

SCHRIFTENREIHE ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT

Analyse

Mai 2017

Das Energiesystem resilient gestalten

Szenarien – Handlungsspielräume – Zielkonflikte

Ortwin Renn (Hrsg.)

„Energiesysteme der Zukunft“ ist ein Projekt von:

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Impressum

Herausgeber

Prof. Dr. Ortwin Renn
Institute for Advanced Sustainability Studies e. V.
Berliner Str. 130, 14467 Potsdam
E-Mail: ortwin.renn@iass-potsdam.de

Autoren

Prof. Dr. Alexander M. Bradshaw
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-
Gesellschaft

Dr. Marion Dreyer
DIALOGIK

Prof. Dr. Arnim von Gleich
Universität Bremen

Prof. Dr. Stefan Gößling-Reisemann
Universität Bremen

Philipp Großkurth
RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung

Peter Hussinger
BayWa r.e. – renewable energy

Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff
OFFIS – Institut für Informatik

PD Dr. Eva Lermer
Ludwig-Maximilians Universität München

Prof. Dr. Reinhard Madlener
RWTH Aachen

Dr. Nils aus dem Moore
RWI – Leibniz-Institut für
Wirtschaftsforschung

Benjamin Scharte
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik
Ernst-Mach-Institut

Prof. Dr. Klaus Thoma
Fraunhofer-Institut für
Kurzzeitdynamik Ernst-Mach-Institut

Dr. Wolfgang Weimer-Jehle
Universität Stuttgart

Prof. Dr. Friedrich-Wilhelm Wellmer
Ehemals Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Geschäftsstelle München, Karolinenplatz 4, 80333 München | www.acatech.de

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | www.leopoldina.org

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | www.akademienunion.de

Empfohlene Zitierweise

Renn, Ortwin (Hrsg.): *Das Energiesystem resilient gestalten: Szenarien – Handlungsspielräume – Zielkonflikte* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017.

Redaktion

Julika Witte, acatech

Wissenschaftliche Koordination

Dr. Marion Dreyer, DIALOGIK, Dr. Achim Eberspächer, acatech

Produktionskoordination

Marie-Christin Höhne, acatech

Gestaltung und Satz

atelier Hauer + Dörfler, Berlin

Druck

Königsdruck, Berlin

ISBN: 978-3-9817048-7-7

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Gedruckt auf säurefreiem Papier, Printed in EC

Das Akademienprojekt

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet Stellungnahmen und Analysen zur Gestaltung der Energiewende. Stellungnahmen enthalten Handlungsoptionen für die Transformation des Energiesystems und werden nach externer Begutachtung vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet. Analysen sind Ergebnisberichte von Arbeitsgruppen. Die inhaltliche Verantwortung für Analysen liegt bei den Autoren. Sofern eine Analyse Bewertungen enthält, geben diese die persönliche Meinung der Autoren wieder.



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Vorwort

Im Februar 2014 sprengten Separatisten in der pakistanischen Provinz Belutschistan gleichzeitig drei wichtige Erdgasleitungen. Über einen Tag lang waren Millionen Menschen ohne Gas. 2010 reduzierte China die Exporte Seltener Erden um 40 Prozent – daraufhin verzehnfachten sich die Preise für Neodym, das unter anderem in Turbinen von Windrädern steckt. Und im November 2005 brachten Schneemassen zahlreiche Stromleitungen und Masten in Westdeutschland zum Einsturz. 250.000 Menschen fehlte mehrere Tage der Strom; der wirtschaftliche Schaden durch das „Münsterländer Schneechaos“ wird auf rund 100 Millionen Euro geschätzt.

Diese Beispiele zeigen: Es gibt eine Vielzahl von Ereignissen, die die Energieversorgung eines Landes und seiner Nachbarstaaten bedrohen. Das können Anschläge oder Wetterextreme sein. Genauso denkbar ist es, dass Deutschland zentrale Rohstoffe für die Energiewende fehlen, da insbesondere bestimmte Metalle vollständig importiert werden müssen. Unklare politische Rahmenbedingungen und falsche Investitionsanreize können die Energiewende ins Stocken bringen. Und schließlich kann die Bevölkerung den Umbau des Energiesystems nicht mehr unterstützen.

In der vorliegenden Analyse werden derartige Gefahren in narrativen Bedrohungsszenarien beschrieben und ausgewertet. Dabei geht diese Arbeit über Einzelereignisse hinaus und erklärt, wie sich zunächst kleinere Entwicklungen gegenseitig verstärken und dadurch verheerende Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben können.

Um derartige Bedrohungen abzuwehren, gilt es, mögliche Schwachstellen frühzeitig zu identifizieren und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Es ist die Aufgabe einer vorsorgenden Energiepolitik, das Versorgungssystem resilient zu gestalten. Das heißt, es muss in der Lage sein, auch unter Belastungen seine Funktionsfähigkeit zu bewahren und Energie bereitstellen zu können.

Die Arbeitsgruppe „Risiko und Resilienz“ des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ hat untersucht, welche Ereignisse und Entwicklungen Deutschlands Energieversorgung gefährden und wie diese bewältigt werden können. Dabei zeigen die AG-Mitglieder politische Gestaltungsspielräume auf, um die Energieversorgung frühzeitig gegen Gefahren zu wappnen, ohne andere energiepolitische Ziele wie Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit außer Acht zu lassen. Zielkonflikte sind dabei unvermeidbar. Hier sind die Entscheidungsträger gefordert, entsprechende Prioritäten zu setzen. Bei dieser Abwägung sollte Resilienz ein wichtiges Kriterium sein.



Prof. Dr. Ortwin Renn

Leiter der Arbeitsgruppe „Risiko und Resilienz“

Inhalt

	Abkürzungen	6
	Zusammenfassung.....	7
1	Einleitung	9
2	Resilienz: Hintergründe und Voraussetzungen.....	11
	2.1 Definition und Begriffsgeschichte.....	11
	2.2 Resilienz und die Ziele der Energiewende	13
	2.3 Kalkulierbare Risiken, „schwarze Schwäne“ und unterschätzte Bedrohungen.....	14
3	Bedrohungsszenarien	16
	3.1 Anschläge	17
	3.2 Wetterextreme	19
	3.3 Rohstoffverknappung Erdgas.....	21
	3.4 Rohstoffverknappung Metalle.....	23
	3.5 Governance-Versagen	26
	3.6 Akzeptanzentzug	28
4	Auswertung der Szenarien: Handlungsspielräume zur Resilienzförderung.....	30
	4.1 Interventionsspielräume Anschläge	30
	4.2 Interventionsspielräume Wetterextreme	32
	4.3 Interventionsspielräume Rohstoffverknappung Erdgas	35
	4.4 Interventionsspielräume Rohstoffverknappung Metalle.....	36
	4.5 Interventionsspielräume Governance-Versagen	38
	4.6 Interventionsspielräume Akzeptanzentzug	39

5	Zielkomplementarität und Zielkonflikte bei den Interventionen.....	41
5.1	Zielkomplementarität.....	41
5.2	Zielkonflikte.....	44
6	Interventionstypen zur Resilienzförderung	47
	Anhang	49
	Literatur.....	54
	Das Akademienprojekt.....	61

Abkürzungen

CO₂	Kohlenstoffdioxid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EHEC	Enterohämorrhagische Escherichia coli, Darminfekte auslösende Krankheitserreger
EIA	US Energy Information Administration, Amt für Energiestatistik im Energieministerium der Vereinigten Staaten
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
LNG	Liquid Natural Gas, Flüssiggas
PEM	Proton Exchange Membrane oder Polymer Electrolyte Membrane, Protonen-Austausch-Membran
PGM	Platingruppenmetalle
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell, Festoxid-Elektrolysezelle

Zusammenfassung

Die Energiewende ist kein Selbstläufer. So gut sie auch geplant und umgesetzt wird – ganz können Bedrohungen nie ausgeschlossen werden. Das gilt umso mehr, je unbekannter und unerwarteter diese Gefahren sind. Um die Energiewende dagegen zu wappnen, muss sie resilient gestaltet werden. **Resilienz** bezeichnet die Fähigkeit von Systemen, ihre Funktionsfähigkeit unter Stress und Belastungen aufrechtzuerhalten beziehungsweise kurzfristig wiederherzustellen.

Die vorliegende Analyse untersucht, was Resilienz aus interdisziplinärer Perspektive bedeutet. Sie lotet aus, welche Risiken Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft drohen, wenn die Energieversorgung nicht resilient genug ist. Zuletzt zeigt sie Wege, um die Energiewende vorausschauend, robust und lernfähig zu gestalten.

Kern dieser Analyse sind sechs narrative Bedrohungsszenarien. Sie sind keine Prognosen, sondern skizzieren, welche künftigen Entwicklungen möglich sind. *Möglich* bedeutet, dass die Szenarien erstens in sich schlüssig sind und zweitens mit dem heutigen Wissen übereinstimmen. Dabei wollen die Szenarien keineswegs alle vorstellbaren Bedrohungen beschreiben. Stattdessen dienen sie als exemplarische „Stresstests“ für die Energiewende, um zu zeigen, wo das System verwundbar ist.

Folgende Bedrohungsszenarien wurden durchgespielt:

1. Das Szenario **Anschläge** skizziert, wie terroristische Angriffe den Erfolg der Energiewende gefährden. Weil die Regierung zu stark auf Kostenreduktion und kurzfristige Effizienz gesetzt hat, wurde die Sicherheit vernachlässigt. Dadurch entstehen Einfallstore für Anschläge und Hackerangriffe.
2. Das Szenario **Wetterextreme** beschreibt, wie Stürme, Überschwemmungen oder auftauende Permafrostböden die Energieversorgung beeinträchtigen. Auch Hitzewellen können zu Stromausfällen führen. Das liegt in erster Linie daran, dass in ganz Europa Gas- und Kohlekraftwerke ausfallen, weil es an Kühlwasser fehlt.
3. Das Szenario **Rohstoffverknappung Erdgas** führt aus, wie internationale Entwicklungen auf dem Markt für Flüssiggas die Versorgungssicherheit in Deutschland gravierend beeinträchtigen. Der Auslöser dafür ist, dass die unkonventionelle Gewinnung von Erdgas („Fracking“) in den USA schlagartig zurückgeht. Das ist kritisch, weil Deutschland in einer Übergangsphase aus Klimaschutzgründen auf Erdgas anstelle von Kohle oder Erdöl setzt.

4. Das Szenario **Rohstoffverknappung Metalle** zeigt, wie politische Entscheidungen und lokale Proteste in Exportländern zu Versorgungsengpässen bei Platingruppenmetallen führen. Diese sind für die Energiewende essenziell, weil sie unter anderem für Brennstoffzellen und Elektrolyseure benötigt werden.
5. Das Szenario **Governance-Versagen** veranschaulicht, wie wechselnde Regierungen es versäumen, attraktive Rahmenbedingungen für Investoren zu schaffen. Weil notwendige Investitionen ausbleiben, genügt die Energieinfrastruktur nicht mehr den Ansprüchen.
6. Das Szenario **Akzeptanzentzug** zeigt, wie für sich vergleichsweise ungefährliche Ereignisse in der Summe dazu führen, dass die Bevölkerung die Energiewende nicht mehr unterstützt. Dazu zählt unter anderem, dass Bürgerbeteiligungsprozesse scheitern und aufgrund unausgereifter Software die Versorgung ausfällt.

Diese Bedrohungen lassen sich auf drei Arten bewältigen:

- Stressoren abbauen
- Verwundbarkeiten verringern
- negative Folgen bewältigen

Diese Ansätze schließen einander nicht aus, sondern bedingen sich gegenseitig. Nur in der Kombination führen sie zu einer erfolversprechenden Resilienzstrategie.

Die drei Ansätze werden für die skizzierten Bedrohungsszenarien durchgespielt, um Interventionen zu entwickeln. Solche Interventionen können einem bestimmten Ziel dienen: Das Sparen von Rohstoffen und Energie etwa verringert Abhängigkeiten und erhöht so die Versorgungssicherheit des Systems.

Gleichzeitig können entsprechende Interventionen dem Erreichen eines anderen Ziels im Weg stehen. Selbst Energieeffizienz hat ihre negativen Seiten: Sie kann die Auslastung von Kraftwerken verringern und damit die Kosten pro erzeugter Einheit Nutzenergie erhöhen.

Für alle Interventionen kann es sowohl Zielkonflikte als auch Zielkomplementaritäten geben. Es ist daher wichtig, diese bereits zu diskutieren, bevor eine Intervention zum Einsatz kommt. Das erfolgt in dieser Analyse nur exemplarisch. Der Fokus liegt dabei auf Komplementaritäten und Konflikten bei den Zielen Klima- und Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit, Versorgungssicherheit, Ressourcenschonung, Sozialverträglichkeit und Akzeptanz und europäische/globale Verantwortung. Zentraler Konflikt ist der zwischen Resilienz und kurzfristiger Effizienz: Zunächst einmal kosten Resilienzmaßnahmen Geld.

Auf Basis der Interventionen für die sechs Bedrohungsszenarien werden zuletzt zehn Interventionstypen identifiziert. In der Regel wird die Energiewende resilienter, wenn Vorsorgemaßnahmen ausgebaut und wirksamere Recyclingmethoden und Ersatzmöglichkeiten für Metalle entwickelt werden. Auch Redundanzen im System und zusätzliche Energiespeicher tragen dazu bei. Darüber hinaus wird die Versorgung resilienter, wenn die Vielfalt der Anlagentechnologien erhöht und unabhängige Versorgungseinheiten geschaffen werden, ohne die Bevölkerung stärker zu belasten. Zu einer wirksamen Resilienzstrategie gehören zuletzt ein systematisches Gefahrenmonitoring, Notfallvorkehrungen sowie Dialogangebote und partizipative Verfahren. All das ist die bestmögliche Versicherung, um die Energieversorgung sowohl resilient als auch umweltverträglich, sicher und bezahlbar zu gestalten.

1 Einleitung

Die deutsche Bundesregierung beschreibt die Umgestaltung des Energiesystems als zentralen Baustein einer nachhaltigen und stabilen Energieversorgung. Dies erfordert den Ausbau von erneuerbaren Energien, von Flexibilitätsoptionen wie Netzen und Speichern und eine effiziente Energienutzung.

In großen Teilen der deutschen Bevölkerung trifft die Energiewende auf breite Zustimmung.¹ Gleichzeitig wird deutlich, dass der Umbau des Energiesystems ein technisch, wirtschaftlich und gesellschaftlich komplexer Prozess ist, bei dem in vielerlei Hinsicht Neuland betreten wird. Wie sicher ist es, dass die deutsche Energiewende erfolgreich sein wird? Was fördert sie, woran kann sie scheitern? Wo können unvorhergesehene Ereignisse auf Schwachstellen im System treffen? Wie kann die Energiewende besser gegen Risiken gewappnet werden, die die Erreichung ihrer Primärziele – Klimaschutz und Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit² – gefährden können? Diese Fragen werden in Politik und Gesellschaft kontrovers diskutiert. Sie drehen sich häufig um naheliegende Szenarien wie datenschutzrechtliche Hindernisse bei der Einführung intelligenter Stromnetze (Smart Grids) oder durch schwankende Einspeisung von Wind- und Solarstrom ausgelöste Blackouts. Welchen Effekt jedoch hätten Ereignisse wie Wet-

terextreme und Rohstoffverknappungen oder eine Kombination aus unglücklichen Zufällen und Änderungen der Rahmenbedingungen? Kann auch dann eine dauerhafte Versorgung der Bevölkerung gewährleistet werden, ohne dass die Kosten explodieren? Lässt sich das Energiesystem so gestalten, dass es auch auf Ereignisse vorbereitet ist, an die wir heute noch gar nicht denken?

Diese Fragen werden im Folgenden diskutiert. In sechs verschiedenen Szenarien wird zunächst untersucht, wie das im Umbau befindliche Energiesystem auf überraschende, unwahrscheinliche und nicht einkalkulierte Bedrohungen reagiert. Daraus werden Interventionen abgeleitet, die das System robuster und anpassungsfähiger, das heißt *resilient(er)*, machen sollen – nicht nur für die beschriebenen Szenarien, sondern darüber hinaus. Entsprechende Maßnahmen werden in der Stellungnahme *Das Energiesystem resilient gestalten: Maßnahmen für eine robuste Versorgung*³ ausführlicher beschrieben. Sie baut auf der vorliegenden Analyse auf.

Der erfolgreiche Umbau des Energiesystems ist an zahlreiche Voraussetzungen und Bedingungen geknüpft. Damit die Energiewende gelingen kann, sind neben technischen Neuerungen geeignete politische Rahmenbedingungen, gesellschaftliche Akzeptanz sowie ein funktionierendes Zusammenwirken von innovativer Tech-

¹ Das legt eine neuere Umfrage des Instituts für Demoskopie Allensbach nahe. Sie zeigt, dass die Zustimmung zur Energiewende in Deutschland in der Bevölkerung bei rund 70 Prozent liegt (Losse 2014). Diese generelle Zustimmung bedeutet allerdings nicht, dass Einigkeit über einzelne Maßnahmen zur Erreichung der Energiewende herrscht (Renn 2015).

² Diese Ziele der Energiewende werden auch als Ziel-dreieck bezeichnet (BMWi/BMUB 2012; für die Ziele der Energiewende vgl. den Anhang).

³ acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1.

nik, institutionellen Steuerungsprozessen und menschlichem Verhalten erforderlich.⁴

Damit die Energiewende erfolgreich ist, müssen also zahlreiche Faktoren und die einzelnen Akteure und Elemente des Energiesystems zusammenwirken. Entsprechend viele Ereignisketten sind denkbar, die ihre Umsetzung bedrohen. Dies stellt besondere Anforderungen an das politische Risikomanagement. Es muss auch unwahrscheinliche und überraschende Ereignisse einplanen. Die vorliegende Analyse hat allerdings einen anderen Fokus als Risikomanagement, das versucht, bestimmte Risiken mit einer auf sie zugeschnittenen Strategie zu bewältigen. Resilienz setzt nicht bei den Belastungen, sondern am System an. Resilienzmaßnahmen sind daher umfassender und können auch dann wirken, wenn die Bedrohung weder quantifizierbar, noch vorher weder bekannt ist.

Die zentrale Frage dieser Untersuchung lautet: Wie kann die Energiewende so gestaltet werden, dass das Energiesystem auch bei unwahrscheinlichen Entwicklungen und Bedrohungen seine Funktionsfähigkeit aufrechterhält oder nach einer Störung schnell wiederherstellen kann? Gemeint ist damit: Das Energiesystem bleibt in der Lage, die Versorgung sicher, zu vertretbaren Preisen sowie umwelt- und klimagerecht bereitzustellen, wobei soziale Aspekte und internationale Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Dabei steht nicht der Erhalt des derzeitigen Systems im Mittelpunkt. Gegebenenfalls ist sogar ein radikaler Umbau

nötig, damit das Energiesystem auch bei Überraschungen und Extremereignissen noch funktionsfähig ist.

Um Möglichkeiten zur Resilienzförderung auszuloten, wurde für diese Analyse mit narrativen Szenarien gearbeitet. Es wurden sechs qualitative Bedrohungsszenarien erstellt, die auf Gefährdungen der Energiewende und ihrer Ziele zugeschnitten sind. Grundlegende Annahme dabei ist, dass Politik und Wirtschaft weiterhin an den Zielen der Energiewende festhalten. Der Zeithorizont der Szenarien reicht bis zum Jahr 2050. Die geografische Reichweite der Bedrohungsfaktoren ist global: Die Szenarien bilden problematische Ereignisse und Entwicklungen ab, die in Deutschland sowie in anderen Ländern stattfinden und Einfluss auf die Energieversorgung in Deutschland haben.

Die Bedrohungsszenarien dienen als Instrumente, um die komplexen Risiken der Energiewende besser zu verstehen und exemplarisch mögliche Schwachstellen beim Planen und Durchführen des Systemumbaus zu beleuchten. Sie liefern Hinweise auf mögliche unerwartete Bedrohungen und helfen dabei, Handlungsbedarfe und -spielräume zu identifizieren. Aus diesen werden verallgemeinerbare Strategien und Interventionen abgeleitet, um die Resilienz des Energiesystems zu steigern.⁵

Den Kern dieser Analyse bilden die narrativen Bedrohungsszenarien und daraus abgeleitete Möglichkeiten, diesen Gefahren wirkungsvoll zu begegnen (Kapitel 4 bis 7). In den nächsten beiden Kapiteln (2 bis 3) wird zunächst ein Überblick zum Konzept „Resilienz“ gegeben und anschließend die Technik der narrativen Szenarien erläutert.

4 Jüngere Forschung zur Energiewende zeigt, dass hier der Grundsatz gilt: „Technischer Wandel in der Energiewende – notwendig, aber nicht hinreichend“ (so der Titel von Grunwald 2014); einen Überblick über Hindernisse bei der Umsetzung der Energiewende bieten Gawel/Hansjürgens 2013. Auch die *Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung* hat betont, „dass die Energiewende nur mit einer gemeinsamen Anstrengung auf allen Ebenen der Politik, der Wirtschaft und der Gesellschaft gelingen wird“ (Ethik-Kommission 2011, S. 5. Die Ethik-Kommission wurde im Frühjahr 2011 von der Bundeskanzlerin Angela Merkel eingesetzt).

5 In der parallel veröffentlichten Stellungnahme *Das Energiesystem resilient gestalten: Maßnahmen für eine robuste Versorgung* werden die in Kapitel 4 und 6 der vorliegenden Analyse skizzierten Interventionen und Interventionstypen weiter ausgearbeitet.

2 Resilienz: Hintergründe und Voraussetzungen

2.1 Definition und Begriffsgeschichte

Resilienz ist die Fähigkeit eines Systems, seine Funktionsfähigkeit unter Belastungen aufrechtzuerhalten beziehungsweise kurzfristig wiederherzustellen.

Diese Definition baut auf dem Verständnis von Resilienz als Widerstandsfähigkeit eines Systems gegenüber starken Belastungen auf. Dafür müssen im System sowohl stabilisierende als auch dynamische Elemente vorhanden sein. Der Grad der erreichten Resilienz lässt sich aus der Fähigkeit ableiten, unter unsicheren und wechselnden Bedingungen keinen dauerhaften Verlust der Leistungsfähigkeit zu erleiden.⁶

Es gibt verschiedene Ansätze, diese Fähigkeit zu fördern. Dazu gehören sowohl „Prävention, Vorbereitung und Schutzmaßnahmen als auch adäquate Krisenreaktion und adaptives Lernen aus vergangenen Ereignissen“⁷. Für eine resiliente Gesellschaft spielt es keine Rolle, ob Bedrohungen und Verwundbarkeiten bekannt oder neu und unerwartet sind. Ihnen gegenüber kann sie proaktiv und reaktiv handeln. Entsprechend sind Prävention und Antizipation essenzielle Bestandteile von Resilienz.⁸ Resilienzstrategien

zielen darauf ab, die Funktionsfähigkeit technischer oder gesellschaftlicher Systeme zu erhalten, indem diese widerstands-, regenerations- und anpassungsfähiger gegenüber Bedrohungen gestaltet werden⁹ und gewährleistet wird, dass im Krisenfall improvisiert werden kann.¹⁰

In dieser Analyse liegt der Fokus auf eher unwahrscheinlichen, nicht einkalkulierten und überraschenden Bedrohungen. Kennzeichnend für Resilienzstrategien ist die Annahme, dass es Katastrophen und andere Gefahren gibt, die nicht vorhersehbar sind und daher auch nicht vollständig durch vorbeugende Maßnahmen ausgeschlossen werden können¹¹. Gerade bei komplexen Systemen wie dem Energiesystem muss damit gerechnet werden, dass es derartige Ereignisse geben wird. Es geht bei einer Resilienzstrategie daher immer auch um vorsorgendes Handeln unter Ungewissheit.

Ihr vorrangiges Ziel ist es, Krisen zu vermeiden, zum Beispiel in erdbebengefährdeten Ländern durch „erdbebensichere“ Kraftwerke, die außerdem auf unterschiedlichen Techniken basieren und dezentral aufgebaut werden. In anderen Fällen geht es um eine effektive Abwehr von Bedrohungen und Widerstandskraft im Krisenfall, beispielsweise durch Notfallpläne bei erdbebenbedingten Kraftwerkshavarien.

6 Die folgende Begriffsbestimmung soll dieses Grundverständnis näher erläutern: „[...] in general resilience is understood to mean the capacity to adapt to changing conditions without catastrophic loss of form or function“ (Park et al. 2013, S. 356). Der in dieser Analyse verfolgte Resilienzansatz würde allerdings einen Verlust der „Form“ akzeptieren, wenn dadurch die „Function“ erhalten bliebe.

7 acatech 2014, S. 6.

8 Scharte et al. 2014, S. 15.

9 Dies entspricht dem Verständnis von Resilienz als „holistischer, umfassender Problemlösungsansatz“ in Scharte et al. 2014, S. 15.

10 Gößling-Reisemann et al. 2013-2

11 Park et al. 2013, S. 360.

Resilienz – Ursprung und Verwendung des Begriffs

In den vergangenen vier Jahrzehnten hat sich der Begriff „Resilienz“ in der Wissenschaft etabliert.¹² Seine Verwendung reicht jedoch bis in die Antike zurück.¹³ Seit dem 17. Jahrhundert werden für „Widerstandsfähigkeit“ im Allgemeinen die englischen Wörter „Resilience“ und „Resiliency“ verwendet – teilweise synonym mit Wörtern wie „Ability to Recover“ (Fähigkeit zur Wiederherstellung), „Robustness“ (Robustheit/Widerstandskraft) und „Adaptability“ (Anpassungsfähigkeit). Im allgemeinen Verständnis von Resilienz spielen daher sowohl systemerhaltende als auch systemverändernde Mechanismen eine Rolle.

Erstmals als wissenschaftlicher Begriff wurde „Resilience“ in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts in der Werkstoffmechanik verwendet.¹⁴ Ab Mitte des 20. Jahrhunderts fand der Begriff „Resilience“ Eingang in die Psychologie,¹⁵ Anfang der 1970er-Jahre wurde er in die Systemökologie eingeführt¹⁶. Um die Jahrtausendwende wurde auch das deutsche Wort „Resilienz“ in den Duden aufgenommen. Inzwischen ist „Resilienz“/„Resilience“ ein weit verbreiteter, interdisziplinär eingesetzter Begriff, der in der Psychologie, Soziologie und Systemökologie sowie im Ingenieurwesen¹⁷ und in der Managementlehre verwendet wird¹⁸. Auch in der Risiko-, Sicherheits- und Nachhaltigkeitsforschung spielt er eine zunehmend bedeutende Rolle.¹⁹ Den unterschiedlichen Begriffsverwendungen in der gegenwärtigen Wissenschaftslandschaft²⁰ ist gemein, dass es sich bei Resilienz um die Widerstands- oder Bewältigungskraft von Individuen oder Systemen gegenüber ungewöhnlichen oder unerwarteten Belastungen handelt.

Die Verbreitung des Begriffs zeigt sich in der wachsenden Zahl von Veröffentlichungen, in denen Resilienz eine Rolle spielt. In der deutschsprachigen Literatur hat sich diese Zahl in den letzten 25 Jahren etwa verzehnfacht. In der englischsprachigen Literatur, in der der Begriff schon länger verwendet wird, hat sie sich in diesem Zeitraum mehr als verdoppelt.²¹ Vor allem zwischen 2004 und 2010 wurde der Begriff in der englischsprachigen Fachliteratur häufiger gebraucht, was auch im Kontext von Naturkatastrophen sowie von Menschen verursachten Krisen interpretiert werden muss²². Seither werden Themen wie Risiko, Ungewissheit, Verwundbarkeit, Krisen und Stressbewältigung immer häufiger mit dem Begriff Resilienz verknüpft.²³

12 Für die Genese des Begriffs vgl. McAslan 2010; Alexander 2013; Scharte et al. 2014; Bonß 2015.

13 Alexander 2013.

14 Alexander 2013; McAslan 2010; Mallet 1856.

15 Werner et al. 1971; Gabriel 2005.

16 Holling 1973; Gunderson et al. 2010.

17 Brenig et al. 2014; Scharte/Thoma 2016; Thoma et al. 2016.

18 Sheffi 2005; Palzkill/Schneidewind 2014.

19 Endreß/Maurer 2015-1; Bankoff 2003; IRGC 2005; Norris et al. 2008; Brand 2009; Brand et al. 2011; NRC 2012; Renn/Klinke 2015.

20 Für eine jüngere Systematisierung und Typisierung von Resilienz-Begriffsbestimmungen vgl. Koslowski/Longstaff 2015; vgl. auch Baggio et al. 2015; Bahadur et al. 2011; Martin-Breen/Anderies 2011.

21 Bonß 2015, S. 15.

22 Beispiele für Naturkatastrophen sind das Erdbeben im Indischen Ozean im Jahr 2004 und die Wirbelstürme Katrina und Rita im Golf von Mexiko im Jahr 2005; ein Beispiel für eine menschengemachte Krise ist die Immobilienkrise in den USA von 2008, die in eine globale Banken- und Finanzkrise mündete (Park et al. 2013, S. 357).

23 Endreß/Maurer 2015-2, S. 7.

Beides wird nicht nur auf der technischen, sondern auch auf der gesellschaftlichen Ebene bestimmt. Dies setzt wechselseitiges Lernen voraus: Lernen im Hinblick auf sich verändernde Umweltsituationen und Lernen aus Krisen. Entsprechende Maßnahmen können auf den Stuserhalt oder eine krisenresistentere Veränderung des betroffenen Systems abzielen. Denn sich ändernde Rahmenbedingungen und Krisen bieten auch Chancen für resilienzfördernde Systemveränderungen.

In der vorliegenden Analyse werden die folgenden Ansätze unterschieden, um Resilienz zu fördern: Abbau von Stressoren (als präventive Maßnahme); Verringerung der Verwundbarkeit des Systems (als Schutzmaßnahme durch den Abbau struktureller Schwachstellen) und Minderung negativer Konsequenzen (als Krisenreaktion und vorbereitende Schutzmaßnahme).

2.2 Resilienz und die Ziele der Energiewende

Es gibt bisher nur wenige Studien, die den Begriff „Resilienz“ explizit auf Energiesysteme anwenden.²⁴ Ein Beispiel ist die Studie *Building a Resilient UK Energy System*, die vom britischen Energieforschungszentrum (UK Energy Research Centre) durchgeführt und in der untersucht wurde, wie das britische Energiesystem resilienter gestaltet werden kann. Die Studie bezieht Resilienz auf Versorgungssicherheit und schließt dabei die Finanzierbarkeit der Stromversorgung für die Verbraucherinnen und Verbraucher (Preissicherheit) ein.²⁵ In der vorliegenden Analyse hingegen wird die Funktions-

fähigkeit des Energiesystems nicht nur durch die Verfügbarkeit von sicherer und bezahlbarer Energie definiert, sondern darüber hinaus durch Klima- und Umweltverträglichkeit.

Funktionsfähigkeit beinhaltet demnach, dass die Primärziele der Energiewende Klimaschutz und Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit konsequent verfolgt und umgesetzt werden. Gleichzeitig bedeutet Funktionsfähigkeit in dieser Analyse, dass die Energieversorgung ressourcenschonend, sozialverträglich und im Kontext einer europäischen und globalen Verantwortung erfolgt. Wie jüngere Forschung zeigt, ist Sozialverträglichkeit ein wesentlicher Faktor für eine erfolgreiche Energiewende, weil sie deren gesellschaftliche Akzeptanz mit bedingt.²⁶ Gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber energiepolitischen Maßnahmen kann keineswegs vorausgesetzt werden und ist auch nicht auf wahrgenommene Kostengünstigkeit zu reduzieren. Stattdessen basiert sie auf einer Summe von rationalen und emotionalen Entscheidungen. Dazu zählen unter anderem der Grad der regionalen Betroffenheit, die persönliche Identifikation mit technischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklungen und Wahrnehmungen der gerechten Verteilung von Nutzen und Risiko sowie von Lasten. Das deutsche Energiesystem ist nicht autark, sondern mit europäischen und internationalen Strukturen verflochten. Daher ist das Übernehmen globaler Verantwortung ein zentrales Kriterium eines stabilen Energiesystems.

24 Zu diesen Studien gehören Hughes 2015; Roege et al. 2014; Göbbling-Reisemann et al. 2013-2; Matzenberger 2013; UKERC 2011; vgl. auch den Essay Pflüger 2014.

25 UKERC 2011. Die Studie hat Wege untersucht, wie die Resilienz des britischen Energiesystems gegenüber externen Schocks, die das Gassystem schädigen, erhöht werden kann.

26 Vgl. Scheer et al. 2017, S. 90; Sonnberger/Ruddat 2016, S. 127–129.

Ein resilientes Energiesystem trägt zum Erreichen der übergeordneten Ziele einer nachhaltigen globalen Energiepolitik bei.²⁷ Es ist zu erwarten, dass bei der Gestaltung konkreter Maßnahmen zu ihrer Umsetzung und zur Steigerung von Resilienz Zielkonflikte unvermeidlich sind. Bei Zielkonflikten hängt es letztlich von der Einzelgewichtung der Ziele ab, inwiefern eine Gestaltungsoption als resilienzfördernd bezeichnet werden kann.²⁸

Die vorliegende Analyse geht davon aus, dass die Energiewende nur gelingen kann, wenn die wechselseitigen Beziehungen aller Einzelziele berücksichtigt werden. Die skizzierten Bedrohungsszenarien veranschaulichen, welche Folgen eintreten können, wenn diese Abhängigkeiten nicht ausreichend beachtet werden. Mögliche Zielkonflikte werden im Kapitel 5.2 zu den Interventionsspielräumen thematisiert.

2.3 Kalkulierbare Risiken, „schwarze Schwäne“ und unterschätzte Bedrohungen

Bisher haben sich Energieforschung und Energiepolitik überwiegend mit Risiken befasst, die bekannt, gut beschreibbar und als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß quantifizierbar sind. Meist können die Auswirkungen solcher Risiken entsprechend abgeschätzt werden. Zu ihnen gehören etwa der Ausfall technischer Systemkomponenten oder Schwankungen globaler Energiepreise.²⁹

Die Bedrohungen, die in dieser Analyse thematisiert werden, umfassen auch solche Risiken. Der Fokus liegt jedoch auf Belastungen, die weder mit einer rein technischen noch mit einer vorwiegend auf erwartbare Störungen fokussierten Risikoanalyse vollständig erfasst werden können. Schließlich wirken bei der Energiewende technische, organisatorische, verhaltenssteuernde, gesellschaftliche und politische Faktoren zusammen. Hinzu kommen Wetterextreme, die ebenfalls auf den Wandel des Energiesystems einwirken können. Die Faktoren beeinflussen sich zum Teil gegenseitig. In diesem Kontext, der stark durch die Dynamik der Energiewende geprägt ist, sind Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß möglicher Störungen schwierig oder auch gar nicht numerisch zu bestimmen.³⁰ Hierzu zählen auch Bedrohungen, die bislang unbekannt waren oder deren Eintrittswahrscheinlichkeit sehr gering ist. Angesichts dessen, wie komplex und dynamisch die Energiewende ist, muss damit gerechnet werden, dass derartige nichtlineare überraschende Entwicklungen und Ereignisse eintreten.³¹

Solche unbekannteren Bedrohungen und quantitativ unkalkulierbaren Risiken wurden bisher wenig diskutiert. In einer Ausschreibung betonte inzwischen aber das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dass auch das Risikopotenzial von unwahrscheinlichen und nicht zu erwartenden Ereignissen berücksichtigt

27 Vgl. Umbach 2015. Hier wird eine erläuternde Darstellung der Ziele und Unterziele der Energiewende und verschiedener Optionen von Zielpriorisierungen geboten. Eine Übersicht der politischen Ziele der Energiewende findet sich im ersten Abschnitt des Anhangs.

28 Das zeigt auch das folgende Zitat: „Ist es beispielsweise akzeptabel, dass eine Verbesserung der Verfügbarkeit von elektrischer Energie erkaufte wird durch höhere ökologische Kosten oder verringerte soziale Verträglichkeit der Erzeugungsmittel?“ (von Gleich et al. 2010, S. 33).

29 UKERC 2011, S. 11. Hier wird auf Bazilian/Roques 2008 verwiesen.

30 Das heißt, es ist ein hohes Maß an Unsicherheit gegeben. Unsicherheit wird hier verstanden als ein Stand des Risiko-Wissens, bei dem die Wahrscheinlichkeit von schädlichen Wirkungen oder die Wirkungen selbst nicht präzise beschrieben werden können (vgl. Renn 2008, S. 75–76). Im Wesentlichen lassen sich diese Schwierigkeiten beim Abschätzen und Bewerten von Risiken im Rahmen der Energiewende auf Wissensprobleme verschiedener Ebenen zurückführen (vgl. Gößling-Reisemann et al. 2013-2, S. 367–371).

31 Das heißt, es ist zu vermuten, dass ein gewisses Maß an „Ahnungslosigkeit“ (Nicht-Wissen) besteht, eine Schlüsselkomponente von „Unsicherheit“ (vgl. Renn 2008, S. 76).

werden muss, die es als „schwarze Schwäne“ bezeichnet.³² Dieser Begriff wird auch in dieser Analyse verwendet.

Für den Essayisten und Risikotheoretiker Nassim Taleb, der die „schwarzen Schwäne“ populär gemacht hat, ist deren zentrales Element, dass sie wirkmächtig und *für sich* betrachtet *sehr unwahrscheinlich* sind.³³ Allerdings sind so viele dieser Bedrohungen möglich, dass es *sehr wahrscheinlich* ist, dass *irgendeine davon* eintritt. Bei „schwarzen Schwänen“ handelt es sich um disruptive Vorfälle, die sich im Einzelfall nicht kalkulieren und prognostizieren lassen:

„Where we don't know what we don't know the prospect is raised of possible „black swans“. These challenges are not about calculable risk, but inherently unquantifiable surprises. Here again, to seek to assign single definite values for „risk“ are not just irrational but dangerous.“³⁴

Wichtigstes Merkmal der Bedrohungen, die in den Szenarien der vorliegenden Analyse skizziert werden, ist ihr Überraschungseffekt. Um „schwarze Schwäne“ in Talebs Sinn handelt es sich dabei jedoch nicht. Schließlich kann nichts mehr eine echte Überraschung sein, das einmal aufgeschrieben ist. Vielmehr kenn-

zeichnet die im Folgenden skizzierten Bedrohungen, dass sie wirkmächtig und zugleich unterschätzt sind. Ebenfalls angelehnt an Taleb lassen sie sich als „graue Schwäne“ bezeichnen.

Das Durchspielen dieser Bedrohungen dient als eine Art Stresstest: Er identifiziert mögliche Folgen der Belastungen und lotet aus, was gegen sie getan werden kann. Dabei wird darauf gesetzt, dass das Beseitigen erkannter Schwachstellen gegenüber „grauen Schwänen“ auch die Resilienz des Energiesystems gegenüber „schwarzen Schwänen“ erhöht. An dieser Stelle wechselt der Fokus wieder von den Bedrohungen auf das System, vom Risikomanagement zur Resilienz.

Indem mögliche Einfallstore für widrige Ereignisse identifiziert und entfernt werden, kann das Energiesystem er-tüchtigt werden, auch viele unterschätzte oder völlig unerwartete Ereignisse zu bewältigen. Aber auch bei Eintritt eines solchen Ereignisses und danach können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden, um problematische Folgen zu mildern. Kombiniert man sie sinnvoll, können die Energiewende und das Energiesystem resilient gegenüber fast allen Herausforderungen werden, die auf sie zukommen.

32 Begründet wird dies mit der großen Bedeutung der Energiewende für die deutsche Energieversorgung und die wirtschaftliche Entwicklung (DTAD 2014). In der Studie „Black Swans (Risiken) in der Energiewende“, die auf diese Ausschreibung erstellt wurde, ist dieser Begriff allerdings sehr weit gefasst. Darin werden „schwarze Schwäne“ zwar als unerwartete und überraschende Ereignisse definiert, die die Zielerreichung der Energiewende gefährden könnten. Im Folgenden werden aus 150 „schwarzen Schwänen“, die in einer Literaturanalyse und in Experteninterviews identifiziert wurden, 15 „Risikocluster“ gebildet und erörtert. Viele dieser Ereignisse – etwa steigende Energiepreise – wären allerdings weder unerwartet noch überraschend (Prognos/ewi/GWS 2016).

33 Taleb 2010.

34 Stirling 2015, S. 13; in freier Übersetzung: „Wo wir nicht wissen, was wir nicht wissen, stellt sich die Frage nach möglichen ‚schwarzen Schwänen‘. Dabei geht es nicht um kalkulierbare Risiken, sondern um grundsätzlich nicht-quantifizierbare Überraschungen. Versuche, diese Herausforderungen als numerisches Risiko zu bestimmen, sind nicht nur irrational, sondern gefährlich.“

3 Bedrohungsszenarien

In der energiepolitischen Debatte kommen vor allem quantifizierende Szenarien zum Einsatz.³⁵ Das setzt voraus, dass die wesentlichen Faktoren des Szenarios numerisch beschrieben und in Rechenmodellen verarbeitet werden können.³⁶ In der vorliegenden Analyse wird der qualitative Ansatz der **narrativen Szenarien** angewendet. Schließlich sind viele der darin skizzierten Bedrohungsfaktoren und ihre Wirkungen auf das Energiesystem nicht valide quantifizierbar.³⁷ Die Szenarien beschreiben Bedrohungen, die aus der Kombination unterschiedlicher Entwicklungen entstehen und die Versorgungssicherheit oder die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende beeinflussen. Für die meisten dieser Entwicklungen sind keine quantifizierbaren Kausalbeziehungen bekannt. Die Anwendung des qualitativ-narrativen Szenarios in dieser Analyse bedeutet jedoch nicht, dass quantitative Informationen ausgeschlossen wurden. Wo es sinnvoll und möglich war, wurden Zahlenangaben integriert.

Quantitative³⁸ wie narrative³⁹ Szenarien basieren auf folgender Annahme: „In einem Szenario wird ausgedrückt, dass ein bestimmter zukünftiger Zustand oder

eine zukünftige Entwicklung für möglich gehalten wird.“⁴⁰ *Möglich* heißt, dass der dargestellte Zustand oder die dargestellte Entwicklung „konsistent mit dem aktuell verfügbaren und relevanten Wissen“⁴¹ ist. Die Bedrohungsszenarien sind keine Voraussagen. Sie werfen vielmehr Schlaglichter auf einen Ausschnitt möglicher Entwicklungen und Ereignisse, die den Umbau des Energiesystems stören können.

Narrative Szenarien werden unter anderem eingesetzt, um politische Handlungsspielräume oder die Folgen alternativer politischer Maßnahmen aufzuzeigen.⁴² Beispiele sind Studien, die von dem Unternehmen Shell seit den 1970er-Jahren zur Unterstützung von Managemententscheidungen durchgeführt werden,⁴³ Studien im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes zur nachhaltigen Vermeidung von Rohstoffkonflikten⁴⁴ und ein Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen zum Sicherheitsrisiko Klimawandel, in dem narrative Szenarien zur Identifikation von Sicherheitsrisiken entwickelt wurden.⁴⁵

Die Auswahl der Szenarien in dieser Analyse ist nicht repräsentativ. Schließlich ist die Anzahl von Szenarien zur Abbildung möglicher Bedrohungslagen prinzipiell unbegrenzt und nicht vollständig er-

35 Beispiele dafür sind die Studien BMUB 2014, BMWi 2014-3 oder UBA 2010, für die eine Reihe von Szenarien zur deutschen Energieversorgung modelliert wurde.

36 Einen guten Überblick über die unterschiedlichen Ansätze, um Szenarien zu erstellen, liefern zum Beispiel van Notten et al. 2003 und Kosow/Gaßner 2008.

37 Qualitative Szenarien sind grundsätzlich eine sinnvolle Alternative, wenn relevante Entwicklungen besonders unsicher oder Kausalbeziehungen unbekannt sind, die für eine formale Modellierung nötig sind (vgl. acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-1, S. 10).

38 Vgl. Kosow/Gaßner 2008.

39 Erläuterungen zu narrativen Szenarien als Verfahren der Szenario-Methodik finden sich im zweiten Abschnitt des Anhangs.

40 Dieckhoff et al. 2014, S. 10.

41 Dieckhoff et al. 2014, S. 10; vgl. zum Begriff „möglich“ auch die Beschreibung von qualitativen Szenarien durch das deutsche Umweltbundesamt (UBA 2013).

42 Hauck/Priess 2013, S. 397.

43 Wack 1985; Mietzner/Reger 2005.

44 Rüttinger/Feil 2010; Feil/Rüttinger 2011.

45 WBGU 2008.

Szenarien	Anschläge	Wetterextreme	Rohstoff- verknappung Erdgas	Rohstoff- verknappung Metalle	Governance- Versagen	Akzeptanz- entzug
Bedrohliche Entwicklung	Angriffe auf das deutsche Energiesystem, die zu erheblichen Ausfällen wichtiger Komponenten führen	Extreme Wetterereignisse, die zu erheblichen Ausfällen wichtiger Komponenten des Energiesystems führen	Ungünstige internationale Entwicklungen, die Deutschlands Versorgung mit Rohstoffen gefährden	Ungünstige internationale Entwicklungen, die Deutschlands Versorgung mit Rohstoffen gefährden	Ungünstige nationale Rahmenbedingungen, die zu unzureichenden privaten Investitionen führen	Ungünstige Ereignisse auf nationaler Ebene, die dazu führen, dass die deutsche Bevölkerung die Energiewende ablehnt

Tabelle 1: Die Szenarien als Beispiele für bedrohliche Entwicklungen

fassbar. Für diese Untersuchung wurden die Szenarien daher nach Gesichtspunkten ausgewählt, die in einem interdisziplinären Austausch mit Expertinnen und Experten⁴⁶ identifiziert wurden.

Beschreibungen in den Szenarien, die sich auf Gegenwart oder Vergangenheit beziehen (Stand 2016), stellen *reale* Ereignisse und Entwicklungen dar. Beschreibungen, die sich auf die Zukunft beziehen, beschreiben *fiktive*, aber Stand des heutigen Wissens *mögliche* zukünftige Ereignisse und Entwicklungen.⁴⁷ Die Ausgangssituation der Szenarien liegt in der Gegenwart oder in der Zukunft. Sie ist jeweils so bestimmt, dass sie die abgebildete bedrohliche Entwicklung plausibler macht.

3.1 Anschläge

Ausgangssituation

Die Energiewende ist bis 2035 weit vorangeschritten. In Deutschland wurde das Energiesystem stark dezentralisiert, es gibt eine Vielzahl an kleinen Erzeugern. Nach den Atomkraftwerken wurden auch alle Kohlekraftwerke abgeschaltet. Die meiste Energie liefern nun Wind und Sonne, wobei die Windräder vor allem im

Norden, die Photovoltaikanlagen vor allem im Süden stehen. Die notwendigen Speichertechnologien sind inzwischen zwar verfügbar; trotzdem gibt es nur wenige stationäre Energiespeicher, weil Batterien immer noch sehr teuer sind. Der – teils auf See – in Windparks produzierte Strom wird mithilfe zweier Höchstspannungsleitungen von Norddeutschland in die süddeutschen Ballungsräume geleitet. Zeiten, in denen nur wenig Wind- und Sonnenstrom zur Verfügung steht, werden mit wenigen Gaskraftwerken überbrückt.

Entwicklung

Diese Maßnahmen können den CO₂-Ausstoß in Deutschland spürbar senken; Klimaschützerinnen und Klimaschützer bezeichnen die Entwicklung als vorbildlich. Durch die Ausrichtung auf Klimaschutz, Kostenreduktion und Effizienz fehlen dem Energiesystem jedoch Rückfall- und Sicherungsoptionen. Ausfällen oder Angriffen gegenüber ist es daher nicht hinreichend gewappnet.

An dieser Schwachstelle setzen extremistische Gruppen an. Sie beginnen damit, Anschläge auf Umspannwerke, Stromleitungen zu den großen Offshore-Windparks, Energiespeicher und Gasleitungen zu verüben. Da es keine ausreichenden Sicherheitsvorkehrungen gibt, führen die Attacken wiederholt zu längeren Ausfällen der Energieversorgung in dicht besiedelten Gebieten der Bundesrepublik. Den Sicherheitsbehörden gelingt

⁴⁶ Vgl. den zweiten Abschnitt des Anhangs.

⁴⁷ Die Szenarien wurden im Frühjahr 2015 und somit vor neueren Entwicklungen wie der „Flüchtlingskrise“ verfasst. Diese Themen konnten daher weder beim Erstellen der Bedrohungsszenarien noch bei der Diskussion von Interventionen berücksichtigt werden.

Verschärfendes Ereignis 1: Doppelanschlag auf Höchstspannungsleitungen

Der November 2037 ist grau und verregnet in ganz Deutschland. Trotz des Mangels an Sonnenschein ist die Energieversorgung aber prinzipiell gesichert, denn in Norddeutschland weht der Wind konstant und stark – bis Extremisten einen Doppelanschlag auf die beiden wichtigsten Höchstspannungsleitungen Deutschlands verüben. Beide Leitungen werden so stark beschädigt, dass die Stromversorgung im Süden und Südwesten Deutschlands zusammenbricht. Durch die Drohungen der Terroristen, den Wiederaufbau der Leitungen jederzeit durch weitere Anschläge sabotieren zu können, wird die Situation weiter verschärft. Das unerwartete Ereignis stürzt zudem das gesamte europäische Energienetz ins Chaos. Frankreich, die Schweiz, Österreich und Tschechien sind trotz großer Anstrengungen nicht in der Lage, das deutsche Energiesystem zu stabilisieren. Gleichzeitig leiden sie selbst unter dem Wegfall der deutschen Kapazitäten. Den Verantwortlichen wird bewusst, wie fatal die Abhängigkeit von zwei großen Höchstspannungsleitungen war.

Verschärfendes Ereignis 2: Simulation einer virtuellen Sonnenfinsternis

Der 22. Juni 2039 ist ein wolkenloser Sommertag. Die Sonnenfinsternis am Vortag hat nicht zu einem Blackout im europäischen Stromnetz geführt, da die vorhandenen Batteriespeicher und häuslichen Blockheizkraftwerke optimal genutzt worden sind und die Industrie ihren Verbrauch planmäßig reduziert hat. Jedoch simuliert eine terroristische Hacker-Gruppe am Folgetag eine zweite virtuelle Sonnenfinsternis. Die Auswirkungen sind verheerend. Durch manipulierte fehlerhafte Wetterprognosen rechnen die Energieversorger an diesem Tag mit viel Windstrom und fahren ihre Reservekapazitäten zurück. Diese fehlen, als es den Cyber-Terroristen gelingt, einen Großteil der Solaranlagen in Deutschland abzuschalten, die an diesem Sommertag zur Mittagszeit nahe ihrer Höchstleistung einspeisen. Die Energieversorger schaffen es nicht, rechtzeitig zu reagieren. Folglich kommt es zu einem Totalausfall der deutschen Stromversorgung. Auch die Nachbarstaaten werden so stark in Mitleidenschaft gezogen, dass in fast ganz Europa der Strom ausfällt. Das manipulierte Prognosesystem macht es den Betreibern unmöglich, die Netze wieder einzugliedern. Erst nach Sonnenuntergang lässt sich die Stromversorgung wieder flächendeckend herstellen.

es nicht immer rechtzeitig, die Angriffe zu vereiteln. Diese Anschläge haben gravierende Auswirkungen auf das Leben in Deutschland: So kommt die Versorgung mit Wärme und Strom teilweise zum Erliegen oder muss vom Staat streng rationiert werden. Viele Bürgerinnen und Bürger müssen von Hilfseinrichtungen wie dem Roten Kreuz und der Bundeswehr versorgt werden.

Gleichzeitig wird das Energiesystem immer digitaler und vernetzter. Die sogenannten smarten Systeme sind aber leichter angreifbar. Dazu trägt bei, dass sie mithilfe standardisierter Software gesteuert werden, die flächendeckend von Viren

oder Trojanern manipuliert werden kann. Parallel dazu baut eine Bundesbehörde ein Portal auf, über das auf Betriebsdaten von Verbrauchern sowie Erzeugern zugegriffen werden kann. Damit führt sie bereits überholte zentrale Strukturen fort und schafft einen Angriffspunkt, über den sich das gesamte System ausschalten lässt.⁴⁸

Dies machen sich Angreifer zunutze, um Zugriff auf die Gaskraftwerke sowie viele dezentrale Erzeugungsanlagen zu erlangen. Fachleute führen zwei

⁴⁸ Ein solcher „systemkritischer Angriffspunkt“, dessen Ausfall den des ganzen Systems nach sich zieht, wird auch als „Single Point of Failure“ bezeichnet.

wichtige Gründe für die Angriffe an, die neben Preisschwankungen auf den Energiemärkten auch ernste Stromausfälle zur Folge haben: Zum einen wurde über energiebezogene IT-Sicherheitsrisiken nie öffentlich diskutiert, was zu einem mangelnden Problembewusstsein geführt hat. Zum anderen greift ein neues Gesetz zur Informationssicherheit nicht, weil darin klare Regelungen fehlen.

Folgen für die Energiewende

Die Folgen der physischen und digitalen Anschläge sind erheblich. Neben den direkten Schäden durch die Angriffe verliert die Bevölkerung das Vertrauen in die Energiewende. Zwar ist der CO₂-Ausstoß Deutschlands deutlich gesunken, aber gleichzeitig ist die Versorgungssicherheit zurückgegangen. Das führt auch bei Investoren zu einem Vertrauensverlust in den Standort Deutschland. Aufgrund dieser Entwicklungen treiben die Regierungen von Baden-Württemberg und Bayern den Bau neuer Gas- und Kohlekraftwerke im Eilverfahren voran. Die Energiewende droht zu scheitern, weil notwendige Sicherheitsaspekte nicht hinreichend berücksichtigt wurden.

3.2 Wetterextreme

Ausgangssituation

Schon in den 2020er-Jahren treten immer häufiger schwere Stürme auf, die Hochspannungsmasten und -leitungen im deutschen Stromnetz stark beschädigen und lokale sowie regionale Stromausfälle auslösen. Das Technische Hilfswerk und weitere Institutionen des Zivil- und Katastrophenschutzes müssen einerseits die Versorgung der Bürgerinnen und Bürger sicherstellen, andererseits aber auch den Betrieb von Notstromgeräten in Krankenhäusern und Altenheimen koordinieren. Die Lebensmittelvorräte in vielen Haushalten reichen nicht aus, was zu Panikkäufen führt.

Entwicklung

Die durch Extremwetter bedingten Stromausfälle befeuern den Widerstand gegen den oberirdischen Trassenausbau. In der Folge verschärft die Bundesregierung ihre bisherigen Richtlinien: Sämtliche neuen Leitungen müssen nun grundsätzlich als Erdkabel verlegt werden. Dies treibt die Kosten für die Energiewende deutlich in die Höhe, sodass zu wenig Geld für den Ausbau von Speichern und flexiblen Kraftwerkreserven zur Verfügung steht.

Um die Versorgungssicherheit zu verbessern, werden Stromnetze verstärkt oder Notversorgungssysteme eingerichtet. Die Kosten steigen weiter. Etwa ab 2030 kommt es durchschnittlich einmal pro Jahr zu einer Hitzewelle, die in Ausmaß und Intensität mit der von 2003 zu vergleichen ist (Länge 10 bis 15 Tage und mittlere Tagesmaximaltemperatur von 32 Grad Celsius) und von Südfrankreich bis nach Russland reicht. Nicht nur Deutschland, auch alle Nachbarländer sind davon betroffen. Die Pegel der Flüsse sinken, und vor allem steigen die Wassertemperaturen. Dadurch steht zeitweise kaum noch Kühlwasser für thermische Kraftwerke zur Verfügung. In einigen Nachbarländern Deutschlands sind Gas- und Kohlekraftwerke so beeinträchtigt, dass die Grundlast nicht mehr zuverlässig bedient werden kann. In diesen Ländern wurden die Kraftwerke nicht mit Kühltürmen ausgestattet. Da das deutsche Stromnetz mit den Netzen der Nachbarländer verbunden ist, werden die Netze insgesamt instabiler.

Durch das Niedrigwasser werden die verbliebenen Kohlekraftwerke in Deutschland nicht rechtzeitig versorgt; es entstehen Engpässe bei Kohletransporten auf Flüssen. Dadurch wird die Versorgung in Ballungsgebieten an Rhein, Main und Elbe bedroht. Beigetragen hat dazu auch der deutlich angestiegene Strombedarf für die Klimatisierung. Da Hitzewellen inzwischen häufig sind, haben viele Privathaushalte und auch kleine Unternehmen elek-

trische Kleinst-Klimaanlagen angeschafft. Die ineffiziente Kühlung mit diesen Geräten belastet die Netze zusätzlich und führt während der Hitzeperioden zeitweise zum Zusammenbruch der Stromversorgung.

Folgen für die Energiewende

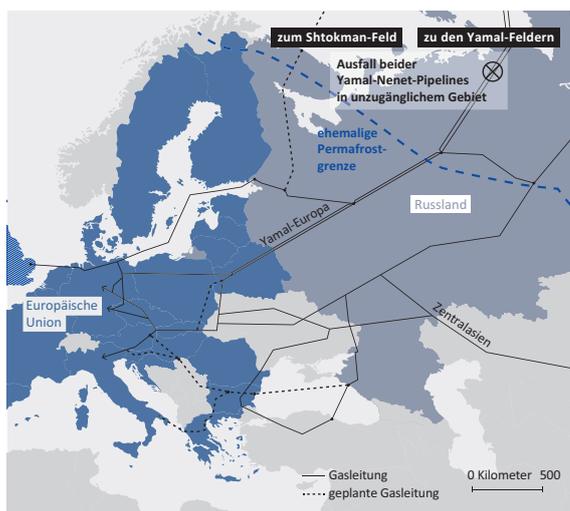
Der Klimawandel führt dazu, dass die Wirtschaftlichkeit der deutschen Energiewende und die Sicherheit der Stromversorgung hochgradig gefährdet sind. Klimaveränderungen haben die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der

Energieversorgung massiv verändert. Da insbesondere die Kohle- und Gaskraftwerke durch Hitze ausgefallen sind, erhöht der Gesetzgeber die Standards für deren Kühlsysteme. Energieversorger investieren nun vorrangig in die Kühlungen älterer Kraftwerke statt in Netze oder Speicher. Die Ausbauziele für erneuerbare Energien werden aufgeweicht, und auch weitere Ziele zur Reduzierung der Treibhausgase werden deutlich abgeschwächt. Die Umsetzung der Energiewende verzögert sich dadurch um mehr als zehn Jahre.

Verschärfendes Ereignis: Ausfall von Erdgasleitungen infolge auftauender Permafrostböden

In den 2040er-Jahren kommt eine weitere Bedrohung hinzu, als in unerwartetem Umfang die Gaslieferungen aus Russland ausbleiben. Somit fallen knapp 40 Prozent der bundesdeutschen Erdgasquellen kurzfristig aus.* Grund hierfür ist, dass die Permafrostböden in Sibirien aufgrund der weltweit steigenden Temperaturen auftauen.** Im russischen Erdgasfördergebiet Yamal-Nenets ver wandeln sich große Gebiete in morastige Flächen. Brückenpfeiler sinken ab, und es kommt zu Erdbewegungen und Grundbrüchen. Dadurch werden Straßen unpassierbar, und auch die Fundamente der Yamal-Europa-Gasleitung sind betroffen.

Eine dieser Erdbewegungen führt dazu, dass mehrere Fundamente wegfallen und die von ihnen getragene Gasleitung bricht. Das ausströmende Gas entzündet sich, eine nachfolgende Explosion zerstört



Erdgas-Pipeline-Netz von Russland nach Westeuropa. Bei der Karte handelt es sich um eine eigene Modifikation von Bailey 2009.

die Gasleitung. Durch die morastige Umgebung ist kein Zugang zur Unglücksstelle möglich. Als Folge muss die Gasleitung abgestellt werden. Sie kann erst nach mehreren Monaten repariert werden, als der nächste Winter die Böden wieder gefrieren lässt. Während des Frühlings und Sommers in Mitteleuropa ist die Gasversorgung über die Yamal-Europa-Leitung somit unterbrochen. Andere Gasleitungen werden daraufhin teilweise außer Betrieb genommen, um ihre statische Sicherheit zu überprüfen. Dadurch wird die Versorgung weiter bedroht. Der Zwischenfall ereignet sich zu einem Zeitpunkt, zu dem die Erdgasspeicher durch einen langen und strengen Winter in Europa leer sind. Die bis dahin aufgebaute Power-to-Gas-Infrastruktur reicht bei Weitem nicht aus, diesen Engpass zu kompensieren. Es kommt zu einer dramatischen Unterversorgung mit Energie aus Gaskraftwerken und infolgedessen zu weitreichenden Stromausfällen.

die Gasleitung. Durch die morastige Umgebung ist kein Zugang zur Unglücksstelle möglich. Als Folge muss die Gasleitung abgestellt werden. Sie kann erst nach mehreren Monaten repariert werden, als der nächste Winter die Böden wieder gefrieren lässt. Während des Frühlings und Sommers in Mitteleuropa ist die Gasversorgung über die Yamal-Europa-Leitung somit unterbrochen. Andere Gasleitungen werden daraufhin teilweise außer Betrieb genommen, um ihre statische Sicherheit zu überprüfen. Dadurch wird die Versorgung weiter bedroht. Der Zwischenfall ereignet sich zu einem Zeitpunkt,

*Im Jahr 2012 wurden 38 Prozent des deutschen Erdgasverbrauchs durch Importe aus Russland gedeckt (Engerer et al. 2014, S. 483-484). **Washington Post 2014.

3.3 Rohstoffverknappung Erdgas

Ausgangssituation

Bis zum Jahr 2020 ist es nicht gelungen, die Treibhausgasemissionen gegenüber dem Jahr 1990 um 40 Prozent zu reduzieren. Damit wurde eines der wichtigsten Ziele der Energiewende verfehlt. Auch das langfristige Bestreben, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 80 Prozent zu senken, erscheint vor diesem Hintergrund unrealistisch.

Zu einer Wende kommt es erst, als ab etwa 2020 zahlreiche Kohlekraftwerke abgeschaltet und durch teils stillgelegte, teils neugebaute Gas- und Dampf-Kraftwerke ersetzt und gleichzeitig erdgasbetriebene Autos gezielt gefördert werden. Dadurch wird Erdgas zeitweise zum wichtigsten Energieträger in Deutschland, obwohl der Anteil am Primärenergieverbrauch 2015 bei nur 21 Prozent lag.⁴⁹ Auch die Reform des europäischen Emissionshandelssystems sorgt dafür, dass mehr Erdgas nachgefragt wird. Der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Energiebereitstellung stieg in der zweiten Hälfte der 2010er-Jahre nur sehr langsam und stagnierte trotz des kontinuierlichen Ausbaus der Kapazität. Grund dafür sind fehlende Speicher für Solar- und Windenergie.

Nicht zuletzt ist die verbreitete Einführung der „Fracking“-Technik („Hydraulic Fracturing“) in den USA verantwortlich dafür, dass große Mengen Erdgas in Form von Flüssiggas auf dem Weltmarkt verfügbar sind. Fracking ermöglicht es, Erdgas kostengünstig aus feinkörnigen Sedimentgesteinen⁵⁰ zu gewinnen.⁵¹ Die Förderung startete in den

2010er-Jahren. Dadurch wurden die USA schnell autark in der Erdgas- und Ölproduktion und innerhalb kurzer Zeit wieder zur Exportnation für fossile Brennstoffe. Am Anfang herrschte großer Optimismus: Der US-amerikanische Energieminister Ernest Moniz sagte 2015: „The US will belong to the most important exporters of LNG in coming decades.“⁵² Der Direktor der US Energy Information Administration (EIA), Adam Sieminski⁵³, meinte im Jahr zuvor: „For natural gas, the EIA has no doubt at all that production can continue to grow all the way out to 2040.“

Entwicklung

Veränderte außenpolitische Rahmenbedingungen und eingeschränkte Fördermöglichkeiten führen dazu, dass das große Überangebot auf dem Flüssiggas-Markt in den frühen 2020er-Jahren plötzlich verschwindet. Der „Käufermarkt“⁵⁴ für Erdgas gehört nun der Vergangenheit an. Folgende Ereignisse lösen die sogenannte Erdgas-Krise Mitte der 2020er-Jahre aus:

Ein stärker gewachsenes Umweltbewusstsein in China führt dazu, dass Kohlekraftwerke systematisch durch Gas-Kraftwerke ersetzt werden. Dafür werden Langzeitlieferverträge für Erdgas mit Russland, Kasachstan und anderen Staaten in Südasiens abgeschlossen. Zur Zeit der Ukraine-Krise (2014 bis 2016) wurden das russisch-europäische Southstream-Projekt⁵⁵ abgesagt und die Kooperation mit dem deutschen Gashandelsunternehmen Wingas⁵⁶ vorläufig aufgekündigt. Fast zeitgleich schloss Russland einen Liefer- und Pipeline-Vertrag mit China ab. Anfang der

49 Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 2016.

50 Der englische Begriff dafür ist „Shale“, das daraus gewonnene Gas wird daher als „Shale Gas“ oder auf Deutsch als „Schiefergas“ bezeichnet.

51 Dabei kann es allerdings zu Kontaminationen des Grundwassers kommen; als größte Risiken dafür werden Havarien in Anlagen an der Oberfläche oder Leckagen in Rohren und Bohrungen angesehen (vgl. acatech 2015, S. 39–42).

52 Das Zitat entstammt einem Interview anlässlich der Münchener Sicherheitskonferenz im Februar 2015 (Energlobe 2015).

53 EIA 2014.

54 Vgl. den Kasten „Marktreaktionen auf Rohstoffverknappung – der Regelkreis der Rohstoffversorgung“ in Kapitel 4.4.

55 Das Southstream-Projekt ist ein Pipeline-Projekt, um Südost-Europa mit russischem Erdgas zu versorgen. Partner für den Offshore-Teil waren Gazprom, die Energieunternehmen EDF und ENI sowie Wintershall.

56 Wingas ist eine Tochtergesellschaft von Wintershall, die wiederum der BASF gehört.

Verschärfendes Ereignis 1: Beeinträchtigung der Flüssiggas-Versorgung durch Anschläge

Aufgrund der hohen Importe nach Europa werden Anfang der 2020er-Jahre mehrere neue Flüssiggas-Terminals an der Nordsee- und Atlantikküste gebaut. Diese haben jeweils eine Kapazität von circa 20 Milliarden Kubikmetern pro Jahr (vergleichbar mit Milford Haven, im Jahr 2015 das größte Terminal in Westeuropa). Jedoch sind solche Einrichtungen sehr verwundbar. Dies zeigt sich, als Terroristen einige dieser Terminals zerstören. In der Folge ist die Versorgung mit Flüssiggas mehrere Jahre eingeschränkt.

Verschärfendes Ereignis 2: erdbebenbedingter Förderstopp in den Niederlanden

2015 ordnete die niederländische Regierung an, dass die betriebsführende Gesellschaft des größten europäischen Erdgasfeldes in der Region Groningen weniger Erdgas fördern darf. Dadurch ging die Zahl der Erdbeben zunächst zurück. In den 2020er-Jahren steigt sie jedoch wieder. Da der Protest der Bevölkerung immer größer wird, beschließt die Regierung einen kompletten Förderstopp von Erdgas. Dieser Beschluss verschärft die Krise in Europa. Schließlich deckte dieses Gasfeld noch wenige Jahre zuvor etwa zehn Prozent des europäischen Bedarfs.*

*Reuter 2015; Hecking 2015.

2020er-Jahre geht auch die Altia-Pipeline (die sogenannte „Western Route“)⁵⁷ in Betrieb, die den Gasexport aus Westsibirien nach China wesentlich erleichtert. Im gegenseitigen Einvernehmen gehen die Erdgaslieferungen aus Russland nach Europa zurück. Europa kauft stärker Flüssiggas ein und baut daher mehrere neue Terminals an der Nordsee- und Atlantikküste.

Gaslieferungen aus den neuen Fördergebieten im östlichen Mittelmeer zwischen Zypern und Israel/Libanon sowie im nördlichen (kurdischen) Teil des Iraks schaffen keine Abhilfe. Aufgrund von Ansprüchen des türkischen Bevölkerungsteils werden die Quellen auf zypriotischem Hoheitsgebiet nicht erschlossen. Misstrauisch gegenüber westlichen Unternehmen kann der Iran seine Produktion nicht wesentlich steigern. Auch die Wiederannäherung an die USA und die Aufhebung von internationalen Boykotten konnten das nicht verhindern.

Auslöser der Krise ist der drastische und schlagartige Rückgang der US-amerikanischen Erdgasförderung mittels der „Fracking“-Technik. Damit bewahrheiten sich Prognosen aus der Wissenschaft: Einige Geologen⁵⁸ hatten bereits zu Beginn des „Fracking-Booms“ in den 2010er-Jahren gewarnt, dass die Voraussagen über die förderbaren Erdgasmengen viel zu optimistisch seien.

Folgen für die Energiewende

Die Versorgung in Europa ist ernsthaft gefährdet. Dies betrifft vor allem Deutschland mit seinem hohen Erdgasverbrauch im Strom-, Heizungs- und Transportsektor. Aufgrund von langfristigen Lieferverträgen gibt es nur wenig Gas auf dem Markt, und die Preise schießen in die Höhe. Völlig unvorbereitet sind die Gasversorger zwar nicht: Unter anderem decken sie einen möglichst hohen Anteil des Bedarfs durch Eigenförderung und nutzen die Speicherkapazität von circa 20 Prozent des Jahresverbrauchs voll aus. Diese Vorkehrungen greifen auch, reichen aber nicht aus.

57 Henderson 2014.

58 Hughes 2014; Inman 2014.

Platingruppenmetalle (PGM)

Zu den PGM gehören die sechs Elemente Platin [Pt], Palladium [Pd], Ruthenium [Ru], Rhodium [Rh], Iridium [Ir] und Osmium [Os]. Als gekoppelte Elemente treten sie in Lagerstätten immer kombiniert auf, vergleichbar mit den Seltenen Erden. Wirtschaftlich mit Abstand am bedeutendsten sind Palladium mit einer Produktion von 210 Tonnen pro Jahr und Platin mit einer Produktion von 190 Tonnen pro Jahr. Die anderen Platingruppenmetalle sind „Beiprodukte“ der Platin- und Palladiumgewinnung. Die Gewinnung erfolgt überwiegend in eigenen Lagerstätten, zum Teil aber auch in Nickel- und Kupferminen.

3.4 Rohstoffverknappung Metalle

Ausgangssituation

Langfristig ist es das Ziel der deutschen Energiewende, ein Energiesystem zu schaffen, das weitestgehend auf die Verwendung fossiler Energieträger verzichtet. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen pro bereitgestellter Energieeinheit mehr mineralische Rohstoffe wie Metalle, Minerale und Seltene Erden eingesetzt werden.⁵⁹ Jedoch besteht die Gefahr, dass es künftig zu Engpässen insbesondere der Platingruppenmetalle (PGM) kommt.⁶⁰ Sie spielen bereits heute in der Katalyse, unter anderem bei Abgaskatalysatoren, eine große Rolle. Wenn Wasserstoff im künftigen Energiesystem eine größere Rolle spielt, könnte die Nachfrage nach diesen Metallen deutlich steigen: Sowohl die Elektrolyseure, um den Wasserstoff zu gewinnen („Power-to-Gas“), als auch die Brennstoffzellen, um ihn wieder umzuwandeln, enthalten Platingruppenmetalle.

Deutschland ist bei den Primärmetallen einschließlich der PGM vollständig von Importen abhängig. Aufgrund ihrer spezifischen geologischen Eigenschaften sind die Rohstoffvorkommen ungleich verteilt.⁶¹ Zum Teil finden sich hohe Konzentrationen nur in einem oder wenigen Ländern. Hinzu kommt, dass der Rohstoffabbau in diesen Staaten häufig von

wenigen Unternehmen betrieben wird. Ein wichtiger Grund hierfür ist, dass kleinere Unternehmen immer häufiger von Wettbewerbern übernommen werden. Durch ein günstiges Preisniveau, zum Beispiel aufgrund niedriger Löhne oder geringer Umwelt- und Sozialstandards, werden Konkurrenten zunehmend aus dem Markt gedrängt.

Diese Effekte führen dazu, dass bei etlichen Rohstoffen, die für die Energiewende benötigt werden, hohe regionale Konzentrationen vorliegen. Der Großteil der Platingruppenmetalle wird in Südafrika (Platin: 72 Prozent; Palladium: 36 Prozent) und in Russland (Platin: 13 Prozent; Palladium: 40 Prozent) gefördert.⁶²

Zuletzt stößt Bergbau weltweit auf immer größeren Widerstand aus der Bevölkerung. Entsprechend wird es zunehmend zu einer Herausforderung für die Rohstoffindustrie, die „Social License to Operate“⁶³ zu erhalten.

59 Angerer et al. 2016.

60 Vgl. Elsner et al. 2015, S. 54.

61 Auch innerhalb von Regionen sind Lagerstätten nach Zahl, Größe und Qualität höchst ungleich verteilt.

62 Schmidt 2015; Beispiele für weitere Hightech-Rohstoffe sind Konzentrationen in China bei Gallium (69 Prozent), Germanium (59 Prozent), Indium (58 Prozent), Schweren Seltenen Erden (99 Prozent) und Leichten Seltenen Erden (87 Prozent).

63 Vgl. acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-2, S. 27

Marktreaktionen auf Rohstoffverknappung – der Regelkreis der Rohstoffversorgung

Rohstoffmärkte schwanken in der Regel zwischen Käufer- und Verkäufermärkten. In einem Käufermarkt sind mehr Rohstoffprodukte – zum Beispiel Kupferkonzentrate – vorhanden, als nachgefragt werden. Das heißt, es kommt zu Preissenkungen, und der Käufer bestimmt das Handeln. Beim Verkäufermarkt ist es umgekehrt. Den Schwankungen zwischen Käufer- und Verkäufermärkten entsprechend variieren die Preise. Das gilt insbesondere für viele Rohstoffe, die für die Energiewende wichtig sind.

Wird ein Rohstoff knapp, zum Beispiel durch eine höhere Nachfrage, steigen die Preise. Dieser Preisanstieg regt die Industrie an, nach Lösungen zu suchen, um damit Gewinn zu machen. Auf der Angebotsseite reagiert sowohl die Industrie der Primär- wie auch der Sekundärproduktion: Bei der Primärproduktion wird die Rohstoffgewinnung unter anderem in bereits bekannten, auf der Warteliste stehenden Lagerstätten aufgenommen. Durch die Preissteigerung kann es sich lohnen, den Abbau auf Teile von Lagerstätten auszuweiten, in denen der Rohstoff in geringerer Konzentration vorliegt. Bei der Sekundärproduktion wird es durch Preissteigerungen möglich, auch bisher unwirtschaftliche Schrotte recyceln zu lassen. Auf der Nachfrageseite kommt es durch Preissteigerungen zu verstärkten Anstrengungen, Material zu sparen oder zu ersetzen.*

* Zum Regelkreis der Rohstoffversorgung vgl. Wellmer/Hagelüken 2015; Wellmer/Dalheimer 2012.

Entwicklung

In den 2030er-Jahren spielt die Wasserstoff-Elektrolyse für die Energiewende eine immer wichtigere Rolle. Ebenfalls als alternativlos erweist sich der Einsatz von Brennstoffzellen für die Mobilität. Aufgrund von Schwankungen der Wind- und Sonnenenergie sollen verstärkt PEM⁶⁴-Elektrolyseure zum Einsatz kommen. Für deren Elektroden werden Platingruppenmetalle verwendet, hauptsächlich Iridium und Platin. Außer Iridium werden nun auch Ruthenium und Osmium verstärkt nachgefragt. Bisher wurden diese drei Metalle nur als Beiprodukte anderer Rohstoffe gewonnen. Nun aber explodieren ihre Preise, und der Regelkreis der Rohstoffversorgung kommt in Gang. Auf der Angebotsseite bieten sich eine erhöhte Produktion und ein effizienteres Recycling von Platinmetallen an. Auf der Nachfrageseite können Substitute oder Elektrolyseure entwickelt werden, die mit weniger Iridium auskommen.

64 PEM steht für „Proton Exchange Membrane“ oder „Polymer Electrolyte Membrane“. PEM-Elektrolyseure enthalten eine Membran, die auf einer Seite mit Platin (Kathode) und auf der anderen Seite mit Iridium oder Ruthenium (Anode) beschichtet ist.

Im Folgenden werden mögliche Entwicklungen, die die Umsetzung von Lösungen bedrohen könnten, für die Angebotsseite aufgezeigt.

Hinderliche Entwicklungen für eine kurzfristige Lösung:

Zusätzliche Lieferungen von bisher nur untergeordnet gewonnenen Platinmetallen sollen aus den sogenannten „Intermediates“⁶⁵ bei den Platinschmelzen erfolgen, die im Wesentlichen in Südafrika liegen. Da Ruthenium, Osmium und Iridium erst am Ende des Trennvorganges entstehen, wurden diese Elemente zu Zeiten einer geringen Nachfrage nicht abgetrennt, sondern zwischengelagert. Nun sollen sie jedoch weiterverarbeitet und die einzelnen Platinmetalle wie Iridium abgetrennt werden. Die Umsetzung dieser Lösung wird zunächst durch die langen Lieferzeiten von kritischen Ausrüstungen zum Kapazitätsausbau für die Verarbeitung der Intermediates bedroht. Als endlich geliefert werden kann, verfügt Südafrika einen Exportstopp für diese PGM, um die

65 Mit Intermediates werden nicht handelbare Zwischenprodukte, die beim Hüttenprozess anfallen, bezeichnet.

Verschärfende Ereignisse auf der Angebotsseite

Versuche, die verstärkte Nachfrage nach Platingruppenmetallen zu befriedigen, werden durch eine Kombination von Ereignissen konterkariert, die nahezu zeitgleich in verschiedenen Ländern stattfinden. Dazu zählen PGM-Exportstopps zum Schutz des eigenen Ausbaus erneuerbarer Energien, mehrjährige Lieferausfälle infolge von sozialen Unruhen und Streiks sowie Blockaden von Bergbauaktivitäten aufgrund lokaler Proteste gegen neue Lagerstättenerschließungen, die auf der Angst der Bevölkerung vor Umweltschäden, sozialem Abstieg und Umbrüchen basieren.

Produktion von Technologien für erneuerbare Energien im eigenen Land voranzutreiben.

Hinderliche Entwicklungen für mittelfristige Lösungen: Produktionen sollen verstärkt in Lagerstättenteile mit einem besseren Platin-Iridium-Verhältnis verlagert und neue Gruben erschlossen werden. In der größten bekannten Lagerstätte und dem Hauptlieferanten von PGM, dem Merensky-Reef⁶⁶ im Bushveld-Komplex in Südafrika⁶⁷, beträgt das Platin-Iridium-Verhältnis 1:50. Im UG-2-Reef, ebenfalls im Bushveld-Komplex, ist der Anteil von Iridium mit 1:20 zweieinhalb Mal höher. Durch Grubenunglücke und Streiks der Bergleute wird die Produktionsverlagerung in andere Lagerstättenteile mit einem besseren Platin-Iridium-Verhältnis jedoch erheblich verzögert. Nachdem die Vorräte in der Industrie aufgebraucht sind, steigen die Preise stark an, und die Konzerne erzielen dadurch hohe Gewinne. Die Grubenarbeiter sind unzufrieden mit ihren Löhnen, die weit hinter den Gewinnen der Bergbaugesellschaften zurückbleiben. Ausgelöst durch landesweite Streiks der Bergleute kommt es zu sozialen Unruhen, die zu mehrjährigen Lieferausfällen führen.

Hinderliche Entwicklungen für eine langfristige Lösung: Durch die Preissteigerungen werden vor allem kleine Explorationsgesellschaften – die sogenannten „Juniors“, die häufig aus Kanada und Australien kommen – angeregt, insbesondere unkonventionelle PGM-Lagerstätten zu erschließen. Solche Explorationsarbeiten sollen in Indonesien, in Oman und auf den Philippinen erfolgen. Dies sind Gebiete mit hohen Chancen, unkonventionelle PGM-Vorkommen zu entdecken. Die Bevölkerung in diesen Ländern wehrt sich aber gegen die Explorationen, da sie hohe Umweltschäden und die Zerstörung ihrer Sozialstruktur befürchtet.

Folgen für die Energiewende

Alle hier angeführten Bedrohungsszenarien führen zu Verzögerungen der Energiewende, gefährden sie aber nicht grundsätzlich. Auch wenn es zu einem langfristigen Embargo von Iridium kommen sollte und bis dahin keine gleichwertige andere Technologie zur Verfügung steht, gibt es Alternativen. Sollten die recycelten Mengen an Iridium nicht ausreichen, könnte man auf weniger effiziente Technologien wie das SOEC-Verfahren ausweichen, die ohne Iridium auskommen.⁶⁸

66 Als „Reef“ werden in geschichteten magmatischen Körpern Schichten bezeichnet, die wirtschaftlich interessante Vererzungen enthalten.

67 Der Bushveld-Komplex in Südafrika ist einer der größten Komplexe basischer Schmelzen der Erde und zeichnet sich durch seine magmatischen Schichten aus. Die Konzentration von Platingruppenelementen-Lagerstätten ist sehr hoch.

68 Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse mit dem SOEC-Verfahren (Solid Oxide Electrolyzer Cell) kommen Elektrolysezellen zum Einsatz, die in der Regel aus Keramik bestehen, auf das Zirkondioxid aufgedampft ist. Auch für Anode und Kathode ist in diesem Verfahren kein Iridium nötig.

3.5 Governance-Versagen

Ausgangssituation⁶⁹

Das Strommarktdesign trägt entscheidend dazu bei, die Energieversorgung sicher, ausgewogen und wirtschaftlich zu gestalten. Von 2014 bis 2016 erarbeitete die Bundesregierung daher das zukünftige Marktdesign für den Stromsektor in einer breit angelegten Diskussion. Auf Basis des vorgelegten Grünbuchs⁷⁰ und Weißbuchs⁷¹ verabschiedete das Bundeskabinett im November 2015 den Gesetzentwurf zum Strommarkt für die Energiewende; im Juli 2016 trat das „Gesetz zur Weiterentwicklung des Strommarktes“ (Strommarktgesetz)⁷² in Kraft.

Mit dem Gesetz wurde die Architektur für einen „Strommarkt 2.0“ definiert und insbesondere auch festgelegt, dass eine vom eigentlichen Strommarkt strikt getrennte Kapazitätsreserve den Strommarkt 2.0 gegenüber unvorhersehbaren Ereignissen absichern soll. Dadurch wurde jedoch kein Kapazitätsmarkt geschaffen, also kein zweiter Markt neben dem Strommarkt, auf dem Unternehmen nur für das Vorhalten von Reservekapazität vergütet werden.⁷³ Damit Anreize, in neue, regelbare Kapazitäten zu investieren, auch

künftig allein von den Preissignalen im „Energy-only“-Markt⁷⁴ ausgehen können, wurde die freie Preisbildung im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) verankert. Investoren erhalten dadurch die Sicherheit, dass sie hohe Preise und Gewinne immer dann erzielen können, wenn nur wenig Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung steht.

Entwicklung

Infolge wechselnder Regierungskoalitionen verwirft die Bundesregierung in den 2020er-Jahren ihre ursprünglichen Pläne zur Ausgestaltung der Energiemärkte. Dadurch ist offen, wie die Förderung der erneuerbaren Energieträger und der Energieeffizienz gestaltet und Flexibilität gewährleistet werden kann. EU-Politikerinnen und -politiker können sich nicht einigen, ob die Finanzierung des Vorhaltens von Reserveanlagen zulässig ist. Eine Reform zur Weiterentwicklung von Energiemärkten mit wachsendem Anteil an dezentralen erneuerbaren Energien in intelligent vernetzten Teilsystemen wird versäumt. Die Entwicklung führt vielfach zu Fehlallokationen von Ressourcen (Fördermittel und gestrandete Investitionen) und kommt schließlich ganz zum Stillstand. Ein neues Momentum bleibt aus, die Glaubwürdigkeit der Energiepolitik wird verspielt.

Vor allem wahltaktische Überlegungen und eine kritische Wirtschaftslage halten die EU-Regierungen davon ab, Entscheidungen über die Ausgestaltung der Märkte zu treffen. Die politischen Parteien können sich nicht mehr einigen, welchen Beitrag Strom, Wärme und Verkehr leisten sollen, um die Energieversorgung umweltfreundlich, sicher und bezahlbar zu machen, und wie diese Sektoren verknüpft werden können. Dadurch investieren Unternehmen weniger in sektorüber-

69 In der einschlägigen wirtschaftswissenschaftlichen Literatur wird in diesem Zusammenhang von „Politikversagen“ (beziehungsweise „Staatsversagen“) gesprochen, wenn die Politik die Wirtschaft nicht im Sinne der Wohlfahrtsoptimierung lenkt – im Gegensatz zum „Marktversagen“, wo Märkte nicht zu einer wohlfahrtsoptimierten Allokation von Ressourcen führen. Es kann dabei durchaus vorkommen, dass durch fehlerhafte Politikintervention ein bereits vorhandenes Marktversagen durch Politik- beziehungsweise Staatsversagen sogar verschlimmert anstatt verbessert wird, zum Beispiel, wenn hohe Förderungen oder hohe Steuern zu Fehlallokationen führen und diese nicht vermindert, sondern weiter erhöht werden (vgl. Blankart 2008, S. 51–77).

70 BMWi 2014-1.

71 BMWi 2015.

72 Deutscher Bundestag 2016. Als sogenanntes Mantelgesetz ändert das Strommarktgesetz verschiedene bestehende Gesetze und Verordnungen, unter anderem das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) sowie die Reservekraftwerksverordnung.

73 Diese Grundsatzentscheidung wird im Rahmen des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ explizit befürwortet (vgl. acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-2, S. 8 und S. 27).

74 Das Prinzip eines „Energy-only“-Marktes besteht darin, dass nur gelieferte Energie vergütet wird. Die Investitionskosten für Kapazitäten müssen daher aus diesen Vergütungen refinanziert werden.

greifende Technologien wie Power-to-Gas und Power-to-Fuels, also die Umwandlung von Strom in gasförmige oder flüssige Energieträger.

Diese Entwicklungen führen dazu, dass die Gesellschaft nicht mehr an die Energiewende glaubt. In der öffentlichen Diskussion stehen nur noch kurzfristige Effekte und unmittelbare Kosten, eine langfristige Gesamtbetrachtung fehlt. Vertreterinnen und Vertreter von Politik und Wirtschaft weisen sich wechselseitig die Schuld zu und bezeichnen die Situation je nach Position als Markt- oder Politikversagen.

Folgen für die Versorgungssicherheit und die Energiewende

Die Folgen für den deutschen Kraftwerkspark sind erheblich: Unwirtschaftlich gewordene Kohlekraftwerke mit Systemrelevanz werden nach entsprechender Prüfung durch die Bundesnetzagentur durch Subventionen weiterbetrieben, während moderne Gaskraftwerke und KWK-Anlagen stillgelegt werden. Da es nicht genug Energiespeicher gibt und die veralteten Netze regelmäßig überlastet sind, kann der wachsende Anteil wetterbedingt schwankender erneuerbarer Ener-

gien oft nicht mehr integriert und fehlende Einspeisung nicht mehr ausgeglichen werden. Dass die Stromversorgung immer häufiger zusammenbricht, hat gravierende Folgen für die Volkswirtschaft, aber auch für die Akzeptanz gegenüber der Energiewende. Das EEG sowie das bisher implementierte Strommarktdesign können die Energieversorgung nicht stabilisieren. Es fehlt an einer konsistenten Zusammenführung von EEG und dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), was die Investitionsunsicherheit weiter verschärft.

Nach Jahren der Unterbeschäftigung in konventionellen Kraftwerken kommt es zu erheblichen Arbeitsplatzverlusten in allen Kraftwerksbranchen. Hersteller von Energietechnik sehen sich zunehmend gezwungen, ihre Produktion ins Ausland zu verlagern. Vor allem die Unsicherheiten über die Ausgestaltung der Energiemärkte verhindern, dass in neue Infrastrukturen investiert wird. In Süddeutschland, wo zahlreiche konventionelle Kraftwerke vom Netz genommen wurden, führt die veraltete Infrastruktur immer häufiger zu Versorgungsengpässen und damit zu einer regional unterschiedlichen Wahrnehmung der Energiewende. Insgesamt ist das Verhältnis zwischen Energiepolitik

Verschärfende Ereignisse: Schwächung des europäischen Strommarktes und Klagewelle

Potenzielle Partnerländer von Deutschland in einem gemeinsamen europäischen Strommarkt steigen aus der Europäischen Union aus. Die Beziehungen Deutschlands zu diesen Ländern sind aufgrund des dort immer stärker werdenden Einflusses von Rechtspopulismus und sozialem Extremismus zerrüttet. Die jahrelange Vorreiterrolle Deutschlands in der Energiewende wird zum Standortnachteil, und es zeigt sich, dass eine Energiewende im nationalen Alleingang nicht umgesetzt werden kann.

Es kommt zur Klage eines in Existenznot geratenen Energieversorgungsunternehmens, das aufgrund der immer langwierigeren Genehmigungsverfahren und nicht eingehaltener Bestandsgarantien sein Auskommen nicht mehr sichern kann. Seiner Klage wird in letzter Instanz stattgegeben. Dieses Urteil löst eine Lawine von ähnlichen Klagen aus und sorgt dafür, dass sich auch die letzten Investoren zurückziehen. Der Ausbau und die Instandhaltung des Kraftwerksparks sowie der erneuerbaren Energien und der Stromnetze kommen vollends zum Erliegen. Stromausfälle häufen sich.

und Energiewirtschaft nachhaltig gestört, die Stabilität der Energieversorgung durch unkontrollierte oder fehlgeleitete Veränderungen des Energiemix massiv gefährdet und die Gesellschaft nicht länger bereit, weitere energiepolitische Maßnahmen zu unterstützen.

3.6 Akzeptanzentzug

Ausgangssituation⁷⁵

Seit Beginn der 2020er-Jahre häufen sich negative Schlagzeilen über die Energiewende: Unter anderem berichteten die Medien über das Scheitern eines Bürgerbeteiligungsprozesses rund um den Trassenbau in Bayern, über Verletzungen durch Batteriebrände in Elektroautos und eine Reihe kleinerer Stromausfälle in Hamburg, die durch eine fehlerhafte Smart-Grid-Software verursacht wurden. Darüber hinaus wird in den Medien eine epidemiologische Studie thematisiert, die kleine, statistisch grenzwertige Abweichungen in den Krebshäufigkeiten in der Umgebung von Hochspannungstrassen ausweist. Expertinnen und Experten befürchten daher öffentlich, dass die Energiewende das Versorgungssystem gesundheitsgefährdender macht. Die Recherchen eines Polit-Fernsehmagazins treffen daher auf eine sensibilisierte Öffentlichkeit: Kurz zuvor war der Hackerangriff auf den größten deutschen Stromversorger bekannt geworden, bei dem zahlreiche persönliche Smart-Meter-Daten gestohlen wurden. Mithilfe dieser Daten konnten organisierte Banden Einbrüche planen, weil sie wussten, wann voraussichtlich niemand in der Wohnung war.

Zur gleichen Zeit gibt der Stahlkonzern FerroGlobal bekannt, seine Stahlproduktion aufgrund der im internationalen Vergleich hohen Industriestrompreise ins

Ausland verlagern zu wollen. Einige Kommentatoren bezweifeln, dass dieser Zeitpunkt ein Zufall ist.

Entwicklung

Die schlechte Presse über die Energiewende spiegelt sich nach einer Weile in negativen Umfragewerten wider. Obwohl der Umbau des Energiesystems in wesentlichen Punkten gute Fortschritte macht – Beispiele sind die steigende Erzeugung von Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien, die gelungene europäische Netzintegration und die nach einer Reform des Emissionshandels deutlich sinkenden Kohlendioxidemissionen –, trifft die Energiewende bei der Bevölkerung auf immer weniger Zustimmung. Eine vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie in Auftrag gegebene Studie zeigt, dass sich viele Menschen zwar bereit erklären, grundsätzlich Lasten für die Energiewende zu tragen. Das gilt jedoch nicht, wenn diese durch Fehlplanungen und -entscheidungen verursacht werden.

Wie die Auswertungen zeigen, sind die Befragten unsicher, was im Zuge der Energiewende noch auf sie zukommen wird. Auch viele derjenigen, die dem Umbau des Energiesystems bislang wohlwollend gegenüberstanden, haben durch persönliche Erfahrungen⁷⁶ ihre Meinung geändert und sind skeptisch geworden.

Die sinkende Zustimmung zur Energiewende schlägt sich auch im Monitoringbericht der Bundesregierung nieder. Die Anzahl der Bürgerinnen und Bürger, die als „Prosumenten“⁷⁷ die Energiewende mitgestalten, ist deutlich gesunken.

⁷⁵ Für das Szenario wurden unter anderem Ergebnisse des Projekts „Integrierte Szenarien“ der Helmholtz-Allianz ENERGY-TRANS verwendet.

⁷⁶ Solange über die Energiewende abstrakt nachgedacht wird, ist diese positiv assoziiert („grün“, „gut“ etc.) – sobald jedoch konkret darüber nachgedacht wird, dominieren individuelle Interessen (zum Beispiel „Bitte nicht vor meiner Tür“; „Was heißt das konkret in Euro für mich?“).

⁷⁷ Mit „Prosumer“ oder „Prosument“ wird ein Verbraucher bezeichnet, der sowohl als Produzent als auch als Konsument tätig ist, zum Beispiel ein Haushalt, der eine private Photovoltaikanlage betreibt und daher zeitweise Strom ins Netz einspeist, zu anderen Zeiten jedoch fremderzeugten Strom verbraucht.

Verschärfende Ereignisse: Blackouts, Verunsicherung und erfolgreicher Anti-Energiewende-Wahlkampf

Eine unausgereifte Smart-Grid-Software führt im Winter zu einem großflächigen und anhaltenden Blackout. Dadurch fallen nicht nur die Elektrogeräte, sondern auch viele Heizungen aus. Elektroautos können nicht mehr aufgeladen werden, und auch der öffentliche Nahverkehr steht still. Kurz danach fordert ein ausgedehnter EHEC-Ausbruch* zahlreiche Todesopfer und verunsichert die Menschen in ganz Deutschland. Als Auslöser wird eine Biogasanlage identifiziert.**

Bürgerinnen und Bürger stehen der Energiewende immer skeptischer gegenüber und wollen sie nicht mehr mitgestalten. Es formiert sich eine kleine, aber aktive Protestbewegung gegen die Energiewende, die schließlich auch die unentschlossene Mehrheit beeinflusst. Die Volkspartei X sieht ihren politischen Vorteil in der Abkehr von der Energiewende, punktet in der öffentlichen Meinung und gewinnt mit einem Anti-Energiewende-Programm die nächsten Wahlen. Der Eigenimpuls der Energiewende trägt diese auch ohne politische Rückendeckung weiter, jedoch deutlich verlangsamt und abgeschwächt.

*Enterohämorrhagische *Escherichia coli* (EHEC) sind Bakterien, die potenziell tödliche Darmkrankheiten verursachen. ** Vgl. LfL Bayern 2013.

So wird die Photovoltaikanlage auf dem Dach zunehmend nicht mehr als sozial vorbildlich wahrgenommen, sondern erscheint vielen Bürgerinnen und Bürgern fragwürdig. Das gefährdet den Umbau zu einer dezentraleren Versorgung. Damit dreht sich der Trend der späten 2010er und frühen 2020er-Jahre, in denen der Widerstand Einzelner gegen den Umbau des Energiesystems als sozial verwerflich galt. Auch die Gebäudesanierungsraten gehen zurück. Auswertungen der Berichterstattung in sozialen Medien zeigen, dass kritische Positionen zur Energiewende an Boden gewinnen – egal, wie plausibel sie sind. Marktstatistiken zeigen außerdem, dass sich Bürgerinnen und Bürger beim Kauf neuer Geräte kaum noch an Verbrauchswerten und Energielabels orientieren. Angesichts der kritischen öffentlichen Meinung hält die Regierung zwar grundsätzlich an den Zielen der Energiewende fest. Sie verzichtet jedoch auf alle weiteren Maßnahmen, die von der Bevölkerung abgelehnt werden könnten.

Folgen für die Energiewende

Die sinkende Akzeptanz der Bevölkerung wirkt sich auf alle gesellschaftlichen Ebenen aus. Zum einen sind Bürgerinnen und Bürger immer weniger bereit, sich an der Energiewende zu beteiligen. Ihre Neigung, in dezentrale Erzeugungsanlagen, effizientere Geräte und energetische Sanierungen zu investieren, stagniert oder nimmt ab. Die Proteste von Anwohnerinnen und Anwohnern gegen Trassen, Windparks oder große Energiespeicher häufen sich. Handwerker, Energieberaterinnen und Technologientwickler reduzieren ihre Angebote, Banken stellen höhere Anforderungen an Investoren und Kreditnehmerinnen. Politikerinnen und Politiker werden immer vorsichtiger und zögerlicher. Immer häufiger werden Einzelprojekte daher nicht mehr umgesetzt, und notwendige Reformen und Novellierungen verzögern sich im Parteienstreit. Das „Räderwerk“ der Energiewende gerät somit immer weiter ins Stocken.

4 Auswertung der Szenarien: Handlungsspielräume zur Resilienzförderung

Die Bedrohungsszenarien skizzieren exemplarische Entwicklungsverläufe und Ereignisse, die die Dienstleistungsfähigkeit des Energiesystems stark beeinträchtigen können. Unter Dienstleistungsfähigkeit wird in dieser Analyse die Bereitstellung von sicherer, bezahlbarer und klimafreundlicher Energie verstanden, und das auf sozialverträgliche und europäisch sowie international kompatible Weise.

Die Resilienz des im Umbau begriffenen Energiesystems lässt sich mit drei Ansätzen fördern:

Abbau von Stressoren: Bei diesem Ansatz geht es darum, Stressoren, die die Energiewende gefährden, auszuschalten oder ihre Wirkung zu begrenzen.

Verringerung der Verwundbarkeit des Energiesystems: Ziel ist es, strukturelle Schwachstellen des Energiesystems abzubauen, um es weniger verwundbar zu machen. Die Verwundbarkeit ergibt sich daraus, wie stark Elemente des Systems Stressoren ausgesetzt sind und wie empfindlich sie ihnen gegenüber sind.⁷⁸ Wo zukünftige Stressoren noch nicht bekannt sind, sollte zudem die Systemarchitektur so angepasst werden, dass Schwachstellen vermieden werden.

Minderung negativer Konsequenzen: Hier geht es darum, negative Folgen zu reduzieren, um die energiepolitischen Ziele weiterhin erreichen und umsetzen zu können.

Diese drei Ansätze der Resilienzförderung sind komplementär: Um Resilienz zu fördern, müssen die drei kombiniert werden – ein Ansatz allein reicht nicht aus. Allerdings kann es je nach Bedrohung nötig sein, Schwerpunkte zu setzen. Zielkonflikte können also nicht ausgeschlossen werden.

4.1 Interventionsspielräume Anschläge

Abbau von Stressoren

Die Stressoren in diesem Szenario sind kriminell motivierte physische und digitale Angriffe. Um sie zu verhindern, werden Polizei und Geheimdienste künftig neu entwickelte Technologien wie berührungslose Sprengstoffdetektoren oder innovative Überwachungstechniken nutzen. Zum Schutz vor Angriffen auf das Energienetz kann die zivile Sicherheitsforschung diese Technologien in Zusammenarbeit mit Behörden weiterentwickeln und spezifizieren. Dabei muss die Rechtslage hinsichtlich Datenschutz und Persönlichkeitsrechten jedoch genau beachtet werden.

Verringerung der Verwundbarkeit

Funktionale und diverse Redundanz leisten einen wesentlichen Beitrag zur Resili-

⁷⁸ Während Verwundbarkeit in der Klimaforschung eher als Resultat aus Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität verstanden wird, drückt sich Anpassungskapazität bei dieser Typendifferenzierung eher im Ansatz „Minderung negativer Konsequenzen“ aus (vgl. Gößling-Reisemann et al. 2013-1).

enz des Energiesystems.⁷⁹ Als derzeitiger Standard gilt die sogenannte (n-1)-Regel. Sie besagt, dass in einem System mit n Objekten, die für eine Aufgabe zuständig sind, diese auch erfüllt werden kann, wenn eines der Objekte ausfällt. Im Zuge der Energiewende wird die Energieversorgung allerdings dezentraler, weshalb diese Regel nicht mehr einziger Maßstab sein kann. Vielmehr muss sie auf das (n-x)-Prinzip erweitert werden. Gleichzeitig können dezentrale Systeme als vermaschte Netze angelegt werden, in denen von Anfang an Redundanz eingebaut ist und die daher weniger verwundbar sind. Einzelne Komponenten des Systems sollten durch andere ersetzt werden können. Bewährte Mittel dafür sind Puffer und Speicher. Das dezentralisierte Netz wird durch „Teilvermaschung“ und stärkere Autonomie resilienter. So können Teilsysteme mindestens vorübergehend weiter funktionieren, auch wenn das übergeordnete System ausfällt.

Das Energiesystem wird robuster, indem systemkritische Schwachstellen behoben und Knotenpunkte geschützt werden. Denkbar sind hier eine dezentral gesteuerte Betriebsführung und -optimierung sowie das Vermeiden systemkritischer Angriffspunkte („Single Points of Failure“). Die Resilienz erhöhen würden auch Zugriffsbeschränkungen auf die Kommunikations- und Informationsnetze aller zur Energieversorgung gehörenden Systeme, insbesondere solcher in Privateigentum. Idealerweise sollten die Schutzstrategien bereits Teil des Systemdesigns sein (Resilience Engineering).⁸⁰ Neue Methoden zur Modellierung und Simulation

komplexer Systeme könnten helfen, kritische Schnittstellen und Einfallstore für Angriffe zu identifizieren und zu beseitigen. Bisherige Methoden identifizieren in erster Linie Verwundbarkeiten gegenüber bekannten Stressoren. Für den Erfolg der Energiewende ist es nötig, auch Modelle und Simulationen zu entwickeln, die unerwartete Ereignisse und die Reaktion komplexer Systeme darauf abbilden und die Folgen davon prognostizieren können. Dafür müssen mathematische und informationstechnische Grundlagen sowie anwendungsnahe Methoden für kritische Infrastruktursysteme entwickelt werden. Voraussetzung dafür ist ein koordiniertes Online-Monitoring des Systems.

Alle Akteure eines digital vernetzten Energiesystems sollten mit zielgruppen-gerechten Informations- und Bildungsprogrammen dafür sensibilisiert werden, Sicherheitsrichtlinien für Informationstechnik und -systeme einzuhalten sowie Verantwortung zu übernehmen. Schließlich tragen in einem dezentralen System auch Privatpersonen und Unternehmen als Betreiber regenerativer Erzeugungsanlagen zur Energieversorgung bei.

Minderung negativer Konsequenzen

Etablierte Reparaturmechanismen könnten nach einem Angriff helfen, die Ausfalldauer von Systemen zu minimieren. Dazu zählen unter anderem standardisierte, austauschbare Systemkomponenten. Digitale Komponenten mit standardisierten Schnittstellen können zwar möglicherweise die Verwundbarkeit gegenüber Hackern erhöhen, weil spezialisierte Angriffe direkt eine große Zahl von Systemen treffen können, wenn sie Protokollschwachstellen ausnutzen. Trotzdem überwiegen die Vorteile der standardisierten Schnittstellen: So kann der Systembetrieb schneller wiederaufgenommen werden, und kompromittierte Systemelemente lassen

79 Funktionale Redundanz sorgt dafür, dass eine Funktion von einer anderen Komponente übernommen werden kann, wenn die ursprüngliche Komponente ausfällt. Noch mehr Sicherheit kann durch diverse Redundanz erreicht werden. Sie liegt vor, wenn die zusätzliche Komponente auf anderen physischen oder informatischen Prinzipien aufbaut als die ursprüngliche Komponente. Dadurch kann verhindert werden, dass dieselbe Störung gleich beide Komponenten lahmlegt.

80 Vgl. Thoma et al. 2016, S. 12–14.

sich leichter austauschen. Bei den Komponenten sollte Diversität gewährleistet sein, damit die Auswirkungen von Angriffen auf die jeweiligen Komponententypen beschränkt bleiben.

Die Energieversorgung kann auch durch das strategische Vorhalten von Notfall- und Reservekapazitäten gesichert werden, etwa in Form von mobilen Energiespeichern oder klassischen Dieselgeneratoren. Dazu sollte die Forschung zu Energiespeichern ausgeweitet werden. Außerdem müssen wichtige Akteure davon überzeugt werden, dass derartige Reservekapazitäten erforderlich sind. Der vorübergehende Rückfall (während einer Störung oder eines Wiederaufbaus) auf eingeschränkte Funktionsfähigkeit oder „Servicelevels“ bei der Stromversorgung könnte das Aufrechterhalten zentraler Versorgungsdienstleistungen gewährleisten; zum Beispiel könnten nur Licht, Heizung und Kommunikationssysteme erlaubt und vergleichsweise unwichtige Verbraucher wie Leuchtreklamen abgeschaltet werden („Graceful Degradation“).

Vorbeugende Maßnahmen wie Notfallübungen und Krisenkommunikationspläne helfen dabei, die Bevölkerung frühzeitig einzubeziehen und die Gefahr von Panik und Vertrauensverlust zu mindern. Entscheidend dabei ist, aufrichtig zu sein und den Bürgerinnen und Bürgern zu vermitteln, dass eine Energieversorgung mit hundertprozentiger Verfügbarkeit nicht immer gewährleistet werden kann. In der Kommunikation zwischen Energieexpertinnen und -experten und der Bevölkerung ist es zentral, Handlungsoptionen zu betonen und zu zeigen, welche effektiven Präventivmaßnahmen den Bürgerinnen und Bürgern zur Verfügung stehen. Dazu beitragen könnten etwa stationäre Energiespeicher, die entweder in jedem Haus oder auf Straßen- oder Häuserblockebene installiert werden könnten.

4.2 Interventionsspielräume Wetterextreme

Abbau von Stressoren

Die Stressoren in diesem Szenario sind klimabedingt und lassen sich grundlegend nur durch einen konsequenten und massiven Klimaschutz, das heißt eine deutliche und rechtzeitige Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen, verringern. Mit einem gewissen Maß an Klimawandel ist aber selbst unter optimistischen Annahmen zu rechnen. Es gilt daher, Schwachstellen im Energiesystem abzubauen und negative Konsequenzen einzudämmen.

Verringerung der Verwundbarkeit

Die Verwundbarkeit des Energiesystems gegenüber Wetterextremen wird hier verstanden als eine Kombination aus spezifischen Sensitivitäten gegenüber Wettereinflüssen und grundlegenden Schwächen im System. An beiden Stellen lässt sich ansetzen. Um besser gegen Wetterextreme gewappnet zu sein, sollte insgesamt weniger elektrische Energie, Wärme und Kälte verbraucht werden.⁸¹ Sofern nicht im gleichen Maße Erzeugung, Netze und Speicher zurückgebaut werden, steigen dadurch die Reservekapazitäten. Störungen an Kraftwerken oder an vorgelagerten Versorgungsstrukturen wirken sich damit weniger dramatisch aus. Der Nachteil dieser Strategie ist jedoch, dass die verbleibenden Strukturen ökonomisch gesehen weniger effizient wären und bei verringertem Absatz auch das Ersetzen veralteter Systeme unter Umständen nicht mehr so rentabel wie vorher wäre.

Um Stromnetze robuster gegenüber Stürmen, Hitze oder Vereisung zu machen, könnten die Leitungen in beson-

⁸¹ Dabei müssten Rebound-Effekte berücksichtigt werden, die im schlechtesten Fall die Bemühungen um Verbrauchsminderungen mittels technischer Effizienzsteigerungen komplett zunichtemachen könnten. Ein Rebound-Effekt von mehr als 100 Prozent, auch „Backfire“ genannt, führt zu einem erhöhten Verbrauch durch eigentlich als verbrauchsmindernd geplante Maßnahmen.

ders exponierten Gegenden als Erdkabel verlegt werden. Regionale Klimamodelle würden dabei helfen, Anlagen und Masten an zukünftige Herausforderungen anzupassen. Die Überwachung der Leiterseiltemperatur (Leiterseilmonitoring) und Hochtemperaturleiterseile können Freileitungen besser vor starker Hitze schützen. Die Netztopologie (ring- oder sternförmige Leitungssysteme, höherer Vermaschungsgrad) hat ebenfalls großen Einfluss darauf, wie robust ein Netz ist. Bei der Netzplanung müssen die zusätzlichen Kosten für diese Maßnahmen ins Verhältnis zu den potenziell vermiedenen Schäden gesetzt werden. Ein neugestalteter Umgang mit unbekanntem Risiken („schwarze Schwäne“) ist nötig, da die regionalen Auswirkungen des Klimawandels – insbesondere Stürme und Vereisungen – noch sehr unsicher sind.

Sinnvoll wäre es, thermische durch nicht-thermische Kraftwerke zu ersetzen. Hierbei ist jedoch wichtig, dass diese nicht nur abschaltbar sind, sondern je nach Bedarf auch zusätzlichen Strom einspeisen können,⁸² wie Wasserkraftwerke und speichergestützte Windparks oder Photovoltaikanlagen. Wichtig ist außerdem die „Schwarzstartfähigkeit“ dieser Anlagen, also die Fähigkeit, nach Stromausfällen ohne Energie von außen wieder hochzufahren. Verbleibende thermische Kraftwerke sollten durchgehend mit Kühltürmen statt mit einfacher Durchflusskühlung ausgestattet werden. Dadurch wären sie weniger anfällig für Kühlwassermangel.⁸³

Speicher im Energiesystem können genutzt werden, um die Sensitivität gegenüber Störungen zu verringern. Rahmenbedingungen wie finanzielle Anreize oder

regulatorische Vorgaben und Anschlussverordnungen können dazu beitragen, Speicher aufzubauen, die das gesamte System stabilisieren. Diese Vorgaben sollten auch für Umwandlungen von Strom in Wärme, Gas oder Kraftstoffe gelten, da Power-to-X-Technologien⁸⁴ künftig eine größere Rolle spielen. Entsprechend systemdienlich sind zum Beispiel das Bereitstellen von negativer und positiver Regelenenergie, Blindleistungsmanagement und Reservekapazitäten. Die Resilienz des Energiesystems gewährleisten die Speicher vor allem deshalb, weil sie zum Tragen kommen, wenn die anderen flexibilisierenden Strukturen zusammenbrechen oder unerreichbar sind, zum Beispiel bei großräumigen Netzausfällen, bei einem Zusammenbruch von IT- und Kommunikationsstrukturen oder dem Ausfall von Kraftwerken. Wichtige Voraussetzung ist auch hier die „Schwarzstartfähigkeit“ der Speicher. Um die Versorgung bei großflächigen Ausfällen sicherzustellen, sollten die Speicher möglichst dezentral verteilt und geografisch gestreut werden.

Eine Konzentration von thermischen Kraftwerken an Standorten mit potenziell niedrigem Wasserpegel und damit knappem Kühlwasser sollte vermieden werden. Ebenso kann die geografische Verteilung von Windparks und Solaranlagen die Folgen regional unterschiedlicher Wetterbedingungen für die Strombereitstellung teilweise ausgleichen. In Regionen mit potenziell hohem Belastungspotenzial für thermische Kraftwerke sollten insbesondere nicht-thermische Kraftwerke errichtet werden.

Grundsätzlich kann die Diversifizierung des Kraftwerksparks das Gesamtsystem robuster machen. Daher sollten die einzelnen Anlagen so austariert werden,

82 Dass diese Anlagen nicht nur negative – sie können abgeschaltet werden –, sondern auch positive Regelenenergie – sie können zusätzlichen Strom einspeisen – bereitstellen, trägt dazu bei, die Netzfrequenz stabil zu halten.

83 Dies ist bei vielen Neubauten schon heute der Regelfall.

84 „Power-to-X“ bezeichnet verschiedene Technologien zur Speicherung beziehungsweise zur anderweitigen Nutzung von Stromüberschüssen in Zeiten eines (zukünftigen) Überangebotes Erneuerbarer Energien im Stromnetz. Der Begriff „Power-to-X“ ist damit eine Erweiterung von „Power-to-Gas“.

dass bei Extremereignissen ausreichend Restkapazität zur Verfügung steht. So sind beispielsweise Photovoltaikanlagen von lang anhaltender Schneebedeckung betroffen, Windräder jedoch nicht; diese sind anfälliger für Stürme und Vereisungen. Thermische Kraftwerke wiederum sind stärker von Hitzewellen betroffen als Photovoltaik- und Windenergieanlagen.

Auch für die Gasversorgung gilt, dass die Bezugsquellen ausgeweitet werden sollten. Eine Diversifizierung der Lieferländer und eine stärkere Versorgung mit Flüssiggas können die leitungsgebundene Importabhängigkeit Deutschlands reduzieren. Bei hohen Stromüberschüssen könnten Power-to-Gas-Anlagen einen zusätzlichen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten. Voraussetzung dafür wäre eine Verpflichtung der Anlagenbetreiber, sich systemdienlich für die Gasversorgung einzusetzen. Wenn Power-to-X-Anlagen in erster Linie die chemische Industrie mit Grundstoffen beliefern und zur Kraftstoffversorgung beitragen, sind die Flexibilitätsoptionen deutlich eingeschränkt.

Power-to-Heat⁸⁵-Konzepte, Wärmepumpen oder Geothermie können zur Diversifizierung der Wärmebereitstellung beitragen. Dies kann in Form dezentraler oder zentraler Anlagen mit Fernwärmekopplung geschehen und durch Wärmespeicher flexibilisiert werden. Anwendungen dafür sind sowohl in privaten Haushalten als auch im gewerblich-industriellen Umfeld möglich, wobei in beiden Fällen Cluster gebildet und etwa in Wohn- oder Industriequartieren Anlagen gemeinsam betrieben werden können.

Minderung negativer Konsequenzen

Abgesehen von Ausnahmen wie dem „Münsterländer Schneechaos“, das im November 2005 rund 250.000 Menschen

tagelang von der Stromversorgung abschnitt, ist Deutschland von Ausfällen der Versorgung durch Wetterextreme bisher weitgehend verschont geblieben. Daher liegt jedoch kaum Handlungswissen für derartige Situationen vor; die Konsequenzen könnten besonders gravierend ausfallen. Dies könnte verhindert werden, wenn sowohl die Bevölkerung als auch spezifische Nutzergruppen für die Gefahren sensibilisiert würden. Beispiele für konkrete Maßnahmen sind regelmäßige Notfallübungen, Planspiele, Blackout-Simulationen, Informationen über Vorsorgemaßnahmen für Privathaushalte und eine offene Kommunikation über mögliche Risiken.

Wetterbedingte Ausfälle der Energieversorgung treffen Nutzer sowie einzelne Energiesektoren in unterschiedlichem Maße. Bei Hitzewellen beispielsweise sind junge, ältere oder kranke Menschen – und damit auch Kindergärten, Seniorenheime und Krankenhäuser – besonders stark betroffen; ein Ausfall der Stromversorgung trifft sie umso härter. Hier könnten mobile Klimatisierungsanlagen mit geeigneten Energieträgern Abhilfe schaffen. Würden verstärkt thermische oder geothermische Klima- und Kälteanlagen genutzt und mehr Dachflächen im urbanen Raum begrünt, um den städtischen Wärmeinselleffekt abzuschwächen, wäre das Stromnetz bei Hitzewellen entlastet. Dies würde nicht nur die Stromversorgung stabilisieren, sondern auch die Chancen erhöhen, dass bei einem Stromausfall netzunabhängige Notfallkühlungen elementare Systemdienstleistungen aufrechterhalten können. Zusätzlich würde der durch den Klimawandel tendenziell steigende Strombedarf für Kühlung und Klimatisierung reduziert. Dies ist insbesondere relevant für den Fall vermehrt auftretender Hitzewellen bei gleichzeitiger Windflaute, bei denen es sonst zu einer Unterversorgung oder einer Netzüberlastung kommen könnte.

⁸⁵ „Power-to-Heat“ bezeichnet die Nutzung von Stromüberschüssen zur Wärmeerzeugung (Heizwärme und Prozesswärme) oder Wärmespeicherung zu Zeiten eines Stromüberangebotes.

Wegen der erhöhten Gefahr eines Blackouts sollten Erneuerbare-Energie-Anlagen frühzeitig auf Schwarzstartfähigkeit vorbereitet werden, damit sie auch unabhängig vom Stromnetz agieren können. Dazu gehören Maßnahmen auf Ebene der Einzeltechnologien, zum Beispiel Notstromversorgung von Windenergieanlagen, Synchronisierung der Wechselrichter mit einem semi-stabilen Netz und der verstärkte Einsatz von Hochleistungshalbleitern. Darüber hinaus müssen die Netze umgestaltet werden. Durch ein zelluläres Design der Stromversorgung beispielsweise werden im Falle eines Blackouts zunächst Inseln der Stromversorgung wiederaufgebaut, die sich zunehmend miteinander vernetzen. Auch durch das Verlegen von Erdkabeln auf der Hoch- und Höchstspannungsebene würde die Gefahr von großflächigen Stromausfällen reduziert, denn dadurch gäbe es weniger Masten und Freileitungen, die Stürmen, Vereisungsbedingungen und Heißwetterlagen ausgesetzt sind.

4.3 Interventionsspielräume Rohstoffverknappung Erdgas

Abbau von Stressoren

Der Hauptstressor in diesem Szenario ist eine plötzliche Knappheit bei der Flüssiggasversorgung in den 2020er-Jahren. Um dieses Risiko zu minimieren, müssen die Bezugsquellen erweitert werden. Dies wird möglich, indem Erdgas aus unterschiedlichen Quellen im Ausland importiert wird – sowohl in Form von Flüssiggas als auch über Pipelines aus dem Mittleren Osten, Russland und Zentralasien. Darüber hinaus empfiehlt die Akademie für Geowissenschaften und Geotechnologien, auch die Erdgasgewinnung im eigenen Land auszubauen.⁸⁶ Ziel sei es, die techno-

logischen und rechtlichen Voraussetzungen für einen sicheren und umweltschonenden Abbau heimischer Gasvorkommen durch „Fracking“ zu schaffen. Um von dieser Möglichkeit im Notfall relativ schnell Gebrauch machen zu können, könnte eine Reihe von Vorkommen so weit exploriert werden, dass ein Förderbeginn innerhalb weniger Wochen möglich wäre. Ein 2015 erschienenenes Positionspapier von acatech zum Thema „Fracking“ und seinen potenziellen Risiken kommt zum Ergebnis, dass ein generelles Verbot auf Basis von wissenschaftlichen und technischen Fakten nicht begründbar ist. Der Einsatz dieses Verfahrens müsse allerdings strengen Sicherheitsstandards folgen, klar geregelt sein und umfassend überwacht werden.⁸⁷

Eine weitere Möglichkeit, den Bezug zu diversifizieren, wäre es, das Potenzial von „Power-to-Gas“ auszuschöpfen, mit dessen Hilfe erneuerbarer Überschussstrom in Zeiten eines geringen Verbrauchs gespeichert werden kann. Dabei wird Strom von der Wind- und Solarenergie mittels Wasserelektrolyse in Wasserstoff umgewandelt.⁸⁸ Eine weitere Möglichkeit wäre es, Wasserstoff mittels der Sabatier-Reaktion in Methan umzuwandeln, das sich besser speichern lässt.

Verringerung der Verwundbarkeit

Die wirksamste Maßnahme, um die Erdgasversorgung robuster zu machen, wären neue Speicherkapazitäten. Im Jahr 2014 verfügte die Bundesrepublik über circa 24 Milliarden Kubikmeter Speicherkapazität in 51 Untergrundspeichern (etwa 40 Prozent Porenspeicher für saisonale und 60 Prozent Kavernenspeicher für tägliche Schwankungen).⁸⁹ Dieses Volumen entspricht rund einem Viertel der in

86 Akademie für Geowissenschaften und Geotechnologien 2015. Die heimische Produktion deckte 2014 10 Prozent des deutschen Bedarfs, weitere 45 Prozent stammten aus anderen westeuropäischen Ländern (Kiesel 2014).

87 acatech 2015.

88 Vgl. auch Kapitel 4.4. Zurzeit ist eine Beimischung von 5 Prozent Wasserstoff im Erdgasnetz rechtlich zulässig; eine Erhöhung auf 10 Prozent oder sogar 20 Prozent wäre technisch mit den heutigen Nutzungsbedingungen von Gas in Industrie, Kleingewerbe und Haushalt kompatibel (Müller et al. 2012).

89 Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie 2016.

Deutschland im Jahr 2013 verbrauchten Erdgasmenge. In Zukunft könnte das Speichervolumen noch weiter ausgebaut werden, womit langfristig ein Gasvolumen von rund 32 Milliarden Kubikmetern zur Verfügung stünde.⁹⁰ Um künftigen Versorgungsausfällen entgegenzuwirken, scheint jedoch auch eine Reserve von einem Drittel des jährlichen Gasverbrauchs noch zu niedrig zu sein. Vielversprechender wäre es, die Option einer nationalen strategischen Gasreserve nach dem Vorbild der früheren Ölreserve zu prüfen.⁹¹

Minderung negativer Konsequenzen

Im Falle eines unerwartet schnell eintretenden Engpasses bei der Gasversorgung hinge das Ausmaß des Schadens maßgeblich davon ab, wie lang dieser andauert und wie viele Speicher zur Verfügung stehen. Um die Versorgung im Krisenfall aufrechterhalten zu können, sollten Möglichkeiten einer stärkeren Vernetzung der Energiesektoren geprüft werden. Infrage kämen hier vor allem „Power-to-Heat“-Technologien, bei denen überschüssiger Solar- und Windstrom für die Warmwasserbereitung und für Fernwärmenetze eingesetzt wird.⁹²

4.4 Interventionsspielräume Rohstoffverknappung Metalle

Abbau von Stressoren

Die Stressoren in diesem Szenario sind wachsende Widerstände der Bevölkerung gegen neue Bergbauvorhaben, landesweite Streiks von Hüttenarbeitern und Exportstopps, um Technologien für erneuerbare Energien im eigenen Land voranzutreiben; sie treten also an den Förderstätten der Platingruppenmetalle auf. Der Hand-

lungsspielraum der deutschen Politik ist daher begrenzt. Zentral ist hier eine vorbeugende und langfristig angelegte Strategie, um die „Social License to Operate“, also die Zustimmung der lokalen Bevölkerung, sicherzustellen. Auf zwischenstaatlicher Ebene könnten Maßnahmen für eine nachhaltige Rohstoffwirtschaft in Investitions- und Handelsabkommen verankert werden.⁹³ Auch die Entwicklungszusammenarbeit sollte darauf hinwirken, in Produktionsländern Rahmenbedingungen zu schaffen, um die Rohstoffförderung entsprechend nachhaltig und sozialverträglich zu gestalten.⁹⁴ Auf internationaler Ebene ist entscheidend, dass ein transparenter Datenaustausch gesichert ist und Antikartellbemühungen erfolgreich anlaufen, sodass weitere Firmenkonzentrationen vermieden werden.

Verminderung der Verwundbarkeit

Eine strukturelle Schwachstelle des Energiesystems liegt in der Importabhängigkeit Deutschlands bei Metallen. Das gilt nicht nur für die genannten PGM, sondern praktisch für alle Metalle und damit auch für viele Rohstoffe, die für die Energiewende wichtig sind. Wenn zu wenige Rohstoffe auf dem Markt sind, kann dies zu Versorgungsengpässen und starken Preissteigerungen führen. Diese Verwundbarkeit kann durch wirksames Recycling verringert werden.

„Heimische“ Rohstoffe sind in Deutschland die Sekundärrohstoffe. Sie stehen allerdings nur begrenzt zur Verfügung, denn die „heimischen Lagerstätten“ – also die Vorkommen in Altprodukten – sind limitiert. Sekundärrohstoffe werden in der Regel bevorzugt eingesetzt, denn das Recycling ist meist weniger energieaufwendig und günstiger als die

⁹⁰ BMWi 2014-2.

⁹¹ Diese Möglichkeit wurde in dem 2015 erschienenen Bericht einer Untersuchungskommission vorgeschlagen, die im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums durchgeführt wurde (Becker-Büttner-Held 2015).

⁹² Das Thema „Vernetzung der Energiesektoren“ ist zurzeit (März 2017) Gegenstand einer weiteren Analyse und Stellungnahme des Akademienprojekts ESYS.

⁹³ Die Rohstoffstrategie der Bundesregierung (BMWi 2010) identifiziert wesentlichen nationalen Handlungsspielraum.

⁹⁴ Ein Positionspapier des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung legt hier bereits den Grundstein (BMZ 2010).

Verwendung von Primärrohstoffen. Das gilt für alle Basis- und Edelmetalle sowie für die hier betrachteten PGM, bei denen die Recyclingraten hoch sind.⁹⁵ Kann der Schrott zusammen mit Kupfer verhüttet werden, ist es möglich, auch geringe Mengen wirtschaftlich wiederzugewinnen. Kupfer ist ein idealer Sammler für Edelmetalle und andere Nebenmetalle, wie Tellur oder Nickel. Für die Basis- und Edelmetalle sowie weitere Nebenmetalle gibt es bereits zuverlässige Recyclingverfahren. Dies gilt jedoch nicht für Elemente wie Seltene Erden oder Metalle wie Indium, Germanium oder Gallium, bei denen die Recyclingraten bisher noch sehr niedrig sind. Für diese Rohstoffe, die für künftige Energiesysteme wichtig sind, müssen neue Verfahren zur Wiedergewinnung entwickelt werden.⁹⁶

Recycling ist dann nicht mehr zweckmäßig, wenn es kostengünstiger ist, Primärmaterialien einzusetzen und die Verarbeitung von Sekundärrohstoffen energieaufwendiger wird als die Gewinnung und Weiterverarbeitung von Primärrohstoffen.⁹⁷

Minderung negativer Konsequenzen

Ein Engpass in der Versorgung mit Rohstoffen ist vor allem dann problematisch, wenn ein knappes Element nicht durch ein anderes ersetzt werden kann. Eine langfristig angelegte Strategie ist es, die Industrie zu motivieren, den Regelkreis der Rohstoffversorgung so weit wie möglich vorbeugend zu entwickeln und nicht erst auf einen Preisanreiz zu warten. Je flexibler die Industrie reagieren kann, desto geringer sind die Konsequenzen eines Versorgungsengpases. Die wesentlichen Elemente des Regelkreises der Rohstoffversorgung sind:

- **Sparsamerer Materialverbrauch:** Da Gewinnung, Verarbeitung und Wiederverwertung von Rohstoffen in der Regel kostenintensiv sind, ist das Ziel, mit weniger Materialien auszukommen. Der effiziente Umgang mit Rohstoffen wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie mit dem Rohstoff-Effizienzpreis gewürdigt.
- **Direkte Substitution:** Die sechs Platingruppenelemente Platin, Palladium, Ruthenium, Rhodium, Iridium und Osmium treten in Lagerstätten immer als gekoppelte Elemente auf. In vielerlei Hinsicht haben sie ähnliche Eigenschaften. Da sie am Markt jedoch unterschiedlich nachgefragt werden, bilden sich unterschiedliche Preise. Je einfacher in einem Produkt ein PGM-Element durch ein anderes – oder eine andere PGM-Kombination – ersetzt werden kann, desto flexibler wird das Gesamtsystem. Außerdem kann die Forschung zum Beispiel alternative Katalysatormaterialien für die Elektrolyse entwickeln.⁹⁸ Auch wenn derartige Katalysatoren eine geringere Effizienz haben sollten, unterstützen sie die Versorgung in einer Engpasssituation.
- **Technologische Substitution:** Der PGM-Bedarf bei der Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff kann reduziert werden, wenn andere elektrochemische Verfahren (zum Beispiel das SOEC-Verfahren) zum Einsatz kommen, da diese nicht unbedingt Metalle als Elektrodenmaterial benötigen.

Weitere mögliche Maßnahmen, um negativen Folgen von Engpässen bei für die Energiewende relevanten Rohstoffen zu begegnen:

⁹⁵ UNEP 2011.

⁹⁶ UNEP 2011.

⁹⁷ Zum Optimum von Recycling vgl. Angerer et al. 2016.

⁹⁸ Das geschieht zum Beispiel im Clustervorhaben MANGAN (FONA 2015).

- Es sollten geschlossene Kreisläufe geschaffen werden, aus denen die PGM am Lebensende eines Produktes in hochwertigen Verfahren recycelt und für die Herstellung neuer Produkte genutzt werden können.⁹⁹
- Sammelsysteme für Elektronikabfälle und ausgediente Katalysatoren¹⁰⁰, die PGM und weitere relevante Metalle enthalten, sollten verbessert werden. Darüber hinaus gilt es, illegale Exporte dieser Schrotte in Länder einzudämmen, in denen nur ein höchst selektives Recycling erfolgt.¹⁰¹ Im Extremfall ist eine Regulierung der Exporte von Katalysatoren der Altagautos denkbar, damit Platingruppenmetalle in Deutschland bleiben.¹⁰²
- Materialien, die derzeit nicht wirtschaftlich recycelt werden können, sollten zwischengelagert werden, bis bessere Verfahren entwickelt sind oder ein Recycling wirtschaftlich wird. Bei PGM sind über den genannten Kupferkreislauf auch sehr niedrighaltige Schrotte verwertbar.

99 Bei der Wasserstoffelektrolyse handelt es sich grundsätzlich um industrielle Anwendungen (B2B), was das Schließen von Kreisläufen vereinfacht. Ein vergleichbarer industrieller PGM-Einsatz findet bei Prozesskatalysatoren in der chemischen und petrochemischen Industrie statt. Hier betragen die PGM-Recyclingraten bezogen auf den Produktlebenszyklus auch bei langjährigen Standzeiten der Katalysatoren über 90 Prozent. Die etablierten Geschäftsmodelle in diesem Segment können auf PGM für die Wasserstoffelektrolyse übertragen werden, sodass nach einer mehrjährigen Aufbauphase des PGM-Inventars in den Anlagen der PGM-Bedarf für neue Anlagen weitgehend durch das Recycling von Altanlagen gedeckt werden kann. Während des Aufbaus kann auf Material aus dem Konsumgüterbereich zurückgegriffen werden. Dafür muss zum Beispiel das Recycling von Autokatalysatoren oder Elektronikschrotten verbessert werden.

100 Obwohl es sich beim Platin in Abgaskatalysatoren – im Gegensatz zu PGM in Brennstoffzellen oder Katalysatoren in Chemieprozessen – um ein offenes System handelt, ist die technische Entwicklung heute so weit fortgeschritten, dass die Verluste während der Nutzungsphase minimal und im Vergleich mit den Verlusten beim Sammeln von Sekundärmaterial vernachlässigbar sind (vgl. Hagelüken 2005).

101 Hagelüken 2014.

102 Diese Katalysatoren enthalten allerdings kein Iridium.

4.5 Interventionsspielräume Governance-Versagen

Abbau von Stressoren

Ein wichtiger Stressor sind politische Unwägbarkeiten und Risiken wie plötzliche Kursänderungen durch Regierungsneubildungen und ebenso schnelle Änderungen von Marktregulierung und Marktdesign. Das politische Risiko kann vermindert werden, indem eine langfristige Strategie zur Erreichung der Energiewendeziele klar formuliert, kommuniziert und gesetzlich verankert wird. Die regulatorischen Rahmenbedingungen der Energie- und Kapitalmärkte sollten weder zu oft noch unüberlegt geändert werden, damit Investoren nicht abgeschreckt werden und das nötige Kapital in die Energiewende fließen kann. Regelmäßige, langfristig ausgerichtete Politikfolgenabschätzungen aller neuen Gesetze könnten dazu beitragen, Unsicherheiten zu verringern und Konsequenzen politischer Beschlüsse im Vorfeld besser beurteilen zu können.

Werden zivilgesellschaftliche Akteure frühzeitig in die Politikgestaltung einbezogen, steigt die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber politischen Entscheidungen. Außerdem können verschiedene gesellschaftliche Interessen besser berücksichtigt und ausbalanciert werden, wodurch politische Strategien gestärkt werden. Damit verringern sich die Gefahren eines abrupten Politikwechsels und der Skandalisierung sowie das Risiko einer Torpedierung politischer Entscheidungen (vgl. die Interventionen zum Szenario „Akzeptanzverlust“).

Verringerung der Verwundbarkeit

Strukturelle Schwachstellen können reduziert werden, indem die Energiemärkte durchlässiger und die Energieträger Strom, Gas, Wärme und Kraftstoffe flexibler umgewandelt werden. Um die Flexibilität zu erhöhen, bedarf es nicht nur einer geeigneten Infrastruktur, sondern auch gesetzlicher Rahmenbedingungen,

die insbesondere die großflächige Realisierung von Power-to-X-Technologien unterstützen. Verwandte Gesetze (zum Beispiel das Energiewendegesetz und das Erneuerbare-Energien-Gesetz) könnten so miteinander in Einklang gebracht oder sogar kombiniert werden.

Aktuelle politische Entwicklungen können dazu führen, dass Energiepolitik und Klimastrategien in den Hintergrund geraten, weil sich tagesaktuelle Probleme in den Vordergrund drängen. Wenn diese Themen in der Verfassung verankert würden, erhielten sie eine höhere politische Priorität. Damit wäre auch die grundsätzliche Beibehaltung der Energie- und Klimapolitik bei Regierungswechseln sichergestellt. Durch unabhängige Expertengutachten und Berichte von Enquete-Kommissionen könnte die Kontinuität der Energie- und Klimapolitik gefördert werden. Parallel dazu würde ein öffentlich einsehbares Erfolgsmonitoring der Energie- und Klimapolitik für Transparenz sorgen und offenlegen, wo Verbesserungsbedarf besteht.

Minderung negativer Konsequenzen

Die negativen Konsequenzen eines Governance-Versagens können gemildert werden, indem strategische Kraftwerksreserven vorgehalten werden (gegebenenfalls im europäischen Verbund) und der Netz- und Speicherausbau bewusst vorangetrieben wird. Wichtig ist in diesem Kontext, Industrie, Gewerbe und Privathaushalte zu ermutigen, mehr Selbstverantwortung zu übernehmen und dezentrale Systeme zu stärken. Dadurch werden großflächige Systemausfälle unwahrscheinlicher. Kosten und Nutzen dieser Maßnahmen müssen jedoch sorgfältig abgewogen werden.

Wenn grundsätzlich an der ökologischen Steuerreform festgehalten würde, wäre auch dann eine gewisse Dekarbonisierung von Wirtschaft und Gesellschaft gewährleistet, wenn Energie- und Klimapolitik scheitern. Dazu könnte auch beitragen, insbesondere die jüngere Ge-

neration stärker für die langfristig angelegten Ziele der Energiewende und der resilienten Gestaltung des Energiesystems zu gewinnen – schließlich ist sie von diesen Änderungen am meisten betroffen. Dadurch könnte auch modernen, umweltentlastenden und energieeffizienten Lebensstilen stärkere Aufmerksamkeit zuteilwerden (wie zum Beispiel „Junge Erwachsene ohne Auto“).

4.6 Interventionsspielräume Akzeptanzenzug

Abbau von Stressoren

Verschiedene Faktoren könnten dazu führen, dass die Bevölkerung nicht mehr hinter der Energiewende steht. Dazu zählen unvorhersehbare Ereignisse und Belastungen sowie Sorgen vor möglichen künftigen Risiken, die Wahrnehmung einer unfairen Lasten-Nutzen-Verteilung oder das Gefühl, in der Energiewende keine aktive Rolle zu spielen. Belastungen der Bevölkerung, die als vermeidbar und als Folge falscher politischer Entscheidungen wahrgenommen werden – etwa Erhöhungen des Strompreises –, können maßgeblich zum Akzeptanzverlust beitragen. Um dieses Risiko zu reduzieren, sollten „Betriebsunfälle“ beim Management der Energiewende vermieden werden. Für das Treffen von Entscheidungen gilt daher, dass Qualität vor Schnelligkeit geht. Damit die Transformation des Energiesystems sozialverträglich gestaltet werden kann, ist außerdem eine transparente Diskussion erforderlich. Dazu gehört auch, dass rechtzeitig offengelegt wird, wenn Maßnahmen teurer werden als geplant. Außerdem ist wichtig, dass beim Umbau des Energiesystems nicht nur technische und ökonomische Aspekte eine Rolle spielen, sondern auch soziale. Das bedeutet, dass beim Treffen von Entscheidungen monetäre, umwelt- und gesundheitsbezogene, ästhetische und symbolische Belastungen der Bevölkerung gleichermaßen berücksichtigt werden sollten.

In der Bevölkerung kursieren bereits heute Befürchtungen („Bald kann ich meine Wäsche nur noch waschen, wenn der Wind weht“), die zum Teil nicht fundiert oder deren Eintreffen unwahrscheinlich ist. Abhilfe könnte hier ein öffentlicher Dialog schaffen, zum Beispiel im Fernsehen („Kummerkasten“). Bürgerinnen und Bürger erhielten dadurch die Möglichkeit, ihre Sorgen öffentlich mit Fachleuten zu diskutieren.

Ein weiterer wichtiger Punkt für mehr Akzeptanz ist, dass die Verteilung von Nutzen und Lasten (geografisch und nach Bevölkerungsschichten) als fair wahrgenommen wird. Dies wird am ehesten erreicht, wenn Entscheidungen, bei denen Verteilungsgerechtigkeit eine Rolle spielt, partizipativ getroffen werden.

Verringerung der Verwundbarkeit

Um Verwundbarkeiten zu reduzieren, müssen sowohl Schwachstellen in der Governance als auch mögliche Belastungen frühzeitig identifiziert werden. Hier kann ein regelmäßiges Monitoring der „Gewinner“ und „Verlierer“ der Energiewende sinnvoll sein. Auch eine internetbasierte Plattform, die sowohl Informationsportal ist als auch Foren und Chats anbietet, könnte ein geeignetes Instrument sein. Bereits bestehende Angebote könnten ausgeweitet und intensiviert werden.¹⁰³

Wenn Bürgerinnen und Bürger die Hintergründe und Wirkmechanismen der Energiewende besser kennen, können sie auch deren „Schattenseiten“ besser beurteilen. Hierzu könnte ein Aufbaustudiengang mit Abschluss „Energiewendeberaterin“ beziehungsweise „Energiewendeberater“ entwickelt, in den Schulfächern Physik, Technik oder Gemeinschaftskunde könnten Schwerpunkte zum Thema Energie(wende) gesetzt oder eine Multiplikatorausbildung zu Energiefragen eingeführt werden.

¹⁰³ Es gibt bereits Internetseiten, auf denen sich Bürgerinnen und Bürger informieren können (zum Beispiel www.forschungsradar.de).

Minderung negativer Konsequenzen

Je aktiver ihre Rolle in der Energiewende ist, desto eher wird diese von Bürgerinnen und Bürgern akzeptiert. Das sollte entsprechend gefördert werden.¹⁰⁴ Dabei sollte nicht nur mit finanziellen Anreizen gearbeitet, sondern es sollten auch die psychologische Wirkung neuer Eigentumsmodelle und planerische Anreize wie Ausgleichsflächen oder Stärkung der kommunalen Wirtschaftskraft genutzt werden. Wichtig ist auch das Image, das Bürgerinnen und Bürger zum Beispiel mit „Prosumenten“ verbinden, die ihre Energie teilweise selbst bereitstellen. Um negative Konsequenzen zu mildern, könnten außerdem konkrete Maßnahmen zum Lastenausgleich getroffen werden. Denkbar wäre ein „Nationaler Entschädigungsfonds Energiewende“, der in rechtlich unregulierten Härtefällen finanzielle Ausgleichsmaßnahmen vorsieht. Dies kann dazu beitragen, dass Bürgerinnen und Bürger künftigen Risiken und Unsicherheiten der Energiewende gelassener gegenüberstehen. Ferner könnten Ombudsstellen der Bevölkerung die Möglichkeit bieten, bei als stark erlebten Belastungen Beschwerde einzulegen.¹⁰⁵

¹⁰⁴ Die Internetseite Energiewende Baden-Württemberg (2016) ist ein Beispiel für die Darstellung von Informationen zur Kostenkalkulation, zu gesellschaftlichem Nutzen und zu den Optionen für Kommunen sowie Bürgerinnen und Bürger, bei regionaler Wertschöpfung selbst aktiv zu werden.

¹⁰⁵ Wichtig wäre hier die Entwicklung geeigneter Zugangskriterien, um das Instrument nicht durch ein hohes Aufkommen unberechtigter Ansprüche zu lähmen.

5 Zielkomplementarität und Zielkonflikte bei den Interventionen

Wichtiges Element einer Resilienzstrategie für das Energiesystem ist es, mögliche Interventionen auf Zielkomplementaritäten und Zielkonflikte hin zu analysieren. **Zielkomplementarität** ist gegeben, wenn eine Intervention auf verschiedene Bedrohungsszenarien passt. Sie ist auch gegeben, wenn die Interventionen helfen, ein Ziel der Energiewende zu erreichen, ohne dass dies in unvertretbarem Ausmaß¹⁰⁶ zulasten anderer Ziele der Energiewende geht. Wenn eine Maßnahme die Erreichung anderer Ziele der Energiewende beeinträchtigt, liegt ein **Zielkonflikt** vor. Um einen Zielkonflikt handelt es sich auch, wenn Interventionen in bestimmten Bedrohungsszenarien geeignet sind, das Erreichen bestimmter Ziele zu unterstützen, während sie ebenjenes in anderen Bedrohungssituationen jedoch gefährden.

Die Zielkomplementaritäten und Zielkonflikte, die im Folgenden aufgeführt sind, wurden mit Blick auf die Ziele Klima- und Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit, Versorgungssicherheit, Ressourcenschonung, Sozialverträglichkeit und Akzeptanz sowie europäische/globale Verantwortung ausgewählt.

5.1 Zielkomplementarität

Reduktion des absoluten Verbrauchs von Rohstoffen und Energie

In vielen Szenarien würde es die Verwundbarkeit des Systems mindern, wenn der absolute Verbrauch von Rohstoffen und Energie reduziert wird. In allen Szenarien kommt es zu Knappheiten, meistens in Form von Versorgungsengpässen bei Strom oder Rohstoffen. Diese wären weit weniger gefährlich, wenn die absolute Nachfrage nach Energieträgern und Rohstoffen zurückgehen würde.

Diversifizierung von Rohstofflieferanten und Wandlungstechnologien

Die Diversifizierung von Rohstofflieferanten – vor allem für Erdgas und metallische Rohstoffe – sowie die Verfügbarkeit von Wandlungstechnologien (Kraftwerkspark, Energieträger, Speicher, IT-Systeme) wirken in mehreren Szenarien (Rohstoffverknappung Metalle und Erdgas, Wetterextreme, Anschläge) positiv auf die Resilienz des Systems.

Die Rohstoffverknappungsszenarien illustrieren, dass Bedrohungen für die Energiewende von Entwicklungen in den rohstoffproduzierenden und -exportierenden Ländern außerhalb Deutschlands ausgehen können. Eine geringere Importabhängigkeit von Rohstoffen, zum Beispiel durch Diversifizierung der Exportländer oder den Aufbau eigener Reserven (etwa einer nationalen Erdgasreserve), würde die Verwundbarkeit des sich wandelnden deutschen Energiesystems verringern.

¹⁰⁶ Vgl. zu den Zielen der Energiewende den ersten Abschnitt im Anhang. Die Nicht-Vertretbarkeit beziehungsweise Vertretbarkeit ist dabei jeweils gesamtgesellschaftlich, politisch und situationsabhängig zu bestimmen.

Schaffung von ausreichend Pufferkapazitäten

Die Rohstoffverknappungsszenarien sowie die Szenarien „Anschläge“ und „Wetterextreme“ veranschaulichen, wie schwierig es sein kann, die Versorgungssicherheit aufrechtzuerhalten oder kurzfristig wiederherzustellen, wenn in unerwarteten Bedrohungslagen „Versorgungspuffer“ fehlen. Das können unter anderem Spielräume bei der Netzkapazität, Ausweichmöglichkeiten auf Power-to-X-Konzepte oder Reserven wie Speicher oder Reservekraftwerke sein.

Solche Puffer wirken vor allem bei Bedrohungen, bei denen die Präventionsmöglichkeiten durch den Abbau von Stressoren begrenzt sind, wie in den Szenarien „Rohstoffverknappung Erdgas“, „Anschläge“ und „Wetterextreme“. Beim Szenario „Rohstoffverknappung Erdgas“ sind der Vorbeugung vor allem dadurch Grenzen gesetzt, dass die zentralen Stressoren an Rohstoffförderstätten und nicht in Deutschland auftreten. Die deutsche Politik kann in dem Fall nur indirekt Einfluss nehmen. Für das Szenario „Anschläge“ ergeben sich die Grenzen daraus, dass Logik und Ausmaß terroristischer Angriffe weder einschätzbar noch vorhersehbar sind. Dementsprechend sind solche Angriffe im Voraus nicht berechenbar. Beim Szenario „Wetterextreme“ sind die ursprünglichen Stressoren klimabedingt und grundlegend nur durch eine langfristige weltweite Treibhausgasreduktion zu verringern. Außerdem ist damit zu rechnen, dass ein bestimmtes Maß an Klimawandel schon jetzt unvermeidbar ist. Nach übereinstimmender Meinung des *Intergovernmental Panel on Climate Change* hat der Klimawandel bereits heute Auswirkungen auf das Wetter und auf die für die Erdgasversorgungsinfrastruktur relevanten Permafrostböden.¹⁰⁷

Zielkomplementarität ist auch insofern gegeben, als Pufferstrukturen dabei helfen könnten, zu vermeiden, dass es zu

massiven Störungen der Stromversorgung in Deutschland kommt, die das gesamte europäische Energienetz betreffen (vgl. das Szenario „Anschläge“).

Nachhaltigkeit, Transparenz und gesellschaftliche Partizipation

Maßnahmen, die auf Nachhaltigkeit, Transparenz und gesellschaftliche Partizipation setzen, könnten in den Szenarien „Rohstoffverknappung Metalle“ (Abbau von Widerständen durch Aufbau nachhaltiger Produktion), „Rohstoffverknappung Erdgas“ (Abbau von Widerständen gegen Fracking, Versachlichung), „Governance-Versagen“ (Verbesserung des Vertrauens in langfristig stabile Politikgestaltung) und „Akzeptanzentzug“ (faire, nachvollziehbare und verlässliche Ausgestaltung der Energiewende) ähnlich wirken. Sie tragen dem Umstand Rechnung, dass die Energiewende ein Vorhaben mit zahlreichen Beteiligten, Werten und Interessen ist, das von der Bevölkerung und Schlüsselakteuren in Wirtschaft und Gesellschaft – national und international – akzeptiert und mitgetragen werden muss.¹⁰⁸

Momentan ist die deutsche Bevölkerung der Energiewende gegenüber überwiegend positiv eingestellt. Es ist jedoch ratsam und realistisch, die Bereitschaft vieler Bürgerinnen und Bürger, Belastungen zu ertragen, Verhaltensanpassungen vorzunehmen und auch kritische Phasen des Wandlungsprozesses zu unterstützen, als nicht sehr hoch einzuschätzen.¹⁰⁹ Zwar ist es noch zu früh, um abschätzen zu können, ob und wie eine bewusste Politik des „kooperativen“ Verhaltens zu mehr Akzeptanz beim Umbau des Energiesystems führen kann. Jedoch erscheint es plausibel, dass es nicht nur massive Schadensereignisse sind, die das bestehende Maß an Akzeptanz und Mitwirkungsbereitschaft der Bevölkerung bedrohen könnten. Das wird durch das Szenario „Akzeptanzent-

107 IPCC 2014, S. 42 und 51.

108 Schippl/Grunwald 2013, S. 4.

109 Renn 2014, S. 339.

zug“ illustriert. Wichtig ist es daher, zu versuchen, die Bereitschaft zur Toleranz von Belastungen, zur Übernahme individueller Mitverantwortung und zur aktiven Mitwirkung bei der Durchführung der Energiewende generell zu fördern. Neben der Informations- und Wissensvermittlung könnten hierfür Kommunikationsformate eingesetzt werden, um die „Stellschrauben“ zu identifizieren, damit die Energiewende sozialverträglich umgesetzt und die Präferenzen der Bürgerinnen und Bürger berücksichtigt werden.

Ein höheres Maß an Belastungstoleranz, individueller Mitverantwortung und aktiver Mitwirkung beim Wandel des Energiesystems sollte dazu führen, dass sich im Falle kritischer Situationen, wie sie in den Szenarien „Anschläge“ und „Wetterextreme“ skizziert werden, mehr Bürgerinnen und Bürger für die Energiewende engagieren und sich im Umkehrschluss weniger Bürgerinnen und Bürger davon abwenden. Die Identifikation – eine wichtige Ressource zur Krisenbewältigung – wäre folglich größer.

Oft wird befürchtet, dass eine proaktive Informations- und Bildungspolitik, in der auch mögliche katastrophale Ereignisse angesprochen werden, der Unterstützung für die Energiewende schaden könnte. Die empirische Evidenz zeigt hingegen: Je offener und klarer auch Belastungen und Risiken thematisiert werden, desto schwieriger ist zwar die Kommunikation zu Beginn, aber desto eher ist mit einer stabilen Akzeptanz zu rechnen, wenn die negativen Belastungen tatsächlich eintreten. Es darf zwar nicht damit gerechnet werden, dass mehr Informationen zur Energiewende und erweiterte Angebote des Gehört-Werdens und Mitgestaltens in der Bevölkerung automatisch zu einer höheren Bereitschaft führen, das eigene Handeln zu ändern; sie wird dadurch aber wahrscheinlicher.

Die Energiewende erfordert mehr Informationstechnik und Digitalisierung im Energiesystem. Nur so können die Vielzahl an Akteuren effektiv in Verteilernetze eingebunden, die Vernetzung der verschiedenen Komponenten hergestellt und ein gezieltes Monitoring ermöglicht werden. „Eine jederzeit sichere Stromversorgung wird so zunehmend auch zu einer Frage der IT-Sicherheit.“¹¹⁰ Das Szenario „Anschläge“ veranschaulicht, wie wichtig es ist, dass alle Akteure, die an der Versorgung in einem digital vernetzten Energiesystem beteiligt sind, gezielt mit eigenen Programmen für die Umsetzung von IT-Sicherheitsrichtlinien sensibilisiert und motiviert werden. Dies gilt auch für die spezifische (Mit-)Verantwortung, die alle relevanten Akteure für die Sicherheit des vernetzten Energiesystems tragen. In einem dezentralen System schließt dies sowohl Wirtschaftsakteure als auch Privatpersonen ein.

Notfallvorkehrungen und -regelungen

Die Szenarien „Wetterextreme“ und „Anschläge“ legen nahe, dass Notfallpläne und -vorkehrungen in kritischen Situationen dazu beitragen können, die Krise so zu bewältigen, dass ihre negativen Konsequenzen gemindert werden. Beispiele für Notfallvorkehrungen sind das Bereithalten mobiler Klimatisierungsanlagen – angetrieben durch Photovoltaik, Dieselgeneratoren oder Gasmotoren – für besonders verwundbare oder exponierte Individuen oder Bevölkerungsgruppen, etablierte Reparaturmechanismen bei IT-Systemen, das selektive Zurückfahren der Stromversorgung für nicht-essenzielle Dienstleistungen, wenn massive Störungen drohen oder bereits eingetreten sind, sowie die Vermittlung von Handlungswissen an die allgemeine Bevölkerung und spezifische Nutzergruppen, zum Beispiel für den Fall länger anhaltender Blackouts (etwa über Notfallübungen, Planspiele oder Simulationen).

110 Konrad/Scheer 2014, S. 41.

5.2 Zielkonflikte

Reduktion des absoluten Verbrauchs von Rohstoffen und Energie

Die Minderung des Verbrauchs kann dazu führen, dass Anlagen und Infrastrukturen kurz- und mittelfristig gesehen weniger kosteneffizient betrieben werden können. Das kann unter anderem mit der geringeren Auslastung der Anlagen und Systeme und dem Verzicht auf positive Skalenerträge zusammenhängen. Gleichzeitig ist aber höhere Effizienz mit volkswirtschaftlichem Nutzen verbunden, der sich in Opportunitätsgewinnen für andere wirtschaftliche Aktivitäten niederschlägt. Dieser Nutzen kann sich unter Umständen erst langfristig realisieren und ist selbst dann sehr unsicher.

Geht die Reduktion des Verbrauchs mit freiwilligem Verzicht auf Energiedienstleistungen einher (Suffizienz), kann sich dies negativ auf das Wirtschaftswachstum auswirken, wenn dadurch die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen insgesamt abnimmt. Möglich ist aber auch ein Wandel in Richtung eines stärkeren qualitativen Wachstums, wo Effizienz- und Suffizienzgewinne in den Konsum von nachhaltigen Produkten und Dienstleistungen wie Beratung, Pflege oder Kultur fließen.

Ob es also zu Zielkonflikten kommt, hängt von den jeweiligen Rahmen- und Umsetzungsbedingungen ab. Aus diesem Grund ist es wichtig, bei der Strategie der Effizienz- und Suffizienzgewinne die Bedingungen so zu setzen, dass es auf der einen Seite nicht zu Rebound-Effekten kommt, die wegen geringerer Kosten durch Effizienzgewinne zu einem Mehrkonsum von Energiedienstleistungen führen. Auf der anderen Seite sollte auch die Konsumneigung nicht schwächer werden, wenn die Bevölkerung bewusst bislang nachgefragte Energiedienstleistungen einsparen will. Bei diesem Spagat ist eine Politik der flexiblen Nachfragesteuerung

auf Basis eines umfassenden Verhaltensmonitorings gefragt.

Diversifizierung von Rohstofflieferanten und Wandlungstechnologien

Der Konflikt zwischen kurzfristiger und langfristiger Effizienz und bezüglich der Frage, in welcher Zeitperspektive sich ein optimiertes Kosten-Nutzen-Verhältnis einspielt, besteht auch bei Maßnahmen in Form ausgedehnter „Pufferstrukturen“.

Ein Energiesystem mit vielen Sicherheitspuffern wäre nach gängigen Modellen der Berechnung von Wirtschaftlichkeit nicht kostenoptimal und damit auch nicht effizient. Das Szenario „Anschläge“ verdeutlicht allerdings: Je mehr Kosten durch kurzfristige Effizienz eingespart werden, desto höher ist das Risiko, dass unter schwierigen Umständen nicht genügend Puffer vorhanden sind, um eine sichere Energieversorgung zu gewährleisten. Auch wenn Pufferstrukturen mit Effizienzverlusten einhergehen, können sie sich auf lange Sicht rechnen.¹¹¹ Effizienz ist ein wichtiges Bewertungskriterium für die Auswahl und Ausgestaltung von Maßnahmen im Rahmen der Entwicklung einer Resilienzstrategie. Effizienzoptimierung allein ist aber nicht ausreichend, „weil sich Effizienz per definitionem immer auf bekannte Probleme beziehungsweise Rahmenbedingungen bezieht“,¹¹² „böse Überraschungen“ also unberücksichtigt bleiben. Wichtig ist ein Wechsel der Perspektive – weg von kurzfristiger Nutzenoptimierung hin zu langfristigem, strategischem Denken.

Dabei ist entscheidend, die Komplexität der Rahmenbedingungen zu beachten, denn die Kosten möglicher Vorsorgemaßnahmen können beträchtlich sein. Die Entscheidung, auf welche Art und Weise eine Priorisierung der eingesetzten Mittel vorgenommen werden soll-

¹¹¹ Vgl. Thoma 2014.

¹¹² Vogt 2015, S. 12, vgl. auch Renn 2014, S. 507.

te, ist anspruchsvoll.¹¹³ Gleichzeitig sind sowohl die tatsächliche Höhe der Vorberbeitungskosten als auch die Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft unsicher. Der schrittweise Aufbau von Pufferstrukturen wäre auch deshalb vorteilhaft, weil man so die Resilienz des Systems sukzessive erhöhen könnte, ohne durch eine abrupte Überforderung (Kostenexplosion) die Unterstützung der Gesellschaft zu gefährden.

Ein solcher Perspektivenwechsel ließe sich auch plausibel gegenüber den gesellschaftlichen Akteuren rechtfertigen. Wenn man die Gründe für Redundanz und Diversität klar kommuniziert, ist zumindest mit dem Nachvollziehen der Argumente, wenn nicht sogar mit Verständnis und Billigung zu rechnen. Beides, Redundanz und Diversifizierung, sind intuitiv einsichtig und können auch im Alltag umgesetzt werden (etwa durch Ersatzbatterien im Haushalt oder Vorräte von Kerzen für einen möglichen Stromausfall). Es ist nicht ausgeschlossen, dass Pufferstrukturen kurz- oder mittelfristig zu höheren Energiekosten für Verbraucherinnen und Verbraucher führen. Ohne ein begleitendes Kommunikationsprogramm könnte dies zur Ablehnung einer Resilienzstrategie führen, weil hier Konflikte mit den Zielen Sozialverträglichkeit und Akzeptanz drohen.

Der Konflikt zwischen kurzfristiger und langfristiger Effizienz kommt insbesondere dann zum Tragen, wenn privatwirtschaftliche Investorinnen und Investoren angesprochen werden. Diese sind unter gegebenen Marktbedingungen meistens zögerlich, wenn es darum geht, langfristige Investitionen unter unsicheren Marktbedingungen zu tätigen. Oft erfordern staatliche Maßnahmen privatwirtschaftliche Investitionen. In diesen Fällen

ist es notwendig, die Bereitschaft zum Investieren vorab zu erheben und gegebenenfalls finanzielle Hilfen anzubieten, um Investitionen mit erst langfristig zu erwartenden Renditen attraktiv zu machen und Unsicherheiten über mögliche Marktentwicklungen abzufedern. Fehlanreize für private Investorinnen und Investoren müssen dabei vermieden werden.

Nachhaltigkeit, Transparenz und Partizipation

Die Transformation des Energiesystems wird tendenziell durch partizipative Elemente verlangsamt. Bedenkt man aber, dass Proteste die Planung und den Bau von Energieinfrastruktur noch wesentlich weiter verzögern und manchmal auch politisch unmöglich machen, dann sind Kommunikation, Transparenz und Partizipation die besten Mittel, um Veränderungen sozialverträglich umzusetzen. Maßnahmen wie der Ausbau der Übertragungsnetze für die Offshore-Windenergie können durch anhaltende Proteste zum Nadelöhr für die gesamte Energiewende werden. Erfahrungen aus der unmittelbaren Vergangenheit zeigen, dass Planungsprozesse für groß angelegte Infrastrukturen besonders anfällig für Proteste aus der Bevölkerung sind. Diese Gefahr ließe sich verringern, wenn zum einen partizipative Verfahren frühzeitig in Gang gesetzt und zum anderen großflächige Infrastrukturmaßnahmen in ihrer Anzahl begrenzt würden. Entsprechende Standorte sollten vor allem unter Gesichtspunkten der Verteilungsgerechtigkeit von Belastungen ausgewählt werden.

Notfallvorkehrungen und -regelungen

Die Nutzung gleichartiger Komponenten in einem digital vernetzten Energiesystem kann die Geschwindigkeit, in der Ausfälle ausgeglichen werden können und der Betrieb wiederaufgenommen werden kann, erhöhen und dadurch negative Konsequenzen eines Versorgungsausfalls mindern. Möglicherweise könnten derartige Komponenten allerdings die Wirkung von

¹¹³ Martin/Pindyck (2015) zeigen unter anderem, dass man nicht notwendigerweise danach streben sollte, alle Katastrophen zu vermeiden, und dass die Entscheidung, gegen welche man sich wappnen sollte, nicht intuitiv zu treffen ist.

Angriffen auf das System durch Hacker erhöhen. Spezialisierte Angriffe auf weitgehend standardisierte Strukturen wären in der Lage, viele Systeme auf einen Schlag zu treffen. Insofern sind gleichartige Systemkomponenten durchaus als strukturelle Schwachstelle eines digitalisierten Energiesystems zu sehen. Der Vorteil, den Betrieb schnell wiederaufnehmen oder beschädigte Systeme schnell austauschen zu können, könnte jedoch überwiegen und ist im Einzelfall abzuwägen.

Notfallübungen für die Gesamtbevölkerung und spezifische Nutzergruppen könnten akzeptanzmindernd wirken, wenn dabei der Eindruck vermittelt wird, dass die Notwendigkeit dieser Übungen einem *Governance*-Versagen bei der Planung und Durchführung der Energiewende geschuldet ist. Es müsste daher deutlich kommuniziert werden, dass die Übungen Elemente einer gut durchdachten Planung und Vorsorge darstellen, bei denen auch überraschende Entwicklungen und Ereignisse einkalkuliert werden.

6 Interventionstypen zur Resilienzförderung

Die folgenden zehn Interventionstypen erscheinen besonders geeignet, die Energieversorgung in Deutschland resilienter zu gestalten. Schließlich wirken sie gegenüber unterschiedlichsten Risiken und Gefahren.

Abbau von Stressoren

1. Internationales Engagement ist gefordert, um vor allem in der Rohstoffgewinnung und im Rohstoffhandel Engpässe und Unsicherheiten abzubauen. Die deutsche Regierung sollte gemeinsam mit weiteren Staaten daran arbeiten, eine nachhaltige Rohstoffwirtschaft in Investitions- und Handelsabkommen zu verankern und in die Entwicklungspolitik zu integrieren. Damit werden die Voraussetzungen geschaffen, dass Deutschland langfristig ausreichend mit Rohstoffen versorgt werden kann. Gleichzeitig übernimmt die Bundesrepublik dadurch Verantwortung für eine internationale und nachhaltige Energiepolitik.

Verringerung der Verwundbarkeit

2. Das Vorsorgeprinzip sollte im Zuge der Energiewende stärker berücksichtigt werden. Zwar führen Vorsorgemaßnahmen zumindest kurzfristig zu Effizienzverlusten. Allerdings sind sie eine kluge Rückversicherung gegenüber unvorhersehbaren Störungen und negativen Ereignissen, die sich einer genaueren quantitativen Abschätzung entziehen.

3. Wichtig für eine resiliente Energieversorgung sind ausreichende Lagerhaltung, mehr und wirksameres Recycling und intensive Forschung zu Substitutionsmöglichkeiten bei metallischen Rohstoffen. Diese Maßnahmen sind besonders wichtig, weil unsicher ist, ob das Engagement für eine weltweite nachhaltige Rohstoffwirtschaft Erfolg hat. Schließlich spielen Metalle in Systemen mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien eine zentrale Rolle.
4. Redundanzen im Energiesystem machen es widerstandsfähiger gegenüber unerwarteten Ereignissen, terroristischen Anschlägen oder Systemzusammenbrüchen. Besonders hilfreich sind Strategien, die über die (n-1)-Regel hinausgehen und Puffer sowie Backup-Lösungen einbeziehen.
5. Zur Verringerung der Verwundbarkeit sollten nicht nur zentrale, sondern auch dezentrale Energiewandler und -speicher ausgebaut werden, die bei großflächigen Ausfällen so lange einen Inselbetrieb sicherstellen, bis das gesamte System wieder funktioniert. Dadurch werden die Versorgungssysteme diversifiziert und unabhängiger von zentralen Strukturen.

6. Darüber hinaus sollten Anlagen technisch diversifiziert werden. Technologien, die sich grundsätzlich in ihrer Funktionsweise unterscheiden (Varietät), streuen das Risiko, dass Störeignisse das gesamte Versorgungssystem beeinträchtigen. Diese Risikostreuung wird verstärkt, wenn zusätzlich auf eine angemessene „Mischung“ (Balance) dieser Technologien geachtet wird.
7. Anlagen zur Energiegewinnung und -verteilung müssen geografisch so verteilt werden, dass sie einerseits unabhängige Versorgungseinheiten bilden, andererseits aber auch der Wahrnehmung der Bevölkerung von einer fairen Lastenverteilung Rechnung tragen.
8. Zu einer wirksamen Resilienzstrategie gehören auch ein systematisches Monitoring akzeptanzgefährdender Belastungen, Dialogangebote (zum Beispiel Ombudsstellen), partizipative Verfahren bei der Gestaltung von Planungsvorhaben sowie Maßnahmen zum Lastenausgleich. Diese Maßnahmen tragen dazu bei, die Planung und Durchführung der Energiewende besser mit den Interessen der Bevölkerung abzustimmen und damit die Wahrscheinlichkeit zu verringern, dass unerwartete Krisen die Akzeptanz reduzieren.

Minderung negativer Konsequenzen

9. Indem frühzeitig Notfallvorkehrungen und -regelungen getroffen werden, können negative Konsequenzen im Falle einer unerwarteten Krise verringert werden. Geeignete Notfallpläne sind zum Beispiel Sensibilisierungs- und Übungsmaßnahmen mit beteiligten Akteuren. Werden sie transparent und offen kommuniziert und umgesetzt, ist nicht zu erwarten, dass damit unnötige Ängste oder Abwehrhaltungen gegenüber der Energiewende geschürt werden. Dabei sollte deutlich gemacht werden, welche Handlungsoptionen und Präventivmaßnahmen zur Verfügung stehen.
10. Hintergründe, Notwendigkeiten und Risiken der Energiewende sind vielen Bürgerinnen und Bürgern noch nicht bewusst und können mit zielgerichteten Informations- und Bildungsprogrammen verbreitet werden. Diese Programme könnten bewirken, dass die Bevölkerung die mit Krisen verbundenen Herausforderungen in ihrem Umfeld besser meistert und negative Auswirkungen vermeiden oder abmildern kann.

Anhang

Ziele der Energiewende¹¹⁴

Primärziele – Zieldreieck

- Klimaschutz und Umweltverträglichkeit
- Versorgungssicherheit
- Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit

Klimaschutzziele – quantitative Ziele der Energiewende

- Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 Prozent (bis 95 Prozent) bis 2050 gegenüber 1990
- Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoenergieverbrauch auf 60 Prozent bis 2050
- Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis 2050 auf 80 Prozent
- Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2050 um 50 Prozent gegenüber 2008
- Senkung des Stromverbrauchs um 25 Prozent bis 2050 gegenüber 2008
- Senkung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor um 40 Prozent bis 2050 gegenüber 2005

Zusammenfassung energiepolitischer Ziele

- Steigerung der Energieeffizienz
- Entwicklung eines dynamischen Energiemix und eines flexibleren Kraftwerksparks
- Aufbau einer leistungsfähigen Netzinfrastruktur (Speichertechnologien)
- Ausbau der Speicherkapazitäten
- Schaffung eines verlässlichen Rechtsrahmens für internationale Energiebeziehungen

Ausgewählte Handlungsfelder für energiepolitische Ziele

- Erneuerbare Energien
- Energieeffizienz
- Fossile Kraftwerke
- Netzinfrastruktur und Integration erneuerbarer Energien
- Energetische Gebäudesanierung und energieeffizientes Bauen
- Mobilität und Verkehr
- Energieforschung
- Integration im europäischen und internationalen Kontext
- Gesellschaftspolitik

Vorgehen bei der Entwicklung und Auswertung der Szenarien

Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Entwicklung der Szenarien und ihrer Auswertung skizziert. Der konzeptionell-analytische Rahmen, in dem diese Arbeiten vorgenommen wurden, ist in Tabelle 2 dargestellt. An dieser Stelle soll die Anfertigung der Analyse als interdisziplinäre, viele Autorinnen und Autoren umfassende Arbeit unter Zuhilfenahme narrativer Szenarien nachvollziehbar gemacht werden.

¹¹⁴ Diese Liste ist eine verkürzte Fassung der Liste der Ziele der Energiewende in Umbach 2015, S. 41–42, die auf diesen Quellen aufbaut: Bundesregierung 2010; BMWi/BMÜB 2012; Löschel et al. 2012.

Resilienz	Risiko	Interventionsspielräume
<p>Fähigkeit des im Wandel begriffenen Systems (Energiewende), die Funktionsfähigkeit gegenüber Stress und Belastungen aufrechtzuerhalten beziehungsweise kurzfristig wiederherzustellen.</p> <p>Funktionsfähigkeit bezieht sich auf die Erreichung der drei Ziele</p> <ul style="list-style-type: none"> • Versorgungssicherheit (einschließlich Ressourcenschonung), • Klima- und Umweltverträglichkeit sowie • Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit <p>unter den Bedingungen von Sozialverträglichkeit und Wahrnehmung europäischer/globaler Verantwortung.</p>	<p>Bedrohungen für die Erreichung der fünf Ziele mit Fokus auf</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bedrohungen, die eher unwahrscheinlich/unerwartet sind, und/oder • in der derzeitigen Diskussion eher geringe Beachtung finden. 	<p>Die drei Ansätze für Interventionen umfassen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abbau von Stressoren, • Verringerung der Verwundbarkeit des Energiesystems sowie • Minderung negativer Konsequenzen beim Eintritt von Schadensereignissen.

Tabelle 2: Der konzeptionell-analytische Rahmen der Arbeit der Arbeitsgruppe Risiko und Resilienz

Leitfaden für die Erstellung der Bedrohungsszenarien

Für die Ausarbeitung der Bedrohungsszenarien wurde vom AG-Leitungsteam ein Leitfaden erstellt, der den Szenario-Ansatz und die Szenario-Grundstruktur vorgibt sowie für jedes der sechs Szenarien ein Beispiel für das jeweilige grobe „Strickmuster“ unterbreitet. Die Beispiele dienten primär der Illustration des Aufbaus und des Texttyps der Szenarien. Daneben waren sie auch Inspiration für die inhaltliche Ausgestaltung der Szenarien.

Da das narrative Szenario als Verfahrensweise gewählt wurde, galt es, plausible, in sich konsistente und verständliche Darstellungen möglicher künftiger Herausforderungen für das Energiesystem und die Energiewendeziele zu entwickeln. Um diese Aufgabe zu erleichtern, wurden im Leitfaden Kennzeichen und Gütekriterien narrativer Szenarien erläutert. Die wesentlichen Punkte hierzu werden im Folgenden dargestellt.

Kennzeichen narrativer Szenarien

Narrative Szenarien sind keine reine Darstellung dessen, was derzeit an Fakten vorliegt. Sie sind vielmehr eine faktengestützte Erkundung des Möglichkeitsraumes für Entwicklungen in der Zukunft,

die mit dem aktuellen Stand des Wissens kompatibel ist. Narrative Szenarien erfüllen ihren Zweck besonders gut, wenn sie anregend geschrieben sind; dadurch sind sie anschaulicher als der typische wissenschaftliche Text. Anschaulichkeit, Bildhaftigkeit und Verständlichkeit erhöhen die Inspirations- und Diskussionsfähigkeit narrativer Szenarien.

Gleichzeitig sind narrative Szenarien aber auch nicht einfach intelligente Erzählungen. Sie bilden mögliche zukünftige Entwicklungen ab. Mögliche Entwicklungen sind dabei Entwicklungen, die „*konsistent mit dem aktuell verfügbaren und relevanten Wissen*“ (Hervorhebung im Original) sind.¹¹⁵ Die Szenarien bauen daher bestehendes faktisches und kausales Wissen ein. Sie schildern jedoch keine Ereignisse, die sich notwendig ergeben werden oder mit hoher Sicherheit zu erwarten sind. Die Vorhersagekraft ist generell kein Qualitätskriterium von Szenarien. Eine Übersicht wichtiger Kennzeichen von narrativen Szenarien bietet Tabelle 3.

Gütezeichen narrativer Szenarien

Eine große Herausforderung besteht darin, Realismus und beherzte Erkundung

¹¹⁵ Dieckhoff et al. 2014. Die Autoren nehmen bei dieser Formulierung Bezug auf Levi 1980.

Was kennzeichnet narrative Szenarien?	Was sind narrative Szenarien nicht?
Text, der anschaulich und verständlich geschrieben ist	Herkömmlicher wissenschaftlicher Text
Faktengestützte und mit Evidenz kompatible Erkundung des Möglichkeitsraumes für Entwicklungen in der Zukunft	Weder eine reine Darstellung dessen, was derzeit an Fakten vorliegt, noch eine Vorhersage oder Beschreibung einer höchstwahrscheinlichen Entwicklung
Tatsachenbehauptungen und kausale/funktionale Zusammenhänge bauen auf dem Stand des derzeitigen Wissens auf; Einbau fiktionaler Institutionen/Akteure	Intelligente Erzählung ohne Wissensfundierung

Tabelle 3: Kennzeichen narrativer Szenarien. Die Tabelle ist angelehnt an Kosow/Gaßner 2008; Gaßner/Steinmüller 2006.

des Möglichkeitsraums in eine gute Balance zu bringen. Die Literatur schlägt hierzu eine Reihe von Kriterien vor, die als zentral zur Bewertung der Güte eines Szenarios, unabhängig vom Szenario-Ansatz, bestimmt werden.¹¹⁶ Vier dieser Gütekriterien und ihre Bedeutung für die Bedrohungsszenarien sollen hier besonders hervorgehoben werden (siehe Tabelle 4).

Plausibilität: Die Bedrohungsszenarien behandeln die Frage: Was ist zu fürchten, und wie kommen wir dahin, warum führt das eine zum anderen? In der vorliegenden Analyse galt es, den Entwicklungspfad hin zu einer Situation, die die Energiewende und die Erreichung ihrer Ziele unter starken Stress setzt, mit plausiblen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen nachvollziehbar darzustellen: Wie wird diese Situation verursacht, was sind die treibenden Einflüsse und Ereignisse (die Bedrohungsfaktoren), was deren Folgen (für die Ziele der Energiewende)? Die Darstellung musste sich dabei auf ein ausgewähltes Set an Geschehnissen und Folgen beschränken.

Konsistenz: Es gilt weiterhin sicherzustellen, dass die Entwicklung innerhalb des Bedrohungsszenarios in sich stimmig ist. Das wäre nicht der Fall, wenn sich Einzelaspekte widersprechen oder sich gegenseitig ausschließen würden. So wäre zum Beispiel ein Szenario nicht kon-

sistent, das gleichzeitig einen Rückgang von Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im Bereich Sicherheit von Informationstechnologien und deutliche technische Fortschritte in der IT-Sicherheit annimmt.¹¹⁷

Verständlichkeit: Aufgabe ist außerdem, Entwicklungen und Ereignisse so konkret zu beschreiben, dass sie nachvollziehbar sind, und dabei nur so viele Aspekte anzusprechen, dass sie nicht aufgrund zu hoher Komplexität an Verständlichkeit verlieren. Typisch für narrative Szenarien sind fiktive Elemente (Institutionen, Organisationen, Akteure).¹¹⁸ Bei einem Teil der Bedrohungsszenarien wird auf sie zurückgegriffen.

Kompatibilität mit wissenschaftlicher Evidenz: Grundsätzlich gilt es, dafür Sorge zu tragen, dass die Behauptungen, die in die Bedrohungsszenarien einfließen, und die kausalen oder funktionalen Zusammenhänge, die der jeweiligen Argumentationskette zugrunde liegen, entweder (theoretisch und/oder empirisch) nachgewiesen oder mit dem heutigen Stand des Wissens kompatibel sind. Das gilt nicht nur für die Beschreibung „realer“ (gegenwärtiger oder vergangener) Ereignisse und Entwicklungen, die Teil der Szenarien sind, sondern auch für die „fiktiven“ Ereignisse und Entwicklun-

116 Hulme/Dessai 2008; Kosow/Gaßner 2008.

117 Dieses Beispiel ist angelehnt an Kosow/Gaßner, S. 29.

118 Vgl. Kosow/Gaßner 2008.

Gütekriterium	Bedeutung
Plausibilität	Die Szenarien müssen als mögliche Entwicklungen angesehen werden („möglich“ ist nicht als „höchstwahrscheinlich“ oder „zu erwarten“ misszuverstehen).
Konsistenz	Die Entwicklung innerhalb des Szenarios muss in sich stimmig sein (das wäre nicht der Fall, wenn sich Aspekte daraus widersprechen oder gegenseitig ausschließen würden).
Verständlichkeit	Entwicklungen müssen so konkret beschrieben werden, dass sie nachvollziehbar sind und nur so viele Aspekte beinhalten, dass sie nicht wegen Überkomplexität an Verständlichkeit einbüßen.
Kompatibilität mit wissenschaftlicher Evidenz	Einfließende Tatsachenbehauptungen und die der jeweiligen Argumentationskette zugrunde liegenden Zusammenhänge (kausal, funktional) müssen entweder nachgewiesen werden (theoretisch und/oder empirisch) oder mit dem heutigen Stand des Wissens kompatibel sein.

Tabelle 4: Gütekriterien der Bedrohungsszenarien. Die Tabelle ist angelehnt an Kosow/Gaßner 2008; Gaßner/Steinmüller 2006.

gen, die in der Zukunft stattfinden. Das heißt beispielsweise, dass das fiktive Ereignis des Wahlgewinns einer neuen Volkspartei mit einem Anti-Energiewende-Programm (siehe Szenario Akzeptanzentzug) nach dem heutigen Stand des Wissens ein mögliches Zukunftsgeschehnis sein muss; das wäre zum Beispiel nicht der Fall, wenn es im deutschen Regierungs- und Wahlsystem nicht möglich wäre, neue Parteien zu gründen.

Aufbau der Bedrohungsszenarien

Der Leitfaden wies auch die Grundstruktur der Bedrohungsszenarien aus. Sie umfasst folgende fünf Elemente:

- Die Darstellung des **Kernszenarios**, die die Entwicklung und die zugrunde liegenden Bedrohungsfaktoren abbildet. Die Entwicklung, die hier aufgezeichnet wird, verläuft überwiegend kontinuierlich, eher schrittweise als abrupt. Die Bedrohungsfaktoren, deren Folgen diese Entwicklung abbildet, haben eher mittleres Wirkniveau (kein Katastrophenpotenzial) und gehen über Stressoren, die heute als offenkundige Problemfaktoren für die Energiewende gelten, hinaus. Vor allem zeichnet der Entwicklungsverlauf ein Bild der vermuteten Folgen einer Kombination aus Bedrohungsfaktoren.
- Eine kurze **Zusammenfassung**, die darstellt, was das Szenario im Kern beinhaltet.
- Hinweise auf die **Folgen** der Bedrohungsentwicklung für die Energiewende und ihre Ziele.
- Eine Skizze der **Ausgangssituation**, von der die bedrohliche Entwicklung, die im Fokus des Szenarios steht, ihren Ursprung nimmt. Die Ausgangssituation kann in der Gegenwart oder in der Zukunft liegen. Die zeitliche Verortung der Ausgangssituation ist jeweils so gewählt, dass sie die Plausibilität der im Szenario abgebildeten bedrohlichen Entwicklung unterstützt.
- Ergänzend werden Ereignisse oder Entwicklungen, die verschärfend auf die Bedrohungsentwicklung und ihre Folgen einwirken könnten, skizziert. Im Unterschied zu den Bedrohungsfaktoren im Kernszenario beinhalten diese **Stressoren** auch hoch unwahrscheinliche, völlig überraschende Ereignisse oder Entwicklungen („schwarze Schwäne“). Sie mögen von

den Adressatinnen und Adressaten der Szenarien zunächst als abwegig abgetan werden, können aber eine intensive Auseinandersetzung mit den Szenarien anstoßen.

fenden Analyse (Zielkomplementarität, Zielkonflikte und wichtige Interventionsoptionen). Dieser wurde in einer Feedbackschleife von allen Teilnehmenden schriftlich kommentiert.

„Es kann geradezu als ein Erfolgskriterium für Szenarios gelten, dass sie viel Diskussion hervorrufen. Der gegenteilige Fall des allseitigen Kopfnickens hingegen bei zu ‚glatten‘ und schlüssigen Szenarios muss durchaus als Problem gesehen werden.“¹¹⁹

Teams aus Autorinnen und Autoren und Feedback-Schleifen innerhalb der Arbeitsgruppe

Für die Ausarbeitung der Bedrohungsszenarien wurden interdisziplinäre Teams aus Autorinnen und Autoren mit Verantwortung für jeweils ein Szenario gebildet. Auf Basis des Leitfadens erstellten sie Entwürfe von insgesamt sechs Szenarien. Das Team zum Thema „Rohstoffverknappung“ verfasste zwei Teilszenarien: eins zu Metallen, die für die Nutzung der erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle spielen, und eins über Erdgas, ohne das der Übergang zu einem CO₂-neutralen neuen Energiesystem nicht zu meistern wäre. Die Entwürfe wurden in zwei Feedbackschleifen kommentiert, in Sitzungen diskutiert und von den Teams überarbeitet.

Anschließend werteten die Teams ihre Szenarien in Bezug auf Interventionsspielräume aus. Die Struktur der Analyse bildeten die drei Ansätze für Interventionen, auf die sich die AG vorab geeinigt hatte. Auch die Entwürfe zu den Interventionsspielräumen und zur szenarioübergreifenden Analyse wurden in mehreren Feedbackschleifen kommentiert, diskutiert und überarbeitet. Das AG-Leitungsteam erstellte – unterstützt durch schriftlichen Input der AG-Mitglieder und Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter – einen Entwurf der szenarioübergrei-

¹¹⁹ Gaßner/Steinmüller 2006, S. 136.

Literatur

acatech 2014

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
(Hrsg.): *Resilien-Tech. „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (acatech POSITION), Berlin 2014.

acatech 2015

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
(Hrsg.): *Hydraulic Fracturing: Eine Technologie in der Diskussion* (acatech POSITION), München 2015.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-1

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina/
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
(Hrsg.): *Mit Energieszenarien gut beraten. Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-2

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina/
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
(Hrsg.): *Die Energiewende europäisch integrieren. Neue Gestaltungsmöglichkeiten für die gemeinsame Energie- und Klimapolitik* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina/
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
(Hrsg.): *Das Energiesystem resilient gestalten. Maßnahmen für eine robuste Versorgung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2017.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-2

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina/
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
(Hrsg.): *Rohstoffe für die Energiewende: Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2017.

Adger 2000

Adger, W. N.: „Social and Ecological Resilience: Are They Related?“. In: *Progress in Human Geography*, 24: 3, 2000, S. 347–364.

Akademie für Geowissenschaften und Rohstoffe 2015

Akademie für Geowissenschaften und Rohstoffe:
Stellungnahme zu Gesetzes- und Verordnungsentwürfen Fracking, 2015. URL: http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Stellungnahmen/Stellungnahmen-Fracking/akademie-fuer-geowissenschaften-und-geotechnologien-e-v.pdf;jsessionid=A9B60B89F83F2C993B1BB6F28C4BF8B2?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: 08.02.2017]

Alexander 2013

Alexander, D. E.: „Resilience and Disaster Risk Reduction: An Etymological Journey“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 11, 2013, S. 2707–2716.

Angerer et al. 2016

Angerer, G./Buchholz, P./Gutzmer, J./Hagelueken, C./Herzig, P./Littke, R./Thauer, R./Wellmer, F.-W.: *Rohstoffe für die Energiesysteme der Zukunft* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2016.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 2016

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990–2015. URL: <http://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html> [Stand: 18.08.2016].

Ausfelder et al. 2015

Ausfelder, F./Beilmann, C./Bertau, M./Bräuninger, S./Heinzel, A./Hoer, R./Koch, W./Mahlendorf, F./Metzelthin, A./Peuckert, M./Plass, L./Räuchle, K./Reuter, M./Schaub, G./Schiebahn, S./Schwab, E./Schüth, F./Stolten, D./Teßmer, G./Wagemann, K./Ziegahn, K.-F.: „Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung“. In: *Chemie Ingenieur Technik*, 87: 1–2, 2015, S. 17–89.

Baggio et al. 2015

Baggio, J. A./Brown, K./Hellebrandt, D.: „Boundary Object or Bridging Concept? A Citation Network Analysis of Resilience“. In: *Ecology and Society*, 20: 2, 2015. URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol20/iss2/art2/> [Stand: 03.08.2015].

Bahadur et al. 2010

Bahadur, A. V./Ibrahim, M./Tanner, T.: *The Resilience Renaissance? Unpacking of Resilience for Tackling Climate Change and Disasters* (Strengthening Climate Resilience Discussion Paper 1), Brighton, UK: Institute of Development Studies 2010. URL: http://www.fsnnetwork.org/sites/default/files/ids_resilience-renaissance.pdf [Stand: 20.02.2017].

Bankoff 2003

Bankoff, G.: „Vulnerability as a Measure of Change in Society“. In: *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 21: 2, 2003, S. 5–30.

Bazilian/Roques 2008

Bazilian, M./Roques, F.: *Analytical Methods for Energy Diversity and Security*, Oxford: Elsevier 2008.

Bailey 2009

Bailey, S.: Map of the major existing and proposed Russian natural gas transportation pipelines to Europe, 2009. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Major_russian_gas_pipelines_to_europe.png [Stand: 04.05.2016].

Becker-Büttner-Held 2015

Becker-Büttner-Held: Schlussbericht: Möglichkeiten zur Verbesserung der Gasversorgungssicherheit und der Krisenvorsorge durch Regelungen der Speicher (strategische Reserve, Speicherverpflichtungen), einschließlich der Kosten sowie der wirtschaftlichen Auswirkungen auf dem Markt (Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie), 2015. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/moeglichkeiten-zur-verbesserung-der-gasversorgungssicherheit-und-der-krisenvorsorge-durch-regelungen-der-speicher.pdf?__blob=publicationFile&v=9 [Stand: 20.02.2017].

Blankart 2008

Blankart, C. B.: *Öffentliche Finanzen in der Demokratie. Eine Einführung in die Finanzwissenschaft*. 7. Auflage, München 2008.

BMUB 2014

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Klimaschutzszenario 2050. Studie erstellt von Öko-Institut e. V. und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2014. URL: <http://www.oeko.de/oekodoc/2019/2014-604-de.pdf> [Stand: 20.05.2015].

Bonß 2015

Bonß, W.: „Karriere und sozialwissenschaftliche Potenziale des Resilienzbegriffs“. In: Endreß, M./Maurer, A. (Hrsg.): *Resilienz im Sozialen. Theoretische und empirische Analysen*, Wiesbaden: Springer Verlag 2015, S. 15–31.

Brand 2009

Brand, F.: „Die Relevanz des Resilienz-Ansatzes für eine Theorie nachhaltiger Entwicklung“. In: von Egan-Krieger, T./Schultz, J./Thapa, P. P./Voget, L. (Hrsg.): *Der Greifswalder Ansatz starker Nachhaltigkeit: Ausbau, Anwendung, Kritik*, Marburg: Metropolis 2009, S. 225–240.

Brand et al. 2011

Brand, F./Hoheisel, D./Kirchhoff, T.: „Der Resilienz-Ansatz auf dem Prüfstand: Herausforderungen, Probleme, Perspektiven“. In: Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (Hrsg.): *Landschaftsökologie. Grundlagen, Methoden, Anwendungen* (Laufener Sozialbeiträge 2011), Laufen: ANL 2011, S. 78–83.

Brenig et al. 2014

Brenig, H.-W./Ludäscher, S./Link, M.: „Sicherheitskultur in den Ingenieurwissenschaften“. In: Lange, H.-J./Wendekamm, M./Endreß, C. (Hrsg.): *Dimensionen der Sicherheitskultur*, Wiesbaden: Springer 2014, S. 145–161.

BMWi 2014-1

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Ein Strommarkt für die Energiewende. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Grünbuch), Stand Oktober 2014.

BMWi 2014-2

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Präventionsplan Gas für die Bundesrepublik Deutschland, Stand Dezember 2014.

BMWi 2014-3

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose. Studie erstellt von Prognos AG/Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln/Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung, 2014.

BMWi 2015

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Ein Strommarkt für die Energiewende. Ergebnispapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch), Stand Juli 2015.

BMWi/BMUB 2012

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Erster Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“, 2012. URL: http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erster-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.pdf?__blob=publicationFile&v=5 [Stand: 20.02.2017].

BMZ 2010

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: BMZ Spezial 166: Entwicklungsfaktor extraktive Rohstoffe. Ein Positionspapier des BMZ (BMZ Spezial 166), 2010. URL: http://www.foes.de/pdf/BMZ_Positionspapier%20Extraktive%20Rohstoffe.pdf [Stand: 25.08.2015].

Bundesregierung 2010

Bundesregierung: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2010. URL: <https://www.nachhaltigkeit.info/media/1285831803phpz9Rqi2.pdf> [Stand: 20.03.2017].

Bundesregierung 2016

Bundesregierung: Energiewende, 2016. URL: https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.html [Stand: 09.05.2016].

Deutscher Bundestag 2016

Deutscher Bundestag: Gesetz zur Weiterentwicklung des Strommarktes (Strommarktgesetz) vom 26. Juli 2016. In: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2016 Teil I Nr. 37, S. 1786–1817. URL: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//%255B@attr_id=%27bgbl116s1786.pdf%27%255D#_bgbl_%2F%2F%25B%40attr_id%3D%27bgbl116s1786.pdf%27%255D__1484333550575 [Stand: 13.01.2017].

Dieckhoff et al. 2014

Dieckhoff, C./Appelrath, H.-J./Fischedick, M./Grunwald, A./Höfler, F./Mayer, C./Weimer-Jehle, W.: *Zur Interpretation von Energieszenarien* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2014.

DTAD 2014

Deutscher Auftragsdienst: Black Swans (Risiken) in der Energiewende, 2014. URL: https://www.dtad.de/details/Black_Swans_Risiken_in_der_Energiewende_53123_Bonn-10261321_1 [Stand: 18.04.2015].

Edwards 2009

Edwards, C.: *Resilient Nation*, London: Demos 2009.

EIA 2014

Energy Information Administration: Statement of Adam Sieminski before the Committee on Energy and Natural Gases U.S. Senate, 25.03.2014. URL: http://www.eia.gov/pressroom/testimonies/sieminski_03252014.pdf [Stand: 09.05.2016].

Elsner et al. 2015

Elsner, P./Fischedick, M./Sauer, D. U. (Hrsg.): *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

Endreß/Maurer 2015-1

Endreß, M./Maurer, A. (Hrsg.): *Resilienz im Sozialen. Theoretische und empirische Analysen*, Wiesbaden: Springer Verlag 2015.

Endreß/Maurer 2015-2

Endreß, M./Maurer, A.: „Einleitung“. In: Endreß, M./Maurer, A. (Hrsg.): *Resilienz im Sozialen. Theoretische und empirische Analysen*, Wiesbaden: Springer Verlag 2015, S. 7–11.

Energiewende Baden-Württemberg

Energiewende Baden-Württemberg: Die Vorteile der Energiewende, 2016. URL: <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/die-vorteile-der-energiewende/> [Stand: 20.02.2017].

Energlobe 2015

Energlobe: A new transatlantic energy security?, 27.01.2015. URL: <http://energlobe.eu/politics/ernest-moniz-announces-a-g7-longterm-joint-plan-in-june> [Stand: 09.05.2016].

Engerer et al. 2014

Engerer, H./Holz, F./Richter, P./Hirschhausen, C. von/Kemfert, C.: Europäische Erdgasversorgung trotz politischer Krisen sicher. In: *DIW Wochenberichte*, 22, 2014, S. 479–492.

Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung 2011

Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung: *Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft*, Berlin 2011.

Feil/Rüttinger 2011

Feil, M./Rüttinger, L.: Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden: Risikoreiche Zukunftsrrohstoffe? Fallstudie und Szenarien zu Lithium in Bolivien (Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Teilbericht 3.3, UBA Texte 25/2011), Berlin 2011. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4102.pdf> [Stand: 18.08.2015].

FONA 2015

Forschung für Nachhaltige Entwicklung: Mangan als Katalysator für die Elektrolyse – Förderung des Clusters Mangan, 2015. URL: <http://www.fona.de/de/20026> [Stand: 22.09.2015].

Gabriel 2005

Gabriel, T.: „Resilienz – Kritik und Perspektiven“. In: *Zeitschrift für Pädagogik*, 51: 2, 2005, S. 208–218.

Gaßner/Steinmüller 2006

Gaßner, R./Steinmüller, K.: „Narrative normative Szenarien in der Praxis“. In: Wilms, F. E. P. (Hrsg.): *Szenariotechnik. Vom Umgang mit der Zukunft*, Bern et al.: Haupt 2006, S. 133–143.

Gawel/Hansjürgens 2013

Gawel, E./Hansjürgens, B.: „Ist der Fahrplan der Energiewende noch einzuhalten?“. In: *Wirtschaftsdienst*, 93: 5, 2013, S. 283–306.

Gesetzentwurf der Bundesregierung

Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung des Strommarktes (Strommarktgesetz, 20.01.2016). URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/073/1807317.pdf> [Stand: 11.03.2016].

von Gleich et al. 2010

von Gleich, A./Göbbling-Reisemann, S./Stührmann, S./Woizeschke, P./Lutz-Kunisch, B.: „Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie“. In: Fichter, K./von Gleich, A./Pfriem, R./Siebenhüner, B. (Hrsg.): *Theoretische Grundlagen für erfolgreiche Klimaanpassungsstrategien* (nordwest2050 Berichte Heft 1), Bremen/Oldenburg: Projektkonsortium „nordwest2020“, 2010, S. 13–50. URL: http://opus.kobv.de/zb/volltexte/2011/10940/pdf/Bericht1_Theoriestudie.pdf [Stand: 17.04.2015].

Göbbling-Reisemann et al. 2013-1

Göbbling-Reisemann, S./Wachsmuth, J./Stührmann, S./von Gleich, A.: Climate change and structural vulnerability of a metropolitan energy supply system – the case of Bremen-Oldenburg in Northwest Germany. In: *Journal for Industrial Ecology*, 17: 6, 2013, S. 846–858.

Göbbling-Reisemann et al. 2013-2

Göbbling-Reisemann, S./Stührmann, S./Wachsmuth, J./von Gleich, A.: „Vulnerabilität und Resilienz von Energiesystemen“. In: Radtke, J./Hennig, B. (Hrsg.): *Die deutsche „Energiewende“ nach Fukushima: Der wissenschaftliche Diskurs zwischen Atomausstieg und Wachstumsdebatte*, Weimar: Metropolis 2013, S. 367–395.

Grunwald 2014

Grunwald, A.: „Technischer Wandel in der Energiewende – notwendig, aber nicht hinreichend“. In: Rogall, H./Binswanger, H.-C./Ekhardt, F./Grothe, A./Hasenclever, W.-D./Hauchler, I./Jänicke, M./Kollmann, K./Michaelis, N. V./Nutzinger, H. G./Scherhorn, G. (Hrsg.): *Jahrbuch 2014/2015 Nachhaltige Ökonomie. Im Brennpunkt: Die Energiewende als gesellschaftlicher Transformationsprozess*, Marburg: Metropolis, 2014, S. 235–253.

Grunwald/Schippel 2013

Grunwald, A./Schippel, J.: „Forschung für die Energiewende 2.0: integrativ und transformativ“. In: *Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis*, 22: 2, 2013, S. 56–62.

Gunderson et al. 2010

Gunderson, L./Allen, C./Holling, C. S. (Hrsg.): *Foundations of Ecological Resilience*, Washington: Island Press 2010.

Hagelüken 2005

Hagelüken, C. (2005): „Der Kreislauf der Platinmetalle – Recycling von Katalysatoren“. In: Hagelüken, C. et al.: *Autoabgaskatalysatoren: Grundlagen – Herstellung – Entwicklung – Recycling – Ökologie* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage), Renningen: Expert Verlag 2005, S. 265–303.

Hagelüken 2014

Hagelüken, C.: „Technologiemetalle – Systemische Voraussetzungen entlang der Recyclingkette“. In: Kausch, P./Bertau, M./Gutzmer, J./Matschullat, J. (Hrsg.): *Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge*, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum Verlag 2014, S. 161–172.

Hauck/Priess 2013

Hauck, J./Priess, J. A.: „The Most Likely Future Isn't: Landnutzungsszenarien für Mitteldeutschland“. In: *Raumforschung und Raumordnung*, 71: 5, 2013, S. 397–411.

Hecking 2015

Hecking, C.: „Druck von unten“. In: *Die Zeit*, 01.04.2015. URL: <http://www.zeit.de/2015/14/erdgas-groningen-energie-russland> [Stand: 04.05.2016].

Holling 1973

Holling, C. S.: „Resilience and Stability of Ecological Systems“. In: *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4: 1, 1973, S. 1–23.

Hughes 2014

Hughes, J. D.: *Drilling Deeper. A Reality Check on US Government Forecasts for a Lasting Tight Oil and Shale Gas Boom*. Santa Rosa, California: Post Carbon Institute 2014. URL: www.postcarbon.org/drilling-deeper [Stand: 19.08.2015].

Hughes 2015

Hughes, L.: „The Effects of Event Occurrence and Duration on Resilience and Adaptation in Energy Systems“. In: *Energy*, 84, 2015, S. 443–454.

Hulme/Dessai 2008

Hulme, M./Dessai, S.: „Negotiating Future Climates: A Critical Review of the Development of Climate Scenarios for the UK“. In: *Environmental Science and Policy*, 11: 1, 2008, S. 54–70.

Inman 2014

Inman, M.: „Natural Gas: The Fracking Fallacy“. In: *Nature*, 516: 7529, 2014, S. 28–30.

IPCC 2014

Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)], Genf: IPCC 2014.

IRGC 2005

International Risk Governance Council: *Risk Governance: Towards an Integrative Approach* (White paper no. 1), Genf: IRGC 2005.

Kiesel 2014

Kiesel, F.: *Entwicklungen in der deutschen Erdgaswirtschaft 2014*, BDEW, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 2014. URL: www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=erdgas2016.pdf [Stand: 08.02.2017].

Konrad/Scheer 2014

Konrad, W./Scheer, D.: Das Smart Grid aus gesellschaftlicher Perspektive (InnoSmart-Arbeitsbericht 02), Stuttgart 2014. URL: http://www.innosmart-projekt.de/data/innosmart/user_upload/Dateien/Smart_Grid_Gesellschaftliche_Perspektiven_NEU_01.pdf [Stand: 04.09.2015].

Koslowski/Longstaff 2015

Koslowski, T. G./Longstaff, P. H.: „Resilience Undefined: A Framework for Interdisciplinary Communication and Application to Real-World Problems“. In: Masys, A. (Hrsg.): *Disaster Management: Enabling Resilience*, Heidelberg et al.: Springer 2015, S. 3–20.

Kosow/Gaßner 2008

Kosow, H./Gaßner, R.: *Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse. Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien (Werkstattbericht Nr. 103)*, Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) 2008.

Levi 1980

Levi, I.: *The Enterprise of Knowledge. An Essay on Knowledge, Credal Probability, and Chance*, Cambridge et al.: MIT Press 1980.

Lfl Bayern 2013

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Verhalten von EHEC und krankheitsregenden Clostridien in Biogasanlagen, 2013. URL: http://www.lfl.bayern.de/zentrale_analytik/048840/index.php [Stand: 09.05.2016].

Löschel et al. 2012

Löschel, A./Erdmann, G./Staiß, F./Ziesing, H.-J.: *Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“. Stellungnahme zum ersten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2011*, Berlin, Mannheim, Stuttgart: 2012.

Losse 2014

Losse, B.: „Hohe Zustimmung für Energiewende 2014“. In: *Wirtschaftswoche*, 14.06.2014. URL: <http://wiwo.de/politik/deutschland/allensbach-umfrage-hohe-zustimmung-fuer-energiewende/10037578.html> [Stand: 26.02.2016].

Mallet 1856

Mallet, R.: *On the Physical Conditions Involved in the Construction of Artillery: With an Investigation of the Relative and Absolute Values of the Materials Principally Employed, and of Some Hitherto Unexplained Causes of the Destruction of Cannon in Service*, London: Longmans, Brown, Green, Longmans and Roberts 1856.

Martin/Pindczyk 2015

Martin, I. W. R./Pindczyk, R.: DP10730 Averting Catastrophes: The Strange Economics of Scylla and Charybdis, 2015. URL: <http://personal.lse.ac.uk/martiniw/AvoidCatastrophesApril2015.pdf> [Stand: 21.10.2015].

Martin-Breen/Anderies 2011

Martin-Breen, P./Anderies, J. M.: Resilience: A Literature Review (Background paper), New York: Rockefeller Foundation 2011. URL: <http://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/bitstream/handle/123456789/3692/Bellagio-Rockefeller%20bp.pdf?sequence=1> [Stand: 03.08.2015].

Matzenberger 2013

Matzenberger, J.: „A Novel Approach to Exploring the Concept of Resilience and Principal Drivers in a Learning Environment“. In: *Multicultural Education & Technology Journal*, 7: 2, 2013, S. 192–206.

McAslan 2010

McAslan, A.: *The Concept of Resilience. Understanding its Origin, Meaning and Utility*, Adelaide, Australia: Torrens Resilience Institute 2010.

Meyerjürgens 2013

Meyerjürgens, T.: HGÜ-Erdkabel: Potentiale und Erfahrungen. BfN-Fachtagung: Netzausbau mit der Natur – Lösungen für die Energiewende im Dialog 15. Mai 2013. URL: https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/erneuerbareenergien/Tgng_netze2013/presentationen/7_Tim_Meyerjuergens_TenneT_Offshore_GmbH_HGUE-Erdkabel_Potentiale_und_Erfahrungen.pdf [Stand: 20.08.2015].

Mietzner/Reger 2005

Mietzner, D./Reger, G.: „Advantages and Disadvantages of Scenario Approaches for Strategic Foresight“. In: *International Journal of Technology Intelligence and Planning*, 1: 2, 2005, S. 220–239.

Müller et al. 2012

Müller, K./Geng, J./Völkl, J./Arlt, W.: „Energetische Betrachtung der Wasserstoffeinspeisung ins Erdgasnetz“. In: *Chemie Ingenieur Technik*, 84: 9, 2012, S. 1513–1519.

NRC 2012

National Research Council: *Disaster Resilience: A National Imperative*, Washington, DC: The National Academies Press 2012.

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie 2016

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: „Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland: Untertage-Gasspeicherung in Deutschland“. In: *Erdöl, Erdgas, Kohle*, 132: 11, 2016, S. 409–417.

Leopoldina 2013

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina:
Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen, Halle
(Saale) 2013. URL: www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2013_06_Stellungnahme_Bioenergie_DE.pdf [Stand: 20.08.2015].

Norris et al. 2008

Norris, F. H./Stevens, S. P./Pfefferbaum, B./Wyche, K. F./Pfefferbaum, R. L.: „Community Resilience as a Metaphor, Theory, Set of Capabilities, and Strategy for Disaster Readiness“. In: *American Journal of Community Psychology*, 41: 1-2, 2008, S. 127–150.

Palzkill/Schneidewind 2014

Palzkill, A./Schneidewind, U.: „Managementwissenschaften – Geschäftsmodelle – Kritik: Business Model Resilienz als Perspektive in einer fragilen Moderne.“ In: von Müller, C./Zinth, C.-P. (Hrsg.): *Managementperspektiven für die Zivilgesellschaft des 21. Jahrhunderts*, Wiesbaden: Springer 2014, S. 27–43.

Park et al. 2013

Park, J./Seager, T. P./Rao, P. S. C./Convertino, M./Linkov, I.: „Integrating Risk and Resilience Approaches to Catastrophe Management in Engineering Systems“. In: *Risk Analysis*, 33: 3, 2013, S. 356–367.

Pflüger 2014

Pflüger, F.: „Exkurs: Resilience – Der Schlüssel zur Energiesicherheit“. In: Thoma, K. (Hrsg.): *Resilientech. „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (acatech STUDIE, April 2014), Berlin: acatech 2014, S. 115–120.

Prognos/ewi/GWS 2016

Prognos/ewi Energy Research & Scenarios/GWS:
Black Swans (Risiken) in der Energiewende.
Risikomanagement für die Energiewende. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Basel 2016. URL: https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/160808_Prognos_Black_Swans_Endbericht_final.pdf [Stand: 20.02.2017].

Renn 2008

Renn, O.: *Risk Governance. Coping with Uncertainty in a Complex World*, London: Earthscan 2008.

Renn 2014

Renn, O.: *Das Risikoparadox. Warum wir uns vor dem Falschen fürchten*, Frankfurt am Main: Fischer 2014.

Renn 2015

Renn, O. (Hrsg.): *Aspekte der Energiewende aus sozialwissenschaftlicher Perspektive* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

Renn/Klinke 2015

Renn, O./Klinke, A.: „Risk Governance and Resilience: New Approaches to Cope with Uncertainty and Ambiguity“. In: Fra.Paleo, U. (Hrsg.): *Risk Governance. The Articulation of Hazard, Politics and Ecology*, Dordrecht: Springer 2015, S. 19–41.

Resilience Alliance 2014

Resilience Alliance: Research on Resilience in Social-Ecological Systems – A Basis for Sustainability, 2014.
URL: <http://www.resalliance.org> [Stand: 17.04.2015].

Reuter 2015

Reuter, B.: „Europa geht das Erdgas aus“. In: *Handelsblatt*, 17.02.2015. URL: <http://www.wiwo.de/technologie/forschung/versiegende-vorkommen-europa-geht-das-erdgas-aus/11362184.html> [Stand: 04.05.2016].

Roegel et al. 2014

Roegel, P. E./Collier, Z. A./Mancillas, J./McDonagh, J. A./Linkov, I.: „Metrics for Energy Resilience“. In: *Energy Policy*, 72, 2014, S. 249–256.

Rüttinger/Feil 2010

Rüttinger, L./Feil, M.: Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden: Risikoreiche Zukunftsrohstoffe? Fallstudie und Szenarien zu China und Seltene Erden (Teilbericht 3.4; Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA Texte 26/2011), Berlin 2010. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4103.pdf> [Stand: 18.08.2015].

Scharte et al. 2014

Scharte, B./Hiller, D./Leismann, T./Thoma, K.: „Einleitung“. In: Thoma, K. (Hrsg.): *Resilientech. „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (acatech STUDIE), München: Herbert Utz Verlag 2014, S. 9–18.

Scharte/Thoma 2016

Scharte, B./Thoma, K.: Resilienz – Ingenieurwissenschaftliche Perspektive. In: Wink, Rüdiger (Hrsg.): *Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung* (Studien zur Resilienzforschung), Wiesbaden: Springer 2016, S. 123–150.

Scheer et al 2017

Scheer, D./Konrad, W./Wassermann, S.: „The good, the bad, and the ambivalent: A qualitative study of public perceptions towards energy technologies and portfolios in Germany“. In: *Energy Policy*, 100, 2017, S. 89–100.

Schippl/Grunwald 2013

Schippl, J./Grunwald, A.: „Einführung in den Schwerpunkt“. In: *Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis*, 22: 2, 2013, S. 4–10.

Schmidt 2015

Schmidt, M.: Rohstoffrisikobewertung – Platingruppenmetalle (DERA Rohstoffinformationen 26), Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 2015. URL: http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/studie_Platin_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Stand: 08.03.2016].

Sheffi 2005

Sheffi, Y.: *The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage*, Cambridge: MIT Press 2005.

Sonnberger/Ruddat 2016

Sonnberger, M./Ruddat, M.: „Die gesellschaftliche Wahrnehmung der Energiewende – Ergebnisse einer deutschlandweiten Repräsentativbefragung“. In: *Stuttgarter Beiträge zur Risiko- und Nachhaltigkeitsforschung*, 34, 2016.

Stirling 2015

Stirling, A.: *Towards Innovation Democracy? Participation, Responsibility and Precaution in the Politics of Science and Technology* (STEPS Working Paper 78), Brighton: STEPS Centre 2015. URL: <http://steps-centre.org/wp-content/uploads/Innovation-Democracy.pdf> [Stand: 18.04.2015].

Taleb 2010

Taleb, N. N.: *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*, New York: Random House 2010 (2. Auflage).

Thoma 2014

Thoma, K. (Hrsg.): *Resilien-Tech. „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (acatech STUDIE), Berlin: acatech 2014.

Thoma et al. 2016

Thoma, K./Scharte, B./Hiller, D./Leismann, T.: Resilience Engineering as Part of Security Research: Definitions, Concepts and Science Approaches. In: *European Journal for Security Research*, 1:1, 2016, S. 3–19.

UBA 2010

Umweltbundesamt: Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen. Studie erstellt von Klaus, T./Vollmer, C./Werner, K./Lehmann, H./Müschel, K./Dessau-Roßlau 2010. URL: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf [Stand: 20.02.2017].

UBA 2013

Umweltbundesamt: Qualitative Szenarien, 05.08.2013. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/strategische-zukunftsforschung/qualitative-szenarien> [Stand: 09.05.2016].

UKERC 2011

UK Energy Research Centre: Building a Resilient UK Energy System (Research Report), 2011. URL: <http://www.ukerc.ac.uk/publications/building-a-resilient-uk-energy-system-research-report.html> [Stand: 03.08.2015].

Umbach 2015

Umbach, E. (Hrsg.): *Priorisierung der Ziele. Zur Lösung des Konflikts zwischen Zielen und Maßnahmen der Energiewende* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

UNEP 2011

United Nations Environment Programme: Recycling Rates of Metals – A Status Report. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, 2011. URL: http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf [Stand: 22.09.2015].

van Notten et al. 2003

van Notten, P. W. F./Rotmans, J./van Asselt, M. B. A./Rothman, D. S.: „An Updated Scenario Typology“. In: *Futures*, 35: 5, 2003, S. 423–443.

Vogt 2015

Vogt, M.: Zauberwort Resilienz. Einführung zur Tagung „Zauberwort Resilienz. Was stärkt in Zeiten des radikalen Wandels?“ (Tutzing 27.02. bis 01.03.2015), 2015. URL: <http://www.forchange.de/assets/archiv/dokumente/Tagung-Tutzing/Vogt-Tutzing-150227.pdf> [Stand: 04.09.2015].

Wack 1985

Wack, P.: „Scenarios – Uncharted Waters Ahead“. *Harvard Business Review*, 62: 5, 1985, S. 73–89.

Walker et al. 2004

Walker, B./Holling, C. S./Carpenter, S./Kinzig, A.: „Resilience, Adaptability and Transformability in Social-Ecological Systems“. In: *Ecology and Society*, 9: 2, 2004, S. 5. URL: ftp://131.252.97.79/Transfer/WetlandsES/Articles/walker_04_socio-ecology_resilience.pdf [Stand: 14.04.2015].

Washington Post 2014

<https://www.washingtonpost.com/news/morning-mix/wp/2014/08/05/scientists-may-have-cracked-the-giant-siberian-crater-mystery-and-the-news-isnt-good/> [Stand: 01.12.2016].

WBGU 2008

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: Globale Umweltveränderungen: *Welt im Wandel. Sicherheitsrisiko Klimawandel*, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2008.

Wellmer/Dalheimer 2012

Wellmer, F.-W./Dalheimer, M.: „The Feedback Control Cycle as Regulator of Past and Future Mineral Supply“. In: *Mineralium Deposita*, 47: 7, 2012, S. 713–729.

Wellmer/Hagelüken 2015

Wellmer, F.-W./Hagelüken, C.: „The Feedback Control Cycle of Mineral Supply, Increase of Raw Material Efficiency and Sustainable Development“. In: *Minerals*, 5, 2015, S. 815–836.

Werner et al. 1971

Werner, E. E./Bierman, J. M./French, F. E.: *The Children of Kauai: A Longitudinal Study from the Prenatal Period to Age Ten*, Honolulu: University of Hawaii Press 1971.

Das Akademienprojekt

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für eine faktenbasierte Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten rund 100 Expertinnen und Experten Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren und Energieversorgung.

Die Arbeitsgruppe „Risiko und Resilienz“

Wie können Energiewende und Energiesystem so gestaltet werden, dass sie auch unter starken Belastungen Dynamik und Funktionsfähigkeit behalten? Für diese Analyse hat die Arbeitsgruppe „Risiko und Resilienz“, in der Ingenieure genauso vertreten waren wie Naturwissenschaftler, Ökonomen oder Sozialwissenschaftler, in narrativen Szenarien mögliche Belastungen für die Energieversorgung und die Energiewende skizziert. Daran anknüpfend hat sie Handlungsspielräume ausgelotet, um vorausschauend mit diesen Belastungen umzugehen. Die Analyse war Grundlage für die Stellungnahme „Das Energiesystem resilient gestalten: Maßnahmen für eine robuste Versorgung“, die zeitgleich veröffentlicht wurde.

Prof. Dr. Ortwin Renn (Leitung)	Institute for Advanced Sustainability Studies
Prof. Dr. Alexander M. Bradshaw	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft
Prof. Dr. Arnim von Gleich	Universität Bremen
Prof. Dr. Stefan Gößling-Reisemann	Universität Bremen
Peter Hussinger	BayWa r.e. renewable energy
Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff	OFFIS – Institut für Informatik
PD Dr. Eva Lermer	Ludwig-Maximilians Universität München
Prof. Dr. Reinhard Madlener	RWTH Aachen
Dr. Nils aus dem Moore	RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
Benjamin Scharte	Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik Ernst-Mach-Institut
Prof. Dr. Klaus Thoma	Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik Ernst-Mach-Institut
Dr. Wolfgang Weimer-Jehle	Universität Stuttgart
Prof. Dr. Friedrich-Wilhelm Wellmer	Ehemals Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Wissenschaftliche Referenten

Dr. Marion Dreyer	DIALOGIK
Dr. Achim Eberspächer	acatech
Philipp Großkurth	RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung

Institutionen und Gremien

Beteiligte Institutionen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Federführung)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Direktorium

Das Direktorium leitet die Projektarbeit und vertritt das Projekt nach außen.

Prof. Dr. Robert Schlögl (Vorsitzender)	Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und Max-Planck-Gesellschaft für Chemische Energiekonversion
Prof. Dr. Carl Friedrich Gethmann	Universität Siegen
Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer	RWTH Aachen
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt	RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
Prof. Dr. Eberhard Umbach	acatech Präsidium

Kuratorium

Das Kuratorium verantwortet die strategische Ausrichtung der Projektarbeit.

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl (Vorsitzender)	Mitglied acatech Präsidium acatech Präsident (bis Februar 2017)
Prof. Dr. Dieter Spath	acatech Präsident (ab Februar 2017)
Prof. Dr. Jörg Hacker	Präsident Leopoldina
Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt	Präsident Akademienunion
Prof. Dr. Bärbel Friedrich	Ehemalige Vizepräsidentin Leopoldina
Prof. Dr. Jürgen Gausemeier	Mitglied acatech Präsidium
Prof. Dr. Martin Grötschel	Präsident Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Prof. Dr. Andreas Löschel	Universität Münster, Vorsitzender der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“

Prof. Dr. Klaus Töpfer Ehemaliger Exekutivdirektor UNEP

Dr. Georg Schütte (Gast) Staatssekretär BMBF

Rainer Baake (Gast) Staatssekretär BMWi

Projektkoordination

Dr. Ulrich Glotzbach Leiter der Geschäftsstelle, acatech

Rahmendaten

Projektlaufzeit

03/2016 bis 02/2019

Finanzierung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen EDZ 2016) gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Geschäftsstelle:

Dr. Ulrich Glotzbach
Leiter der Geschäftsstelle Energiesysteme der Zukunft
Markgrafenstraße 22, 10117 Berlin
Tel.: +49 30 2067957-32
E-Mail: glotzbach@acatech.de

Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft

ISBN: 978-3-9817048-7-7