants can be operated with low generation costs. In addition, the reduced costs for CO_2 certificates facilitate lower electricity prices, which are up to $9\text{€}_{2007}/\text{MWh}$ lower than those stated in the Reference Case.

The less expensive electricity supply is coupled with positive feedback effects for the industrial production, employment and the overall economic development: the GDP in 2020 is up to 0.6 % higher than that stated in the Reference Case, and up to 0.9 % higher in 2030. That represents a cumulative increase of GDP by 122 to 295 bn € (in prices of 2000) compared to the Reference Case between 2010 and 2030 (depending whether the length of the lifetime of nuclear power plants is set to 40 or 60 years).

Until 2020, primary energy consumption develops similarly in both variants of delayed nuclear phase-out. During that period, its decrease is significantly less than in the Reference Case. For 2020, primary energy consumption is expected to be 7 % higher than in the Reference. This can mainly be attributed to better economic performance as well as to lower electricity prices. Longer operation of nuclear power plants results in lower inputs of coal and natural gases in electricity production. This is reflected in the primary energy mix.

With the longer lifetimes for nuclear power plants, less additional power capacity is needed in Germany. In the mid-term (app. 2020), a longer operational time of 40 years reduces the additionally needed capacity by 7 Gigawatts (GW_{el}). With an extension to 60 years, this figure rises to 15 GW_{el} . Longer operational times promote domestic electricity production, which is expected to increase from 616 bnkWh (TWh) in 2012 to maximally 663 TWh in 2030. This is due to a higher aggregate demand for electricity, while electricity imports shrink.

In the case of a lifetime extension of existing nuclear power plants to 60 years, the supply risk remains virtually unchanged. In the Reference Case, and also with a lifetime extension to 40 years, however, it rises considerably until 2030. This is explained by two factors: First, the reduction in the share of nuclear power cannot be completely compensated by the substantial increase in the share of renewable energies. Secondly, Germany's consumption of natural gas is almost completely dependent on imports by 2030.

9 Sensitivity Analyses

The implications of a variation in the key determinants of future energy use are gauged by employing sensitivity analyses to both the Reference Case and a Lifetime Extension Case encompassing an extension of the lifetime of nuclear power plants in Europe to 60 years. To this end, alternative values for the following four determinants are analysed: economic development, the level of energy prices, climate targets, and demographic change.

For the Lifetime Extension, the analysis focuses on the effects of higher energy prices and stricter climate targets.

All sensitivity analyses indicate that the EU requirement to increase the share of renewable energies in gross final energy consumption to 18 % by 2020 is not quite reached. The same applies to the national goal of reaching a 30 % share of renewable energies in gross electricity consumption by 2020. Irrespective of the sensitivity analysis, the bio-fuel share reaches 10.5 % in the year 2020 and is primarily determined by quota requirements.

The national goal to double the electricity production from combined heat and power generation by 2020 is not met in any of the sensitivity analyses. In the sensitivity analyses with lifetime extension, the CHP electricity generation is slightly lower. The ambitious goal of doubling energy productivity by 2020 compared to 1990 is not reached in any of the sensitivity analyses.

Literaturverzeichnis

IER, RWI, ZEW, 2010, Projecting Energy Market Trends until 2030. Energy Outlook 2009. Executive Summary and Abstract, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, Stuttgart, Essen, Mannheim.

Strom und Trinkwasser aus erneuerbarer Energie für Europa, Nordafrika und den Mittleren Osten

Franz Trieb, Tobias Naegler

Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum, Institut für Technische Thermodynamik,
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, Deutschland, E-Mail: Franz.Trieb@dlr.de,
Telefon: +49 (0)711 6862 423

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht zeigt die Perspektive einer nachhaltigen Bereitstellung von Strom und Trinkwasser für Europa (EU), den Mittleren Osten (ME) und Nordafrika (NA) und die entsprechende Wandlung des Versorgungssektors bis zum Jahr 2050 auf. Erneuerbare Energiequellen und Effizienzgewinne sowie die Nutzung fossiler Brennstoffe zum Ausgleich von Angebots- und Bedarfsengpässen ermöglichen den Wechsel zu einer günstigen, sicheren und umweltkompatiblen Energieversorgung. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die enge Kooperation zwischen Europa und der MENA-Region, insbesondere bei der Markteinführung erneuerbarer Energien, beim Aufbau eines Hochspannungsgleichstrom-Übertragungsnetzes (HGÜ) und bei der Schaffung geeigneter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen.

1 Einleitung

Um den Übergang zu einer Energieversorgung realisieren zu können, die kostengünstig und umweltverträglich ist und auf gesicherten Ressourcen beruht, müssen strenge Nachhaltigkeitskriterien angelegt werden: Zunächst muss Energieversorgung sicher sein. Im Falle der Elektrizität bedeutet dies in erster Linie die stets bedarfsgerechte Verfügbarkeit. Zudem muss die Energieversorgung kostengünstig, langfristig frei von Subventionen und umweltkompatibel sein (insbesondere in Hinblick auf den Klimaschutz) und zudem jedem Bürger zugänglich sein.

Elektrizität wird derzeit größtenteils durch den Einsatz fossiler und nuklearer Energiequellen erzeugt, die zwar die Kriterien der Versorgungssicherheit (noch) erfüllen, im Hinblick auf Klimaschutz und andere Umweltrisiken, aber auch bezüglich der langfristigen Kostenstabilität, wesentliche Nachhaltigkeitskriterien verletzen. Erneuerbare Energiequellen werden bislang – mit Ausnahme der Wasserkraft – noch in geringem Maße genutzt. Ein Grund liegt dafür einerseits darin, dass sie sich verglichen mit fossilen und nuklearen Brennstoffen weniger leicht ausbeuten lassen. Andererseits erfordert die fluktuierende Natur erneuerbarer Energiequellen (insb. Sonne und Wind) einen höheren technischen Aufwand an Speicher- oder Lastmanagement, damit der Strombedarf jederzeit durch die Stromerzeugung gedeckt werden kann.

Die Herausforderung an die Stromversorgung der Zukunft ist es, einen Mix aus vorhandenen Technologien und Ressourcen zu finden, der in der Lage ist, neben dem Kriterium der Verfügbarkeit nach Bedarf auch die Nachhaltigkeitskriterien Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit zu erfüllen [MED-CSP 2005, TRANS-CSP 2006].

2 Methodik

Die vorliegende Studie entwirft ein in sich konsistentes Szenario, das einerseits die Entwicklung des Energie- und Trinkwasserbedarfes der EUMENA-Region bis 2050 aufzeigt, andererseits die Umstrukturierung des Energieversorgungssystems skizziert, die nötig ist, um den Energie- und Wasserbedarf bis 2050 unter Berücksichtigung der oben aufgezeigten Nachhaltigkeitskriterien zuverlässig zu decken.

Die Entwicklung des Energie- und Trinkwasserbedarfs lässt sich aus Szenarien der Entwicklung des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums der einzelnen Länder der Region sowie der Entwicklung der Energie- und Wasserbedarfs-Intensitäten abschätzen. Hierbei wird berücksichtigt, dass eine steigende Wirtschaftsleistung einerseits mit einer Steigerung der Effizienz der Erzeugung, Verteilung und Nutzung sowohl von Energie als auch von Trinkwasser einhergeht. Andererseits erzeugen neue Produkte und Serviceangebote im Zuge eines steigenden Wohlstandes einen steigenden Bedarf an Wasser und Energie. In dieser Hinsicht ist insbesondere die Entwick-

lung „neuer“ Energieverbraucher - im Rahmen dieser Studie in erster Linie die Meerwasserentsalzung - zu berücksichtigen. Andere denkbare Paradigmenwechsel im Stromsektor, wie z. B. zunehmende Elektromobilität, werden hier zunächst nicht betrachtet.

Ausgehend von der aktuellen Struktur der Energieversorgung in den EUMENA-Ländern beschreibt das Szenario die Umstrukturierung hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung mit dem Schwerpunkt auf erneuerbaren Energien. Das Szenario berücksichtigt dabei einerseits die Trägheit des Energiesystems, die sich aus der Weiternutzung des bestehenden Kraftwerkparks, begrenzten Kapitalmitteln und begrenzten Ausbaupazitäten für einzelne Technologien ergibt. Andererseits müssen die natürlichen Potenziale erneuerbarer Energien und deren ungleichmäßige räumliche Verteilung in der EUMENA-Region berücksichtigt werden. Letztendlich muss sichergestellt werden, dass das skizzierte Stromversorgungssystem in der Lage ist, jederzeit ausreichend gesicherte Leistung zur Verfügung zu stellen. Zu diesem Zweck demonstriert eine Analyse des stündlichen Strombedarfs und der stündlichen Strombereitstellung aus konventionellen, fluktuierenden erneuerbaren und regelbaren erneuerbaren Energiequellen sowie über Stromimporte, dass in dem gewählten Szenario jederzeit der aktuelle Strombedarf der einzelnen EUMENA-Länder gedeckt werden kann.

Die Entwicklung der Stromgestehungskosten lässt sich unter Berücksichtigung der erwarteten Degressionen der Investitionskosten (Lerneffekte insbesondere bei den erneuerbaren Technologien), der Entwicklung der Brennstoffpreise, der Kosten für Neubau bzw. Ertüchtigung der Verteilungsinfrastruktur sowie der Betriebskosten der Kraftwerke bestimmen. So wird ein Vergleich der volkswirtschaftlichen Kosten möglich, die für verschiedene Aus- und Umbau-Szenarien der Energieversorgung erwartet werden können.

3 Entwicklung des Strom- und Wasserbedarfs

Wie oben dargestellt sind die Haupttreiber des Strom- und Wasserverbrauchs einerseits das Bevölkerungswachstum, andererseits das Wirtschaftswachstum. Schätzungen

der Vereinten Nationen zufolge wird die Bevölkerung in Europa mit ca. 600 Mio. in etwa stabil bleiben, während sie sich in MENA von 300 Mio. im Jahr 2000 bis zum Jahr 2050 auf ebenfalls 600 Mio. verdoppeln wird (UNO 2004). Ebenso wird das Bruttoinlandsprodukt (BIP) in Europa⁶ bis 2050 von 9.000 Mrd. €⁷ in 2000 auf 25.000 Mrd. € anwachsen. Die Wirtschaft in MENA entwickelt sich hingegen deutlich dynamischer: Bis 2050 steigt das BIP in unserem Szenario um das 10-fache auf 17.000 Mrd. €. Unsere Analyse zeigt, dass der daraus resultierende Stromverbrauch bis zum Jahr 2050 im Mittleren Osten und Nordafrika ohne Wasserentsalzung ca. 3000 TWh/a betragen wird (Trieb und Klann 2006). Der Europäische Verbrauch wird sich nach dem Szenario bei ca. 4000 TWh/a stabilisieren.

Für die MENA-Länder wird ein zunehmendes Wasserdefizit erwartet, d. h. deutliche Differenzen zwischen verfügbaren, erneuerbaren Trinkwasserressourcen und dem wachsenden Wasserbedarf. Das Defizit wird heute hauptsächlich durch Überausbeutung der Grundwasserressourcen ausgeglichen. Dem Szenario zufolge wird es von zurzeit 60 Mrd. m³ pro Jahr auf 150 Mrd. m³ im Jahr 2050 ansteigen, obwohl bereits eine Verbesserung der Effizienz der Wasserverteilung, der Aufbereitung, der Wiederverwendung sowie des Wassermanagements unterstellt ist. Es wird hier angenommen, dass das wachsende Trinkwasserdefizit in MENA durch Meerwasserentsalzung gedeckt wird, deren Energiebedarf durch Strom bereitgestellt wird. Bei einem Strombedarf von durchschnittlich 3,5 kWh/m³ bedeutet dies im Jahr 2050 einen Verbrauch von fast 550 TWh für die Entsalzung [AQUA-CSP 2007].

4 Verfügbare Ressourcen und Technologien

Das langfristige wirtschaftliche Potenzial von erneuerbaren Energien - insbesondere der Solarenergie - ist in EUMENA viel größer als der derzeitige Bedarf: In EUMENA existiert ein Potenzial von 630.000 TWh/a an solarthermischen und photovoltaischen Kraftwerken, 2.000 TWh/a an Windenergie und 4.000 TWh/a an Energie aus geo-

⁶ „Europa“ ist nach den in der TRANS-CSP Studie enthaltenen Ländern definiert, z. B. inkl. der Türkei.

⁷ Alle Kosten und Preise in diesem Artikel sind in konstantem Geldwert des Jahres 2000 angegeben.

thermalen Quellen, Wasserkraft und Biomasse, die jedoch räumlich sehr unterschiedlich verteilt sind (Abbildung 1).

Fossile Energiequellen (Kohle, Erdöl, Erdgas) stellen eine nützliche Ergänzung zu dem Mix aus erneuerbarer Energie dar. Sie werden insbesondere zur Absicherung der Netzstabilität und zum Energieausgleich genutzt. Ihr Verbrauch wird dadurch gegenüber heute deutlich reduziert, was den Preisanstieg bremst, Umwelteinflüsse minimiert und ihre Ressourcen schont. Kernkraftwerke dagegen sind für eine Kombination mit erneuerbaren Energien weniger gut geeignet, weil ihre Erzeugung nicht wirtschaftlich dem fluktuierenden Bedarf angepasst werden kann.

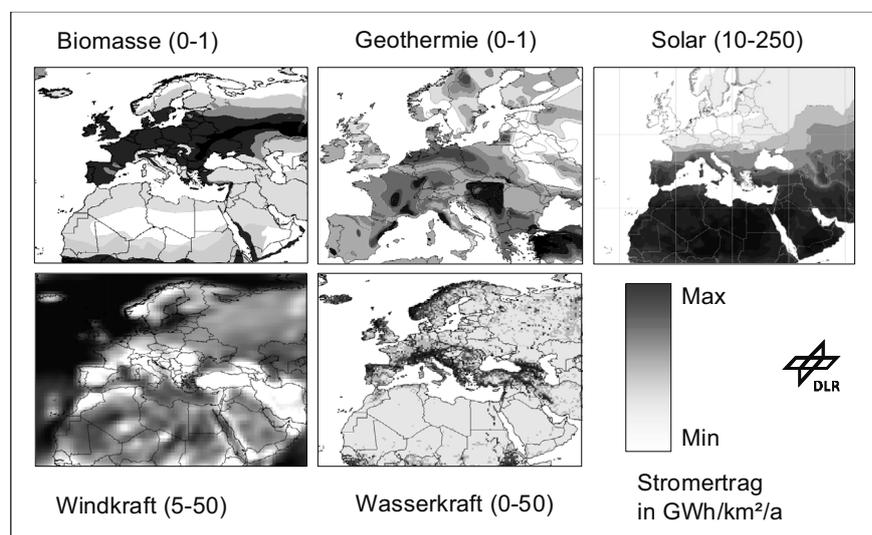


Abbildung 1: Verteilung erneuerbarer Energiequellen für EUMENA, mit Bandbreite des jährlichen Energieertrages (in Klammern spezifiziert), der mit Hilfe jeder Technologie aus jeweils 1 km² Landfläche gewonnen werden kann. Solarenergie beinhaltet sowohl PV als auch CSP [MED-CSP 2005].

Während z. B. Windkraft und Photovoltaik meteorologisch getriebenen, zeitlich fluktuierenden Output liefern, sind andere erneuerbare Energietechnologien genauso wie konventionelle Kraftwerke in der Lage, bedarfsgerecht Grund- und Spitzenlast zur Verfügung zu stellen, z. B. große Wasserkraftwerke (in Norwegen, Island und in den Alpen), geothermale Systeme, die meisten Biomasse-Anlagen und konzentrierende solarthermische Kraftwerke (CSP).

CSP-Kraftwerke sind seit 20 Jahren eine etablierte Technologie. Sie können wie konventionelle Kraftwerke Grund- und Spitzenlaststrom (einschl. Regelleistung)

liefern: Tagsüber wird die Sonnenstrahlung genutzt, nachts thermische Energiespeicher. Bei Bedarf kann mit fossilen Brennstoffen oder Biomasse zugefeuert werden, so dass die Verfügbarkeit von CSP-Kraftwerken nahezu 100 % beträgt, bei deutlich geringerem Brennstoffverbrauch als fossil befeuerte Kraftwerke. Zudem können CSP-Kraftwerke Wärme für zahlreiche Anwendungen zur Verfügung stellen [MED-CSD 2010]. Aus MENA können große Mengen Solarstrom importiert werden, die die heimischen europäischen Quellen ergänzen und jederzeit verfügbare (Regel-) Leistung zu wettbewerbsfähigen Preisen bereitstellen können: So könnten die heutigen Stromtarife für Solarstrom in Spanien von etwa 27 ct/kWh bis 2020 auf unter 10 ct/kWh sinken [AT Kearney 2010].

5 Szenarien einer nachhaltigen Energie- und Wasserversorgung in EUMENA

Mit Ausnahme von Windenergie und Wasserkraft werden erneuerbare Energieformen kaum vor dem Jahr 2020 im Strommix sichtbar werden (Abbildung 2 und Abbildung 3). Gleichzeitig werden das Auslaufen der Nutzung von Kernenergie in vielen europäischen Ländern und der aus Umweltschutzgründen stagnierende Verbrauch von Kohle einen mittelfristig ansteigenden Erdgasverbrauch zur Folge haben, so dass der Verbrauch fossiler Brennstoffe vor 2020 nicht wesentlich reduziert wird. Bis 2020 werden erneuerbare Energieformen wie Wind und Photovoltaik vor allem den Brennstoffverbrauch reduzieren, aber nur wenig zur Regelleistung beitragen.

Gesicherte Leistung nach Bedarf und mit einer Reserve von 25 % kann deshalb bis 2020 nur durch Erweiterung der Kapazitäten fossil gefeuerter Spitzenlastkraftwerke bereitgestellt werden. Ab 2020 wird ein wachsender Anteil an solarthermischem Strom aus den MENA Ländern neben geothermischer Energie und Wasserkraft aus Skandinavien via Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (HGÜ) nach Europa eingeführt werden, um den Bedarf an fossilen Regelkraftwerken reduzieren zu können.

In den MENA-Ländern stellen konzentrierende thermische Solarkraftwerke die einzige erneuerbare Quelle dar, die tatsächlich in der Lage ist, den schnell anwachsenden Stromkonsum zu befriedigen, da sie sowohl Grund- und Spitzenlaststrom nach

Bedarf liefern kann. Fossile Energiequellen werden 2050 nur noch als Backup genutzt werden.

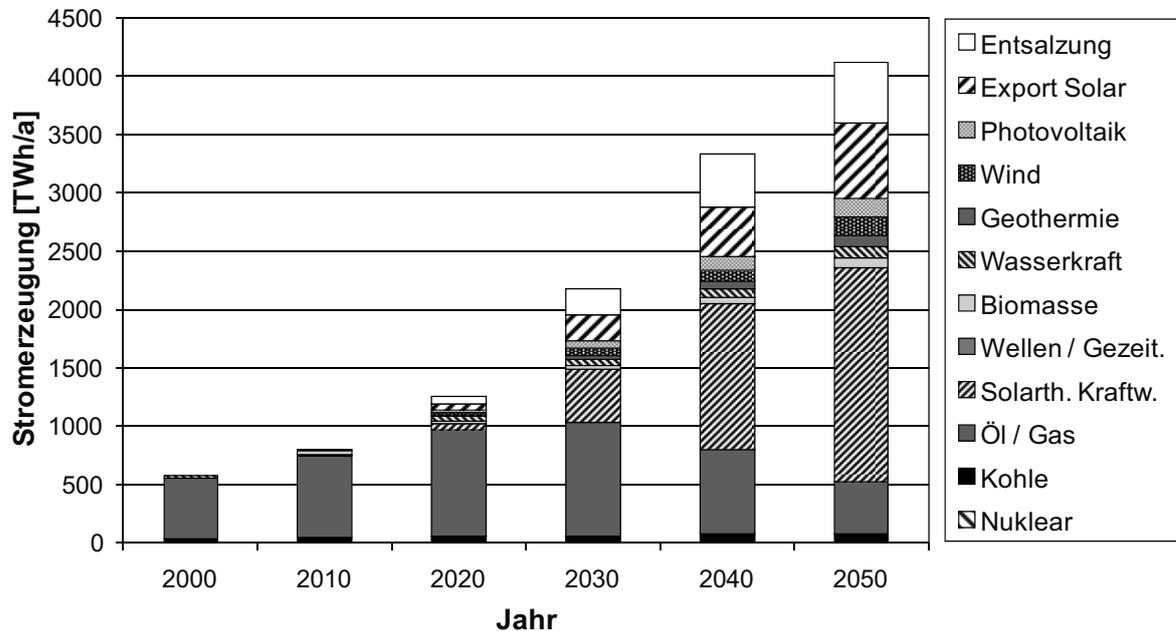


Abbildung 2 Szenario der Stromerzeugung auf der Basis erneuerbarer und fossiler Energiequellen in MENA zur Deckung des wachsenden Energiebedarfs unter Berücksichtigung von Solarstromexporten nach Europa und dem zusätzlichen Strombedarf für die Meerwasserentsalzung in der Region.

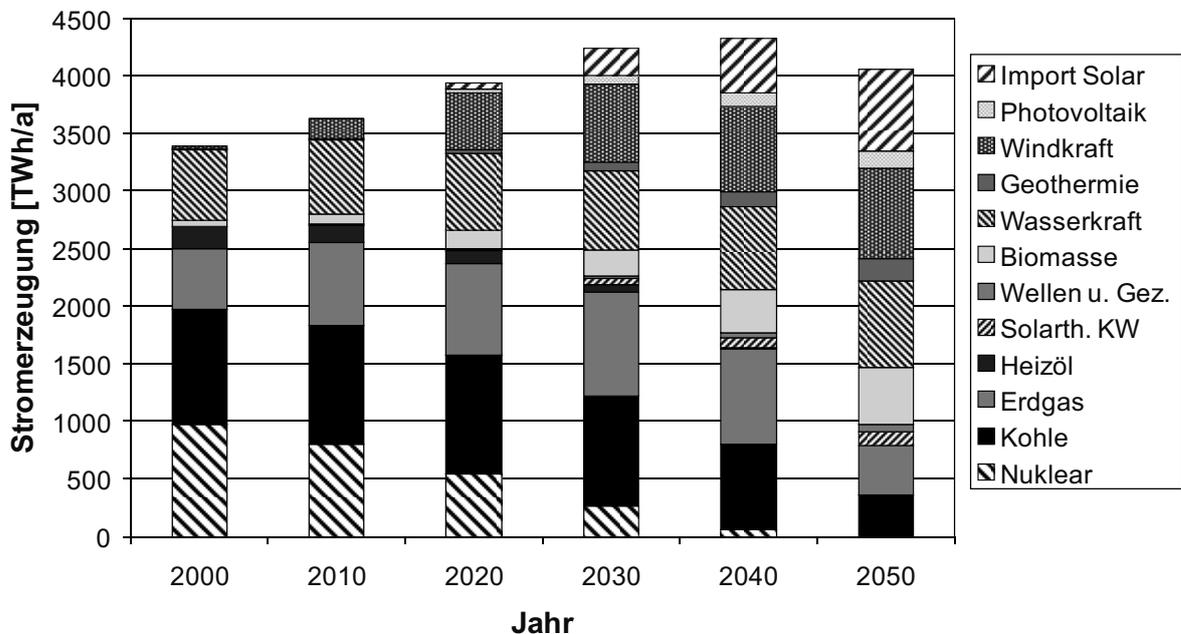


Abbildung 3: Szenario der Stromerzeugung auf der Basis erneuerbarer, nuklearer und fossiler Energiequellen in Europa unter Berücksichtigung von Solarstromimporten aus MENA.

Zur Ergänzung des erneuerbaren Strommixes wird eine effiziente Backup-Infrastruktur benötigt: Einerseits muss sie eine gesicherte Kapazität durch schnell reagierende, mit Erdgas befeuerte Spitzenlastkraftwerke bereitstellen. Andererseits muss eine effiziente Netzinfrastuktur bereitstehen, die die Übertragung erneuerbaren Stroms von den Produktionsstätten zu den Hauptverbrauchscentren erlaubt. Eine mögliche Lösung ist die Kombination von HGÜ-Leitungen, einer seit mehreren Jahrzehnten etablierten Technologie, und dem konventionellem Wechselstromnetz. Diese Entwicklung wird wahrscheinlich auch ohne Zubau erneuerbarer Technologien stattfinden, um das wachsende europäische Netz zu stabilisieren, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen und um den Wettbewerb zu stärken [Asplund 2004, Eurelectric 2003]. Der Verlust der in MENA generierten Solarenergie durch HGÜ wird über eine Entfernung von 3000 km etwa 10 % betragen. Der Wert dieser Importe gründet sich auf niedrige Produktionskosten von langfristig ca. 0,05 €/kWh (in konstantem Geldwert des Jahres 2000) und eine hohe Flexibilität hinsichtlich Grund-, Regel- und Spitzenlastbetrieb.

Ein Modell stündlicher Zeitverläufe des Energieversorgungssystems ausgewählter Länder gemäß unserem Szenario zeigt, dass sogar ohne zusätzliche Stromspeicherkapazitäten die existierende Regelleistung der Spitzenlastkraftwerke zum Ausgleich von Bedarfsfluktuationen ausreicht, solange der fluktuierende Anteil der erneuerbaren Energie kleiner bleibt als die vorhandene Spitzenlastkapazität (was in unserem Szenario der Fall ist). Zunächst wird sich der Bedarf an konventionellen Grundlastkraftwerken als Konsequenz des wachsenden Anteils erneuerbarer Energien Schritt für Schritt verringern (Abbildung 4). Grundlaststrom wird durch Kraft-Wärme-Kopplung, die Brennstoffe auf fossiler und Biomasse-Basis nutzt, durch Laufwasserkraft und durch Windkraft- und Photovoltaikanlagen gewonnen. Regelleistung wird aus besser speicherbaren Quellen wie Speicherwasserkraft, Biomasse oder geothermischer Energie gewonnen. Die verbleibende Spitzenlastkapazität wird durch Pumpspeicherung, Wasserkraftstauseen, solarthermische Kraftwerke und auf fossilen Brennstoffen basierenden Spitzenlastkraftwerken bereitgestellt. Zusätzlich wird ein bedarfsseitig verbessertes Energiemanagement zunehmend dafür genutzt werden, die Nutzung von Pumpspeicherkapazität und fossilen Brennstoffen für Spitzenlast zu

minimieren, deren Betrag verglichen mit heute in etwa gleich bleiben wird [Brischke 2005].

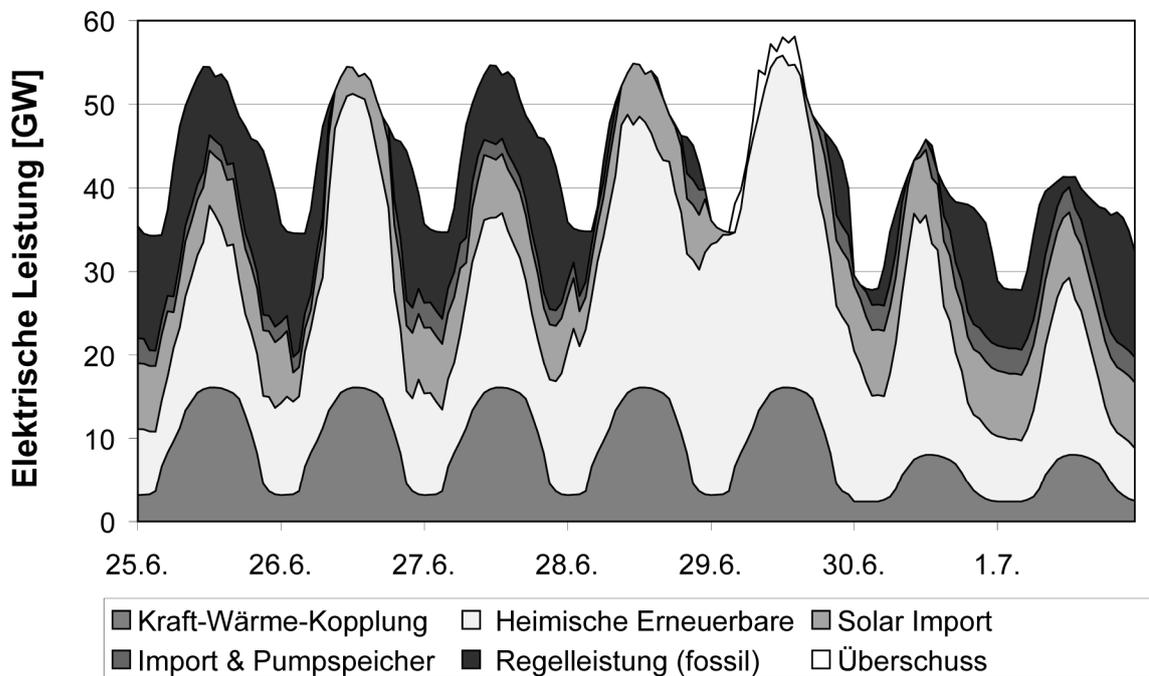


Abbildung 4: Ausschnitt aus einer stündlichen Modellierung der Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2050 mit hohen Anteilen erneuerbarer Energie [Brischke 2005]

Für Solarstromkosten kann eine Lernrate von 85-90 % erreicht werden [Pitz-Paal et al. 2005]. Bei einer weltweiten Installation von 100.000 MW könnten die Kosten auf ungefähr 0,08-0,10 €/kWh fallen. Bis 2030 könnten 240.000 MW an CSP-Kraftwerken weltweit installiert sein [MED-CSP 2005, TRANS-CSP 2006, AQUA-CSP 2007]. Alle erneuerbaren Stromquellen zeichnen sich durch ähnliche Lernraten aus und werden mit zunehmender Nutzung kostengünstiger.

Nimmt man den spanischen Strommix als Beispiel [TRANS-CSP 2006], dann zeigt ein Szenario aus einer Mischung aus heimischen erneuerbaren Energien, Solarenergie aus Nordafrika und fossilen Brennstoffen mittelfristig stabile und sogar leicht sinkende Stromkosten. Eine Fortschreibung des gegenwärtigen Strommixes hingegen wird aufgrund steigender Brennstoffpreise zu immer höheren Energiekosten führen.

6 Eine Alternative zu Klimawandel und Kernenergie

Im vorliegenden Szenario reduzieren sich die CO₂-Emissionen im Stromsektor der EUMENA-Region von 1790 Mt/a (2000) auf 690 Mt/a (2050). Bei Fortführung des aktuellen Trends hingegen können bis 2050 3700 Mt/a erwartet werden. Die Pro-Kopf-Emissionen liegen im Szenario im Jahr 2050 bei 0,58 t/cap/a und liegen damit im Rahmen des vom *Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU)* empfohlenen Wertes (1-1,5 t/cap/a, [Graßl et al. 2003]). Aufgrund hoher Effizienzverluste und des resultierenden höheren Verbrauchs fossiler Brennstoffe wird Kohlenstoffabspeicherung und -speicherung (CCS) in dieser Studie als Ergänzung, aber nicht als Alternative zu erneuerbaren Energien betrachtet.

Die Fläche, die für die Infrastruktur erneuerbarer Energien (Kraftwerke und HGÜ-Leitungen) im Zeitraum bis 2050 benötigt wird, umfasst etwa 1 % der gesamten Landfläche der EUMENA-Region, vergleichbar mit der heute für die Transport- und Verkehrsinfrastruktur genutzten Landfläche in Europa.

Die Meerwasserentsalzung im großen Stil wird zukünftig unverzichtbar sein. Wenn sie anstelle von fossilen Brennstoffen mit Sonnenenergie betrieben wird, können ihre Auswirkungen auf die Umwelt wesentlich reduziert werden. Dennoch stellt die Meerwasserentsalzung selbst aufgrund der entstehenden Salzlauge und der erforderlichen chemischen Zusätze eine beachtliche Belastung für die Umwelt dar, die allerdings durch höheren Energieeinsatz reduziert werden könnte [AQUA-CSP 2007].

Eine nachhaltige Lösung muss auch für die Wärme- und Kälteerzeugung sowie den Transportsektor gefunden werden. Energieeffizienz und wachsende Anteile erneuerbarer Energie sind hierbei ebenfalls nützliche Orientierungshilfen. Auf lange Sicht existiert die Option, einen teilweisen Wechsel von traditioneller Wärme und Brennstoffen hin zu elektrischem Strom zu vollziehen (z. B. elektrische Wärmepumpen, Elektromobilität). Der sich daraus ergebende höhere Strombedarf kann leicht aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden, Potenziale sind ausreichend vorhanden. Neben Strom existieren direkte Lösungen mithilfe von erneuerbaren Energiequellen auch für die Sektoren Wärme und Transport, wie z. B. Bio-Brennstoffen für Transport und Wärmeerzeugung, energieeffiziente Gebäude, Solarwassererhitzer etc. [Dürschmidt et al. 2006]. Darüber hinaus ist die kombinierte Wärme- und Stromerzeugung eine

wichtige Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz von Verbrennungsprozessen, wie auch der Geothermie und von solarthermischen Kraftwerken.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In Europa, dem Nahen Osten und Nordafrika besteht ein großes Potenzial an erneuerbaren Energien. Erneuerbare Energien sind in der Lage, eine sichere und bedarfsgerechte Stromversorgung bereitzustellen. Bis 2050 kann der Anteil erneuerbarer Energien in Europa, dem Nahen Osten und Nordafrika (EUMENA) 80 % erreichen (2000: 16 %, überwiegend Wasserkraft). Für einen schnellen Wechsel zu sauberer und sicherer Energie ist eine Verbindung der Elektrizitätsnetze der EUMENA-Region von großem Vorteil. Hierbei wird die HGÜ-Technologie für die Fernübertragung im Transmediterranen Stromkonzept genutzt, das hauptsächlich auf erneuerbaren Energien basiert, mit einem Backup aus schnell reagierenden, fossilen Kraftwerken. Solarenergie, die durch CSP Kraftwerke in MENA erzeugt und mit Hilfe von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) nach Europa transferiert wird, kann eine sichere Kapazität für Grundlast- und Spitzenlaststrom bereitstellen. Hohe und gleichmäßige Sonnenstrahlung in MENA und niedrige Übertragungsverluste nach Europa (ca. 10 %) resultieren in einem Preis von langfristig ca. 0,05 €/kWh für den Import von Sonnenenergie.

Die Markteinführung erneuerbaren Stroms erfordert die Unterstützung durch adäquate politische, rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Dies wird sich in einem vorübergehenden Anstieg der nationalen Strompreise niederschlagen, aber langfristig deren stetige Eskalation abwenden - dank des wachsenden Anteils immer günstiger werdender erneuerbarer Energien als Ersatz für sich weiter verteuernde fossile Brennstoffe. Bei sofortiger Einführung kann der Wechsel zu einem nachhaltigen Energiemix innerhalb einer Zeitspanne von etwa 15 Jahren zu einer kostengünstigeren Stromerzeugung führen als bei Beibehaltung der gewohnten, auf fossilen Brennstoffen basierenden Strategie der Fall wäre.

Anstelle einer Verdoppelung der CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 können die CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung in EUMENA in unserem Szenario auf 38

% des Wertes von 2000 reduziert werden. Nur 1 % der Landfläche wird dafür benötigt. Das entspricht der gegenwärtigen Landnutzung für Transport und Verkehr in Europa. Wachsende Trinkwasserdefizite in MENA erfordern zunehmend die Entsalzung von Meerwasser. Dies kann nur dann nachhaltig realisiert werden, wenn dafür erneuerbarer Energiequellen genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- AQUA-CSP 2007, Trieb, F, Schillings, C, Viebahn, P, Paul, C, Altowaie, H, Sufian, T, Alnaser, W, Kabariti, M, Shahin, W, Bennouna, A, Nokraschy, H, Kern, J, Knies, G, El Bassam, N, Hasairi, I, Haddouche, A, Glade, H, Aliewi, A, *Concentrating Solar Power for Seawater Desalination, Final Report*. German Aerospace Center (DLR), Study for the German Ministry of Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, (ongoing) Stuttgart 2007, aufgerufen am 9. Dezember 2010, <www.dlr.de/tt/aqua-csp>.
- Asplund, G 2004, *Sustainable energy systems with HVDC transmission*, at IEEE PES 2004 General Meeting, Denver, 6-12 June 2004, aufgerufen am 9. Dezember 2010, <http://ewh.ieee.org/cmte/ips/2004GM/2004GM_GlobalPowerSystems.pdf>.
- AT Kearney 2010, *Solar Thermal Electricity 2025 - Clean electricity on demand: attractive STE cost stabilize energy production*, ESTELA, Juni 2010.
- Brischke, LA 2005, *Model of a Future Electricity Supply in Germany with Large Contributions from Renewable Energy Sources using a Single Node Grid (in German)*, VDI Fortschritt Berichte, Reihe 6, Energietechnik, Nr. 530, VDI Düsseldorf.
- Dürschmidt, W, Zimmermann, G, Böhme, D (eds) 2006, *Renewable Energies - Innovation for the Future*, German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Berlin 2006.
- Eurelectric 2003, Union of the Electricity Industry, *Mediterranean Interconnection - SYSTMED*, Brussels 2003, <<http://public.eurelectric.org/Content/Default.asp?PageID=35>>.
- Graßl H, Kokott, J, Kulesa, M, Luther, J, Nuscheler, F, Sauerborn, R, Schellhuber, HJ, Schubert, R, Schulze, ED 2003, *World in Transition – Towards Sustainable Energy Systems*, German Advisory Council on Global Change, WBGU, Berlin March 2003, aufgerufen am 9 Dezember 2010, <http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_engl.html>.

- MED-CSP 2005, Trieb, F, Schillings, C, Kronshage, S, Viebahn, P, May, N, Paul, C, Klann, U, Kabariti, M, Bennouna, A, Nokraschy, H, Hassan, S, Georgy Yusef, L, Hasni, T, Bassam, N, Satoguina, H, *Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region, Final Report*. German Aerospace Center (DLR), Study for the German Ministry of Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, April 2005, aufgerufen am 9. Dezember 2010, <www.dlr.de/tt/med-csp>.
- MED-CSD 2010, Combined solar power and desalination plants: techno-economic potential in Mediterranean Partner countries, Observatoire Méditerranéen de l'Énergie, May 2010, <<http://www.med-csd-ec.eu/eng/>>.
- Pitz-Paal, R, Dersch, J & Milow, B 2005, *European Concentrated Solar Thermal Road Mapping*, ECOSTAR, SES6-CT-2003-502578, European Commission, 6th Framework Programme, German Aerospace Center, Cologne 2005.
- TRANS-CSP 2006, Trieb, F, Schillings, C, Kronshage, S, Viebahn, P, May, N, Paul, C, Klann, U, Kabariti, M, Bennouna, A, Nokraschy, H, Hassan, S, Georgy Yusef, L, Hasni, T, Bassam, N & Satoguina, H, *Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power, Final Report*. German Aerospace Center (DLR), German Ministry of Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, June 2006, aufgerufen am 9. Dezember 2010, <www.dlr.de/tt/trans-csp>.
- Trieb, F & Klann, U 2006, Modelling the Future Electricity Demand of Europe, Middle East and North Africa, Internal Report, DLR 2006.
- United Nations, World Population Prospects: The 2004 Revision Population Data Base, Medium Growth Scenario, Department of Economic and Social Affairs, Population Division Homepage, <<http://esa.un.org/unpp/>>.

Energy Technology Perspectives 2010

The role of energy scenarios and modelling

Uwe Remme

International Energy Agency, 9, rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France,
E-mail: uwe.remme@iea.org, Phone: +33 (0)1 40 57 67 13

Abstract

Energy scenarios are a useful tool helping decision-makers in government and industry to prepare for the future and to develop long-term strategies in the energy sector. The International Energy Agency (IEA) uses scenarios in the 2010 edition of the *Energy Technology Perspectives (ETP)* [International Energy Agency 2010] to study the crucial role of technologies in achieving deep reductions in energy-related CO₂ emissions and at the same time ensuring energy security and meeting the growing energy needs of the developing world. *ETP 2010* identifies in its BLUE Map scenario, which aims for a halving of global CO₂ emissions by 2050 relative to 2005, the most important technologies needed in key energy sectors. In addition to the global scenarios, *ETP 2010* also looks at the implications of the scenarios on a national or regional level by analysing the CO₂ trends and abatement options in four countries/regions, which play a major role in reducing CO₂ emissions: China, India, OECD Europe and the United States. The outcomes of the global scenario analysis serve as starting point to develop roadmaps for the most important clean energy technologies. Each roadmap presents the growth path for a particular technology from today to 2050, and identifies milestones in terms of technology development, financing, policy and public engagement that need to be achieved to realise the technology's full potential.

Keywords

CO₂ abatement, energy scenarios, energy technology, energy model, technology roadmaps

1 Introduction

Energy scenarios have been used for more than three decades to develop coherent stories about alternative futures⁸. Scenarios help decision-makers in government and industry to derive strategies and also challenge existing plans or thinking. Scenarios do not aim to forecast or predict the future, but provide coherent and credible stories about possible future pathways. Since the future evolution of many factors influencing the energy system, e.g. oil price development, is inherently uncertain, scenarios do not try to remove the uncertainty by predicting future outcomes, but explore possible options for decision-making under various, often uncertain and uncontrollable, future conditions in the energy sector.

Due to the longevity of many technology investments in the energy sector, scenarios typically cover a time horizon of several decades. Depending on the question being analysed, scenarios may also cover a shorter time horizon. The following discussion focuses on long-term scenarios in the energy system, i.e. the decision space being explored includes options to build new capacity and is not limited to the use of the existing capacity stock.

Different types of scenarios can be distinguished based on the underlying question being targeted by the analysis. Normative scenarios demonstrate the options required to reach a specific target or goal. A scenario analysing the technology portfolio and energy mix needed to reach a given future CO₂ reduction target is an example for a normative scenario. Explorative scenarios represent a further scenario type. They aim at analysing the impact of specific decisions or measures, e.g. what is the impact of introducing a renewable quota in the power sector on its CO₂ emissions. Normative scenarios can be referred to as *how-to* scenarios, whereas explorative scenarios look at *what-if* type of questions. In addition, one can identify a third type of scenario, which explicitly aims at studying the impact of uncertainty in the scenario assumptions, e.g. future gross domestic product (GDP) growth, by developing scenario variants for different assumptions for the uncertain scenario assumptions, e.g. a low and high GDP

⁸ The oil company Shell developed in the early 1970s alternative scenarios regarding economic growth, oil supply and oil prices to analyse its business environment. Prior to the first oil crisis, part of the scenarios anticipated possible oil supply disruptions and rising oil prices [Wack 1985].

growth variant. The three types of scenarios are often combined in a scenario analysis. An example is a normative scenario looking at how to reach a CO₂ reduction target. An explorative variant of this mitigation scenario may study the role of specific technology options in reaching the mitigation target, e.g. what are the cost effects, if carbon capture and storage (CCS) is not available as a mitigation option.

Scenarios are initially formulated in a qualitative form as a storyline, but then, due to the complex nature of the energy system, often analysed in a quantitative way using mathematical models of the energy system. Energy models describe components of the energy system, e.g. technologies, energy carriers and emissions, and their interdependencies in a systematic way. A single model is often not capable of covering all aspects which should be addressed by the scenario analysis. For example, a technology-oriented model, the so-called bottom-up model, can provide detailed information on energy technologies, but cannot provide insights on economic impacts, e.g. GDP or employment effects. Economic models, so-called top-down models, are needed to analyse these issues. Due to the reliance on energy models in the scenario analysis, the capabilities and possible limitations of the applied model approaches should be included in the presentation and discussion of scenario results.

In the following, an overview of the *ETP 2010* scenarios, the underlying methodology in deriving the scenarios and the use of these scenarios for the development of technology roadmaps will be given. Finally, future research needs in scenario analysis and modeling are discussed.

2 Energy scenarios and modelling in the Energy Technology Perspectives 2010

ETP 2010 analyses how low-carbon energy technologies can contribute to deep CO₂ emissions reduction targets. Using a techno-economic approach that assesses costs and benefits, the book examines least-cost pathways for meeting energy policy goals while also proposing measures to overcome technical and policy barriers. Specifically, *ETP 2010* examines the future fuel and technology options available for electricity generation and for the key end-use sectors of industry, buildings and transport.

ETP 2010 studies and compares various scenarios. The ETP 2010 Baseline scenario follows the Reference scenario to 2030 outlined in the World Energy Outlook 2009 [IEA 2009a], and then extends it to 2050. It assumes governments introduce no new energy and climate policies. In contrast, the BLUE Map scenario (with several variants) is target-oriented: it sets the goal of halving global energy-related CO₂ emissions by 2050 (compared to 2005 levels) and examines the least-cost means of achieving that goal through the deployment of existing and new low-carbon technologies. The BLUE Map scenario also enhances energy security (e.g. by reducing dependence on fossil fuels) and brings other benefits that contribute to economic development (e.g. improved health due to lower air pollution).

In the BLUE Map scenario, CO₂ emissions in 2050 are reduced to 14 Gt, around half the level emitted in 2005. This means emissions are 43 Gt lower in 2050 than the 57 Gt CO₂ projected in the Baseline scenario. Achieving these CO₂ emissions reductions will require the development and deployment of a wide range of energy-efficient and low-carbon technologies across every sector of the economy (Figure 1). End-use efficiency improvements in the use of fuels and electricity, and power sector measures dominate the short- and medium-term emissions reductions. But to achieve the deeper emission cuts needed by 2050, these measures will need to be supplemented by the widespread introduction of new technologies such as electric vehicles (EVs) and CCS between 2030 and 2050.

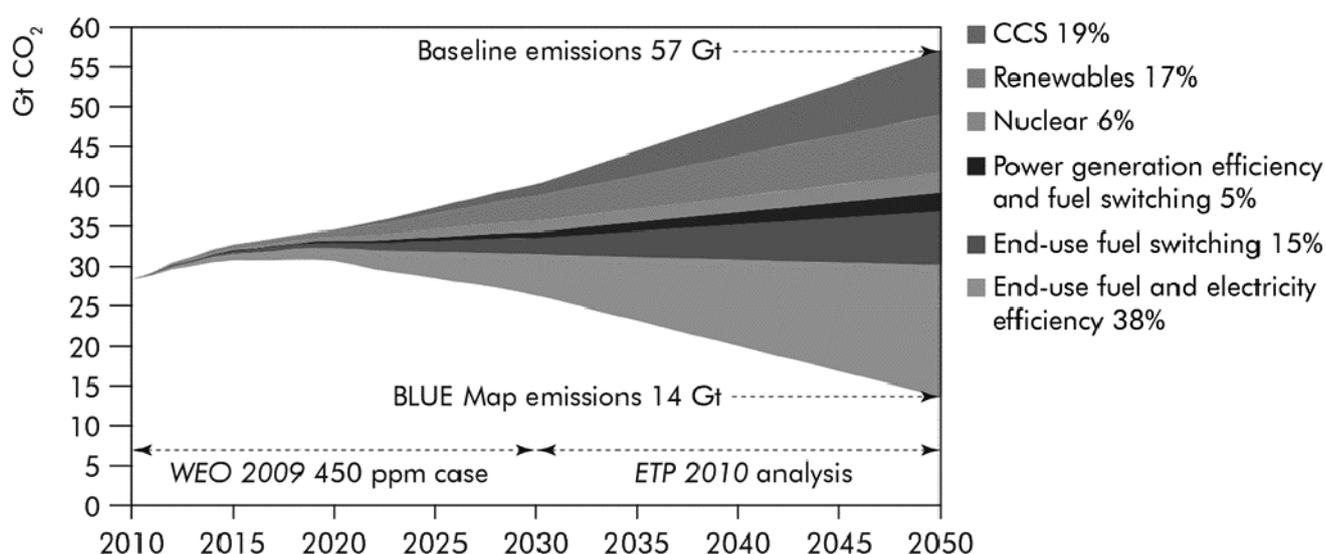


Figure 1: Key technologies for reducing CO₂ emissions under the BLUE Map scenario

The primary tool used for the scenario analysis is the IEA ETP model. This global 15-region model permits the analysis of fuel and technology choices throughout the energy system, from energy extraction through fuel conversion and electricity generation to end-use. The model's detailed representation of technology options includes about 1000 individual technologies. The ETP model belongs to the MARKAL family of bottom-up modelling tools [Fishbone & Abilock 1981]. MARKAL has been developed over the past 30 years by the Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), one of the IEA Implementing Agreements [Loulou et al. 2004]. The ETP-MARKAL model uses optimisation to identify least-cost mixes of energy technologies and fuels to meet the demand for energy services, given constraints like the availability of natural resources.

The ETP model has been supplemented with detailed demand-side models for all major end-uses in the industry, buildings and transport sectors. These models were developed to assess the effects of policies that do not primarily act on price. These demand-side models explicitly take capital stock turnover into account, and have been used to model the impact of new technologies as they penetrate the market over time.

To refine the analysis on the regional or country level within the global *ETP 2010* scenarios, the IEA secretariat cooperated with national modelling teams and energy experts to enhance the scenario analysis for China, India, OECD Europe and the United States, which together accounted for more than 60 % of global energy-related CO₂ emissions in 2007. The insights from the national or regional modelling groups, which analysed the Baseline and BLUE Map scenarios with their models, have been integrated in the global ETP scenario analysis.

Beyond the scenario analysis itself, the results of the BLUE Map scenario serve as starting point for the development of technology roadmaps to help governments and industry to accelerate the development and deployment of clean energy technologies. The BLUE Map scenario defines the deployment goal which should be achieved for a particular technology by 2050. Based on the scenario results, a technology roadmap then develops a growth path from today to 2050, and identifies technology, financing, policy and public engagement milestones that need to be achieved to realise the technology's full potential.

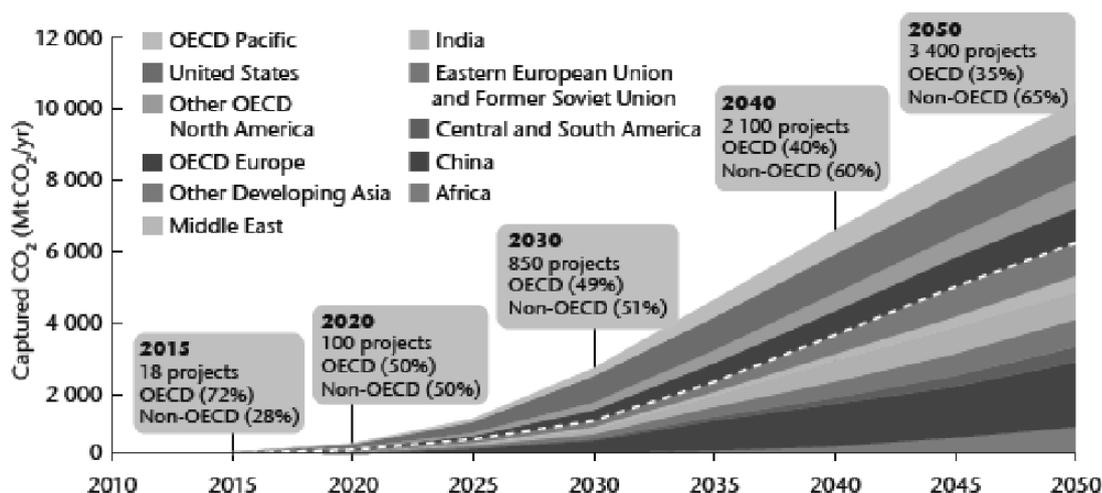


Figure 2: Global deployment of CCS 2010-50 by region

Figure 2 from the CCS roadmap illustrates the evolution of CCS projects in power generation, industry and the upstream sector between 2010 and 2050 [IEA 2009b]. OECD countries must lead in the first decade, but the technology must quickly expand to the developing world: by 2050, 65 % of the projects must be located in non-OECD countries.

Besides the CCS roadmap, the IEA has published roadmaps for wind, solar photovoltaic, concentrated solar power, electric vehicles, the cement sector and nuclear energy. Work on roadmaps for other low-carbon energy technologies has begun, including bioenergy, biofuels, energy efficiency in the buildings sector, geothermal energy and smart grids.

3 Future research challenges

Achieving deep emission cuts as envisaged in the BLUE Map scenario requires a fundamental transformation of the energy system. More efficient use of energy on the end-use side can provide substantial reductions in CO₂ emissions. Power generation needs to be essentially decarbonised through a mix of renewables, nuclear and CCS. Reducing emissions in the transport sector requires new advanced vehicle and fuel production technologies, such as electric vehicles or 2nd generation biofuels. Several

issues of this transformation of the global energy system need to be better understood and represented in the scenario analyses:

- The electricity system has to become more flexible and smarter to integrate an increasing amount of variable renewables and to electrify the transport sector. Smart grids are a promising concept to enable these changes, but more work is needed to better describe the interactions between electricity generation, grid and consumers. The IEA is currently developing a roadmap to address some of the questions related to the introduction of smart grids.
- Regional aspects of an energy system, e.g. climate conditions, geographic distribution of energy resources and consumers, are important characteristics influencing the available future options and strategies. The *ETP 2010* scenario analysis tried to capture some of the region-specific aspects in the global scenario analysis by co-operating with national or regional modelling and energy experts for some of the larger energy-consuming countries/regions. This regional analysis should ideally be expanded to other world regions, but the challenge lies in ensuring consistency among the national scenario studies and in integrating them into a global scenario.
- Reaching the full mitigation potential of energy-efficient and low-carbon energy technologies will depend to a significant extent on influencing consumers' technology choices and behaviour. An improved understanding of the human dimensions of energy consumption, particularly in the buildings sector and in personal transport, can help policy makers to catalyse and amplify technology-based energy savings. *ETP 2010* discusses behavioural aspects, but the analysis of consumer behaviour has to be expanded and better reflected in the scenario analysis.
- Energy scenarios often focus on energy and emission-related impacts and neglect other environmental effects, e.g. land and water use of energy technologies. Local protests against energy projects, e.g. hydro dams or overland transmission lines, show that concerns in the population about the possible impacts of energy technologies have to be better addressed in the scenario and decision-making processes.

- The material requirement needed to produce energy technologies and the related energy and environmental impacts are often not included in the scenario analysis. Life-cycle analysis (LCA) provides a detailed assessment of the impacts of a technology from its production, over its use to its decommissioning. But the analysis is often based on static factors for energy and environmental impacts. A better linkage between LCA and scenario analysis is needed.

Besides improving the scenario analysis itself, communicating and presenting energy scenarios and their results to policy-makers, industry experts and the public is crucial for the decision-making process and the debate about strategies in the energy system. Often scenarios are misunderstood as projections or forecast of the future, though they should be considered as possible future developments to demonstrate the available options and their implications in the decision process. The internet may be one communication channel to present scenarios in a more interactive manner to a broader audience. Thus, an improved understanding of energy scenarios may not only support the decision-making process itself, but also provide the involved stakeholders with a better knowledge of the underlying interdependencies in the energy sector.

Literature

- Fishbone, LG & Abilock, H 1981, "MARKAL: A Linear-Programming Model for Energy Systems Analysis: Technical Description of the BNL Version", *International Journal of Energy Research*, vol. 5, no. 4, pp. 353-375.
- IEA, 2010, *Energy Technology Perspectives 2010: scenarios and strategies to 2050*, Paris.
- IEA, 2009a, *World Energy Outlook 2009*, Paris.
- IEA, 2009b, *Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage*, Paris.
- Loulou, R, Goldstein, G & Noble, K 2004, *Documentation for the MARKAL Family of Models*, ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme), aufgerufen am 12. Januar 2011, <www.etsap.org/MrkIDoc-I_StdMARKAL.pdf>.
- Wack, P 1985, "Scenarios: uncharted waters ahead", *Harvard Business Review*, September-October 1985, pp. 73-89.

Energieszenarien aus der Sicht eines Energieversorgungsunternehmens

Beispiel im Strommarkt

Aurélie Fleury, Sven Filter, Christian Güthert

EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Durlacher Allee 93, 76131 Karlsruhe, Deutschland,
E-Mail: a.fleury@enbw.com - s.filter@enbw.com, Telefon: +49(0)721/63-14432 / 14076

Kurzfassung

Die Zukunft der Energieversorgung ist von einer Vielzahl von energiewirtschaftlichen, politischen, technischen sowie gesellschaftlichen Themen beeinflusst. Für Energieversorgungsunternehmen (EVU) sind Energieszenarien ein wichtiges Mittel zur Entscheidungsunterstützung für z. B. den Neubau von Kraftwerken. Mithilfe von Szenarien sollen die möglichen Entwicklungen im Energiemarkt erfasst und die Wirtschaftlichkeit solcher Projekte bewertet werden. Die Herausforderung liegt darin, die Szenarien adäquat zusammenzustellen, so dass robuste Entscheidungen getroffen werden können.

Stichworte

Energieszenarien, Entscheidungsunterstützung, Energieversorgungsunternehmen

1 Einleitung

Investitionsentscheidungen oder Strombezugsoptionen wirken auf ein Energieversorgungsunternehmen über lange Zeiträume. So ist bei Laufwasserkraftwerken oft von einer Nutzungsdauer von weit über 50 Jahren auszugehen. Für eine Entscheidung über ein solches Projekt sollen daher die relevanten Trends und Einflussfaktoren analysiert und die möglichen Entwicklungen im Energiemarkt abgeleitet werden.

Diese Einflussfaktoren können aus verschiedenen Gebieten stammen:

- Umwelt und Politik: z. B. CO₂-Minderungsziele, Ausbau und Förderung der erneuerbaren Energien.
- Energiewirtschaft: z. B. Brennstoffzugang und -preise auf dem Weltmarkt.
- Sozioökonomische Aspekte: z. B. Bevölkerungswachstum und Nachfrageentwicklung, Akzeptanz von neuen Technologien, Nutzergewohnheiten.

Angesichts der Komplexität der Themen und ihrer Zusammenhänge sowie angesichts der Unmöglichkeit einer exakten Vorhersage der künftigen Entwicklung ist die Definition von Szenarien unabdingbar [Schindler & Zittel 2008]. Mithilfe der Szenarien sollen die Effekte der verschiedenen Einflussparameter auf die Investitionsentscheidung abgeschätzt.

2 Verwendung der Energieszenarien im Strommarkt

Zur Ermittlung der Strompreise werden, basierend auf Annahmen zu Brennstoff- und CO₂-Preisen sowie sonstigen Parametern, mathematische Optimierungsmodelle (Ausbau- und Einsatzplanung) verwendet. Unter Berücksichtigung der möglichen Entwicklung der verschiedenen Einflussparameter werden energiewirtschaftliche Langfristszenarien abgeleitet. Sie sind ein Set aus konsistenten Brennstoffpreis- und fundamental begründeten Strompreisszenarien für den deutschen Strommarkt bis 2040.

Die Szenarien werden in erster Linie als Basis für die Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit und Risiken von Investitionsprojekten und Strombezugsoptionen vor allem im Erzeugungsbereich und für strategische Überlegungen eingesetzt.

Beispielsweise werden für ein Neubauprojekt Deckungsbeiträge des Kraftwerkprojektes in seinem modellierten Einsatz und die Wirtschaftlichkeit anhand einer Investitionsrechnung (dynamische Verfahren) für die verschiedenen Szenarien bestimmt.

Im Rahmen der Erzeugungsstrategie wird die Wirtschaftlichkeit des gesamten Unternehmenskraftwerksparks anhand der Szenarien ausgewertet. Ziel ist, einen gegenüber zukünftigen Entwicklungen robusten Kraftwerkspark zu bestimmen.

Langfristige Szenarien können auch als Initiierung oder Diskussionsunterstützung bei öffentlichen und politischen Auseinandersetzungen mit den Problemen der zukünftigen Energieversorgung dienen.

Sie werden auch zur Unterstützung der allgemeinen Strategie des Unternehmens eingesetzt.

3 Auswahl der Szenarien

3.1 Anforderungen an Energieszenarien

Während im kurzfristigeren Zeithorizont oftmals mit Prognosen sowie mit stochastischen Modellen gearbeitet wird, greifen Energieszenarien weiter in die Zukunft und lassen bewusst größere Veränderungen zu [Henssen 2002, Burck et al. 2010]. Sie umfassen Langfristüberlegungen, die die Findung robuster Entscheidungen unterstützen sollen.

Die Identifikation der wesentlichen Einflussgrößen auf die künftige Entwicklung des Energiemarktes ist entscheidend für die Gestaltung der Szenarien. Manche Fragen oder Effekte im Strommarkt können heute nicht beantwortet bzw. quantifiziert werden. Neben den Preisentwicklungen muss auf mögliche Probleme der zukünftigen Energieversorgung aufmerksam gemacht werden, und es müssen Schlussfolgerungen und Empfehlungen für entsprechende Maßnahmen abgeleitet sowie Chancen und Risiken für das Unternehmen hervorgehoben werden.

Bei der Gestaltung der Szenarien stellen sich folgende Fragen:

- Soll ein Projekt gegenüber einer „Stresssituation“ oder gegenüber einer möglichen Bandbreite bewertet werden?
- Sollen die Szenarien extreme Entwicklungen („worst“ und „best“ case) gegenüber einem weiteren Vorgehen wie heute („Business as usual“) darstellen und dadurch eher eine große Bandbreite abdecken?
- Sollen die Szenarien mögliche „vorstellbare“ Entwicklungen gemäß einer wahrscheinlichen Ausprägung veranschaulichen (eher moderate Bandbreite)?

3.2 Gestaltung der Szenarien

Ausgehend von der aktuellen Situation der Energiemärkte fließen in den Szenarien die wesentlichen für die Entwicklung der Strompreise relevanten Treiber ein und werden im Rahmen einer plausiblen Entwicklungsbandbreite variiert. Die Gesamtheit der Szenarien soll die Bandbreite der als realistisch betrachteten Entwicklungen beschreiben, wobei ein einzelnes Szenario als begrenzender Eckpunkt steht.

Ein wesentlicher Einflussparameter ist der Intensitätsgrad, mit dem Klimaschutzziele verfolgt werden. Dies beeinflusst im Wesentlichen den Ausbau der erneuerbaren Energien, die Anstrengungen zu Effizienzsteigerungen, die Durchdringung der Elektromobilität und die Entwicklung des CO₂-Zertifikatehandels und deren Preise.

Demzufolge werden Klimaschutzszenarien erstellt und Szenarien, in denen der Klimaschutz nicht die übergeordnete Rolle einnimmt, also moderate Szenarien.

Zusätzlich bildet die Entwicklung der Primärenergiepreise für Kohle, Öl und Gas einen weiteren wichtigen Einflussparameter. Sie bestimmt auch die relative Vorteilhaftigkeit einzelner Erzeugungskapazitäten zueinander. Hierbei ist nicht alleine die absolute Höhe der Brennstoffpreise entscheidend, sondern vielmehr die Relation der Konkurrenz Brennstoffe zueinander.

Dem wurde Rechnung getragen, in dem sowohl innerhalb der Klimaschutzszenarien als auch in den moderaten Szenarien unterschiedliche Brennstoffrelationen abgebildet werden.

Die wesentlichen treibenden Größen zur Gestaltung der Szenarien sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Wesentliche Einflussparameter zur Gestaltung der Energieszenarien.

| Parameter | Abhängigkeiten zur Definition der Bandbreiten (nicht ausführlich) |
|---|---|
| Brennstoffpreise für Steinkohle, Ölprodukte, Erdgas | Weltmärkte, Preisbildung, Verfügbarkeit von Energieträgern, Preisverhältnisse Erdgas zu Kohle (Spread), Ersetzbarkeit, ... |
| CO ₂ -Zertifikatspreise | internationale, europäische, nationalen Minderungsziele für Treibhausgase, Marktmechanismen, ... |
| Stromnachfrage und -profil | Bevölkerungsentwicklung, BIP Entwicklung, Effizienz, Strukturwandel, Verhaltensänderung, Förderungen, technische Entwicklungen, ... |
| Wärmenachfrage und -profil | Bevölkerungsentwicklung, BIP Entwicklung, Effizienz, Strukturwandel, Förderungen, technische Entwicklungen, ... |
| Ausbau der erneuerbaren Energien | Förderung, Investitionsentwicklung, technische Entwicklung, Marktintegration, Fluktuationen, ... |
| Netzausbau | Entwicklung des Übertragungsnetzes, Marktintegration, Stromaustausch |
| Kraftwerke (Bestand und Neubau) | Technik- und Kostenentwicklung, Kernenergieverlängerung, ... |

Verschiedene Annahmen zur Entwicklung der unterschiedlichen Einflussparameter werden erarbeitet: Für die Einzelparameter werden Spannbreiten definiert, und es wird die Abhängigkeiten zwischen den Parametern identifiziert. Im Rahmen einer „Storyline“ wird definiert, wie in jedem Szenario die Entwicklung der verschiedenen Parameter zueinander und zu einer gemeinsamen logischen nachvollziehbaren und vorstellbaren künftigen Entwicklung passt.

4 Umgang mit den Szenarien für die Entscheidungen

4.1 Umgang mit den Szenarien

Da die Folgen der Investitionsentscheidung aus unternehmerischer Sicht von hoher Bedeutung sind, soll die Robustheit der Entscheidung gewährleistet sein.

Szenarien beschreiben nur eine eng begrenzte Auswahl aller denkbaren zukünftigen Entwicklungen des Energiemarkts und der Energieversorgung. Durch die Wahl mehrerer Szenarien geht die Eindeutigkeit der Aussage zurück zugunsten ihrer allgemeinen Aussagekraft.

Dabei ist stets auch die Handhabbarkeit der Szenarien für die Entscheidung zu berücksichtigen. Eine hohe Anzahl an Szenarien kann zwar ein breiteres Spektrum der möglichen Entwicklungen abdecken, aber die Entscheidungsfindung erschweren.

Neben den „messbaren“ Treibern und Preispfaden, die die Szenarien gestalten, werden nicht messbare mögliche Aspekte aus den Szenarienanalyse berücksichtigt [Schindler & Zittel 2008]. Hierzu zählen beispielsweise mögliche Änderungen in den Marktmechanismen bei einem starken Ausbau der erneuerbaren Energien (Netzintegration, Marktintegration, Kapazitätsmarkt). Diese Aspekte sollen erläutert werden und im Entscheidungsprozess berücksichtigt werden.

4.2 Starken und Schwächen der aktuellen Szenarien

Die Gestaltung der Szenarien ist von der Einschätzung der Autoren zu den möglichen Entwicklungen abhängig. Fehleinschätzungen können zu Szenarien führen, die keine adäquate Bandbreite abdecken und dadurch die Entscheidung falsch lenken können. Szenarien sind prinzipiell unvollständig, da sie nur einen Teil der möglichen Entwicklungen aufzeigen und nicht alle Einflussparameter erfasst werden können. Die Entwicklung der Preispfade ist modellgestützt, weswegen die Szenariengestaltung teilweise durch Modellgrenzen beschränkt ist.

Die Szenarien sind aber ein wichtiges Hilfsmittel bei der Investitionsentscheidung, um mögliche Entwicklungen im Strommarkt aufzuzeigen, damit das Unternehmen entsprechend reagieren kann und die Rahmenbedingungen im Energiemarkt mit politischen Entscheidungsträgern mit gestalten kann.

5 Forschungsbedarf

Die Energiemärkte weisen eine steigende Komplexität auf. So nimmt im Strommarkt die europäische Integration der nationalen Märkte immer weiter zu, der Zubau erneuerbarer Energien stellt andere Anforderungen an Betriebsführung und Marktdesign, und Unsicherheiten nehmen zu. Vor diesem Hintergrund sind die Bildung der Szenarien selbst mit Hilfe komplexer Optimierungsmodelle sowie der Umgang mit den Ergebnissen und die Bewertung der Risiken weiter zu entwickeln.

Schlussfolgerungen

Energieszenarien bilden eine wichtige Planungsgrundlage für die Investitionsentscheidungen bei EVU. Die Herausforderung bei der Szenarientwicklung besteht darin, die relevanten Einflussparameter auf dem Energiemarkt zu identifizieren und deren mögliche künftige Entwicklungen abzuschätzen. Die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern müssen aufgezeigt und die Konsistenz der Annahmenbündel muss geprüft werden, damit robuste Entscheidungen getroffen werden können. Der Strommarkt ist von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Politische Maßnahmen haben eine erhebliche Auswirkung auf seine Gestaltung. Eine regelmäßige kritische Revision der Szenarien ist deshalb notwendig, um ihre Aussagekraft zu gewährleisten. Die Szenarien stellen eine rationale Basis für die Entscheidung dar, die Entscheidung ist aber dann dem Entscheidungsträger (z. B. dem Unternehmensvorstand) nach seiner Abwägung von Nutzen und Risiko überlassen.

Literaturverzeichnis

Schindler, J & Zittel, W 2008, „Energieszenarien – kritische Anmerkungen zu prominenten Beispielen“, *Wissenschaft und Umwelt Interdisziplinär*, Heft 11, S. 16-21.

Henssen, H 2002, *Was sind Energieszenarien, was können sie leisten?*, www.energiefakten.de, 14. Oktober 2002, aufgerufen am 13 Dezember 2010, <<http://energiefakten.org/pdf/szenarien.pdf>>.

Burck, J, von Blücher, F, Fabian, T 2010, *Welche Energiezukunft ist möglich?*, Germanwatch e.V..

Energieszenarien im Umweltbundesamt

Diana Nissler

Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau, Deutschland,
E-mail: Diana.Nissler@uba.de, Telefon: +49(0)340/21032959

1 Die Aufgaben des Umweltbundesamtes im Bereich der Energiepolitik

Die deutsche Energiepolitik wird durch mehrere Bundesministerien geprägt. Federführend ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, das u. a. für Fragen des Wettbewerbs oder für die Versorgungssicherheit zuständig ist.

Das Bundesministerium für Verkehr und Bauwesen ist mit Energiefragen im Verkehrs- und Gebäudebereich befasst. Dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit obliegen die Vermeidung negativer Umweltauswirkungen der Energieversorgung sowie der Ausbau der erneuerbaren Energien.

Als Bundesoberbehörde im Zuständigkeitsbereich des Umweltministeriums befasst sich auch das Umweltbundesamt mit den Umwelteffekten der Energieversorgung. Laut Gründungsgesetz gehört es zu den Aufgaben des Amtes,

- das Bundesministerium für Umwelt und Naturschutz in seinen Aufgaben mit wissenschaftlicher Beratung zu unterstützen,
- Daten zum Zustand der Umwelt zu erheben und aufzubereiten und der Öffentlichkeit zugänglich zu machen,
- Verwaltungsaufgaben, zum Beispiel für den Vollzug von Gesetzen, wahrzunehmen.

Die Abteilung I 2 „Energie und Klimaschutz“ am Umweltbundesamt besteht aus 6 Fachgebieten (Arbeitseinheiten). Diese befassen sich mit globalen und nationalen Klimaschutzzielen, den internationalen Verhandlungsprozessen zum Klimaschutz, mit erneuerbaren Energien, Energieeffizienz, Energiestatistik und Energiedaten und mit

dem Führen des deutschen THG-Emissionsregisters und der Berichterstattung über die deutschen Treibhausgasemissionen.

Das Fachgebiet „Energiestrategien und -szenarien“ ist ein Grundsatzfachgebiet. Es setzt sich mit der umfassenden Fragestellung auseinander, wie die Energieversorgung umweltgerechter gestaltet werden kann. Eine wichtige Rolle spielen dabei die Erfordernisse des Klimaschutzes: Wie sollte eine Energieversorgung aussehen, die deutlich weniger klimawirksame Treibhausgase freisetzt, als das heute der Fall ist? Schlüsselfaktoren sind dabei der Ausbau der erneuerbaren Energien und eine wesentlich effizientere Nutzung von Energie. Mit welchen Instrumenten und Maßnahmen kann die Bundesregierung diese Faktoren positiv beeinflussen? Ein weiterer Schwerpunkt des Fachgebiets besteht darin, zu untersuchen, wie wirksam Instrumente der Klimapolitik – einzeln oder im Zusammenspiel betrachtet – sind.

2 Die Arbeit mit Energieszenarien am Umweltbundesamt

Bisher werden Energieszenarien für das Umweltbundesamt in der Regel durch Auftragsarbeiten wissenschaftlicher Institute erstellt. Über eigene Energiemodelle verfügt das Umweltbundesamt derzeit nicht.

Die Auftragsforschung wird in der Regel über den Umweltforschungsplan (Ufoplan) organisiert. Dieser Titel im Bundeshaushalt wird von den Ressortforschungseinrichtungen im Umweltressort – neben dem Umweltbundesamt das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und das Bundesamt für Naturschutz (BfN) – und auch dem Umweltministerium selbst genutzt, um wissenschaftliche Fragestellungen zu untersuchen, die für die weitere Gestaltung der Umweltpolitik relevant sind. Für die Aufstellung des Ufoplane benennen alle beteiligten Institutionen ihren Forschungsbedarf; die endgültige Auswahl der Projektideen erfolgt dann in einem Abstimmungsprozess mit dem Umweltministerium. Bei der Ausschreibung der Forschungsvorhaben sind dann Fragestellungen und Bearbeitungsmethoden meist schon sehr detailliert vorgegeben.

2.1 Politikszzenarien

Mit den Politikszzenarien [Umweltbundesamt 2009] werden seit 1996 die möglichen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen in Deutschland bis zum Jahr 2030 projiziert. Die Modellergebnisse sind Grundlage für den Nationalbericht über die Entwicklung der Treibhausgasemissionen, der derzeit alle zwei Jahre an die EU-Kommission übermittelt wird.

Die Energieszenarien bestehen im Wesentlichen aus folgenden zwei Zukunftsbildern: im Mit-Maßnahmen-Szenario wird davon ausgegangen, dass bis 2030 die deutsche Klimaschutzpolitik unverändert bleibt. Im Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario wird untersucht, wie sich ein Portfolio zusätzlicher klimapolitischer Maßnahmen auf die weitere Entwicklung der THG-Emissionen auswirken würde.

Sowohl die Rahmendaten für die Modellrechnungen (z. B. Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftswachstum, Entwicklung Energieträgerpreise) als auch die möglichen zusätzlichen klimapolitischen Maßnahmen werden in der Interministeriellen Arbeitsgruppe CO₂ (IMA CO₂) abgestimmt, in der alle mit Energiefragen und THG-Emissionen befassten Ressorts der Bundesregierung vertreten sind. Für die Modellierung werden bottom-up-Nachfragemodelle für verschiedene Sektoren (z. B. ASTRA für den Verkehr) mit den Modellen PowerACE (Erzeugung erneuerbarer Energien) und ELIAS (fossile Stromerzeugung einschl. der an KWK gekoppelten Wärmeproduktion) sowie dem Merit-Order-Modell kombiniert. Für einzelne Annahmen – z. B. unterschiedliche Energiepreisentwicklungen oder Verfügbarkeit/Nichtverfügbarkeit der Technologie zur Kohlenstoffabscheidung und -verpressung (CCS) – werden Sensitivitätsrechnungen erstellt.

2.2 Kosten- und Modellvergleich langfristiger Klimaschutzpfade (bis 2050)

Schaffen wir mit energiepolitischen Entscheidungen Pfadabhängigkeiten, die verhindern, dass wir langfristig ambitioniertere Emissionsminderungsziele erreichen können? Aus dieser Fragestellung ging ein Forschungsprojekt hervor, in dem drei Klimaschutzszenarien unter einheitlichen Rahmenbedingungen mit demselben

Modellsystem nachgebildet werden. So ist ein direkter Vergleich der ökonomischen und Umweltwirkungen möglich.

Die drei untersuchten Klimaschutzszenarien sind:

- Szenario 1: Moderate Effizienzsteigerung mit angebotsseitigem Strukturwandel
- Szenario 2: Moderate Effizienzsteigerung mit strukturkonservativer Angebotsseite
- Szenario 3: Hohe Effizienzsteigerung mit angebotsseitigem Strukturwandel

Diese Szenarien, die auf externen Studien beruhen, wurden in ein Modellsystem implementiert, das aus dem gekoppelten detaillierten makroökonomischen Wachstums- und Energiesystemmodell REMIND-D des Potsdam-Instituts und dem technologisch differenzierteren Energienachfragemodell DEESY des Wuppertal Instituts besteht. Als (endogene) Rahmenbedingung ist vorgegeben, dass die Szenarien – soweit die Modelle diesen Entwicklungspfad abbilden können – über alle Sektoren Emissionsminderungen von insgesamt 40 % bis zum Jahr 2020 und von 85 % bis zum Jahr 2050 in Deutschland erreichen sollten.

Erste Zwischenergebnisse wurden im Sommer 2010 in Form eines Thesenpapiers [Umweltbundesamt 2010a] veröffentlicht. Unter anderem wurde deutlich, dass eine Steigerung der Energieeffizienz die wirtschaftlich vorteilhafteste Klimaschutzoption ist – und entscheidend für das Erreichen der Klimaschutzziele. Der Ausbau der erneuerbaren Energien erfolgt in den Simulationen schneller als bisher in den Zielen der Bundesregierung angestrebt.

2.3 Energieziel 2050: 100 % Erneuerbare Energien

Kann ein hochentwickelter Industriestaat wie Deutschland seinen Strombedarf aus erneuerbaren Energien decken? Diese Frage stand am Anfang einer Untersuchung zur möglichen Stromversorgung im Jahr 2050 [Umweltbundesamt 2010b]. Ausgangspunkt war die Vision eines „treibhausgasneutralen Deutschlands“ – mit einem weitestgehend THG-emissionsreduzierten Stromsektor, der vollständig auf erneuerbaren Energien beruht.

Basierend auf Annahmen zur demographischen und gesamtwirtschaftlichen Entwicklung leiteten die Experten des Umweltbundesamtes einen Energieverbrauchswert für das Jahr 2050 ab. Dazu kamen Schätzungen für die Sektoren private Haushalte, Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Verkehr – ausgehend von den besten heute verfügbaren Techniken. Diese Schätzungen werden ergänzt durch Werte für Leitungsverluste und den Stromverbrauch im Umwandlungsbereich sowie für Potenziale einer Reihe von Speichertechnologien (einschließlich Lastmanagement). Für die Angebotsseite wurde das technisch-ökologische Potential erneuerbarer Energien hergeleitet.

Im Szenario Regionenverbund simuliert das Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), wie die so beschriebene Stromnachfrage im Jahr 2050, die unter Rückgriff auf die Wetter- und Lastprofile der Jahre 2006-2009 zeitlich aufgelöst wurde, jederzeit durch die Einspeisung der verfügbaren EE-Stromerzeugung bzw. durch den Rückgriff auf Speichertechniken gedeckt werden kann. Dazu wurde das Modell SimEE eingesetzt.

Dieses Szenario Regionenverbund bildet einen Eckpunkt des Lösungsraums, der zeigen soll, wie eine vollständige Deckung der Stromnachfrage im Jahr 2050 aus technischer Sicht gestaltet werden könnte. Das Szenario Regionenverbund wird in Zukunft ergänzt werden durch die Szenarien Großtechnik-International und Lokal-Autark.

2.4 Exkurs: Koordination der Szenarienarbeit im Umweltbundesamt

Vor etwa zwei Jahren hat das Umweltbundesamt im Fachgebiet I 1.1 „Grundsatzfragen, Umwelt- und Nachhaltigkeitsstrategien“ eine Anlaufstelle für das Thema „Modelle und Szenarien“ eingerichtet. Die Kollegen haben sich einen Überblick verschafft, welche Arbeitseinheiten im Haus Szenarioansätze verwenden, welche Inputdaten und welche Modelle genutzt werden. Etwa zwei Mal im Jahr findet ein „Szenarien-jour-fixe“ statt, an dem die mit Szenarien befassten UBA-Mitarbeiter aktuelle Arbeiten vorstellen und diskutieren. Die Treffen sollen auch der methodischen Weiterbildung dienen. In unregelmäßigen Abständen werden externe Referenten eingeladen, die zu grundsätzlichen Fragen in der Szenarienarbeit berichten.

Auch diese Arbeitseinheit initiiert Forschungsvorhaben mit und zu Szenarietechniken. Aktuell wird im Rahmen eines Gutachtens mit der Universität Stuttgart (Herr Weimer-Jehle, ZIRN) an einem harmonisierten und konsistenten Rahmendatensatz gearbeitet (FKZ 363 01 318); hierbei werden qualitative (Cross-Impact-Bilanzanalyse) mit quantitativen (Datenreihen) Methoden kombiniert.

Ferner werden noch zwei rein qualitative Szenario-Forschungsvorhaben bearbeitet: „Nachhaltige Stadt 2030“ und „Integrierte Nachhaltigkeitsszenarien“. Im ersten Fall werden die Szenarien/Leitbilder einer nachhaltigen Stadt normativ gebildet und im zweiten Fall wird die explorative Szenario-Technik angewendet.

Die jüngst veröffentlichte Studie zur 100 % erneuerbaren Stromerzeugung (siehe 2.3) hingegen wurde mit dem Story-and-Simulation-Ansatz [Alcamo 2009] erarbeitet. Das methodische Spektrum wird kontinuierlich um qualitative und hybride Ansätze erweitert.

3 Fazit zur Arbeit mit Energieszenarien am Umweltbundesamt

Bisher kamen in den Szenarienarbeiten, die das Umweltbundesamt in Auftrag gegeben hat, fast ausschließlich modellbasierte, quantifizierte Simulationen der Energiewirtschaft oder -technik zur Anwendung. In der Studie „Energieziel 2050“ wurde erstmals ein stärker qualitativ ausgerichteter Ansatz (story and simulation) gewählt. Unterschiedliche Szenarien entstanden i. d. R. über die Variation wichtiger Eingangs- oder Rahmendaten. So wurden Zusammenhänge z. B. zwischen der Energiepreisentwicklung und der Entwicklung der THG-Emissionen erkundet.

Eine Schwierigkeit dieser Methode besteht darin, dass die Modellrechnungen für das Umweltbundesamt – als Auftraggeber, der auf extern entwickelte Modelle zurückgreift – eine Art „black box“ bilden. Es ist in der Regel unmöglich, einzelne quantitative Modellergebnisse durch Rückgriff auf das verwendete Modell zu rekonstruieren. Umso wichtiger ist eine verständliche Dokumentation der Modelleigenschaften und grundlegenden Wirkungszusammenhänge im Modell durch das beauftragte Forschungsinstitut, um Reliabilität und Validität der Ergebnisse zu belegen.

Um eine nachhaltige, den Erfordernissen des Klimaschutzes Rechnung tragende Energiewirtschaft zu gestalten, ist ein Strukturwandel sowohl im Bereich der Energienutzung als auch im Bereich der Energieerzeugung notwendig.

Während das Ziel, die Zwischenziele und unsere augenblickliche Ausstattung (die politischen Instrumente) für diesen Weg klar benannt sind – Erhöhung der Energieeffizienz, Ausbau der erneuerbaren Energien, Deckelung der Emissionen durch einen Zertifikatehandel etc. – fehlen systematische Untersuchungen dazu, wie sich diese Entwicklungen im Detail auf die unterschiedlichen Akteure in Wirtschaft und Gesellschaft auswirken können. Vergleicht man den bevorstehenden Strukturwandel mit einer Bergwanderung, würde das bedeuten: Wir kennen das Ziel und wissen, wir müssen zunächst bergauf. Es gibt eine grobe Wegskizze mit Landmarken (= Zwischenziele). Wir haben keine Wanderkarte mit hinreichend kleinem Maßstab. Wir wissen nicht, ob wir mit Bachquerungen oder Schneefeldern rechnen müssen. Unsere Mitwanderer (die Energieversorger, Netzbetreiber, Energieverbraucher) scheinen mit gutem Schuhwerk ausgestattet – aber wie ist es um ihre Kondition und ihre Geschicklichkeit im Gelände bestellt? Schaffen Sie es, Ihr Gepäck – zum Beispiel die für den Strukturwandel erforderlichen Innovationen und Investitionen – zu schultern? Wer kann uns unterwegs bei Schwierigkeiten unterstützen – und wer wird unserer Unterstützung bedürfen?

Klar ist: Es gibt für diese Aufgabe eine Menge unbekannter Größen, die wir so bald wie möglich näher erkunden sollten. Szenariotechniken bieten sich an, einige dieser Fragen näher zu betrachten. Wir sollten sie in Zukunft umfassender als bisher nutzen – und sind offen für Anregungen und Unterstützung.

Literaturverzeichnis

Alcamo, J (ed.) 2009, *Environmental futures*, Elsevier, Amsterdam/Oxford.

Gesetz über die Errichtung eines Umweltbundesamtes (UBAG) vom 22. Juli 1974 (BGBl. I S. 1505) in der Fassung vom 11. August 2009 (BGBl. I S. 2723).

Umweltbundesamt, 2009, *Politiksznarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030*, Reihe Climate Change, Dessau.

Umweltbundesamt, 2010a, *Kosten- und Modellvergleich langfristiger Klimaschutzpfade (bis 2050) - Kernthesen zum 2. Zwischenbericht*, aufgerufen am 26. November 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kosten_und_modellvergleich_langfristiger_klimaschutzpfade.pdf>.

Umweltbundesamt, 2010b, *100 % Strom aus erneuerbaren Quellen*, Umweltbundesamt, Dessau.

Verwendung von Energieszenarien Am Beispiel der Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung

Wolfgang Langen

Dr. Wolfgang Langen, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat:
Langfristige Energiepolitik, Scharnhorststr. 34-37, 10115 Berlin, Deutschland,
E-Mail: wolfgang.langen@bmwi.bund.de, Telefon: +49 (0)30 18 615 6748

Kurzfassung

Die Energie- und Klimapolitik nimmt Zeiträume in den Blick, die bis in die Mitte dieses Jahrhunderts reichen. Energiewirtschaftliche Investitionen in Kraftwerke und Netze sind typischerweise mit langen Nutzungsdauern von 20 und mehr Jahren verbunden. Die technische Lebensdauer von Gebäuden beträgt mehr als 50 Jahre. Der Klimawandel und seine Auswirkungen werden gar mit noch längerer Perspektive diskutiert. Angesichts dieser Zeiträume greift die Energiepolitik auf Energieszenarien zurück, die unterschiedliche energiepolitische Optionen aufzeigen und darlegen, welche Herausforderungen und Chancen damit verbunden sein können. Damit sind Energieszenarien eine wichtige Grundlage für die Vorbereitung politischer Entscheidungen. Die grundsätzlichen Unsicherheiten und Limitierungen, die mit sehr langfristigen Vorausschauen verbunden sind, sollten stets bedacht werden. Die Verwendung von Energieszenarien wird in diesem Artikel am Beispiel der Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung kurz erläutert.

Stichworte

Energieszenarien, Energiekonzept, Bundesregierung, Energiepolitik

1 Einleitung

Das am 28.09.2010 vom Bundeskabinett verabschiedete Energiekonzept [BMWi & BMU 2010] basiert auf Szenarienrechnungen, die im gemeinsamen Auftrag von Bundeswirtschaftsministerium und Bundesumweltministerium von den drei Instituten PROGNOSE/EWI/GWS erarbeitet worden waren. Die Aufgabenstellung ergab sich aus der Koalitionsvereinbarung: „Wir werden spätestens innerhalb des nächsten Jahres ein neues Energiekonzept vorlegen, das szenarienbezogen Leitlinien für eine saubere, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung formuliert“. Dabei wurden konkrete Zielvorgaben aus dem Koalitionsvertrag festgelegt, u. a. die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 % zu reduzieren.

Das Energiekonzept und die zu Grunde liegenden Energieszenarien [Schlesinger, Lindenberger, Lutz et al. 2010] haben erwartungsgemäß zu einer breiten Diskussion mit zustimmenden als auch kritischen Beiträgen geführt. Diese Diskussion ist angesichts der Herausforderungen notwendig und begrüßenswert. Mit diesem Artikel soll die Verwendung von Energieszenarien am Beispiel der Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung erläutert werden.

2 Die Formulierung und Umsetzung der Aufgabenstellung

Die Ausgestaltung zur künftigen Energie- und Klimapolitik enthält folgende Leitlinien aus dem Koalitionsvertrag für die Zeit bis zum Jahr 2050:

- Die Treibhausgasemissionen sollen bis zum Jahr 2020 um 40 % und bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 % reduziert werden (jeweils bezogen auf das Jahr 1990).
- Die erneuerbaren Energien sollen bis zum Jahr 2050 den Hauptanteil an der Energieversorgung (in den Bereichen Strom, Wärme und Verkehr) übernehmen.
- Die Kernenergie ist eine Brückentechnologie. Der Neubau von Kernkraftwerken ist keine Option.

- Die mögliche Nutzung der CO₂-Abscheidung und –Speicherung soll einbezogen werden.

Diese Leitlinien wurden in vier Zielszenarien überführt, die die Ziele auf je unterschiedlichen Wegen erreichen. Die Energieszenarien unterscheiden sich im Wesentlichen bezüglich der Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke. Den Zielszenarien wurde ein Referenzszenario gegenübergestellt.

Die Gegenüberstellung von Ziel- und Referenzszenario ist in der modernen Szenarientechnik üblich und wird u. a. auch angewandt im World Energy Outlook 2009 der Internationalen Energie Agentur (IEA), beim Modell Deutschland im Auftrag des WWF und den Energieperspektiven Schweiz im Auftrag des Bundesamts für Energie in Bern. Im Rahmen eines solchen Ansatzes gehört es zum Charakteristikum eines Referenzszenarios, dass es sich in wesentlichen Annahmen von den Zielszenarien unterscheidet. Nur dann kann es die Funktion eines Maßstabes einnehmen, der einerseits den notwendigen Handlungsbedarf zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele aufzeigt und andererseits die Basis für die Berechnung der volkswirtschaftlichen Kosten darstellt.

Szenarienergebnisse setzen Annahmen für eine Vielzahl von sozio-ökonomischen Größen voraus. Es entspricht einer langjährigen Tradition bei den Szenarien- und Prognosearbeiten des Bundeswirtschaftsministeriums, bei den Annahmensetzungen in erster Linie auf die Expertise der Gutachter zu setzen.

3 Was leisten Energieszenarien und was nicht?

Die Funktion von (Ziel-) Szenarien ist es zu untersuchen, unter welchen Bedingungen und mit welchen Mitteln vorgegebene Ziele realisiert werden können. Sie zeigen Zusammenhänge auf, verweisen auf notwendige Voraussetzungen und mögliche Zielkonflikte. Szenarienergebnisse können aber nicht als „Beweis“ angesehen werden, dass bestimmte Zielvorgaben auch erreicht werden können. Dass diese Anforderung zu hoch gesteckt ist, zeigt allein die Fülle der aktuell vorliegenden Szenarien mit durchaus widersprüchlichen Ergebnissen. Szenarien sind in erster Linie mathematische Konstrukte, die – wie Gleichungssysteme – nach Lösungen suchen. Nur im Zu-

sammenhang mit den gesetzten Annahmen und Voraussetzungen ist die jeweils gefundene Lösung gültig.

In den Energieszenarien geht es grundsätzlich nicht darum, die Vorteilhaftigkeit eines bestimmten Energieträgers im Vergleich zu anderen Optionen aufzuzeigen (etwa „Kernenergie“ vs. „Einsparung“ oder „CCS“ vs. „Erneuerbare Energien“). Aufgabe war vielmehr, einen kostengünstigen Weg in die „klimaneutrale Energieversorgung bis 2050“ aufzuzeigen – und bei dieser Aufgabe geht es nicht um ein Gegeneinander, sondern um die Ausschöpfung aller geeigneten und kostengünstigen Minderungsbeiträge. Nur im Vergleich der Zielszenarien, die sich im Wesentlichen nur durch unterschiedliche Laufzeiten für die Kernenergie unterscheiden, lassen sich Aussagen zur relativen Vorteilhaftigkeit von Laufzeitverlängerungen ableiten.

Auch bei der Einschätzung künftiger struktureller Entwicklungen haben die Gutachter ihre eigenen Erwartungen formulieren und in die Szenarien integrieren können. Dies gilt bspw. für den langfristig unterstellten europäischen Binnenmarkt für Strom („europäische Kupferplatte“). Diese Vision, die als Voraussetzung einen starken Netzausbau, eine Verdreifachung der Kuppelleitungskapazitäten und eine übergreifende europäische Regulierung beinhaltet, hat erhebliche Auswirkungen auf die Szenarienergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung der Strompreise, des Ausbaus der erneuerbaren Energien und der Stromimportabhängigkeit. Demgegenüber sind Einschätzungen, dass in der erheblichen Zeitspanne bis 2050 ein „Stillstand“ bei der Schaffung eines europäischen Strombinnenmarkts eintritt, wenig überzeugend.

Die erarbeiteten Zielszenarien für 2050 ergeben im Vergleich zu der Referenzentwicklung folgende Ergebnisse:

- Der Energieverbrauch insgesamt geht stark zurück (rd. 50 % gegenüber rd. 35 % in Referenzentwicklung);
- damit nimmt auch die Importabhängigkeit der Energieversorgung insgesamt ab (knapp 55 % gegenüber 61 %; der Stromimport steigt jedoch stark an);
- das Strompreisniveau kann weitgehend konstant gehalten werden und liegt tendenziell unter dem Niveau der Referenzentwicklung.

Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs ist in Abbildung 1 in der Gegenüberstellung von Referenzentwicklung und einem Szenario, das einer Laufzeitverlängerung von 12 Jahren entspricht, dargestellt. Erkennbar ist der deutliche Rückgang des Energieverbrauchs und der starke Ausbau des Anteils erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2050.

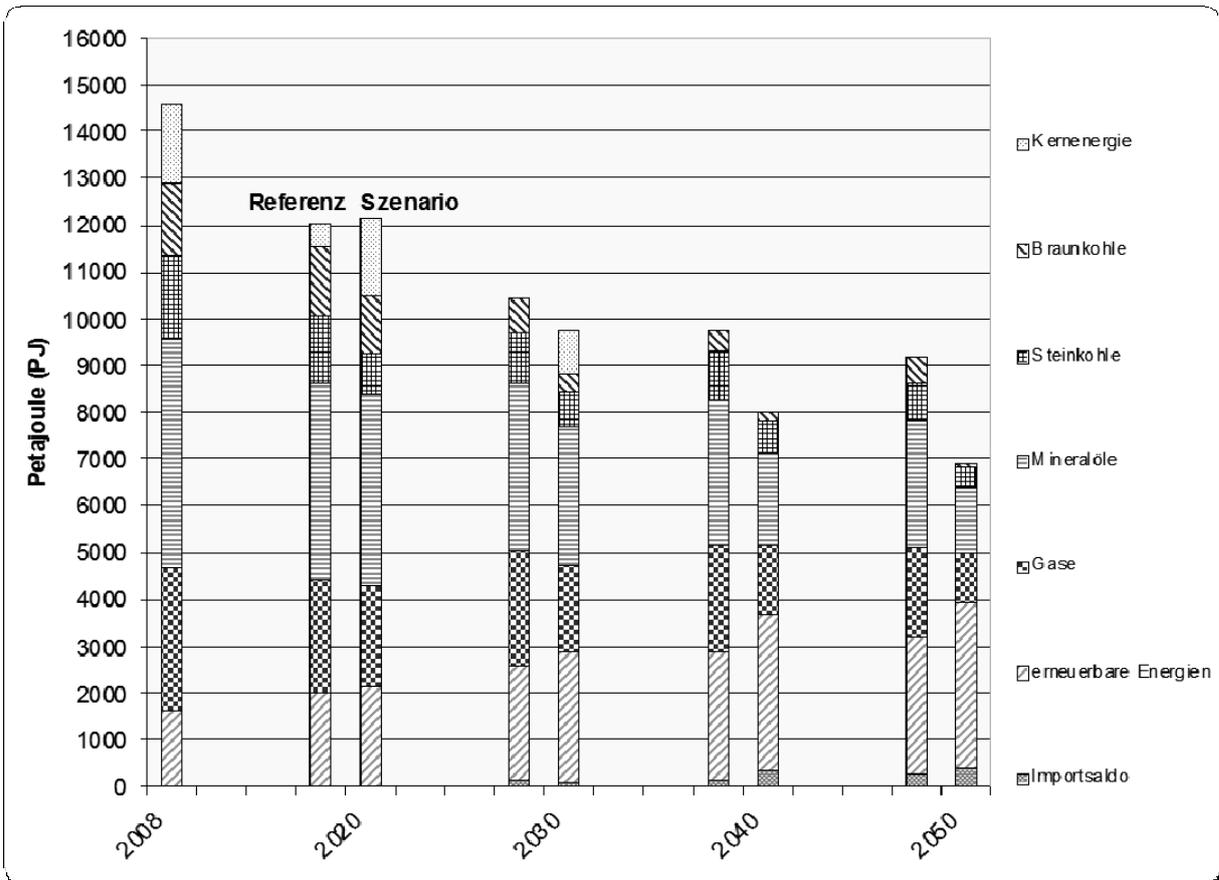


Abbildung 1: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs für die Referenz und Szenario IIA. [Eigene Darstellung nach Tabelle Ü1 und Ü2 der Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung vom August 2010]

4 Von den Energieszenarien zum Energiekonzept

Unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Ergebnisse der Energieszenarien und auf der Basis ihrer Ziele hat die Bundesregierung im September 2010 ein Energiekonzept vorgelegt. Darin wird aufgezeigt, was in allen wichtigen Handlungsfeldern getan werden muss, um eine wirtschaftliche, sichere und umweltschonende Energieversorgung für Wirtschaft und Verbraucher in Deutschland sicherzustellen.

Das Energiekonzept enthält u. a. einen Entwicklungspfad für verschiedene energie- und klimapolitische Ziele. Bei diesem Pfad ist eine Punktlandung nicht realisierbar. Das wäre mit den erwartbaren vielfältigen wirtschaftlichen und technischen Entwicklungen auch nicht zu vereinbaren. Vielmehr gibt der Entwicklungspfad allgemein und in den verschiedenen Sektoren Auskunft darüber, ob im Verlauf der tatsächlichen Entwicklung die langfristigen Zielsetzungen generell erreicht werden können.

Tabelle 1: Energie- und klimapolitische Ziele aus dem Energiekonzept der Bundesregierung

| | Heute | Ziele | | | |
|---|--------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 2009 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Absenkung der Treibhausgasemissionen (gegenüber 1990) | -27 % | -40 % | -55 % | -70 % | -80 % bis -95 % |
| Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch | 10,4 % | 18 % | 30 % | 45 % | 60 % |
| Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung | 16,3 % | 35 % | 50 % | 65 % | 80 % |
| Primärenergieverbrauch (gegenüber 2008) | | -20 % | | | -50 % |
| Stromverbrauch (gegenüber 2008) | | -10 % | | | -25 % |
| Energieverbrauch Verkehr (EEV gegenüber 2005) | | -10 % | | | -40 % |

Bei keiner Annahme zu Preis- oder Technologieentwicklung über einen Zeitraum von 40 Jahren kann davon ausgegangen werden, dass diese auch tatsächlich so eintreten wird. Jegliche vergleichbare Untersuchung ist mit derartigen Unsicherheiten behaftet. Für heutige Ziele und Pläne kann im Zeitverlauf eine grundlegende Revision erforderlich werden. Denn, „je planmäßiger die Menschen vorgehen, desto wirksamer vermag sie der Zufall zu treffen“ [Dürrenmatt]. Dennoch sind Szenarienstudien sinn-

voll – sie zeigen mögliche Pfade auf und machen Voraussetzungen und Handlungsbedarf deutlich.

Disclaimer: Dieser Artikel gibt die persönliche Meinung des Autors wieder.

Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2010, *Energiekonzept für eine umwelt schonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung – 28.September 2010*, abrufbar unter <<http://www.bmwi.de>>.

Schlesinger, M, Lindenberger, D, Lutz, C et al. 2010, *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung -Projekt Nr. 10/12*, für das Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (ewi) und Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung (gws).

Zitiert nach Friedrich Dürrenmatt, Die Physiker

Energy [R]evolution Scenarios Development, Experiences and Suggestions

Sven Teske

Renewable Energy Director, Greenpeace International, Große Elbstrasse 39, 22767 Hamburg, Germany, E-mail: Sven.Teske@greenpeace.de, Phone: +49 - 171-87 87 552

1 Status Quo: How did Greenpeace use energy scenarios in recent years and how has the work evolved? What are the experiences?

1.1 The early days of Greenpeace energy scenarios

Greenpeace works with energy scenarios since the early 1990s. The first global energy scenario was published 1993; “The fossil fuels free future” scenario which was done by the Stockholm Environment Institute (SEI). While this model was rather simple, Greenpeace developed further scenarios in the following years. Between 1994 and 2004, Greenpeace offices in over 20 countries developed energy scenarios for countries and/or regions. However there was a growing need for a standardization as all those scenarios could not be compared to each other.

Greenpeace used those energy scenarios to identify a critical pathway towards a fossil and nuclear energy phase out. Those scenarios were produced to both get a clearer idea what needs to be done for internal purposes as well as for the communication to a wider audience. While the environmental movement of the 1970s and 1980s focused on highlighting the problem, it became an integral part of the work by Greenpeace in the 1990th to show the way out of environmental destruction. “Solutions campaigning” requires clear and easy to understand blueprints what needs to be done to solve a problem in order to get heard by policy makers. Therefore energy scenarios became a centre piece of work for Greenpeace. The “Energy [R]evolution” series started in 2005 and have been ground breaking work – not only – for the Greenpeace climate and energy work, as it was possible to show for the first time how to achieve a

series of different political targets. A much stronger coordination within different environmental targets – such as nuclear phase out, sustainable agriculture, ocean and forest conservation was necessary in order to identify the deployment of other energy sources such as biomass or offshore wind.

1.2 Five years of energy [R]evolution scenarios – five years of development: 2005 – 2010

Since Greenpeace published the first Energy [R]evolution scenario in May 2005 (covering the EU-25 countries) during a seven month boat trip from Poland all the way down to Egypt, the project has developed significantly. That very first Energy [R]evolution scenario was launched on board the ship with the support of former EREC Policy Director Oliver Schäfer. This was the beginning of a long-lasting and fruitful collaboration between Greenpeace International and the European Renewable Energy Council. The German Space Agency's Institute for Technical Thermodynamics, under the leadership of Dr. Wolfram Krewitt, was the scientific research institute behind all the analyses which supports the scenario. Between 2005 and 2009 these three very different stakeholders managed to put together over 30 scenarios for countries from all continents of the world and published two editions of the Global Energy [R]evolution. It has since become a well-respected blueprint for progress towards an alternative energy future. The work was translated into more than 15 different languages, including Chinese, Japanese, Arabic, Hebrew, Spanish, Thai and Russian.

The concept of the Energy [R]evolution scenario has been under constant development from the beginning. Now, for example, we are able to calculate the employment effects in parallel with the scenario development. Also the program MESAP/PlaNet was developed by the software company seven2one, providing many features to make the project more sophisticated. For the 2010 edition we developed a specific standard report tool which provides us with a “ready to print” executive summary for each region or country. This allows our calculations to interact between all the world regions, resulting in the global scenario opening up like a cascade. All these new developments enabled us to provide ever improving quality, faster development times

and more user friendly outputs. Over the past few years an experienced team of 20 scientists from all regions of the world has been formed in order to review the regional and/or country specific scenarios and to make sure that they are appropriate to the specific geographical area.

In some cases the Energy [R]evolution scenarios were the first long term energy scenario ever produced for a particular country, for example the Turkish scenario published in 2009. Since the first Global Energy [R]evolution scenario was published in January 2007, we organised side events at every single UNFCCC climate conference, countless energy conferences and panel debates. Over 200 presentations in more than 30 languages always had one message in common: “The Energy Revolution is possible; it is needed and will pay for itself in benefits for future generations!” Many high level meetings took place, for example on 15th July 2009, when the Chilean President Michelle Bachelet attended our launch event for the Energy [R]evolution in Chile. The Energy [R]evolution work is a cornerstone of the Greenpeace climate and energy work worldwide and we would like to thank all the stakeholders who have been involved. Unfortunately, in October 2009, Dr. Wolfram Krewitt from DLR passed away far too early and left a huge gap for everybody. His energy and dedication helped to make the project a true success story. Arthouros Zervos and Christine Lins from EREC have been involved in this work from the very beginning and Sven Teske from Greenpeace International has led the project since its first beginnings in late 2004. The well received layout of all the Energy [R]evolution series was produced – also from the very beginning – by Tania Dunster and Jens Christiansen from “onehemisphere” in Sweden, and with enormous passion, especially in the final phase when the reports went to press.

Finally, all the Global Energy [R]evolution scenarios were published in a number of scientific and peer review journals such as “Energy Policy” and Springer’s “Energy Efficiency” and were quoted in over 100 books about renewable energy.

The box below provides a selection of milestones of the progress of the Energy [R]evolution story between 2005 and June 2010.

Box 1: Selection of published Energy [R]evolution Scenarios 2005 – 2010

| | |
|---------------------------|--|
| June 2005 | First Energy [R]evolution scenario for EU-25 presented in Luxembourg for members of the EU's Environmental Council. |
| July – August 2005 | National Energy [R]evolution scenarios for France, Poland and Hungary launched during an "Energy [R]evolution" boat trip with a sailing vessel across Europe (Poland to Egypt via Rhine, Danube, Black Sea and Mediterranean Sea). |
| January 2007 | First Global Energy [R]evolution Scenario published parallel in Brussels and Berlin |
| April 2007 | Launch of the Turkish translation of the Global scenario. |
| July 2007 | Launch of Futu[r]e Investment – an analysis of the needed global investment pathway for the Energy [R]evolution scenarios. |
| November 2007 | Launch of the Energy [R]evolution for Indonesia in Jakarta/Indonesia. |
| January 2008 | Launch of the Energy [R]evolution for New Zealand in Wellington/NZ. |
| March 2008 | Launch of the Energy [R]evolution for Brazil in Rio de Janeiro/Brazil. |
| March 2008 | Launch of the Energy [R]evolution for China in Beijing/China. |
| June 2008 | Launch of the Energy [R]evolution for Japan in Aoi Mori & Tokyo/Japan. |
| June 2008 | Launch of the Energy [R]evolution for Australia in Canberra/Australia . |
| August 2008 | Launch of the Energy [R]evolution for the Philippines in Manila/Philippines. |
| August 2008 | Launch of the Energy [R]evolution for Mexico in Mexico City/Mexico. |
| October 2008 | Launch of the second edition of the Global Energy [R]evolution Report. |
| December 2008 | Launch of the Energy [R]evolution for the EU-27 in Brussels/Belgium. |
| December 2008 | Launch of a concept for specific feed-in tariff mechanism to implement the Global Energy [R]evolution Report in developing countries at a COP13 side event in Poznan/Poland. |
| March 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for the USA in Washington/USA. |
| March 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for India in Delhi/India. |
| April 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for Russia in Moscow/Russia. |
| May 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for Canada in Ottawa/Canada. |
| June 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for Greece in Athens/Greece. |
| June 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for Italy in Rome/Italy. |
| July 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for Chile in Santiago/Chile. |
| July 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for Argentina in Buenos Aires/Argentina. |

| | |
|-----------------------|---|
| September 2009 | Launch of the first detailed job analysis “Working for the Climate” – based on the global Energy [R]evolution report in Sydney/Australia. |
| October 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for South Africa in Johannesburg/SA. |
| November 2009 | Launch of the Energy [R]evolution for Turkey in Istanbul/Turkey |
| November 2009 | Launch of “Renewable 24/7” a detailed analysis for the needed grid infrastructure in order to implement the Energy [R]evolution for Europe with 90 % renewable power in Berlin/Germany. |
| June 2010 | Launch of the third edition of the Global Energy [R]evolution Report. |
| October 2010 | Publication in “Energy Efficiency” by Springer. |

2 The third edition of the Energy [R]evolution Scenario

Between the first launch of the Energy [R]evolution scenario in January 2007 and the third edition in June 2010, this work evolved and many experiences we made with the first two editions lead to several changes and editions. The main differences between the 1st and the 3rd editions are the following:

- All regional scenarios are now published in one book rather than in 10 different reports like in the first edition
- The investment pathway of the power sector was outlined
- Fuel cost savings were added
- Needed production capacities for renewable energy technologies in the power sector were added
- Employment impact of the scenarios was added
- An advanced Energy [R]evolution was added as a reaction to the debate in climate science that the CO₂ reduction of the basic Energy [R]evolution might not be enough to stay below 2°C
- New policy mechanisms were developed in order to provide examples how to implement renewable energy technologies

2.1 Executive summary of Energy [R]evolution 2010

This third edition of the Energy [R]evolution is even more ambitious and visionary than the previous two editions. The report demonstrates how the world can get from where we are now to where we need to be in terms of phasing out fossil fuels, cutting CO₂ while ensuring energy security. This phase-out of fossil fuels offers substantial benefits such as independence from world market fossil fuel prices as well as the creation of millions of new green jobs. It also means providing energy to the two billion people currently without power. Our future and the future of the planet is rooted in the investment in people and local communities in terms of installing and maintaining renewable energy sources, rather than further subsidising the dirty fossil fuels which are inherently finite. The following executive summary outlines in brief a practical blueprint of how to make this a reality.

2.2 Environmental challenge

The threat of climate change, caused by rising global temperatures, is the most significant environmental challenge facing the world at the beginning of the 21st century. It has major implications for the world's social and economic stability, its natural resources and in particular, the way we produce our energy.

The Copenhagen Accord, agreed at the climate change summit in December 2009, has the stated aim of keeping the increase in global temperatures to below 2°C, and then considering a 1.5°C limit by 2015. However, the national emissions reduction pledges submitted by various countries to the United Nations coordinating body, the UNFCCC, in the first half of 2010 are likely to lead to a world with global emissions of between 47.9 and 53.6 gigatonnes of carbon dioxide equivalents per year by 2020. This is about 10-20 % higher than today's levels. In the worst case, the Copenhagen Accord pledges could even permit emission allowances to exceed a 'business as usual' projection [Rogelj et al. 2010]. In order to avoid the most catastrophic impacts of climate change, the global temperature increase must be kept as far below 2°C as possible. This is still possible, but time is running out. To stay within this limit, global

greenhouse gas emissions will need to peak by 2015 and decline rapidly after that, reaching as close to zero as possible by the middle of the 21st century.

2.3 A safe level of warming?

Keeping the global temperature increase to 2°C is often referred to as a ‘safe level’ of warming, but this does not reflect the reality of the latest science. This shows that a warming of 2°C above pre-industrial levels would pose unacceptable risks to many of the world’s key natural and human systems [Hare 2009]. Even with a 1.5°C warming, increases in drought, heatwaves and floods, along with other adverse impacts such as increased water stress for up to 1.7 billion people, wildfire frequency and flood risks, are projected in many regions. Neither does staying below 2°C rule out large-scale disasters such as melting ice sheets. Partial de-glaciation of the Greenland ice sheet, and possibly the West Antarctic ice sheet, could even occur from additional warming within a range of 0.8-3.8°C above current levels [Smith et al. 2008]. If rising temperatures are to be kept within acceptable limits, then we need to significantly reduce our greenhouse gas emissions. This makes both environmental and economic sense. The main greenhouse gas is carbon dioxide (CO₂) produced by using fossil fuels for energy and transport.

2.4 Climate change and security of supply

Spurred by recent rapidly fluctuating oil prices, the issue of security of supply – both in terms of access to supplies and financial stability – is now at the top of the energy policy agenda. One reason for these price fluctuations is the fact that supplies of all proven resources of fossil fuels – oil, gas and coal – are becoming scarcer and more expensive to produce. So-called ‘non-conventional’ resources such as shale oil have even in some cases become economic, with devastating consequences for the local environment. What is certain is that the days of ‘cheap oil and gas’ are coming to an end. Uranium, the fuel for nuclear power, is also a finite resource. By contrast, the reserves of renewable energy that are technically accessible globally are large enough to provide about six times more power than the world currently consumes – forever. Renewable energy technologies vary widely in their technical and economic maturity,

but there are a range of sources which offer increasingly attractive options. These include wind, biomass, photovoltaics, solar thermal, geothermal, ocean and hydroelectric power. Their common feature is that they produce little or no greenhouse gases, and rely on virtually inexhaustible natural elements for their 'fuel'. Some of these technologies are already competitive. The wind power industry, for example, continued its explosive growth in the face of a global recession and a financial crisis in 2008 and 2009 and is a testament to the inherent attractiveness of renewable technology. Last year (2009) Bloomberg New Energy Finance reported the total level of annual investment in clean energy as \$145 billion, only a 6.5 % drop from the record previous year. The global wind industry defied the economic downturn and saw its annual market grow by 41.5 % over 2008, and total global wind power capacity increase by 31.7 % to 158 GW at the end of 2009 [Sawyer & Zervos (eds.) 2010]. More grid-connected solar PV capacity was added worldwide than in the boom year of 2008.

And the economics of renewables will further improve as they develop technically, as the price of fossil fuels continues to rise and as their saving of carbon dioxide emissions is given a monetary value. At the same time there is enormous potential for reducing our consumption of energy, and still continuing to provide the same level of energy services. This study details a series of energy efficiency measures which together can substantially reduce demand across industry, homes, business and services. Against these positive attractions, nuclear energy is a relatively minor industry with major problems. The average age of operating commercial nuclear reactors is 23 years, so more power stations are being shut down than started. In 2008, world nuclear production fell by 2 % compared to 2006, and the number of operating reactors as of January 2010 was 436, eight less than at the historical peak of 2002. Although nuclear power produces little carbon dioxide, there are multiple threats to people and the environment from its operations. These include the risks and environmental damage from uranium mining, processing and transport, the risk of nuclear weapons proliferation, the unsolved problem of nuclear waste and the potential hazard of a serious accident. The nuclear option is therefore discounted in this analysis.

2.5 The Energy [R]evolution

The climate change imperative demands nothing short of an energy revolution, a transformation that has already started as renewable energy markets continue to grow. In the first global edition of the Energy [R]evolution, published in January 2007, we projected a globally installed renewable capacity of 156 GW by 2010. At the end of 2009, 158 GW were installed. More needs to be done, however. At the core of this revolution will be a change in the way that energy is produced, distributed and consumed.

The five key principles behind this shift will be to:

- Implement renewable solutions, especially through decentralised energy systems
- Respect the natural limits of the environment
- Phase out dirty, unsustainable energy sources
- Create greater equity in the use of resources
- Decouple economic growth from the consumption of fossil fuels

Decentralised energy systems, where power and heat are produced close to the point of final use, will avoid the current waste of energy during conversion and distribution. Investments in ‘climate infrastructure’ such as smart interactive grids, as well as super grids to transport large quantities of offshore wind and concentrating solar power, are essential. Building up clusters of renewable micro grids, especially for people living in remote areas, will be a central tool in providing sustainable electricity to the almost two billion people around the world for whom access to electricity is presently denied.

2.6 Greenhouse development rights

But although the Energy [R]evolution envisages a clear technological pathway, it is only likely to be turned into reality if its corresponding investment costs are shared fairly under some kind of global climate regime. To demonstrate one such possibility, we have utilised the Greenhouse Development Rights framework, designed by EcoEquity and the Stockholm Environment Institute, as a way of evening up the unequal ability of different countries to respond to the climate crisis in their energy policies.

The Greenhouse Development Rights (GDR) framework calculates national shares of global greenhouse gas obligations based on a combination of responsibility (contribution to climate change) and capacity (ability to pay). Crucially, GDRs take inequality within countries into account and calculate national obligations on the basis of the estimated capacity and responsibility of individuals. Individuals with incomes below a ‘development threshold’ – specified in the default case as \$7,500 per capita annual income, PPP adjusted – are exempted from climate-related obligations. Individuals with incomes above that level are expected to contribute to the costs of global climate policy in proportion to their capacity (amount of income over the threshold) and responsibility (cumulative CO₂ emissions).

The result of these calculations is that rich countries like the United States of America, which are also responsible for a large proportion of global greenhouse gas emissions, will contribute much more towards the costs of implementing global climate policies, such as increasing the proportion of renewables, than a country like India. Based on a ‘Responsibility and Capacity Indicator’, the USA, accounting for 36.8 % of the world’s responsibility for climate change, will in turn be responsible for funding 36.3 % of the required global emissions reductions.

The GDR framework therefore represents a good mechanism for helping developing countries to leapfrog into a sustainable energy supply, with the help of industrialised countries, while maintaining economic growth and the need to satisfy their growing energy needs. Greenpeace has taken this concept on board as a means of achieving equity within the climate debate and as a practical solution to kick starting the renewable energy market in developing countries.

2.7 Methodology and assumptions

Three scenarios up to the year 2050 are outlined in this report: a Reference scenario, an Energy [R]evolution scenario with a target to reduce energy related CO₂ emissions by 50 % from their 1990 levels and an advanced Energy [R]evolution version which envisages a fall of more than 80 % in CO₂ by 2050.

The *Reference Scenario* is based on the reference scenario in the International Energy Agency's 2009 World Energy Outlook (WEO 2009) analysis, extrapolated forward from 2030. Compared to the previous (2007) IEA projections, WEO 2009 assumes a slightly lower average annual growth rate of world Gross Domestic Product (GDP) of 3.1 %, instead of 3.6 %, over the period 2007-2030. At the same time, it expects final energy consumption in 2030 to be 6 % lower than in the WEO 2007 report. China and India are expected to grow faster than other regions, followed by the Other Developing Asia group of countries, Africa and the Transition Economies (mainly the former Soviet Union). The OECD share of global purchasing power parity (PPP) adjusted GDP will decrease from 55 % in 2007 to 29 % by 2050.

The *Energy [R]evolution Scenario* has a key target for the reduction of worldwide carbon dioxide emissions down to a level of around 10 Gigatonnes per year by 2050. A second objective is the global phasing out of nuclear energy. To achieve these goals the scenario is characterised by significant efforts to fully exploit the large potential for energy efficiency. At the same time, all cost-effective renewable energy sources are used for heat and electricity generation, as well as the production of bio fuels. The general framework parameters for population and GDP growth remain unchanged from the Reference scenario.

The *Advanced Energy [R]evolution Scenario* takes a much more radical approach to the climate crisis facing the world. In order to pull the emergency brake on global emissions it therefore assumes much shorter technical lifetimes for coal-fired power plants – 20 years instead of 40 years. This reduces global CO₂ emissions even faster and takes the latest evidence of greater climate sensitivity into account. To fill the resulting gap, the annual growth rates of renewable energy sources, especially solar

photovoltaic, wind and concentrating solar power plants, have therefore been increased. Apart from that, the advanced scenario takes on board all the general framework parameters of population and economic growth from the basic version, as well as most of the energy efficiency roadmap. In the transport sector, however, there is 15 to 20 % lower final energy demand until 2050 due to a combination of simply less driving and instead increase use of public transport and a faster uptake of efficient combustion vehicles and – after 2025 – a larger share of electric vehicles. Within the heating sector there is a faster expansion of CHP in the industry sector, more electricity for process heat and a faster growth of solar and geothermal heating systems. Combined with a larger share of electric drives in the transport sector, this results in a higher overall demand for power. Even so, the overall global electricity demand in the advanced Energy [R]evolution scenario is still lower than in the Reference scenario. In the advanced scenario the latest market development projections of the renewable industry have been calculated for all sectors.

The speedier uptake of electric and hydrogen vehicles, combined with the faster implementation of smart grids and expanding super grids (about ten years ahead of the basic version) allows a higher share of fluctuating renewable power generation (photovoltaic and wind). The threshold of a 40 % proportion of renewables in global primary energy supply will therefore be passed just after 2030 (also ten years ahead). By contrast, the quantities of biomass and large hydro power remain the same in both Energy [R]evolution scenarios, for sustainability reasons.

2.8 Towards a renewable future

Today, renewable energy sources account for 13 % of the world's primary energy demand. Biomass, which is mostly used in the heat sector, is the main source. The share of renewable energies for electricity generation is 18 %, while their contribution to heat supply is around 24 %, to a large extent accounted for by traditional uses such as collected firewood. About 80 % of the primary energy supply today still comes from fossil fuels. Both Energy [R]evolution scenarios describe development pathways which turn the present situation into a sustainable energy supply, with the advanced version achieving the urgently needed CO₂ reduction target more than a decade earlier than the basic scenario. The following summary shows the results of the advanced

Energy [R]evolution scenario, which will be achieved through the following measures:

- Exploitation of existing large energy efficiency potentials will ensure that final energy demand increases only slightly – from the current 305,095 PJ/a (2007) to 340,933 PJ/a in 2050, compared to 531,485 PJ/a in the Reference scenario. This dramatic reduction is a crucial prerequisite for achieving a significant share of renewable energy sources in the overall energy supply system, compensating for the phasing out of nuclear energy and reducing the consumption of fossil fuels.
- More electric drives are used in the transport sector and hydrogen produced by electrolysis from excess renewable electricity plays a much bigger role in the advanced than in the basic scenario. After 2020, the final energy share of electric vehicles on the road increases to 4 % and by 2050 to over 50 %. More public transport systems also use electricity, as well as there being a greater shift in transporting freight from road to rail.
- The increased use of combined heat and power generation (CHP) also improves the supply system's energy conversion efficiency, increasingly using natural gas and biomass. In the long term, the decreasing demand for heat and the large potential for producing heat directly from renewable energy sources limits the further expansion of CHP.
- The electricity sector will be the pioneer of renewable energy utilisation. By 2050, around 95 % of electricity will be produced from renewable sources. A capacity of 14,045 GW will produce 43,922 TWh/a renewable electricity in 2050. A significant share of the fluctuating power generation from wind and solar photovoltaic will be used to supply electricity to vehicle batteries and produce hydrogen as a secondary fuel in transport and industry. By using load management strategies, excess electricity generation will be reduced and more balancing power made available.
- In the heat supply sector, the contribution of renewables will increase to 91 % by 2050. Fossil fuels will be increasingly replaced by more efficient modern technologies, in particular biomass, solar collectors and geothermal.

Geothermal heat pumps and, in the world's sunbelt regions, concentrating solar power will play a growing part in industrial heat production.

- In the transport sector the existing large efficiency potentials will be exploited by a modal shift from road to rail and by using much lighter and smaller vehicles. As biomass is mainly committed to stationary applications, the production of bio fuels is limited by the availability of sustainable raw materials. Electric vehicles, powered by renewable energy sources, will play an increasingly important role from 2020 onwards.
- By 2050, 80 % of primary energy demand will be covered by renewable energy sources. To achieve an economically attractive growth of renewable energy sources, a balanced and timely mobilisation of all technologies is of great importance. Such mobilisation depends on technical potentials, actual costs, cost reduction potentials and technical maturity. Climate infrastructure, such as district heating systems, smart grids and super grids for renewable power generation, as well as more R&D into storage technologies for electricity are all vital if this scenario is to be turned into reality. The successful implementation of smart grids is vital for the advanced Energy [R]evolution from 2020 onwards. It is also important to highlight that in the advanced Energy [R]evolution scenario the majority of remaining coal power plants – which will be replaced 20 years before the end of their technical lifetime – are in China and India. This means that in practice all coal power plants built between 2005 and 2020 will be replaced by renewable energy sources from 2040 onwards. To support the building of capacity in developing countries, significant new public financing, especially from industrialised countries, will be needed. It is vital that specific funding mechanisms such as the “Greenhouse Development Rights” (GDR) and “Feed-in tariff” schemes (see chapter 2) are developed under the international climate negotiations that can assist the transfer of financial support to climate change mitigation, including technology transfer.

2.9 Future costs and Future investments

Renewable energy will initially cost more to implement than existing fuels. The slightly higher electricity generation costs under the advanced Energy [R]evolution scenario will be compensated for, however, by reduced demand for fuels in other sectors such as heating and transport. Assuming average costs of 3 cents/kWh for implementing energy efficiency measures, the additional cost for electricity supply under the advanced Energy [R]evolution scenario will amount to a maximum of \$31 billion/a in 2020. These additional costs, which represent society's investment in an environmentally benign, safe and economic energy supply, continue to decrease after 2020. By 2050 the annual costs of electricity supply will be \$2,700 billion/a below those in the Reference scenario.

It is assumed that average crude oil prices will increase from \$97 per barrel in 2008 to \$130 per barrel in 2020, and continue to rise to \$150 per barrel in 2050. Natural gas import prices are expected to increase by a factor of four between 2008 and 2050, while coal prices will continue to rise, reaching \$172 per tonne in 2050. A CO₂ 'price adder' is applied, which rises from \$20 per tonne of CO₂ in 2020 to \$50 per tonne in 2050.

Future Investment

It would require \$17.9 trillion in global investment until 2030 for the advanced Energy [R]evolution scenario to become reality – approximately 60 % higher than in the Reference scenario (\$11.2 trillion). Under the Reference version, the levels of investment in renewable energy and fossil fuels are almost equal – about \$5 trillion each – up to 2030. Under the advanced scenario, however, the world shifts about 80 % of investment towards renewables; by 2030 the fossil fuel share of power sector investment would be focused mainly on combined heat and power and efficient gas-fired power plants. The average annual investment in the power sector under the advanced Energy [R]evolution scenario between 2007 and 2030 would be approximately \$782 billion. Because renewable energy has no fuel costs, however, the fuel cost savings in the advanced Energy [R]evolution scenario reach a total of \$6.5 trillion, or \$282 billion per year until 2030 and a total of \$41.5 trillion, or an average of \$964 billion per year until 2050.

2.10 Future global employment

Worldwide, we would see more direct jobs created in the energy sector if we shifted to either of the Energy [R]evolution scenarios.

- By 2015 global power supply sector jobs in the Energy [R]evolution scenario are estimated to reach about 11.1 million, 3.1 million more than in the Reference scenario. The advanced version will lead to 12.5 million jobs by 2015.
- By 2020 over 6.5 million jobs in the renewables sector would be created due to a much faster uptake of renewables, three-times more than today. The advanced version will lead to about one million jobs more than the basic Energy [R]evolution, due to a much faster uptake of renewables.
- By 2030 the Energy [R]evolution scenario achieves about 10.6 million jobs, about two million more than the Reference scenario.
- Approximately 2 million new jobs are created between 2020 and 2030, twice as much as in the Reference case. The advanced scenario will lead to 12 million jobs, which are 8.5 million in the renewables sector alone. Without this fast growth in the renewable sector global power jobs will be a mere 2.4 million. Thus by implementing the E[R] there will be 3.2 million or over 33 % more jobs by 2030 in the global power supply sector.

2.11 Development of CO₂ emissions

While CO₂ emissions worldwide will increase by more than 60 % under the Reference scenario up to 2050, and are thus far removed from a sustainable development path, under the advanced Energy [R]evolution scenario they will decrease from 28,400 million tonnes in 2007 (including international bunkers) to 3,700 in 2050, 82 % below 1990 levels. Annual per capita emissions will drop from 4.1 tonnes/capita to 0.4 t/capita. In spite of the phasing out of nuclear energy and a growing electricity demand, CO₂ emissions will decrease enormously in the electricity sector. In the long run efficiency gains and the increased use of renewable electric vehicles, as well as a sharp expansion in public transport, will even reduce CO₂ emissions in the transport

sector. With a share of 42 % of total emissions in 2050, the transport sector will reduce significantly but remain the largest source of CO₂ emissions – followed by industry and power generation.

2.12 Policy changes

To make the Energy [R]evolution real and to avoid dangerous climate change, Greenpeace and EREC demand that the following policies and actions are implemented in the energy sector:

- Phase out all subsidies for fossil fuels and nuclear energy.
- Internalise the external (social and environmental) costs of energy production through ‘cap and trade’ emissions trading.
- Mandate strict efficiency standards for all energy consuming appliances, buildings and vehicles.
- Establish legally binding targets for renewable energy and combined heat and power generation.
- Reform the electricity markets by guaranteeing priority access to the grid for renewable power generators.
- Provide defined and stable returns for investors, for example by feed-in tariff programmes.
- Implement better labelling and disclosure mechanisms to provide more environmental product information.
- Increase research and development budgets for renewable energy and energy efficiency.

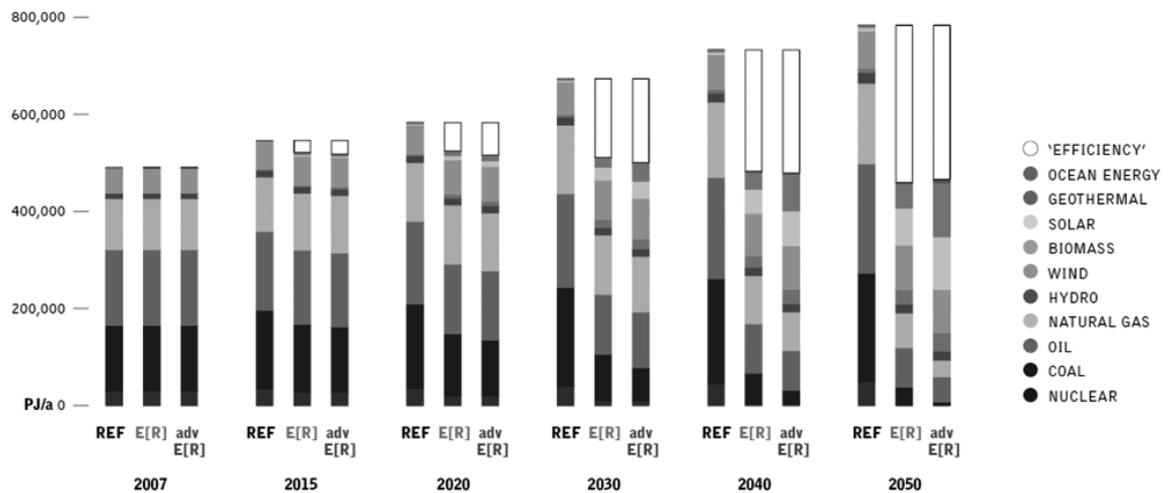


Figure 1: global development of primary energy consumption under the three scenarios (efficiency = reduction compared to the reference scenario)

3 Knowledge gaps and Outlook

A major challenge within the scenario work is the availability of coherent statistical data, especially for developing countries. Besides that, a different breakdown by sectors e.g. geothermal heat pumps are sometimes under “heating/cooling” and in other scenarios under “power” or regions e.g. OECD Europe and EU-27 makes it difficult to compare scenarios with each other. Large methodology differences in “top-down” and “bottom-up” models can make it even problematic to identify if parameters are assumed or if they are results of the model.

International standardization of statistical data is needed to get to comprehensive global, regional and national energy scenarios. A global database which can be accessed from all scientific institutions would be very beneficial for scenario modellers. The latest data for technologies – both in terms of the current market and technical details, latest research results for technical potentials as well as current and future cost would make scenarios more coherent and informative for policy makers.

Last but not least the different regions used e.g. from IEA and IPCC are challenging and a global standardization would help.

Future Projects: Greenpeace would welcome an international scientific project which would merge “top-down” and “bottom-up” energy models into more detailed energy simulation scenarios which includes weather data of the past decades in order to calculate possible grid expansion and/or storage needs as well as a country-specific breakdown. Scenarios for Megacities would link energy scenarios with regional energy project developments.

A 200 country scenario with a standard reporting system across all sectors would lead to a more detailed cost calculation and socioeconomic implications. Last but not least the needed resources e.g. steel, copper and rare elements for an entire energy scenario would add a new dimension to this debate.

4 Needed qualifications and competences

Besides the usual qualifications for scenario development, it would be beneficial for the scenario work to have experts in “real” energy project development and financing. For the needed infrastructure it would be beneficial to have electrical engineers in the team, as well as meteorologists for simulation of fluctuating renewable energy sources. The demand side projection should include as many experts from within the industry (car manufacturer, white goods, etc.) and architecture for the building demand side.

From my point of view there are the following steps in energy scenario development – for each step experts with practical experiences are needed:

- Model architecture: to choose the model closest to the “real” energy supply system – in technical terms
- Financial flows: to include the financial flows based on the current financial systems
- Political framework: to identify mechanisms to change current energy systems and research interaction between step 1 to 3.

- Demand side: to include all sectors (power, heating/cooling, transport and industry) detailed knowledge about the efficiency potentials is needed from experts with practical experiences.
- Supply side: to best reflect the technologies currently available on the market and to get a sense which technology will have a realistic chance to enter a mass market.
- Infrastructure: to add more information about the needed infrastructure e.g. grid or district heating pipelines in the computer model.
- Meteorology: to be able to optimise energy technology mixes and potential system conflicts. Detailed meteorology data will clarify potential demand curves and possible generation profiles.
- Communication. To be able to communicate the results of the scenario to different audiences such as policy maker, investors and the general public.

Literature

- Rogelj, J, Nabel, J, Chen, C, Hare, W, Markmann, K, Meinshausen, M, Schaeffer, M, Macey, K & Höhne, N 2010, "Copenhagen accord pledges are paltry", *Nature*, vol. 464, pp.1126-1128.
- Hare, WL 2009, "A Safe Landing for the Climate", In *State of the World*, Worldwatch Institute.
- Smith, JB, Schneider, SH, Oppenheimer, M, Yohe, GW, Hare, W, Mastrandrea MD, Patwardhan, A, Burton, I, Corfee-Morlot, J, Magadza, CHD, Fussel, HM, Pittock, AB, Rahman, A, Suarez, A & van Ypersele, JP 2008, "Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "reasons for concern"", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Published online before print February 26, 2009, doi: 10.1073/pnas.0812355106 PNAS February 26, 2009.
- Sawyer, S & Zervos, A (eds.) 2010, *Global Wind 2009 Report*, GWEC, March 2010.

Schlussfolgerungen für Forschung und Doktoranden- ausbildung Ergebnisse der Workshops

Christian Dieckhoff

Karlsruher Institut für Technologie, Campus Nord, Institut für Technikfolgenabschätzung
und Systemanalyse (ITAS), 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland,
E-Mail: dieckhoff@kit.edu, Telefon: +49/ (0)721/ 608-26794

Während beider Workshops fanden anregende und sehr fruchtbare Diskussionen statt, die unter Einbeziehung der zuvor dokumentierten Beiträge zu Ergebnissen in zweierlei Hinsicht verdichtet werden: Neben dem großen Forschungsbedarf, der zu unterschiedlichen Teilfragen, aber auch zu übergreifenden Problemstellungen erkannt wurde, ist deutlich geworden, dass eine systematisierte Doktorandenausbildung in diesem Feld sowohl aus Sicht der Anbieter als auch aus Sicht der Nachfrager eine Lücke in der nationalen und internationalen Graduiertenausbildung schließen würde.

1 Forschungsbedarf

Die Diskussionen während der beiden Workshops bestätigten, dass die Betrachtung von Energieszenarien entlang ihres „Lebensweges“ eine fruchtbare Systematik darstellt, um das komplexe Themenfeld der Energieszenarien in seiner gesamten Breite systematisch zu erfassen. Wie im Folgenden geschildert wird, erlaubte es nicht nur die Identifikation von speziellen Einzelfragen, sondern gerade auch die Identifikation und Formulierung von Fragestellungen die nur beantwortet werden können, wenn mehrere Phasen dieses Lebensweges integrierend betrachtet werden. Der Unterscheidung von Konstruktion, Bewertung und Wirkung von Energieszenarien folgend ergeben sich hinsichtlich des Forschungsbedarfes drei Hauptlinien.

Aufbauend auf dem bereits existierenden „methodischen Werkzeugkasten“ bedarf es hinsichtlich der Konstruktion von Energieszenarien einer weit reichenden Weiterentwicklung, um erstens die technisch-ökonomischen Veränderungen im Energie-

system wie etwa die zunehmende Dezentralisierung der Erzeugungsstrukturen oder die wachsenden Anteile fluktuierender Erzeuger und die damit steigende Komplexität angemessen erfassen zu können (u. a. Schönfelder et al. in diesem Band). Gerade auch die quantitative Modellierung der Nachfrageseite wird in diesem Zusammenhang als entwicklungsbedürftig angesehen (Martin Wietschel et al. in diesem Band). Zweitens gilt es, die etablierten Methoden der Modellierung auf Mikro- und Makroebene sowie der Energieangebots- und Nachfrageseite zu integrieren, um komplexe Wechselwirkungen erfassen zu können (ebd.). Weitergehender Bedarf methodischer Entwicklung wird zum einen darin gesehen, den bisherigen Fokus auf energiebedingte Emissionen auf andere, ebenfalls gravierende Nebenfolgen der Bereitstellung von Energie – etwa die damit verbundene Land- und Wassernutzung – zu erweitern. Zum anderen wird angeregt, die Analyse des Energiesystems um die Berücksichtigung des Materialaufwandes für die Bereitstellung der Kraftwerkstechnologien selbst und die damit verbundenen Umweltwirkungen, beispielsweise durch die Einbeziehung von Lebenszyklusanalysen (LCA), zu ergänzen (Uwe Remme in diesem Band). Ebenfalls bezüglich der Konstruktion von Energieszenarien wird drittens ein erheblicher Bedarf an Methoden identifiziert, die es erlauben, auch qualitative Aspekte in die quantitative Analyse – etwa beim kritischen Schritt des Festlegens numerischer Annahmen – mit einbeziehen zu können (Wolfgang Weimer-Jehle und Hannah Kosow in diesem Band). Viertens wird schließlich ein erheblicher Bedarf darin gesehen, die kommunikative Funktion von Energieszenarien systematisch zu reflektieren, um insbesondere die Vermittlung der mit ihnen verbundenen Unsicherheiten und Geltungsgrenzen zu verbessern (u. a. Uwe Remme in diesem Band) – ein Gesichtspunkt, der nur als integrale Fragestellung unter Einbeziehung der tatsächlichen und intendierten Wirkung von Energieszenarien bearbeitet werden kann.

Während hinsichtlich der Konstruktion von Energieszenarien auf eine Fülle von etablierten Methoden aufgebaut werden kann, so ist der Forschungsbedarf hinsichtlich der Bewertung von Energieszenarien von grundlegenderer Art. Hier gilt es nicht nur, Verfahren für die Bewertung der Güte von Szenarien zu entwickeln. Vielmehr müssen zunächst einmal wissenschaftstheoretisch fundierte Kriterien bereitgestellt werden, um diese Bewertung methodisch gesichert durchführen zu können. Da sich die Güte sowohl auf die Konstruktion der Szenarien als auch auf ihre spätere Verwendung und

deren Folgen bezieht, handelt es sich bei der Frage der Bewertung um einen Aspekt, der nur unter Berücksichtigung des gesamten „Lebensweges“ angemessen bearbeitet werden kann (Armin Grunwald in diesem Band).

Ebenfalls ein grundlegend forschungsbedürftiger Aspekt ist die Wirkung von Energieszenarien in unterschiedlichen Rezeptionskontexten, von denen im vorliegenden Band eine ganze Reihe durch die Vertreter der Nachfrageseite exemplarisch vorgestellt wurden. Ihre systematische Untersuchung stellt zum einen eine eigenständige Forschungsfrage dar, die gerade dann dringend klärungsbedürftig ist, wenn Energieszenarien in demokratisch legitimierungspflichtigen Entscheidungsprozessen verwendet werden oder langfristig bindende Entscheidungen mit großem Kapitaleinsatz auf ihrer Grundlage getroffen werden (Armin Grunwald in diesem Band). Darüber hinaus ist die Beantwortung dieser Frage aber auch von zentraler Bedeutung für die Forschungsarbeit im Bereich der Konstruktion und Bewertung von Energieszenarien. Denn nur unter Kenntnis dessen, wie Energieszenarien tatsächlich interpretiert und verwendet werden, kann ihre Konstruktion und Bewertung angemessen weiterentwickelt werden. In der Diskussion zeichneten sich hier bereits erste unterscheidbare Verwendungsweisen von Energieszenarien ab, die einer weiteren systematischen Untersuchung bedürfen. Demnach werden Energieszenarien einerseits in der frühen Strategieentwicklung eingesetzt, andererseits aber auch zur Bewertung sehr konkreter Einzeloptionen, etwa bei Investitionsentscheidungen in Unternehmen. Auch hinsichtlich ihres kommunikativen Zweckes wurde, bezogen auf die jeweilige Organisation, eine eher nach außen gerichtete – im Fall der Politik auch legitimatorische – Funktion erkennbar, während andererseits eine eher nach innen gerichtete Funktion beschrieben wurde, indem den Energieszenarien etwa eine vermittelnde Rolle bei der internen Abstimmung, Begründung und Umsetzung strategischer und politischer Grundsatzhaltungen der Organisation zugesprochen wurde.

Ein zentraler Diskussionspunkt, der die Notwendigkeit der integrierten Betrachtungsweise besonders deutlich machte, ist der Umstand, dass Energieszenarien in manchen Fällen als deterministische Prognosen interpretiert werden (Uwe Remme in diesem Band). Es wurde deutlich, dass erst dann auf dieses Phänomen angemessen methodisch bei der Konstruktion der Szenarien reagiert werden kann, wenn die Bedingungen dieser (Fehl-)interpretation im jeweiligen Rezeptionskontext geklärt sind.

2 Lehren für die Lehre: Schlussfolgerungen für die Doktorandenausbildung

Neben der Systematisierung des Forschungsfeldes war ein weiteres Ziel der beiden hier dokumentierten Workshops, den inner- und außerwissenschaftlichen Bedarf an einer systematischen Doktorandenausbildung zu identifizieren und Möglichkeiten ihrer Umsetzung – insbesondere im Rahmen einer Graduiertenschule – zu diskutieren. Dem lag der Befund zugrunde, dass Energieszenarien auch in der Hochschullehre ein bisher nicht systematisch beachtetes Thema darstellen. Gerade eine strukturierte Doktorandenausbildung – etwa im Rahmen einer Graduiertenschule – wäre jedoch durch die Kombination der Forschungstätigkeit im Rahmen der individuellen Promotionsprojekte und der gezielten Kompetenz- und Wissensvermittlung in besonderer Weise geeignet, die umrissenen komplexen Fragestellungen angemessen zu bearbeiten. Während der Workshops bestätigten diejenigen Teilnehmer, die als Nachfrager Energieszenarien in ihren jeweiligen Entscheidungsprozessen nutzen, darüber hinaus den großen Bedarf an gut ausgebildeten Hochschulabsolventen für ihre jeweiligen Einsatzfelder. Die wichtigsten Erkenntnisse und Anregungen für die Doktorandenausbildung werden im Folgenden zusammengefasst:

Allem voran gelte es, die Einsicht, wonach wichtige Fragen im Themenfeld der Energieszenarien nur dann adäquat beantwortet werden können, wenn eine integrierende Perspektive auf Energieszenarien entlang ihres gesamten Lebensweges eingenommen wird, auch in der Ausgestaltung einer systematischen Doktorandenausbildung zu berücksichtigen. Die Teilnehmer der Workshops – gerade auch die Vertreter außerwissenschaftlicher Einrichtungen – betonten die zentrale Bedeutung der Vermittlung von Grundkenntnissen aus allen drei „Lebensphasen“ an alle Doktoranden eines solchen Programms. Nur so könne sichergestellt werden, dass Teilfragen im Rahmen der Promotionsprojekte im Gesamtzusammenhang der Thematik bearbeitet werden können.

Im Einzelnen wurde angeregt, allen Doktoranden die Grundlagen der Energiepolitik und -ökonomik sowie das Konzept der Nachhaltigkeit als übergreifendes Hintergrundwissen zu vermitteln. Aber auch speziellere methodische und theoretische Kenntnisse wie die Grundlagen der computergestützten Modellierung, der

Szenariomethodik und weiterer Methoden der Zukunftsforschung im Bereich der Konstruktion, die wissenschaftstheoretischen Grundlagen des rationalen Umgangs mit unsicherem Wissen im Bereich der Bewertung und Grundkenntnisse qualitativer und quantitativer Methoden der Sozialwissenschaften zur Analyse von Fragestellungen im Bereich der Wirkung, wurden als wichtige Lehrinhalte für alle Doktoranden angesehen. Darüber hinaus wurde die Notwendigkeit betont, das übergreifende Lehrprogramm durch Angebote zu ergänzen, die auf die speziellen Bedürfnisse der Doktoranden bei der Durchführung ihres individuellen Promotionsprojektes zugeschnitten sind.

Die Bearbeitung des Themenfeldes Energieszenarien im Rahmen einer Graduiertenschule ist damit vor allem dann Erfolg versprechend, wenn ein intensiver interdisziplinärer Austausch in der Lehre und während der Forschungsarbeit – etwa durch eine entsprechende Betreuung, die regelmäßige Durchführung von Forschungskolloquien und nicht zuletzt durch eine interdisziplinäre Besetzung der Promotionsstellen selbst – ermöglicht wird. Wie die vorherige Skizze des Curriculums zeigt, sind hierbei vor allem die Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften, die Technikfolgenabschätzung, die Philosophie sowie die Sozial- und Politikwissenschaften einzubinden. Es wurde außerdem gerade auf Seiten der Nachfrager der Vorschlag begrüßt, die Lehre durch praktische Module, etwa in Form von Praktika bei einschlägigen Einrichtungen der Nachfragerseite, zu ergänzen und insgesamt angeregt, die internationale Vernetzung eines solchen Forschungs- und Ausbildungsprogramms gezielt zu fördern. Insbesondere internationale Gastforschungsaufenthalte der Doktoranden, die gezielte Aufnahme ausländischer Studenten in das Programm und die Durchführung von Lehrveranstaltungen durch internationale Wissenschaftler wurden als besonders wertvoll angesehen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Teilnehmer der beiden Workshops die Bedeutung eines solchen Graduiertenprogramms nicht nur in der Ausbildung hoch qualifizierter, für den inner- und außerwissenschaftlichen Arbeitsmarkt sehr wertvoller Absolventen sahen, sondern seine Funktion gerade in dessen wissenschaftlicher Leistung durch die Erforschung dringender gesamtgesellschaftlich relevanter Fragestellungen erkannten. Man war sich einig, dass Energieszenarien in Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit zwar ein etabliertes und hilfreiches

Instrument darstellen, ihre Belastbarkeit und die Möglichkeiten ihrer methodisch gesicherten Verwendung als Entscheidungsgrundlage im Angesicht ihrer inhärenten Unsicherheiten jedoch als dringend klärungsbedürftig anzusehen sind.

Autorenverzeichnis

Dr.-Ing. Markus Blesl heads the group Energy System Modelling and Technology Analysis. He graduated in physics at the University of Stuttgart in 1995. Since 1995 he is member of the research team in the department of Energy Economics and Systems Analysis (ESA) at the IER. He received his PhD in 2002 from the University of Stuttgart on spatially highly resolved modelling local energy systems. Dr. Blesl coordinated numerous national and international projects in the field of CHP, energy system and electricity market modelling and analysis of energy policy measures and GHG abatement strategies.

Dipl.-Ing. Christian Dieckhoff, Jahrgang 1980, studierte Maschinenbau in der Vertiefungsrichtung Energie- und Umwelttechnik und im Begleitstudium Angewandte Kulturwissenschaften an der Universität Karlsruhe (TH). Er ist seit 2007 Doktorand am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Forschungszentrums Karlsruhe.

Dr. rer. pol. Ulrich Fahl, economist and optimisation expert, heads the Department 'Energy Economics and Systems Analysis' at the Institute of Energy Economics and the Rationale Use of Energy (IER) at the University of Stuttgart. He received his PhD in 1990 from the University of Stuttgart on a Decision Support System for energy economy and energy policy. Dr. Fahl is responsible for national and international research activities in the field of energy and electricity demand analysis, energy and electricity modelling, integrated resource planning, energy and transport issues, energy efficiency analysis, and energy and climate. He co-ordinated numerous national and international projects.

Prof. Dr. Wolf Fichtner, Jahrgang 1967, Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Universität Karlsruhe (TH); 1998 Promotion zum Dr. rer. pol.; 2004 Habilitation (venia legendi für das Fach "Betriebswirtschaftslehre"); 2005 bis 2008 Professor für

Energiewirtschaft an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus; seit 2008 Professor für Energiewirtschaft am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung (DFIU) und am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH).

Dr.-Ing. Sven Filter, Studium der Elektrotechnik und Promotion zur langfristigen Kraftwerkseinsatzoptimierung am Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen. Tätigkeiten in den Bereichen Stromhandel/Risikomanagement sowie Netz- und Kraftwerkstechnik. Ab 2005 als Analyst bei EnBW Trading GmbH u.a. mit Marktanalyse und Erstellung langfristiger Konzern-Planungsprämissen befasst, seit 2010 Projektleiter energiewirtschaftliches Portfoliomanagement bei EnBW Energie Baden-Württemberg AG.

Dipl.-Wirt.-Ing. Tobias Fleiter studierte „Energie- und Umweltmanagement“ an der Universität Flensburg und hat das Studium mit dem Titel Dipl.-Wirt.-Ing. erfolgreich abgeschlossen. Seit 2007 ist Tobias Fleiter als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung im Competence Center *Energiepolitik und Energiesysteme* tätig. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Modellierung der Energienachfrage sowie Fragestellungen zur Energieeffizienz in der Industrie aus technischer und ökonomischer Perspektive. In diesem Zeitraum absolvierte er einen Forschungsaufenthalt an der Universität Bordeaux sowie bei der Europäischen Kommission in der Generaldirektion Energie und Transport.

Dr. rer. pol. Aurélie Fleury, Studium des Energiewesens und der Verfahrenstechnik am Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, Frankreich; 1998-2001 Projekt-Ingenieur Thermostelect S.A., Schweiz; 2005 Promotion an der Universität Karlsruhe (TH) zum Thema "Eine Nachhaltigkeitsstrategie für den Energieversorgungssektor dargestellt am Beispiel der Stromversorgung in Frankreich"; seit 2005 Projektleiterin bei der Energie Baden-Württemberg AG (EnBW), Schwerpunkte: Energiewirtschaft und Marktumfeld, Analyse der langfristigen Entwicklung von Strommärkten.

Prof. Dr. rer. nat. Armin Grunwald, Studium von Physik, Mathematik und Philosophie. Berufstätigkeiten in der Industrie (Software Engineering, 1987-1991), im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (1991-1995) und als stellvertretender Direktor der Europäischen Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen (1996-1999). Seit 1999 Leiter des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse des Forschungszentrums Karlsruhe (ITAS). Seit 2002 auch Leiter des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). 2007 Berufung an die Universität Karlsruhe unter Beibehaltung der Leitungsfunktionen von ITAS und TAB. Sprecher des KIT-Schwerpunkts "Mensch und Technik". Sprecher des Helmholtz-Programms "Technologie, Innovation und Gesellschaft". Arbeitsgebiete: Theorie und Methodik der Technikfolgenabschätzung, Technikphilosophie, Technikethik, nachhaltige Entwicklung.

Dipl. Verwaltungswissenschaftler Christian Güthert, Studium der Verwaltungswissenschaften und Umweltsoziologie an der Universität Potsdam und der Humboldt-Universität Berlin. Ab 1999 Mitarbeiter der EnBW Energie Vertriebsgesellschaft mbh. Seit 2001 Referent im Bereich Wirtschaft und Politik, später im Bereich Regulierung und Ordnungsrahmen. Ab 2004 Projektleiter im Vorstandsbereich Operations/Optimierer, seit 2008 Konzernexperte Energiewirtschaft/Marktumfeld. Mitglied in der AG Emissionshandel beim BMU, Mitglied im Projektkreis Energie-wirtschaftliche Grundsatzfragen des VDEW (Erstellung der Studie 2030), sowie Mitgliedschaft in der Studiengruppe „Pathways to a climate friendly Europe“ des World Energy Councils.

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Simon Hirzel ist seit Mitte 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung im Competence Center Energiepolitik und Energiesysteme. Dort beschäftigt sich er mit Fragestellungen aus dem Themenfeld der Energieeffizienz, speziell im Bereich industrieller Querschnittstechnologien. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Energienachfragemodellierung und der Technologiebewertung. Bis Frühjahr 2008 studierte er Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Kaiserslautern mit der Fachrichtung

„Verfahrens- und Umwelttechnik“ mit Studienaufenthalten an der ENSGSI Nancy, Frankreich und der NTNU Trondheim, Norwegen.

Dr. Patrick Jochem, Jahrgang 1978, Studium der Volkswirtschaftslehre an den Universitäten Bayreuth, Mannheim und Heidelberg. 2009 Promotion zum Dr. rer. pol. in der Transportökonomie bei Prof. Dr. W. Rothengatter am Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (KIT-IWW) . Zwischen 2006 und 2008 Promotionsstipendiat der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) sowie Dozent an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg. Seit Ende 2009 Gruppenleiter am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung (DFIU) und am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (KIT-IIP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Dipl.-Soz.Wiss. Hannah Kosow studierte Sozialwissenschaften an der Universität Stuttgart und am Institut d'Etudes Politiques in Bordeaux. Nach ihrem deutsch-französischen Diplom 2007 arbeitete sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) in Berlin. Seit Dezember 2009 ist Hannah Kosow als Doktorandin am ZIRN. Im Rahmen des Exzellenz-Clusters „Simulation Technologies“ analysiert sie die politisch-gesellschaftlichen Rahmenannahmen von Umweltsimulationen mit Methoden der Szenariotechnik.

Dr. Wolfgang Langen ist Regierungsdirektor im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Referat Langfristige Energiepolitik. Nach Studium und Promotion im Fach Physik arbeitet er seit 1999 im Bundeswirtschaftsministerium in den Bereichen erneuerbare Energien und Informations- und Kommunikationstechnologie. Im Jahr 2007 ging er nach Paris zur Ständigen Vertretung der Bundesrepublik Deutschland bei der OECD. Seit 2008 befasst er sich im Bundeswirtschaftsministerium mit Energieprognosen, Energieszenarien und Energiestatistik.

Dr. Tobias Naegler hat Physik an den Universitäten Heidelberg und Gießen studiert. Die Promotion zum Dr. rer. nat. erfolgte am Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) in Saclay (Frankreich) und an der Universität Heidelberg zum Thema "Simulating bomb radiocarbon: Consequences for the global carbon cycle". Seit August 2009 ist Tobias Naegler wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung (STB) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart. Seine Arbeits- und Forschungsschwerpunkte sind die Energiesystemmodellierung und die Erstellung von nationalen und internationalen Energieszenarien.

Dipl.-Pol. Diana Nissler ist wissenschaftliche Angestellte am Umweltbundesamt. Sie arbeitet im Fachgebiet „Energiestrategien und –szenarien“ zu Fragen einer umweltgerechten Energieversorgung und beschäftigt sich zunehmend mit Möglichkeiten und Grenzen von Energieszenarien. Sie studierte Politikwissenschaften an der Freien Universität Berlin und absolvierte ein einjähriges internationales Studienprogramm „International Environmental Policy“ an der Universität Roskilde (Dänemark).

Dr. Uwe Remme is energy modeller in the Energy Technology Policy Division of the International Energy Agency (IEA). He has more than ten years experience in energy systems modelling and analysis. Prior to joining the IEA, he worked as researcher at the University of Stuttgart, Germany, on several national and international projects in the field of energy technology and policy assessment. He was also co-developer of the TIMES model within the ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme) Implementing Agreement of the IEA. Uwe Remme has studied chemical engineering at RWTH Aachen University, Germany, and Carnegie Mellon University, Pittsburgh, and holds a PhD degree in mechanical engineering from the University of Stuttgart.

Dipl.-Wi.-Ing. Martin Schönfelder, Jahrgang 1984, Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Universität Karlsruhe (TH); seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Lehr-

stuhl für Energiewirtschaft. Forschungsgebiete: Energiesystemmodellierung; Elektromobilität; Netzintegration erneuerbarer Energien und dezentraler Wandlungsanlagen.

Dipl.-Ing. Sven Teske is the Director of Greenpeace International's Renewable Energy Campaign. He graduated as Diploma Engineer in Wilhelmshaven, Germany and worked as a scientific adviser for the Greenpeace Germany (Energy Unit) from 1994, becoming the leading Renewable Energy Campaigner for Greenpeace Germany in 1995. He has been responsible for the development of numerous renewable energy campaigns. He was the founder of Greenpeace Energy – Germany's only cooperative in the power sector. From 2004 he has served as Director of the Renewable Energy Campaign for Greenpeace International in Amsterdam. He is the author of numerous studies in the field of renewable energy including the world energy scenario "Energy [R]evolution". From 2008 until 2011 he is serving as a lead author for the IPCC Special Report Renewables (SRREN)."

Dr. rer. nat. Franz Trieb arbeitet seit 1983 im Bereich erneuerbarer Energien, damals im Rahmen seines Ingenieurstudiums an der TU Clausthal. In seiner Dissertation an der Universität Oldenburg baute er ein autonomes Wasserstoff-Energiespeichersystem für Solar- und Windstrom auf. Anschließend führte er einen zweijährigen Postgraduierten Kurs zu erneuerbaren Energien an der Universität Tacna in Peru für die dortigen Professoren des Fachbereichs Physik durch. Seit 1994 arbeitet er in der Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung des Instituts für Technische Thermodynamik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit den Schwerpunkten solarthermische Kraftwerke, solare Energieressourcen und Ausbau-szenarien für erneuerbare Energien in Europa, dem Mittleren Osten und Nordafrika

Prof. Dr.-Ing. Alfred Voss was awarded a Dipl.-Eng. degree in Energy Engineering and a PhD (Dr.-Ing.) from the Technical University of Aachen in 1970 and 1973 respectively. From 1976 to 1977 he worked as a Researcher on the energy program at the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Laxenburg, Austria. He was appointed as project manager of the "Programme Group Systems

Research and Technological Development" (Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung) of the Nuclear Research Center in Jülich from 1977 until 1983, when he became Professor for Energy Economics and Energy Systems at the University of Stuttgart. In 1990 he became director of the Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER) at the University of Stuttgart.

Dr. Wolfgang Weimer-Jehle ist Physiker und stellvertretender Direktor des Interdisziplinären Forschungsschwerpunkts Risiko und Nachhaltige Technikentwicklung (ZIRN) an der Universität Stuttgart. Er forscht über die Interdependenzen zwischen Energie, Umwelt und Gesellschaft und über Methoden der qualitativen System- und Szenarioanalyse. In diesem Zusammenhang befasst er sich seit 15 Jahren mit der Verknüpfung von modellgestützten und qualitativen Szenarien in den Themenfeldern Energie und Nachhaltigkeit.

Prof. Dr. rer. pol. Martin Wietschel studierte an der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH) Wirtschaftsingenieurwesen. Nach einer leitenden Funktion bei der Firma Hewlett Packard folgte die Anstellung als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) der Universität Karlsruhe mit dem Abschluss der Promotion zum Dr. rer. pol. (mit Auszeichnung, 1995). Die daran anschließende Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am IIP führte zur Habilitation mit dem Abschluss der *venia legendi* für Betriebswirtschaftslehre der Universität Karlsruhe und der Ernennung zum Privatdozenten (2000). Er arbeitet seit 2002 als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter im Competence Center Energiepolitik und Energiesysteme des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung. Seit 2007 leitet er dort das Geschäftsfelds *Energiewirtschaft*. Seit 2005 hat er einen Lehrauftrag an der ETH Zürich und im Jahre 2008 wurde ihm eine außerplanmäßige Professur an der Universität Karlsruhe verliehen.

ISBN 978-3-86644-621-2

