



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Mai 2017
Stellungnahme

Das Energiesystem resilient gestalten

Maßnahmen für eine gesicherte Versorgung

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina | www.leopoldina.org
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften | www.acatech.de
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften | www.akademienunion.de

Impressum

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

Redaktion

Selina Byfield, acatech

Wissenschaftliche Koordination

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

Produktionskoordination

Marie-Christin Höhne, acatech

Gestaltung und Satz

Atelier Hauer + Dörfler GmbH, Berlin

Druck

Königsdruck, Berlin

ISBN: 978-3-8047-3668-9

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.

Vorwort

Im Stromnetz läuft nicht immer alles störungsfrei: Kabelschäden und Kurzschlüsse sind keine Seltenheit, manchmal müssen auch ganze Kraftwerke abgeschaltet werden. Von den meisten Vorfällen erfahren wir nichts, weil die Stromversorgung trotzdem stabil bleibt. Das liegt auch daran, dass es mehr Stromerzeuger, Transformatoren oder Leitungen gibt als für den Normalbetrieb erforderlich sind. Es spielt daher zunächst keine Rolle, weshalb eine Leitung ausfällt. Bis der Schaden behoben ist, kann der Strom über eine andere weiterlaufen.

Solche Redundanz – doppelt hält besser – trägt maßgeblich zu einem resilienten Energiesystem bei. Resilient bedeutet, dass das System auch unter Belastungen funktionsfähig bleibt und Energie bereitstellt. Bislang ist die Stromversorgung nur in wenigen anderen Ländern so zuverlässig wie in Deutschland. Allerdings wandelt sich das Energiesystem derzeit tiefgreifend. Einige dieser Entwicklungen machen es verwundbarer: Intelligente Stromzähler und -netze bieten neue Angriffspunkte, um die Stromversorgung mit vergleichsweise einfachen Mitteln zu sabotieren. Gleichzeitig werden Wärme-, Gas-, Strom- oder Kommunikationsnetze stärker verknüpft, so dass sich Störungen auch auf andere Systeme ausbreiten können. Zu diesen technischen Umbrüchen können Gefahren von außen kommen, etwa Wetterextreme infolge des Klimawandels.

Das Energiesystem unter diesen Bedingungen resilient zu gestalten, ist eine gemeinsame Aufgabe von Netz- und Kraftwerksbetreibern, Behörden und politischen Entscheidungsträgern und Wissenschaftlern. Monitoring, IT-Sicherheit und die Aufklärung über das Verhalten in Notfällen gehören zu den Handlungsfeldern, die ebenfalls in dieser Stellungnahme des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) adressiert werden.


Ausgangspunkt der hier formulierten Handlungsoptionen waren Szenarien, die beispielhaft illustrieren, wie einzelne Ereignisse oder Entwicklungen Kettenreaktionen auslösen und Teile der Energieversorgung unterbrechen oder die Energiewende ins Stocken bringen könnten. Ausführlicher beschrieben sind sie in der Analyse *Das Energiesystem resilient gestalten. Szenarien – Handlungsspielräume – Zielkonflikte*. Den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die beide Publikationen erarbeitet haben, danken wir ebenso herzlich wie den Gutachterinnen und Gutachtern dieser Stellungnahme.



Prof. Dr. Jörg Hacker
Präsident
Nationale Akademie der
Wissenschaften Leopoldina



Prof. Dr. Dieter Spath
Präsident
acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften



Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt
Präsident
Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften

Inhalt

Zusammenfassung.....	6
1 Ein resilientes Energiesystem – was ist das und was nützt es?	9
2 Neue Belastungen und Verwundbarkeiten – was könnte passieren?	11
2.1 Sabotage und Anschläge.....	12
2.2 Naturgefahren infolge des Klimawandels	13
2.3 Rohstoffknappheiten durch internationale Risiken	14
2.4 Ungeeignete Energieinfrastruktur durch falsche Investitionsanreize	15
3 Mehr als die Summe ihrer Teile: die Resilienzstrategie	17
4 Maßnahmen	20
4.1 Monitoring – von der Risikoanalyse zum Resilienz-Monitoring	22
4.2 Partizipation und Lastenausgleich	23
4.3 Stärkung von Ressourceneffizienz und -flexibilität	25
4.4 Diversifizierung	27
4.5 Redundanzen	28
4.6 Puffer, Speicher und Reserven	30
4.7 Dezentralität und funktionsfähige Teilsysteme	32
4.8 Information und Aufklärung der Bevölkerung	33
4.9 Notfallregelungen	34
4.10 Lernen.....	35
5 Wer koordiniert? Systemische Steuerung als Erfordernis	37
Literatur.....	39
Das Akademienprojekt	43

Zusammenfassung

Mit der Energiewende betritt Deutschland in vielen Bereichen unbekannte Pfade. Der damit verbundene sozio-technische Umbruch macht das Energiesystem zunehmend komplex. Einige Beispiele: Verbraucherinnen und Verbraucher werden zu „Prosumentinnen und Prosumenten“, die auch Strom ins Netz einspeisen. Stromerzeuger genauso wie Verbraucher können durch intelligente Netze digital gesteuert werden. Durch unterschiedliche Techniken wie Elektromobilität oder das Herstellen von synthetischem Gas als Speichermedium werden die Sektoren Strom, Wärme und Mobilität stärker miteinander verknüpft.

Dieses Mehr an Komplexität verspricht das künftige Energiesystem in vielerlei Hinsicht effizienter und flexibler zu machen. So können intelligente Stromnetze dazu beitragen, den Verbrauch besser auf die wetterabhängig schwankende Einspeisung aus Windrädern und Photovoltaikanlagen abzustimmen. Gleichzeitig wird es schwieriger, Gefährdungen der Versorgungssicherheit abzuschätzen. Je komplexer ein System ist, desto mehr Ansatzpunkte gibt es für unvorhersehbare Störungen, und desto eher können Probleme, die in einem Teilbereich auftauchen, das gesamte System beeinträchtigen. Über intelligente Stromzähler (Smart Meter) können Haushalte zum Einfallstor für Angriffe auf das Gesamtsystem werden. Zu vielen dieser Gefährdungen liegen kaum Erfahrungen vor. Dazu trägt bei, dass die Energiewende das System vergleichsweise schnell tiefgreifend verändert.

Belastungen entstehen auch durch „externe“ Faktoren: Dazu zählen nicht nur Hackerangriffe auf die Energieversorgung.

Wenn der Klimawandel voranschreitet, kann die Versorgung mit russischem Erdgas ausfallen, weil Permafrostböden auftauen und damit Gasleitungen unterbrechen. Gleichzeitig wachsen mit der Umsetzung der Energiewende die Ansprüche an die Energieversorgung. Im Kern lauten sie: „grüne Energie“ zu bezahlbaren Preisen und bei gleichbleibend hoher Versorgungssicherheit. Umso drängender stellt sich die Frage: Wie kann das im Umbau befindliche deutsche Energiesystem weiterhin ein hohes Maß an Versorgungssicherheit gewährleisten?

Vor diesem Hintergrund erfordert eine vorausschauende Energiepolitik neben klassischen Risiko- und Kostenanalysen eine Resilienzstrategie. Resilienz bedeutet, dass ein System seine Funktionsfähigkeit auch unter hoher Belastung aufrechterhält oder nach Versagen schnell wiederherstellt und aus solchen Vorgängen lernt. In dieser Stellungnahme wird Resilienz als Gewährleistung der Versorgungssicherheit im Rahmen der Energiewende verstanden.

Weil nicht vorhersehbar ist, welche Ereignisse und Entwicklungen im Wechselspiel von internen und externen Einflüssen zu massiven Störungen der Energieversorgung führen könnten, müssen Schutzkonzepte über den wahrscheinlichen und erwartbaren Störfall hinausgehen. Resilienzstrategien setzen genau hier an. Sie dienen dazu, Systeme so zu ertüchtigen, dass sie auch bei unwahrscheinlichen und überraschenden Belastungen ihre Funktionsfähigkeit und Lernfähigkeit aufrechterhalten beziehungsweise kurzfristig wiederherstellen können.

Notwendig sind dafür Maßnahmen, die gegenüber möglichst vielen verschiedenen Belastungen wirken. Eine probate Methode, Handlungsspielräume auszuloten und geeignete Maßnahmen zu identifizieren, sind Szenarien. In dieser Stellungnahme skizzieren Kurz-Szenarien beispielhafte **Bedrohungskonstellationen**:

- Sabotage und Anschläge
- Naturgefahren infolge des Klimawandels
- Rohstoffknappheiten durch internationale Risiken
- Ungeeignete Infrastruktur durch falsche Investitionsanreize

Eine Resilienzstrategie muss auch die Möglichkeit einer Kombination solcher (und weiterer) Szenarien berücksichtigen. Für kombinierte Szenarien gilt das Gleiche wie für die einzelne Bedrohung: Zwar ist es unwahrscheinlich, dass *eine* der hier ausgeführten Bedrohungskonstellationen genau so eintritt wie beschrieben. Je mehr Konstellationen allerdings möglich sind, und bei komplexen Systemen wächst deren Zahl rapide, desto wahrscheinlicher wird es, dass *irgendeine* davon eintritt.

Eine Resilienzstrategie umfasst die vier Handlungsfelder:

- Risiken und Schwachstellen identifizieren
- Das System robust und vorsorgend gestalten
- Ausfälle überbrücken und die Systemleistung wiederherstellen
- Flexible und adaptive Systeme aufbauen

Umsetzen lässt sich die Resilienzstrategie mit Maßnahmen. Deren Ausgangspunkt sind oft Kooperationen: zwischen Behörden und Energieversorgern oder Netzbetreibern, vor allem aber zwischen Staaten. Fast alle der folgenden zehn Typen von Resilienzmaßnahmen für das Energiesystem werden durch Kooperationen wirksamer:

Monitoring dient dazu, Schwachstellen und Gefährdungen des Energiesystems zu identifizieren. Hier kann auf Erkenntnisse des Risikomanagements zurückgegriffen werden. Um auch unerwartete Belastungen besser meistern zu können, müssen zunächst einmal Kriterien und Methoden entwickelt werden, um die Resilienz des Energiesystems zu messen. Zweckmäßig ist ein regelmäßiges Monitoring des gesamten Energiesystems.

Partizipation und Lastenausgleich tragen dazu bei, dass die Zivilgesellschaft die Energiewende und den Bau nötiger Infrastruktur akzeptiert oder unterstützt. Mittel dafür sind Bürgerforen, Ombudstellen, ein möglicher Entschädigungsfonds für Belastungen durch den Bau von Infrastruktur oder Möglichkeiten finanzieller Teilhabe.

Für Elektroautos und Elektrolyseure sind Seltene Erden und Metalle notwendig, die Deutschland importiert. Um hier Engpässe auf dem Rohstoffmarkt und die Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern zu reduzieren, ist es sinnvoll, das Recycling etwa von Platingruppenmetallen und das Entwickeln von Ersatzstoffen voranzutreiben. Eine wichtige Grundlage dafür sind ausreichende Finanzierung der Forschung und verbesserte Gesetze und Standards.

Durch die Diversifizierung von Anlagen zur Stromerzeugung können Risiken gestreut werden. Windräder sind nicht von Hitzewellen betroffen und Gaskraftwerke können dann Strom erzeugen, wenn weder der Wind weht, noch die Sonne scheint. Standards können mit verhindern, dass intelligente Netze oder Zähler mit identischer Software ausgestattet werden, was sie anfälliger gegenüber Hackerangriffen macht.

Redundanz bedeutet, Leitungen, Generatoren und andere Elemente häufiger zu installieren als für den Normalbetrieb nötig. Dann bleibt die Versorgung auch er-

halten, wenn einige dieser Elemente ausfallen. Wenn Daten in intelligenten Netzen stets mehrfach und über verschiedene Kanäle übermittelt werden, sind Manipulationen durch Hacker weniger wirksam.

Puffer, Speicher und Ressourcen aller Art können kurzfristige Engpässe abfangen. Dazu zählen Erdgasspeicher oder Lager von Metallen. Dazu zählen aber auch unverplante Ressourcen wie Reparatereinheiten oder „Springer“, die bei Bedarf schnell eingesetzt werden können. In Stromnetzen könnten „Systembeobachter“ zum Einsatz kommen, die engen Kontakt zu Reparatereinheiten halten.

Wenn das Gesamtsystem als Summe für sich funktionsfähiger Teilsysteme angelegt wird, sinkt das Risiko, dass Ausfälle sich großräumig ausbreiten. Ein solches „zelluläres Design“ setzt voraus, dass Stromerzeuger, Speicher, aber auch Reparatereinheiten räumlich verteilt und auch die Netze intelligent verknüpft werden.

Information und Aufklärung der Bevölkerung können dazu beitragen, dass die Folgen von Versorgungsausfällen weniger dramatisch ausfallen. Erfahrungen aus Großbritannien zeigen, dass Unterricht und Schulungen signifikante Wirkung zeigen. Ebenfalls zur Versorgungssicherheit beitragen können Kampagnen für Energieeffizienz oder für das Installieren lokaler Speicher, um das System flexibler zu machen.

Mit Notfallregelungen lassen sich Störungen überbrücken und der Betrieb des Systems schneller wiederherstellen. Digitale Notbetriebs-Infrastrukturen können einspringen, wenn beispielsweise die Hauptrechner zerstört wurden. Verteilnetze könnten so umgebaut werden, dass bei Störungen stufenweise Verbraucher abgekoppelt werden können. Dabei würden weniger wichtige Verbraucher wie Leuchtreklamen zuerst, essenzielle Verbraucher wie Feuerwehrezentralen dagegen nie von der Versorgung getrennt.

Lernen ist wichtig, um das System stets an neue Rahmenbedingungen anzupassen. Dafür ist es hilfreich, Ausfälle genauso zu dokumentieren wie „Beinahe-Katastrophen“. Kritische Situationen können durch Simulationen vorweggenommen werden. Hierfür müssen Modelle weiter und neuentwickelt und Netz- und Kraftwerksbetreiber damit vertraut gemacht werden.

Angesichts der Vielfalt möglicher Belastungen im künftigen Energiesystem ist damit zu rechnen, dass eine erfolgversprechende Resilienzstrategie einer Kombination von Maßnahmentypen bedarf. Nicht in jeder Situation greift die gleiche Maßnahme oder Maßnahmenkombination. Resilienzförderung erfordert Maßnahmen, die auf Rahmenbedingungen und Akteure zugeschnitten sind. Das Energiesystem sollte als lernendes System gestaltet werden, das auf Ereignisse und Entwicklungen flexibel und adaptiv reagieren kann. Dies erfordert unter anderem, die Improvisationsfähigkeit von Akteuren zu stärken.

Ein wichtiges Bewertungskriterium für Resilienzmaßnahmen ist deren Effizienz in einer Langfristperspektive. Schließlich kostet Resilienz zunächst einmal Geld. Eine allzu kurzfristige Perspektive ist dabei allerdings problematisch. Langfristig ist Resilienz eine lohnende Investition. Wichtig ist daher ein Wechsel der Perspektive: weg von kurzfristiger Optimierung hin zu langfristigem, strategischem Denken. Es ist die Aufgabe der Politik, diesen Perspektivwechsel voranzutreiben und die Förderung von Resilienz so zu steuern, dass Maßnahmen und Akteurs-Verantwortlichkeiten bestmöglich aufeinander abgestimmt sind.

1 Ein resilientes Energiesystem – was ist das und was nützt es?

Am 23. Dezember 2015 gingen in der westlichen Ukraine die Lichter aus. Hackern war es gelungen, Schadsoftware in die Computersysteme dreier ukrainischer Stromversorger einzuschleusen und so mehrere Umspannwerke vom Netz zu trennen. Gleichzeitig löschten sie Systemdateien und legten das Callcenter eines der Versorger lahm, damit dieser sich nicht durch Anrufe betroffener Kundinnen und Kunden ein Bild vom Ausmaß der Ausfälle machen konnte. Nach rund drei Stunden gelang es den Verteilnetzbetreibern, die Versorgung wiederherzustellen. Bis dahin waren über 200.000 Haushalte vom Strom abgeschnitten.¹

Der erste bekanntermaßen von Hackern ausgelöste Stromausfall zeigt: Der Wandel des Energiesystems macht Belastungen möglich, die es davor nicht gegeben hat. Dass die Energie- und insbesondere die Stromversorgung in Deutschland in den letzten Jahrzehnten äußerst zuverlässig funktioniert haben, ist keine Garantie, dass das auch so bleibt. Und dass die deutsche Bevölkerung die Energiewende mehrheitlich weiter befürwortet, bedeutet nicht, dass die Ansprüche an die Versorgung sinken. Von den zentralen Zielen der Energiewende sind Bezahlbarkeit und Versorgungssicherheit den Bürgerinnen und Bürgern die wichtigsten.² Das Ideal lautet: „grüne Energie“ zu möglichst geringen Kosten bei gleichbleibend hoher Versorgungssicherheit. Vielen Industrie- und

Dienstleistungsunternehmen in Deutschland ist eine zuverlässige Versorgung ein primäres Anliegen:³ Versorgungssicherheit ist ein Standortvorteil. Auch deshalb ist das Stromnetz heute schon so ausgelegt, dass selbst bei Höchstlast einzelne Leitungen oder Kraftwerke ausfallen können, ohne dass es zu einem großräumigen Stromausfall kommt.

Mit der Energiewende wird diese hochtechnisierte und vernetzte Infrastruktur komplett umgebaut. Dadurch wird die Versorgung in mancher Hinsicht robuster: Schon heute sind die Millionen von Wind- und Photovoltaikanlagen physisch schwerer auszuschalten als die wenigen hundert Großkraftwerke, die in den neunziger Jahren den Strom lieferten. Gleichzeitig entstehen jedoch neue Verwundbarkeiten: Windrädern und Photovoltaikanlagen fehlen die rotierenden Massen der Turbinen von Gas-, Kohle- oder Kernkraftwerken, die zur Stabilisierung der Netzfrequenz beitragen. Vor allem aber schwankt die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien wetterbedingt und damit unabhängig vom Verbrauch. Um hier für mehr Flexibilität zu sorgen, werden intelligente Netze und Zähler eingeführt. Vernetzte Haushaltsgeräte können zu einem weiteren Einfallstor für digitale Angriffe auf das Energiesystem werden.⁴

¹ Vgl. E-ISAC/Sans 2016.

² In den Ergebnissen einer FORSA-Umfrage bewerten die Befragten die Kosten als wichtiger als Versorgungssicherheit und Umweltfreundlichkeit (vgl. FORSA 2016). In anderen Umfragen steht die Versorgungssicherheit an erster Stelle (vgl. Schubert et al. 2013, S. 36).

³ Das zeigt sich beispielsweise daran, dass 2016 rund die Hälfte von über 2000 befragten Unternehmen Maßnahmen zur Absicherung gegen Stromausfälle durchführte oder plante (vgl. DIHK 2016, S. 19).

⁴ Im Oktober 2016 benutzten Hacker vernetzte Kameras, Drucker und Babyphones, um Internetdienste wie Amazon oder Netflix durch Überlastung unbenutzbar zu machen. Auch mit solchen Methoden könnten Hacker eines Tages das Energiesystem angreifen.

Dabei wird das System immer komplexer: Dafür sorgen immer mehr Anlagen und Stromversorger sowie neue Verbindungen und Schnittstellen zwischen Strom-, Wärme-, Gas- und Kommunikationsnetzen oder Wasserstofftankstellen. Verglichen mit den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts verändert sich das System zudem immer schneller. Damit die Versorgung weiterhin reibungslos funktioniert, müssen Technik, regulatorischer Rahmen und das Verhalten der Nutzerinnen und Nutzer zusammenpassen. Doch je komplexer und dynamischer ein System, desto weniger lassen sich die Auswirkungen einzelner Störfaktoren und ihre Wechselwirkungen im Vorhinein einschätzen.

Unter diesen Bedingungen werden sogenannte „schwarze Schwäne“ wahrscheinlicher. Dabei handelt es sich um wirkmächtige Ereignisse, die sich schlecht quantifizieren und prognostizieren lassen und überraschend eintreffen⁵ – wenn schon nicht für einzelne Fachleute, so für die handelnden Personen. In der Regel lassen sich „schwarze Schwäne“ erst im Nachhinein erklären. Ein Beispiel ist das Ozonloch: Dieses hatte niemand vorhergesehen, obwohl grundsätzlich bekannt war, dass Fluorchlorkohlenwasserstoffe in der Atmosphäre zum Abbau von Ozon führen. Gegenüber derartigen Belastungen stößt klassisches Risikomanagement an seine Grenzen.

Abhilfe schafft hier eine **Resilienzstrategie**. Ein Energiesystem, dessen Funktion – hier die Versorgungssicherheit – unter Belastungen erhalten bleibt

oder zumindest innerhalb kurzer Zeit wiederhergestellt werden kann, ist ein *resilientes* Energiesystem. Dem Vorsorgeprinzip entsprechend sollte auch die Energiewende in Deutschland um eine Resilienzstrategie ergänzt werden. Sie sollte sich in eine allgemeine Nachhaltigkeitsstrategie einfügen.⁶

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

Mit „System“ ist dabei ein **sozio-technisches System** gemeint, in dem auch psychologische, soziale und ökonomische Logiken gelten. Im Folgenden wird skizziert, wie die Versorgungssicherheit dieses Systems gewährleistet werden kann. Die Rahmenbedingungen ändern sich dabei laufend. Zum einen wird das Energiesystem selbst in hoher Geschwindigkeit umgebaut. Zum anderen gewinnen bestimmte äußere Faktoren an Bedeutung; es ist sehr wahrscheinlich, dass Klimawandel oder Terrorismus zu ihnen zählen. Der Fokus auf Künftiges ist deshalb wichtig, weil die Energiewende ein langfristiges Projekt ist, dessen Zielvorgaben bis in das Jahr 2050 reichen.⁷ Das ist auch der Zeithorizont der Belastungen und Resilienzmaßnahmen, die im Folgenden skizziert werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die bundesdeutsche Politik an den Zielen der Energiewende festhält.

5 Zur Definition des Begriffs „Schwarzer Schwan“ vgl. Taleb 2007, S. xvii–xix. Deutlich weiter gefasst ist die Definition des Begriffs „schwarzer Schwan“ in einer vom Bundeswirtschaftsministerium beauftragten Studie zum Risikomanagement für die Energiewende (siehe Prognos/ewi/GWS 2016). Sie werden dort darin 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.

6 In der „Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie“, die das Bundeskabinett im Januar 2017 beschlossen hat, spielt die Versorgungssicherheit im Abschnitt zum Thema Energie zwar eine Rolle, der Begriff „Resilienz“ wird an dieser Stelle aber nicht genannt (vgl. Bundesregierung 2017, S. 113–121).

7 Für die Ziele der Energiewende vgl. Umbach 2015, S. 11–15. Zwei der wichtigsten quantitativen Ziele lauten, dass die Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 Prozent bis 2050 (gegenüber 1990) reduziert werden und der Primärenergieverbrauch bis 2050 um 50 Prozent und bis 2020 um 20 Prozent (gegenüber 2008) gesenkt wird (vgl. Bundesregierung 2010, S. 4–5).

2 Neue Belastungen und Verwundbarkeiten – was könnte passieren?

Ungünstige Entwicklungen oder Ereignisse können durch einzelne technische, organisatorische und Natureinflüsse genauso verursacht werden wie durch die Wechselwirkungen zwischen diesen. Anzahl und Ausprägung von Bedrohungsszenarien lassen sich nicht vollständig überblicken. Allerdings lässt sich anhand einiger ausgewählter Szenarien ausloten, an welchen Stellen Handlungsbedarf und Handlungsspielraum für Resilienzmaßnahmen besteht. Auch wenn sie nur einen Ausschnitt möglicher Belastungen für das Energiesystem abbilden, liefern die Szenarien daher wichtige Hinweise, was man tun kann, um das Energiesystem resilienter zu machen.

In dieser Stellungnahme werden vier Szenarien mit unterschiedlichen Auslösern skizziert:

- Sabotage und Terroranschläge
- Naturgefahren infolge des Klimawandels
- Rohstoffknappheiten infolge internationaler Entwicklungen
- Ungeeignete Energieinfrastruktur infolge falscher Investitionsanreize

Die narrativen Szenarien bilden beispielhaft ab, was *sein könnte*.⁸ Sie sind jedoch *keine Prognosen* und sagen nichts darüber aus, wie wahrscheinlich es ist, dass bedrohliche Situationen tatsächlich eintreten. Vielmehr werfen sie Schlaglichter auf

mögliche Fehlentwicklungen und Belastungen, die zum Teil gravierende Folgen haben können. Einige Entwicklungen sind absehbar, etwa die wachsende Digitalisierung des Energiesystems, der zunehmende Bedarf an metallischen Rohstoffen, die Zunahme des internationalen Terrorismus und schädliche Auswirkungen des Klimawandels.

Die Bedrohungskonstellationen der vier Beispielszenarien sind aus den Bedrohungsszenarien der ESYS-Analyse *Das Energiesystem resilient gestalten. Szenarien – Handlungsspielräume – Zielkonflikte* abgeleitet,⁹ auf der diese Stellungnahme aufbaut. Sie dienen als exemplarische Belastungstests für die Versorgungssicherheit im Rahmen der Energiewende. Die in den beiden erstgenannten Szenarien beschriebenen Belastungen gefährden das Energiesystem und damit die Versorgungssicherheit unmittelbar. Sie können direkt zu großräumigen Stromausfällen führen. Die Szenarien zu zeitweiligen Rohstoffknappheiten und fehlenden oder fehlgeleiteten Investitionen in Infrastruktur dagegen beschreiben, wie die Energiewende ausgebremst werden kann. Indem sie zu Engpässen führen, machen sie das System verwundbarer und bedrohen die Versorgungssicherheit mittelbar.

⁸ Für qualitativ-narrative Szenarien gilt genauso wie für quantifizierende: Ein Szenario bringt zum Ausdruck, dass ein zukünftiger Zustand oder eine zukünftige Entwicklung für möglich gehalten wird; „möglich“ bedeutet hier: konsistent mit dem aktuellen Stand des relevanten Wissens (vgl. acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-3, S. 9–10; Dieckhoff et al. 2014, S. 10).

⁹ Vgl. Renn 2017. In der Analyse ist der Gegenstand von Resilienz jedoch weiter gefasst: Dort ist er auf die Energiewende als Prozess und mit ihr auf die Ziele Klimaverträglichkeit, Bezahlbarkeit, Versorgungssicherheit sowie Ressourcenschonung, Sozialverträglichkeit und globale Verantwortung bezogen.

2.1 Sabotage und Anschläge

Terrorismus ist eine weltweite Gefahr. Energieinfrastruktur war bereits Ziel von Angriffen: Anfang der sechziger Jahre sprengten Mitglieder des separatistischen „Befreiungsausschusses Südtirol“ rund vierzig Strommasten. Einige norditalienische Industriegebiete waren danach kurzzeitig von der Stromversorgung abgeschnitten, Züge blieben während der Fahrt stehen. Dass der Strom sich heutzutage auch mit IT-Kenntnissen kappen lässt, zeigt der eingangs skizzierte Hackerangriff auf ukrainische Stromversorger im Dezember 2015. Derartige Stromausfälle sind umso schadensträchtiger, je wirt-

schaftsstärker und dichter besiedelt die betroffene Region ist.

Zwar wird im Zuge der Energiewende die *physische Infrastruktur* dezentraler. Gleichzeitig kann deren *digitale Steuerung* zentraler werden. Bei einer weitgehend zentralen digitalen Steuerung von Stromerzeugern und Netzen können Sicherheitslücken entstehen. Das Gleiche gilt, wenn mehr Privathaushalte mit intelligenter Messtechnik ausgestattet sind. Selbst wenn „Secure Smart Meters“ zusätzliche Datensicherheit gewährleisten, entstehen dadurch mögliche neue Angriffspunkte. Dann nimmt die Verwundbarkeit der Infrastrukturen durch Sabotage zu.

Szenario Hackerangriff

Nehmen wir an, die öffentliche Debatte über IT-Sicherheitsrisiken für das Energiesystem ist ausgeblieben, obwohl viele Probleme unter Fachleuten bekannt waren. So hat das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik zwar klargestellt, dass die Unternehmen einschließlich der Kraftwerke sich nicht allein auf den Schutz durch den Staat verlassen dürfen, sondern sich vor allem selbst schützen müssen. Das Gleiche gilt für Privathaushalte, die mit ihren dezentralen Erneuerbare-Energien-Anlagen inzwischen einen großen Teil des Stroms in Deutschland erzeugen. Sowohl Energieversorger als auch Privathaushalte bekamen Sicherheitsrichtlinien zur Verfügung gestellt. Oft wurden diese aber nicht umgesetzt.

Außerdem haben viele Energieunternehmen aus Furcht vor Imageschäden nicht über versuchte oder gelungene Hackerangriffe auf ihre Energieanlagen berichtet, obwohl sie laut dem Gesetz zur Informationssicherheit dazu verpflichtet gewesen wären. Branchenweit haben deshalb Unternehmen die Gefahren mangelhafter Sicherheitsvorkehrungen unterschätzt. Sie haben es daher versäumt, ausreichend in die IT-Sicherheit zu investieren, weil dies keine unmittelbaren Wettbewerbsvorteile verspricht.

Die Energieversorger sind also schlecht vorbereitet, als Hacker sich über das zentrale Portal für Betriebsdaten Zugriff auf einzelne Kraftwerke sowie eine große Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen verschaffen. Dieses Portal hat die Bundesnetzagentur aufgebaut, um die Daten möglichst vieler Stromerzeuger und -verbraucher zu erfassen. Auf Basis dieser Daten erstellen Netzbetreiber und Energieversorger Prognosen zu Netzauslastung und Strombedarf. Damit schaffen sie jedoch einen „Single Point of Failure“, über den sich das gesamte System manipulieren lässt. Indem die Hacker überhöhte Verbrauchsprognosen einspeisen, sorgen sie dafür, dass viele Kraftwerke zwischen höchster Erzeugung und Notabschaltung pendeln.

Der Angriff verursacht neben starken Preisschwankungen an den Strombörsen auch großräumige Stromausfälle. Die Bevölkerung verliert nicht nur das Vertrauen in die Sicherheit des digital gesteuerten Energiesystems, sondern in die Energiewende als solche. Behörden und Systembetreiber führen daraufhin in großem Maßstab rigide Sicherheitsmaßnahmen ein, die die Energieversorgung teurer und zugleich weniger flexibel machen.

2.2 Naturgefahren infolge des Klimawandels

Wetterextreme und Naturgefahren treffen auch das Energiesystem. Im November 2005 froren große Mengen nassen Schnees an Stromleitungen und Strommasten fest, so dass schließlich mehrere davon zusammenbrachen. Die Belastung waren heftige Schneefälle in kurzer Zeit, die Schwachstelle war die veraltete Infrastruktur: Zahlreiche Strommasten waren über 65 Jahre alt und aus sprödem und relativ leicht brechendem Stahl. Rund 250.000 Haushalte blieben tagelang ohne Strom; der wirtschaftliche Schaden durch das „Münsterländer Schneechaos“ wird auf rund 100 Millionen Euro geschätzt.

Mit dem Klimawandel werden Wetterextreme wahrscheinlicher. Außer Schnee können auch Stürme insbeson-

dere freistehende Stromleitungen beschädigen. Überschwemmungen können Umspannwerke und Strommasten unterspülen und zerstören. Häufigere Hitzewellen können das deutsche Energiesystem und den Systemumbau stark belasten. Wenn die Permafrostböden in Sibirien auftauen, könnten Erdgaspipelines beschädigt und Lieferketten dieses wichtigen Rohstoffs unterbrochen werden.

Auch selten, aber regelmäßig auftretende Naturereignisse können künftige Energiesysteme stark beeinträchtigen: Geomagnetische Stürme können Transformatoren beschädigen und damit Stromnetze zum Ausfall bringen. Und ein Vulkanausbruch in der Größenordnung des Krakatau-Ausbruchs 1883, nach dem noch jahrelang Aschepartikel in der Atmosphäre schwebten, würde den Ertrag an Solarenergie massiv reduzieren.

Szenario Hitzewellen

Nehmen wir an, ab dem Jahr 2030 ist es durchschnittlich einmal pro Jahr so lange so heiß wie im Sommer 2003. Die Hitzewellen reichen von Südfrankreich bis Russland. Kohlekraftwerke können nicht mehr per Schiff mit Kohle versorgt werden, weil die Pegel der großen Flüsse zu niedrig sind. Vor allem aber wird das verbliebene Wasser sehr warm. Aus Gründen des Gewässerschutzes darf es daher nicht mehr verwendet werden, um Kohle- und Gaskraftwerke zu kühlen. Die Situation verschärft sich, weil in mehreren Nachbarländern Deutschlands Kühltürme fehlen, die für das Kühlen von Kraftwerken mit weniger Frischwasser auskommen. Dort müssen so viele Kraftwerke herunterfahren, dass die Grundlast nicht mehr zuverlässig bedient werden kann. Weil das deutsche Stromnetz mit dem der europäischen Nachbarländer verbunden ist, wird auch die deutsche Stromversorgung instabil.

Weil sich die Hitzewellen häufen, stellen immer mehr Privatleute und Gewerbebetriebe mobile und zugleich ineffiziente Klein-Klimaanlagen auf. Der zusätzliche Stromverbrauch führt vor allem mittags zu neuen Lastspitzen. Diese können auch durch Solarstrom nicht vollständig ausgeglichen werden, weil die Produktivität von Photovoltaikzellen bei starker Hitze sinkt.

Während der Hitzewellen bricht die Stromversorgung daher mehrfach zusammen. Zwar sind die Ausfälle nur vorübergehend, als Gegenmaßnahme erhöht der Gesetzgeber aber die Standards für die Kühlsysteme der Gas- und der verbliebenen Kohlekraftwerke. Statt in Netze oder Speicher investieren Energieversorger nun vorrangig in Kühlsysteme älterer Kraftwerke. Das macht die Energieversorgung teurer, aber nicht klimafreundlicher. Unternehmen sehen die neuen Anforderungen für Kühlungen als Eingriffe in die Planungs- und Investitionssicherheit, die Bürgerinnen und Bürger sehen sie als Kurswechsel gegen die Energiewende, deren Akzeptanz damit entsprechend nachlässt.

2.3 Rohstoffknappheiten durch internationale Risiken

Die Preise für Energierohstoffe sind eng mit politischen Entwicklungen in den Lieferländern verknüpft. Ab 2006 beschränkte die chinesische Regierung die Exporte Seltener Erden. Da über neunzig Prozent der weltweit geförderten Seltenen Erden aus China stammte, folgten rapide Preissteigerungen: Von 2010, als die Exportquoten um vierzig Prozent gesenkt wurden, bis Mitte 2011 verzehnfachten sich die Preise für Neodym, das unter anderem für die Magneten in den Rotoren von Windrädern verwendet wird.¹⁰

¹⁰ Vgl. Angerer et al. 2016, S. 145; BGR 2014, S. 4. Gegenüber dem Jahr 2003, in dem der „China-Preis-Boom“ begann, traten, wenn man Tagesspitzenpreise berücksichtigt, sogar Preissteigerungen um den Faktor 70 beziehungsweise über 100 auf.

Embargos oder Kriege sind nur die auffälligsten Ursachen für explodierenden Preise von Energierohstoffen. Andere Ursachen sind technische Probleme oder falsche Einschätzungen darüber, wie viel Rohstoffe förderbar oder auch nur am Markt verfügbar sind. Daraus entstehende „Rohstoffhypes“ können dazu führen, dass Rohstoffe wie Platingruppenmetalle¹¹ schlagartig teuer und schwerer verfügbar werden. Für den Aufbau der neuen Energieinfrastruktur sind metallische Rohstoffe

¹¹ Zu den Platingruppenmetallen gehören die sechs Elemente Platin [Pt], Palladium [Pd], Ruthenium [Ru], Rhodium [Rh], Iridium [Ir] und Osmium [Os]. Sie treten als gekoppelte Elemente – vergleichbar den Seltenen Erden – in Lagerstätten immer zusammen auf. Wirtschaftlich mit Abstand am bedeutendsten sind Platin mit einer Weltbergbauproduktion von 190 Tonnen pro Jahr und Palladium mit 210 Tonnen pro Jahr. Die anderen Platingruppenelemente werden nur als Beiprodukte bei der Platin- und Palladiumgewinnung produziert, von Iridium zum Beispiel 3 bis 4 Tonnen pro Jahr. Gewonnen werden sie überwiegend aus eigenständigen Lagerstätten, teilweise auch als Beiprodukt in Nickellagerstätten (vgl. Renn 2017, S. 23).

Szenario Platingruppenmetall-Knappheit

Nehmen wir an, in den 2030er-Jahren fahren immer mehr Menschen Autos mit Brennstoffzellen, die Wasserstoff als Energieträger nutzen. Dadurch werden Platingruppenmetalle sehr wichtig. Sie werden für die Brennstoffzellen ebenso benötigt wie für die Elektrolyseure, die den Wasserstoff herstellen. Die Nachfrage nach Platingruppenmetallen wächst daher rapide.

Südafrika, eines der wichtigsten Lieferländer, verhängt jedoch einen Exportstopp für Platingruppenmetalle, weil es die Produktion von Elektrolyseuren im eigenen Land vorantreiben will. In Russland, Simbabwe und den USA, wo die Produktion erhöht werden sollte, streiken die Bergleute. Sie fordern, dass die Gehälter mit den gestiegenen Gewinnen der Bergbaugesellschaften mitziehen. Neue Lieferanten wird es auf absehbare Zeit nicht am Markt geben. Die Exploration weiterer Lagerstätten von Platingruppenmetallen in Indonesien, dem Oman oder den Philippinen kommt aufgrund lokaler Proteste gegen Umweltschäden und einen befürchteten sozialen Abstieg der Anwohnerinnen und Anwohner ebenfalls nicht voran. Wasserstoff-Langzeitspeicher oder Brennstoffzellen, die ohne Platingruppenmetalle auskommen, wurden bisher nicht mit Nachdruck entwickelt. Sie stehen mindestens kurzfristig nicht zur Verfügung.

Unmittelbar ist die Versorgungssicherheit in Deutschland nicht gefährdet. Weil durch den anhaltenden Engpass bei Platingruppenmetallen Wasserstoff teuer wird, gerät jedoch die Energiewende ins Stocken. Dazu trägt bei, dass die medialen Debatten über Metallknappheit einen Stimmungsumschwung verursachen: Viele Menschen glauben nicht mehr, dass die Energiewende gelingen kann: Die Proteste gegen den notwendigen Ausbau der Energieinfrastruktur nehmen zu, Investitionen in klimafreundlichere Technik nehmen ab.

fe die wichtigste Gruppe.¹² In Deutschland werden entsprechende Metalle nicht abgebaut; bei den Primärrohstoffen ist Deutschland daher vollständig von Importen abhängig. Daher kann es problematisch werden, wenn rohstoffexportierende Länder die Ausfuhr beschränken oder es dort zu Protesten gegen den Rohstoffabbau kommt. Beides kann zu Rohstoffengpässen in Deutschland führen.

2.4 Ungeeignete Energieinfrastruktur durch falsche Investitionsanreize

Die Politik eines Landes kann auch dessen eigene Versorgungssicherheit gefährden: Im Zug der Deregulierung des kalifornischen Strommarkts ab 1996 waren die etablierten Versorger angewiesen worden, zahlreiche ihrer Kraftwerke zu verkaufen. Den größten Teil des Stroms, den sie ab dann lieferten, mussten sie davor selbst einkaufen. Allerdings wurden nur die Großhandelspreise für Strom liberalisiert, während die Endkundenpreise gedeckelt blieben. Unter diesen Bedingungen konnten Kraftwerksbetreiber ihre Profite steigern, indem sie Kraftwerke abschalteten und damit das Angebot künstlich verknappten. In den Jahren 2000 und 2001 waren die etablierten kalifornischen Stromversorger zahlungsunfähig, und es kam zu rollierenden Abschaltungen und großflächigen Stromausfällen. Der wirtschaftliche Schaden durch die „kalifornische Energiekrise“ wird auf über 40 Milliarden US-Dollar geschätzt.¹³

Interessenkonflikte zwischen regionaler, nationaler und europäischer Politik, die sich in einem längeren Entscheidungsstau niederschlagen, wachsende Proteste gegen den Bau neuer Energieinfrastruktur wie Stromtrassen oder Windparks oder wechselnde Positionen zur Energiewende auf Regierungsebene belasten das Energiesystem gleichermaßen. Solche Entwicklungen können Investoren verunsichern und damit den notwendigen Aus- und Umbau von Energieinfrastruktur verhindern.

Kombinationen der aufgeführten und anderer Bedrohungsszenarien sind ebenfalls möglich. Ein Beispiel sind terroristische Angriffe auf ein durch Extremwetter bereits belastetes Energiesystem, das aufgrund unzureichender Investitionen zu wenige „Puffer“ für Ausfallsituationen bereithält. Würden solche oder andere Bedrohungsszenarien unvorbereitet Wirklichkeit werden, könnte dies zu Krisen führen, die nur sehr schwer zu bewältigen wären. Für kombinierte Szenarien gilt das Gleiche wie für die einzelne Bedrohung: Es ist zwar unwahrscheinlich, dass eine spezielle Bedrohungskonstellation eintritt. Je mehr Konstellationen allerdings möglich sind, desto wahrscheinlicher wird es, dass einer von vielen möglichen Effekten dieser Kombinationen eintritt, der zum Ausfall der Versorgung führen kann.

¹² Vgl. Angerer et al. 2016.

¹³ Vgl. Weare 2003, Schätzung der Kosten S. 3–4.

Szenario Investitionsstau

Nehmen wir an, obwohl die Bundesregierung in den Jahren 2014 bis 2016 das Marktdesign für den Stromsektor in einer breit angelegten Diskussion erarbeitet hat, ändern wechselnde Regierungskoalitionen dieses Design in den Jahrzehnten darauf immer wieder. Vor allem über die Förderung von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz sowie das Vorhalten von flexiblen Kraftwerken oder Speichern herrscht Uneinigkeit. An die neuen Anforderungen eines Energiesystems mit wachsenden Anteilen dezentraler erneuerbarer Energien in intelligent vernetzten Systemen (Strom, Wärme, Verkehr) werden die Energiemärkte nicht ausreichend angepasst. Die nötigen Investitionsanreize bleiben aus.

Das blockiert den notwendigen Umbau des Kraftwerksparks: Ineffiziente alte Kohlekraftwerke werden nach entsprechender Prüfung durch die Bundesnetzagentur durch Subventionen am Leben gehalten, weil sie systemrelevant sind. Gleichzeitig werden moderne Gas- und Kraft-Wärme-Kopplung-Kraftwerke durch die Betreiber stillgelegt, weil sie sich angesichts ihrer immer selteneren Einsätze nicht mehr rechnen.

Parallel dazu wurde versäumt, die Netze auszubauen sowie die Entwicklung und den Einsatz von Energiespeichern voranzutreiben. Angesichts des rasant zunehmenden Anteils schwankend einspeisender erneuerbarer Energien sinkt die Versorgungssicherheit des Energiesystems zusehends. In der Folge fällt der Strom immer häufiger aus. Nachrichten über Versorgungsstörungen und ihre echten oder vermeintlichen Ursachen verbreiten sich über Twitter rasant. Blogger und auch einige Politiker machen ebenfalls in sozialen Medien Stimmung gegen die Energiewende als Grund der Störungen. Das Verhältnis zwischen Energiepolitik und Energiewirtschaft ist gestört, die Stabilität der Energieversorgung durch unkontrollierte oder fehlgeleitete Veränderungen der Energieinfrastruktur gefährdet und die Gesellschaft nicht länger bereit, sich auf weitere „Energiewende-Experimente“ einzulassen.

3 Mehr als die Summe ihrer Teile: die Resilienzstrategie

Zwar sind bestimmte Entwicklungen, die für das Energiesystem bedrohlich werden könnten, absehbar. Die Einzelereignisse und ihre Abfolge, für die vier mögliche Entwicklungen beispielhaft skizziert wurden, sind es aber nicht. Hinzu kommt die Gefährdung durch die genannten „schwarzen Schwäne“. Überraschende, neue und unterschätzte Ereignisse hebeln Präventionsmaßnahmen aus, die auf spezielle Belastungen zugeschnitten sind.

Im Folgenden geht es daher nicht darum, bestimmten Risiken mit einer auf sie zugeschnittenen Strategie oder gar punktuellen Gegenmaßnahmen beizukommen – das wäre klassisches Risikomanagement. Eine Resilienzstrategie ist nicht auf erwartbare externe *Belastungen* fokussiert. Ihr Ziel ist es vielmehr, das *System* so robust zu gestalten, dass es seine Funktionsfähigkeit erhalten oder – egal was passiert – so schnell wie möglich wiederherstellen kann. Sie trägt dazu bei, mit unterschiedlichsten Belastungen umzugehen, auch mit unterschätzten („graue Schwäne“) und schwer prognostizierbaren und überraschenden („schwarze Schwäne“).¹⁴

Die im Folgenden skizzierte Resilienzstrategie unterscheidet sich vom Ablauf des Verhaltens resilienter Systeme, der in internationaler Literatur beschrieben wird. Sie wurde für diese Stellungnahme entwickelt und ist stärker auf die Handlungsspielräume der Akteure und

die genannten Maßnahmentypen fokussiert als das internationale Modell.¹⁵ Ihre vier Handlungsfelder ergänzen sich und bauen aufeinander auf. Allerdings ist es möglich, einzelnen der vier Handlungsfelder ein stärkeres und anderen ein weniger starkes Gewicht beizumessen.

Risiken und Schwachstellen identifizieren: Idealerweise sollen Belastungen für die Energieversorgung schon neutralisiert werden, bevor sie sich auswirken können. Außer technischen Belastungen können das auch Faktoren wie unzureichende Investitionen in die Infrastruktur sein. Dazu gehört, sie zu identifizieren und ihre potenziellen Auswirkungen auf das Energiesystem zu untersuchen (Risikoanalyse). Des Weiteren müssen Schwachstellen im System identifiziert werden (Vulnerabilitätsanalyse). Daten aus dem Monitoring des Energiesystems und den Dokumentationen vergangener Krisen können dazu beitragen, Simulationsmethoden zu verbessern. Aus den Ergebnissen können wirksame Präventivmaßnahmen und neue Vorgaben für die Planung von Energieinfrastrukturen abgeleitet werden.

Das System robust und vorsorgend gestalten: Belastungen sollen die Funktion des Systems nur minimal beeinträchtigen. Redundanz, also das Vorhalten von mehr Betriebsmitteln als für den Normalbetrieb notwendig, oder andere

¹⁴ Auch daher ist im Folgenden die Rede von „schwarzen Schwänen“ und nicht von „Dragon Kings“. Der Fokus dieses alternativen Konzepts, das der Physiker und Risikoforscher Didier Sornette entwickelt hat, liegt mehr auf den unwahrscheinlichen Ereignissen und Methoden, sie näherungsweise zu prognostizieren (vgl. zum Beispiel Sornette 2009).

¹⁵ Dieser Ablauf besteht ebenfalls aus vier Feldern, die sich allerdings auf das System und nicht auf die systemgestaltenden Akteure beziehen. Die Felder heißen „Absorbing“, „Recovering“, „Adapting Through Self-organization and Learning“ und „Transforming into a Different System by Altering Structures, Functions and Feedback Loops“ (Kröger/Sansavini 2016).

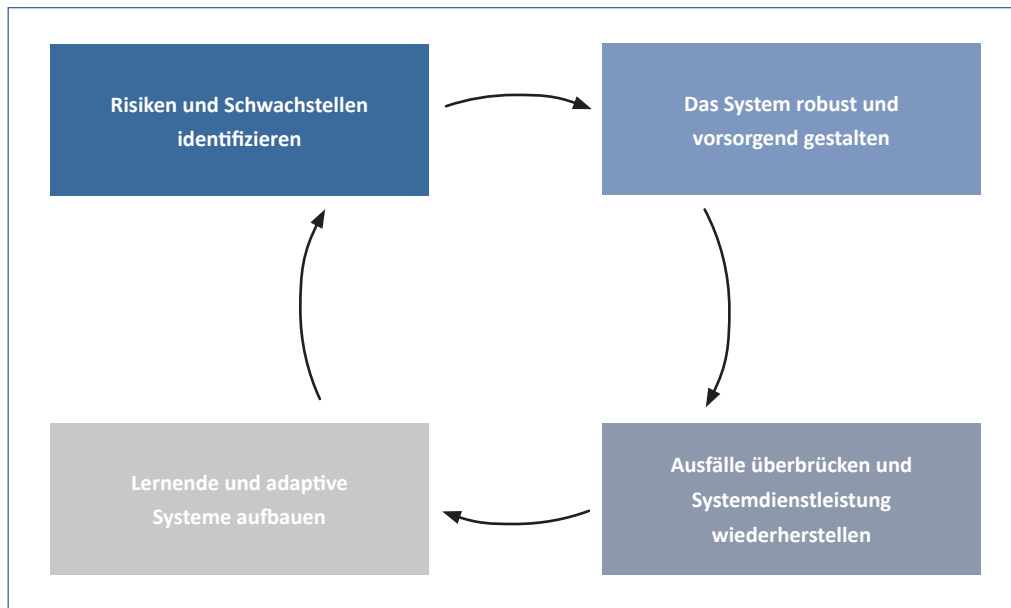


Abbildung 1: Resilienzstrategie. Eigene Darstellung.

Formen von Puffern wie Speicher oder Reparaturtrupps können Schwachstellen beseitigen. Vorhandene Technik kann durch alternative Lösungen ergänzt und damit das System diversifiziert werden. Dabei sollen auch Schwachstellen identifiziert werden, die bislang nicht belastet wurden und auch noch nicht zu Ausfällen geführt haben. Durch Analyse, Diversität, Redundanz und eine möglichst offene und nachjustierbare Gestaltung kann das Energiesystem robuster gemacht werden. Das gilt besonders, wenn neue Technologien zum Einsatz kommen oder bisher unabhängige Infrastrukturen miteinander verknüpft werden. Bei der intelligenten Kopplung von Sektoren (Strom, Wärme, Mobilität) ist eine maximale Flexibilität bei gleichzeitiger Minimierung gegenseitiger Abhängigkeiten das Ziel.

Ausfälle überbrücken und Systemleistung wiederherstellen:

Um Schäden durch einen Energieausfall lokal zu begrenzen und die Funktionen des Systems so schnell wie möglich wiederherzustellen, müssen Bevölkerung und Unternehmen gut informiert und bei der Selbsthilfe unterstützt werden. Dazu dienen Notfallpläne und regelmäßige Übungen, die Zivilschutzorganisationen wie das Technische Hilfswerk organisieren können. Die kritischsten Folgen haben langanhaltende Stromausfälle, aber auch das Unterbrechen der Wärme- und Kraftstoffversorgung ist problematisch. Wenn das Energiesystem dezentraler wird, müssen auch die Möglichkeiten zur Notfallversorgung und zum Wiederaufbau der Versorgung dezentral angelegt sein. Hier können auch mobile Erzeuger eine Lösung sein, etwa Aggregate, die mit synthetischen Treibstoffen betrieben werden können. Bereits bestehende dezentrale Strukturen wie lokale Strom- oder Wärmenetze müssen möglicherweise angepasst werden, damit sie das System stabilisieren und/oder nach Ausfällen zu dessen Wiederherstellung beitragen können.

Lernende und adaptive Systeme

aufbauen: Ziel sollte sein, sowohl aus eingetretenen als auch aus vermiedenen Katastrophen zu lernen und dadurch das System anpassungsfähig zu halten. Entscheidend ist dabei nicht, dass die Struktur oder bestimmte Elemente des Energiesystems – etwa Wärmenetze oder Kohlekraftwerke – erhalten bleiben, sondern die Dienstleistungen, die das System bereitstellt – in diesen Fällen Wärme und Strom. Hierfür müssen Störfälle und überstandene Krisen dokumentiert (Wissensspeicher) und systematisch ausgewertet (Lösungsspeicher) werden, sodass sie als Grundlage für Planspiele und Notfallszenarien verwendet werden können. Auf diese Weise können auch Sicherheitsstandards regelmäßig überarbeitet werden. Welche Belastungen in Zukunft auf das Energiesystem zukommen können, ist unsicher. Es ist daher wichtig, dass die beteiligten Akteure improvisieren können. Ferner sind technische und organisatorische Strukturen regelmäßigen Stresstests zu unterziehen, bei denen Simulationen zum Einsatz kommen können.

Zuletzt müssen die gesellschaftliche Akzeptanz für eine langfristige Transformation des Energiesystems und das Bewusstsein, dass es zu Störungen und Ausfällen kommen kann, gefördert werden. Schließlich können Widerstand der Bevölkerung und soziale Unruhen das Wiederherstellen der Energieversorgung nach Ausfällen beträchtlich verlangsamen.

4 Maßnahmen

Um das Energiesystem resilient zu gestalten, sind zehn Maßnahmentypen wichtig; oft sind deren Grundlage – vor allem internationale – Kooperationen. Einige Überschneidungen in Kauf nehmend, können sie den vier Handlungsfeldern der Resilienzstrategie zugeordnet werden. Wie diese wurden die zehn Maßnahmentypen für diese Stellungnahme entwickelt. Einige davon sind eher geeignet, mittel- und langfristig Verwundbarkeiten des Systems zu reduzieren, andere sind darauf ausgerichtet, kurzfristigen Störungen oder Schocks zu begegnen (siehe Abbildung 2). Für viele der genannten Maßnahmen werden Kosten anfallen. Wie hoch sie im Einzelnen ausfallen, wurde allerdings nicht berechnet und wird daher im Folgenden auch nicht beziffert.

Der Schwerpunkt der hier beschriebenen Maßnahmen liegt auf dem Stromsektor. Dafür gibt es zwei Gründe: Zum einen ist es sehr wahrscheinlich, dass in den nächsten Jahrzehnten die Bedeutung des Stroms zunehmen wird, da die Sektoren Wärme und Mobilität in großen Teilen elektrifiziert werden. Zum anderen ist die Stromversorgung die zentrale Infrastruktur schlechthin: Vom Strom sind weitere Infrastrukturen direkt abhängig, etwa die Wasserversorgung oder die Telekommunikation. Hier spielen Wechselwirkungen zwischen den Systemen eine wichtige Rolle: So kann es funktionierende Kommunikationsnetze und Informationstechnik – die wiederum Strom brauchen – erfordern, um das Stromnetz nach einem Ausfall wiederherzustellen. Aus diesen Gründen würden großflächige und andauernde Stromausfälle die modernen Gesellschaften sehr viel unmittelbarer

und stärker treffen als etwa Knappheiten von Treibstoffen. Und auch hier gilt: Ohne Strom fallen selbst die Zapfsäulen an den Tankstellen aus.

Um die Funktionsfähigkeit des Systems zu gewährleisten, sind **internationale und sektorübergreifende Kooperationen unerlässlich**. Schon heute wird im Stromsystem auf europäischer Ebene zusammengearbeitet, etwa um die Funktionsfähigkeit auch in Krisenfällen zu sichern.¹⁶ Eine wichtige Maßnahme, um die Stromversorgung aufrechtzuerhalten, ist der europaweite Ausbau der Übertragungs- und Verteilnetze.¹⁷ Kooperation auf europäischer Ebene ist auch bei Gefährdungen von außerhalb der eigenen Landesgrenzen sinnvoll. Der intensive Austausch der Sicherheitsbehörden senkt das Risiko durch im Ausland vorbereitete Sabotage deutscher Infrastruktur.

Die Sicherung der Rohstoffversorgung, gleich ob für Energie- oder metallische Rohstoffe, ist eine privatwirtschaftliche Aufgabe. Staatlicherseits kann Rohstoffbezug flankierend durch internationale Abkommen abgesichert werden. Durch verstärkte Kooperation (zum Beispiel durch eine gemeinsame Versorgungs- und Reservepolitik) lassen sich im Krisenfall Ausgleiche herstellen,

¹⁶ Die europäischen Netzbetreiber kooperieren im ENTSO-E Verbund (European Network of Transmission System Operators for Electricity) in zentralen Fragen der Standardisierung und Sicherheit.

¹⁷ Im Rahmen des von der EU getragenen Großprojekts e-Highway2050 wurde detailliert untersucht, welche langfristigen Veränderungen dem europäischen Stromsystem bevorstehen. Insbesondere wurde betrachtet, wie Energiesicherheit bei zunehmender Dekarbonisierung aufrechterhalten werden kann: e-highway2050.eu/

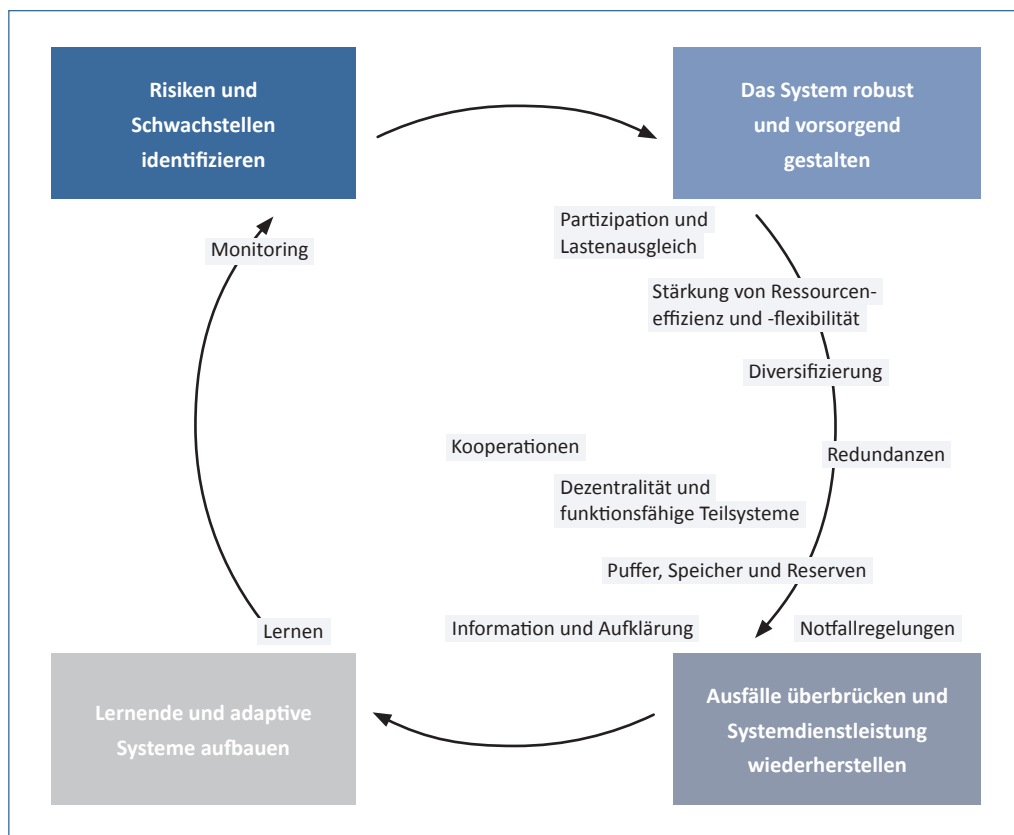


Abbildung 2: Resilienzstrategie und die dazugehörigen Maßnahmentypen. Eigene Darstellung.

etwa durch längerfristige Lieferverträge zwischen Unternehmen.

Damit die Bevölkerung die Energiewende langfristig unterstützt – und auch den Bau notwendiger Infrastrukturen hinnimmt –, sollten sich möglichst viele andere Länder zu vergleichbaren Anstrengungen bekennen.¹⁸ Ein Schritt in diese Richtung ist der in Paris ausgehandelte Klimavertrag, der am 4. November 2016 in Kraft getreten ist.

Parallel zum mittelfristigen Aufbau eines zentralen Resilienz-Monitorings sollte das Augenmerk kurzfristig auf lokale Bedrohungen gelegt werden. Um Gefahren frühestmöglich zu identifizieren, ist es sinnvoll, die notwendige Expertise zusammenzuführen. Dafür könnten Behörden

und Systembetreiber etwa mit großen Versicherern zusammenarbeiten.

Damit Netzbetreiber beispielsweise in der Lage sind, Regionen mit Störfällen schnell vom Netz zu isolieren, müssen verlässliche Modelle durchgerechnet worden sein und als Handlungsunterlagen ausgearbeitet vorliegen. Betreiber kleiner Verteilnetze oder Erzeugungsanlagen sind dafür auf die Unterstützung externer Fachleute angewiesen. Hier können Kooperationen weiterhelfen. Eine Initiative der Netzbetreiber in der Regelzone 50 Hertz führte unter anderem zu einem gemeinsamen Konzept, um das Stromnetz nach Ausfällen wiederaufzubauen.¹⁹ Für den Austausch von Daten zwischen Übertragungsnetz-, Verteilnetz- und Anlagenbetreibern werden aber auch Vorgaben vom Regulator nötig sein, etwa der Bundesnetzagentur.

¹⁸ Handlungsoptionen zur europäischen Integration der Energiewende zeigt die Stellungnahme *Die Energiewende europäisch integrieren* (acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-1).

¹⁹ Vgl. 10-Punkte-Programm Systemsicherheit 2014.

4.1 Monitoring – von der Risikoanalyse zum Resilienz-Monitoring

In quantitativen Risikoanalysen werden Eintrittswahrscheinlichkeiten und Schadensausmaße bestimmter Ereignisse ermittelt. Außerdem wird analysiert, in welchem Maß Gegenmaßnahmen beide Größen beeinflussen können. Derartige Risikoanalysen kommen schon seit mehreren Jahrzehnten zum Einsatz. So erfassen Institutionen wie der Deutsche Wetterdienst, aber auch große Versicherer standardmäßig Wetter- und Klimadaten, um Extremwetterereignisse prognostizieren und ihre Wirkung einschätzen zu können. Die Deutsche Rohstoffagentur beobachtet Trends auf den Rohstoffmärkten, mit denen etwa Knappheiten von Platinmetallen oder Erdgas prognostiziert werden können. Polizei und Geheimdienste sollen terroristische oder kriminell motivierte Angriffe auf Teile der Energiein-

frastruktur verhindern, indem sie unter anderem verdächtige Kommunikationsvorgänge überwachen. All diese Aktivitäten werden auch künftig zur Resilienz des Energiesystems beitragen.

Allerdings stoßen klassische Risikoanalysen an ihre Grenzen, weil das Energiesystem stets komplexer wird. Zudem sind sie nur bedingt geeignet, neuartige und unerwartete Ereignisse zu identifizieren.²⁰ Künftig werden daher Kriterien zur Operationalisierung und Quantifizierung der Resilienz des Energiesystems benötigt. Über verschiedene Bedrohungsarten hinweg würden sie es erlauben, systematisch nach Schwachstellen in der Energieversorgung zu suchen. Teilweise müssten Kriterien, Methoden und Indikatoren, um Resilienz zu messen, jedoch erst entwickelt werden.

²⁰ Vgl. Linkov et al. 2014, S. 407–408, Scharte/Thoma 2016, S. 141.

Resilienz-Monitoring

Es ist nötig, existierende Monitoring-Technologien in einem systemischen Ansatz zu verbinden. Ziel ist es, mögliche Verwundbarkeiten des Energiesystems während seiner Transformation zu identifizieren. Im Fokus stehen Elemente, die für das Gesamtsystem essenziell sind, weil ihre Funktion nur sehr schwer ersetzt werden kann. So wäre es teuer und schwer durchzusetzen, etwa Anbindungen von Windparks auf See an das Übertragungsnetz oder große Überland-Stromtrassen doppelt anzulegen.

Die Ergebnisse solcher Analysen könnten dann Teil eines bundesweiten Resilienz-Monitorings sein, das als Frühwarnsystem Schwachstellen des Energiesystems aufzeigt.²¹ Umsetzbar wäre dies durch einen beispielsweise einmal jährlich zu erstellenden Bericht einer unabhängigen, interdisziplinär besetzten Expertengruppe. Er sollte die unterschiedlichen Bereiche des Energiesystems erfassen: im Bereich Strom etwa die Erzeugung, den Verbrauch oder die Verteilung und Netze, bei der Mobilität die Versorgung mit Treibstoffen und metallischen Rohstoffen für die Fahrzeuge, im Bereich Wärme die Versorgung mit Brennstoffen. All diese Komponenten könnten für die Gegenwart genauso wie für mögliche Entwicklungen in den kommenden Jahren und Jahrzehnten in Bezug auf Stabilität beziehungsweise Verwundbarkeit bewertet werden.²² Um eine solche Expertengruppe einzurichten, gibt es zwei Möglichkeiten: Denkbar wäre einmal eine Ausschreibung, auf die Konsortien sich für bestimmte Laufzeiten bewerben könnten. Alternativ könnte eine Kommission berufen werden. Voraussetzung wäre in beiden Fällen der Auftrag beispielsweise des Bundeswirtschaftsministeriums.

²¹ Vgl. acatech 2014, S. 18–19.

²² Die Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe hat bereits die Aufgabe des regelmäßigen Monitorings von Energie- und metallischen Rohstoffen. Ihre Arbeit und Ergebnisse könnten Teil eines umfassenderen Resilienz-Monitorings werden.

Vielversprechend ist es, etablierte Methoden des Risikomanagements zu erweitern.²³ Dadurch können Maßnahmen identifiziert werden, um Risiken systemübergreifend zu minimieren. Dieses Vorgehen deckt auch Risiken für die Versorgungssicherheit ab, die verhindern, dass das System sich nach Störungen erholt.²⁴

Mithilfe solcher Methoden können Netz-, Windpark-, Kraftwerks- und andere Infrastrukturbetreiber deutlich mehr mögliche Störungen als bisher antizipieren und ihre Systeme besser auf unerwartete Ereignisse vorbereiten. Um diese Methoden einzuführen, ist es nötig, dass Infrastrukturbetreiber, angewandte Forschung und Regulierungsbehörden eng zusammenarbeiten. Vieles hängt damit von der Verfügbarkeit und Qualität der Daten ab, die genutzt werden können, und von der Kosten-Nutzen-Relation des Monitorings.

4.2 Partizipation und Lastenausgleich

Um die Versorgungssicherheit des „neuen“ Energiesystems zu gewährleisten, ist es unverzichtbar, dass die Zivilgesellschaft das Errichten notwendiger Infrastrukturen aktiv (durch Mitwirkung) oder passiv (durch Duldung) unterstützt. Fehlende Akzeptanz oder gar Proteste können nicht nur laufende Vorhaben verschleppen oder blockieren, sondern auch Investitionen in künftige Projekte verhindern.

Eine sensible Stellschraube im System der Resilienz ist die wahrgenommene Fairness von Maßnahmen in den Augen der Bevölkerung²⁵: Als Verletzung der Fairness wird es wahrgenommen, wenn

Lasten und Nutzen einer Maßnahme nicht gerecht verteilt sind oder als nicht gerecht verteilt erscheinen.²⁶ Es ist daher nötig, eine insgesamt faire Lasten-Nutzen-Verteilung herzustellen und transparent zu machen. Dazu trägt zum Beispiel bei, wenn betroffene Gruppen und Personen in Gestaltungsentscheidungen einbezogen werden. Lasten frühzeitig offenzulegen und zu diskutieren sind Mindestvoraussetzungen, damit die Transformation als fair erlebt werden kann. Noch besser als Verhandlungen über eine gerechte Lastenverteilung ist es allerdings, Fairness-Verletzungen frühzeitig zu vermeiden. Das setzt voraus, dass bei der Planung der Energiewende Entscheidungsqualität vor -schnelligkeit geht. An Belastungen, die auf die Bevölkerung zukommen können, sollten nicht nur Kosten berücksichtigt werden, sondern auch Umweltschäden, Eingriffe ins Landschaftsbild oder gesundheitliche Beeinträchtigungen.²⁷ Es könnten auch Ombudsstellen eingerichtet werden, bei denen Bürgerinnen und Bürger bei als hoch erlebten Belastungen Beschwerde einlegen können.

Eine weitere Herausforderung: Laien nehmen Risiken anders als Expertinnen und Experten wahr. Außer der eigenen Betroffenheit spielen hier auch viele aus der Wahrnehmungspsychologie bekannte qualitative Risikomerkmale²⁸ wie die wahrgenommene Kontrollierbarkeit des Risikos oder die Freiwilligkeit der Risikübernahme eine große Rolle²⁹. Sinnvoll ist es, bei Planungen „Betroffene“ einzubeziehen.

Bei vielen Auseinandersetzungen ist die Öffentlichkeit mit kontroversen Expertenaussagen konfrontiert.³⁰ Mögliche Folgen sind Misstrauen und Distanz. Abhilfe können hier unter anderem von

23 Risikomanagement besteht aus den fünf Schritten Kontext etablieren, Risiken identifizieren, Risiken analysieren, Risiken evaluieren und Risiken behandeln (ISO 31000 2009).

24 Vgl. RESILENS 2016, S. 22–25.

25 Die Faktoren sind in Anlehnung an Renn 2015 formuliert.

26 Vgl. Renn 2011.

27 Vgl. Renn 2015.

28 Vgl. Kaspersen et al. 1988.

29 Vgl. Slovic 1999.

30 Vgl. Nennen/Garbe 1996.

Politik und Medien gemeinschaftlich organisierte öffentliche Foren schaffen, bei denen unter Teilnahme der Öffentlichkeit kontroverse Positionen, Perspektiven und Ideen aus der Wissenschaft diskutiert und hinterfragt werden. Dabei ist wichtig, dass nicht nur Informationen vermittelt, sondern auch Wissen und Erfahrungen der Betroffenen erkannt und berücksichtigt werden. Ziel ist also ein Dialog auf Augenhöhe. Mit dem „Bürgerdialog Stromnetz“ und ähnlichen Initiativen der Bundesnetzagentur gibt es bereits Ansätze für solche Foren.³¹

Das Einrichten eines nationalen Entschädigungsfonds Energiewende durch die Bundesregierung kann zur Akzeptanz gegenüber dem Energieinfrastrukturausbau beitragen. Er würde bestehende Regelungen ergänzen, bei denen Netzbetreiber Grundstücksbesitzerinnen und Grundstücksbesitzern Kompensationen bezah-

len, die sie über Netzentgelte umlegen.³² Der Fonds hätte damit die Wirkung einer Versicherung und könnte bei vergleichsweise geringen Kosten (Entschädigung einer Minderheit) eine relativ große Wirkung (Absicherungswahrnehmung) in der Gesamtbevölkerung entfalten.

Das Risiko eines solchen Fonds liegt darin, dass falsche Anreize entstehen können. Wenn Betroffene selbst diese beantragen, ist es für sie vorteilhaft, die Höhe des Schadens zu übertreiben, um von der höchstmöglichen Entschädigung zu profitieren. Daher müsste klar festgelegt sein, wie die Höhe der Zahlungen durch einen Entschädigungsfonds festgelegt wird. Voraussetzung dafür sind mehr Erkenntnisse darüber, wie Schadenshöhen auf anderem Weg als durch die Einschätzung der Betroffenen festgestellt werden können.³³

³¹ Der Bürgerdialog Stromnetz bietet Bürgerbüros und eine digitale Plattform, um sich über den Netzausbau zu informieren und einzubringen. Träger ist ein Konsortium aus DUH Umweltschutz-Service GmbH (eine Tochter der Deutschen Umwelthilfe e.V.), der Hirschen Group und IKU – Die Dialoggestalter; die Mittel stammen vom Bundeswirtschaftsministerium (www.buergerdialog-stromnetz.de). Auch die Bundesnetzagentur bietet auf einer Webseite eine Übersicht über Veranstaltungen und informiert, wie man derzeit zur Netzplanung Stellung nehmen kann (<https://www.netzausbau.de/home/de.html>).

³² Zu den bestehenden rechtlichen Regelungen, Entschädigungen für Wertverluste von Grundstücken zu bezahlen, vgl. White & Case 2016.

³³ In der umweltökonomischen Literatur wird die Zahlungsbereitschaft, um von Unerwünschtem (wie etwa Freileitungen) verschont zu bleiben, als „Willingness to Pay“ bezeichnet, die Bereitschaft, dies bei entsprechenden Entschädigungen zu akzeptieren, als „Willingness to Accept“. Für den Fall der Energieinfrastruktur liegen dazu bislang nur wenige Untersuchungen vor (ein Beispiel ist Menges/Beyer 2014).

Finanzielle Teilhabe an der Energiewende

Die finanzielle Beteiligung an Energieinfrastruktur kann die Akzeptanz dafür erhöhen.³⁴ Als Prosumentinnen und Prosumenten Energie selbst bereitzustellen und zu verkaufen, ist derzeit vor allem für diejenigen eine Option, die Eigenheime besitzen. Die „Bürgeranleihe Westküstenleitung“ in Schleswig-Holstein war 2013 der Versuch, Betroffenen die Möglichkeit zu geben, sich an den Netzausbaurenditen zu beteiligen. Dass nur 142 von rund 160.000 angeschriebenen Haushalten die Anleihe zeichneten, dürfte allerdings vor allem damit zusammenhängen, dass diese kein attraktives Risiko-Rendite-Verhältnis bot: Als nachrangige Anleihe war ihr Verlustrisiko höher als für klassische Anleihen, außerdem war die Laufzeit unbegrenzt und konnte nur vom Anbieter gekündigt werden.³⁵ Unter diesen Bedingungen waren die gebotenen drei beziehungsweise fünf Prozent Verzinsung keineswegs außerordentlich attraktiv, und entsprechend warnten Verbraucherschützer davor, die Anleihe zu zeichnen.

Möglichkeiten echter finanzieller Teilhabe bieten Energiegenossenschaften, von denen es 2016 über 800 gab,³⁶ oder Bürgerwindparks. Eine weitere Option wären „Anwohneraktien“, die Infrastrukturunternehmen wie beispielweise Netzbetreiber anbieten. Anwohnerinnen und Anwohner neu errichteter Energieinfrastruktur bekämen dann die Möglichkeit, Aktien der entsprechenden Unternehmen zu bevorzugten Bedingungen zu erwerben. Wie bei Belegschaftsaktien könnten das günstigere Preise für Aktien sein, wobei diese im Gegenzug über eine gewisse Sperrfrist lang gehalten werden müssten.

34 Für Schlaglichter auf die teils widersprüchlichen Ergebnisse bisheriger Studien vgl. Elsner et al. 2015, S. 83–84; Lenk et al. 2015, S. 10. Auf alle Fälle reduziert finanzielle Teilhabe die Verärgerung über Energieinfrastruktur: So zeigen deutsche und internationale Studien, dass Anwohner sich weniger durch die Geräusche von Windrädern belästigt fühlen, wenn sie an diesen finanziell beteiligt sind (vgl. zum Beispiel Pedersen et al. 2009, S. 638; Pohl et al. 1999, S. 31–32).

35 TenneT 2013.

36 DGRV 2016.

4.3 Stärkung von Ressourcen-effizienz und -flexibilität

Unerwartete Rohstoffknappheiten, die kurzfristig nicht abgedeckt werden können, sind ein Risiko für die Energieversorgungssicherheit.³⁷ Zunächst einmal ist es wichtig, eine gemeinsame EU-Handelspolitik abzustimmen. Schließlich kann die EU als Vertreterin von 28 Staaten wirkungsvoller mit einzelnen Lieferländern verhandeln als Deutschland allein.

Technisch lassen sich Versorgungsrisiken durch folgende Maßnahmen reduzieren:

Ressourcen lassen sich effizienter einsetzen, indem Produkte so konzipiert werden, dass für ihre Herstellung so wenige Rohstoffe wie möglich verbraucht werden. Die Versorgungssicherheit steigt zudem, wenn Recyclingraten maximiert werden. Das reduziert die Importabhängigkeit und damit mögliche Lieferschwierigkeiten und Risiken bei politischen Krisen in den Lieferländern. Es ist zwar unmöglich, Materialien zu hundert Prozent zu recyceln; auch um den Energieeinsatz und die Folgen für die Umwelt zu minimieren, gibt es ein Optimum für Recycling.³⁸ Trotzdem sollte es das langfristige Ziel sein, eine Kreislaufwirtschaft

37 Langfristig greift bei Knappheiten der „Regelkreislauf der Rohstoffversorgung“ (vgl. Wellmer/Hagelüken 2015).

38 Vgl. Angerer et al. 2016, S. 98.

zu schaffen, die von extern bedingten Rohstoffkrisen weitgehend entkoppelt ist.³⁹

Elektroden beispielsweise, die für die Wasserstoffherstellung oder für Brennstoffzellen benötigt werden, lassen sich relativ gut recyceln. Die verwendeten Metalle (zum Beispiel Platin und/oder Palladium in chemischen Prozesskatalysatoren, Iridium bei bestimmten Elektrolyseuren oder Platin in Brennstoffzellen eines Flottenbetreibers) können mit hoher Effizienz zurückgewonnen werden.

Ein ressourcenabhängiges System kann durch Substitution deutlich flexibler werden. So können in Solarzellen unterschiedliche Materialien die gleiche Funktion erfüllen, wie Cadmiumtellurid, Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid, kristallines oder amorphes Silizium. Substitutionsoptionen sollten nach Möglichkeit vorbeugend entwickelt werden. Je flexibler die Industrie auf Lieferhemmnisse reagieren kann, desto geringer werden die Folgen eines Versorgungsengpasses bei einem Rohstoff (oder einer Rohstoffgruppe) sein. Zur Flexibilität gehört im Hinblick auf Substitution auch, dass Kundinnen und Kunden vorab darüber informiert werden, dass eine andere Materialzusammensetzung in den Produkten keinesfalls zulasten von deren Funktion geht („Produktfreigabe“).⁴⁰

39 Die Idee einer Kreislaufwirtschaft wurde in den vergangenen Jahren mit unterschiedlichen Argumenten immer wieder vorgebracht, zum Beispiel durch das im Dezember 2015 veröffentlichte „Circular Economy“-Paket der EU-Kommission (EU COM 2015).

40 Vgl. Angerer et al. 2016, S. 108.

Für die Basismetalle Eisen und Stahl, Buntmetalle wie Kupfer, Aluminium oder Zink oder die Edelmetalle Gold, Silber oder Platin sind Recyclingprozesse bereits weit entwickelt. Bei Lithium, wichtig für Batterien in der Elektromobilität, oder vielen der potenziell lieferkritischen Elemente wie Gallium, Germanium, Indium oder die Seltenen-Erden-Elemente dagegen sind die Recyclingraten noch sehr niedrig. Um sie zu erhöhen, müssen effiziente Recyclingprozesse entwickelt und Altprodukte besser erfasst und dem Recycling zugeführt werden.

Im Konsumgüterbereich besteht auch für das Recycling von Basis- und Edelmetallen noch ein erheblicher Optimierungsbedarf. Die Recyclingkette besteht hier aus mehreren Prozessstufen: Erfassen (Sammeln), Sortieren, Demontage, Aufbereitung und metallurgisches Recyceln. Während an der ersten Stufe die Verbraucherinnen und Verbraucher beteiligt sind, die Altprodukte zum Wertstoffhof bringen oder in den entsprechenden Sammelbehältern entsorgen, gibt es am Ende der Kette europaweit derzeit nur wenige Metallhütten, die relevante Fraktionen aus dem gesamten Altmaterial metallurgisch verarbeiten. Um das Recycling im Konsumgüterbereich zu verbessern, sind also unterschiedlichste Akteure gefragt, die unterschiedlich leicht angesprochen werden können. Grundsätzlich sollte das Design der Produkte es ermöglichen, dass diese mit geringen Verlusten in Komponenten zerlegt werden können, die eine effiziente Metallrückgewinnung erlauben.

Verbesserte Gesetzgebung und Standards für Recycling

Wichtig ist zum einen die Verbesserung von technischen Verfahren und Kapazitäten für ressourcen- und kosteneffizientes Recycling von Sondermetallen. Hier bedarf es einer verbesserten Abfallgesetzgebung, weg von massen- beziehungsweise gewichtsbasierten Recyclingquoten hin zur stärkeren Berücksichtigung von in kleinen Mengen anfallenden Edel- und Sondermetallen, unter anderem durch die Entwicklung geeigneter Erfassungssysteme. Zum anderen ist es wichtig, Recyclingstandards europaweit verbindlich festzuschreiben und illegale Elektroschrott-Exporte zu verhindern. Zentraler Akteur wäre hier das europäische Parlament.

4.4 Diversifizierung

Durch Diversifizierung von Technologien und Maßnahmen lässt sich die Verwundbarkeit des Energiesystems gegenüber Hitzewellen oder anderen Wetterextremen genauso reduzieren wie die gegenüber Rohstoffengpässen oder technischen Angriffen. Technologische Diversifizierung bedeutet, dass unterschiedliche Technologien zur Verfügung stehen, die die gleiche Funktion erfüllen, zum Beispiel bei der Stromerzeugung, zur Frequenzstabilisierung im Transportnetz oder zum Speichern von Energie. Die Energiespeicherung kann zum Beispiel durch eine Mischung aus elektrochemischen (Batterien), mechanischen (Schwungräder und Pumpspeicherseen) und chemischen (Power-to-Gas) Prinzipien diversifiziert werden, wobei überdies verschiedene Anforderungen an Leistung, Kapazität und Dynamik erfüllt werden.

Eine Diversifizierung der Rohstoffbasis als ergänzende Strategie gilt sowohl der Versorgung mit Energierohstoffen (Erdöl, Kohle, Gas) als auch potenziell kritischen Metallen wie Neodym, Indium oder Gallium. Zur Diversifizierung der Erdgasversorgung gehört der Bezug aus mehreren unterschiedlichen Quellen im Ausland – sowohl in Form von Flüssiggas als auch durch bestehende Pipelinesetze. Außerdem sollte das Potenzial Deutschlands und Europas in dieser Hinsicht ausgeschöpft werden. Der Abbau heimischer unkonventioneller Gasvorkommen durch „Fracking“ ist dabei eine Option – unter der Voraussetzung, dass dabei hohe Sicherheitsstandards eingehalten werden.⁴¹ Die Versorgung mit Gas und Kraftstoffen kann diversifiziert werden, indem Strom aus erneuerbarer Erzeugung in Wasserstoff, Methan und längerkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt wird (Power-to-X). Eine Rückverstromung über Brennstoffzellen oder Gaskraftwer-

ke ist zudem eine Flexibilitätsoption, um Schwankungen auszugleichen. Genauso können Power-to-X-Produkte als Kraftstoffe eingesetzt werden, da im Mobilitätssektor noch eine sehr geringe Diversität vorliegt (fossile Quellen überwiegen stark). Die Nutzung von entsprechend erzeugtem Wasserstoff oder Methan im Wärmemarkt könnte zur Diversifizierung dieses Sektors beitragen.

Eine Ergänzung von Kohle- und Gaskraftwerken durch nicht-thermische Energiewandler wie Wasserwerke oder Windräder kann dazu beitragen, das System robuster gegenüber Hitzeperioden und den damit einhergehenden Verlust an Produktivität und Kühlmöglichkeiten zu machen. Eine Reserve von thermischen Kraftwerken hingegen kann das System gegenüber länger währendem Ausfall von Wind- und Solarerzeugung absichern (Dunkelflaute) beziehungsweise einen Mindestbetrieb sichern und zudem der besseren Wiederaufbaufähigkeit nach einem großräumigen Netzzusammenbruch („Schwarzstartfähigkeit“) dienen. Dabei sollte die Diversifizierung auch gegenüber neuen Belastungssituationen wirken.⁴²

Diversifizierung kann die Energieversorgung teurer machen, weil dadurch Skalen- und Lerneffekte weniger zum Tragen kommen, als wenn eine Technologie bevorzugt ausgebaut wird. Ein kostengünstigerer Kompromiss sind hier internationale Abkommen. Wenn die Netze entsprechend ausgebaut sind, könnten Länder bei der Energiebereitstellung eigene Schwerpunkte setzen, die dann auch durch die Kraftwerksparks in Nachbarländern diversifiziert würden.

⁴¹ Vgl. acatech 2015, v. a. S. 39–42; BGR 2016.

⁴² Gerade im Hinblick auf Belastbarkeit ist die Etablierung von Kriterien für Diversität nötig, damit der technologische Raum und die Antwortdiversität der Technologien entsprechend beschrieben werden kann. Hier ist zum Beispiel der Ansatz von Stirling (2007 und 2010) hilfreich, der Diversität als Anzahl von Technologien (Variety), Verschiedenheit der Technologien (Disparity) und Verteilung der jeweiligen Anteile (Balance) beschreibbar macht.

Diversifizierung systemrelevanter Software

Diversifizierung lässt sich als Strategie auch auf cyber-physikalische Systeme der Energieversorgung übertragen. Denn je „digitaler und smarter“ ein System, desto verwundbarer ist es auch für Hackerangriffe. Digitale „Monokulturen“ sind besonders gefährdet: Die meisten Viren und Trojaner werden für Betriebs- und Softwaresysteme mit dem jeweils höchsten Marktanteil geschrieben. Ein ähnliches Risiko besteht bei intelligenten Netzen und Smart Homes, wenn diese aus Effizienzgründen mit identischer Software ausgestattet werden. Standards, die alternativen Software- beziehungsweise Technologieanbietern den Markteintritt erleichtern, könnten diese Verwundbarkeit verringern. Das Gleiche gilt für gezielte Softwareanpassungen, bei denen Funktionsweisen, Programmbibliotheken und Algorithmen variiert werden, bis hin zur zufälligen Veränderung von Programmcodes.⁴³ Die Sicherheit der Systeme kann durch unabhängige Begutachtungen von Programmcodes und öffentliche Sicherheitstests nach standardisierten Methoden geprüft werden.⁴⁴

Zuständig wären hier die Ministerien für Wirtschaft und Energie, für Verkehr und digitale Infrastruktur, des Innern und Behörden wie das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. Um Codes offenzulegen, müssten Anreize geschaffen oder sogar Anordnungen getroffen werden. Code-Reviews könnten ausgeschrieben und durch wissenschaftliche Institute oder (Beratungs-)Unternehmen umgesetzt werden⁴⁵. Neben entsprechenden verbindlichen Richtlinien kann bei Open-Source-Programmen auf die Unterstützung durch freiwillige Initiativen oder Einzelpersonen gesetzt werden.

43 All das erschwert die Ausnutzung von Softwareschwächen (vgl. Jackson et al. 2013).

44 Vgl. McDaniel/McLaughlin 2009, S. 75–77.

45 Mit openKONSEQUENZ hat sich 2016 ein Industriekonsortium gegründet, das diese Strategie bei der konsortialen quelloffenen Entwicklung von IT-Leitsystemen für kritische Energieinfrastrukturen verfolgt (www.openkonsequenz.de).

4.5 Redundanzen

Redundanzen sind unerlässlich, um Ausfälle der Energieversorgung zu verhindern. Sie wirken gegenüber kurzfristigen und unmittelbaren Bedrohungen des Energiesystems durch Anschläge und Extremwetterereignisse. Klassisch ist hierfür die (n-1)-Regel für die Auslegung von Versorgungsnetzen, beispielsweise zur Stromversorgung. Sie bedeutet, dass jedes einzelne Element eines solchen Netzes (Generator, Leitungssystem, Transformator etc.) ausfallen darf, ohne dass die Stromversorgung im betroffenen Gebiet gefährdet wäre. Dies setzt zum Beispiel die Ausstattung von Hochspannungstrassen mit mehr als einem Leitersystem vor-

aus, das aus je drei Leiterseilen besteht.⁴⁶ Da das Energiesystem dezentraler wird, dürfte die (n-1)-Regel in Zukunft oft nicht mehr ausreichen. Stattdessen wird sie auf zu (n-x) erweitert werden müssen.

In Stromnetzen wird Redundanz meistens dadurch erreicht, dass Elemente doppelt oder mehrfach angelegt werden (numerische oder passive Redundanz). Außerdem können im Fehlerfall Netze neu verschaltet werden, indem beispielsweise Netzmaschen geschlossen werden und so die Versorgung eines vom Ausfall betroffenen Gebiets wieder hergestellt wird (aktive Redundanz). Weniger gebräuchlich ist eine funktionelle oder asymmet-

46 Die Redundanz wird allerdings dadurch eingeschränkt, dass in der Regel nur ein Mast diese Leitersysteme trägt. Wenn – wie beim „Münsterländer Schneechaos“ 2005 – ganze Masten ausfallen, nutzt die redundante Auslegung der Leitersysteme nichts.

rische Redundanz. Dabei wird dieselbe Funktion von verschiedenen Einheiten im System erfüllt, die möglichst auf unterschiedlichen technischen Prinzipien basieren. Im Stromversorgungssystem sind die Erzeugungseinheiten bereits funktionell redundant, die Verteilnetze hingegen kaum. Strom wird in der Regel über Leitungen des gleichen Typs (Drehstrom) übertragen. Erst zukünftig wird vermehrt auch Gleichstrom eingesetzt werden. Das parallele Auslegen einer Übertragungsstrecke in Freileitung und Erdkabel ist derzeit nicht in Planung und aus Kostengründen in absehbarer Zeit nicht realistisch, würde aber die funktionelle Redundanz erhöhen. Überdies sind Erdkabel gegenüber Wetterereignissen oder Anschlägen besser geschützt – im Schadensfall aber auch schwerer zu reparieren. Beispiele aus anderen Bereichen des Energiesystems sind bivalente Heizsysteme (Solar- plus Gasheizung) oder Hybridantriebe bei Fahrzeugen.

Zur Absicherung gegenüber Cyberangriffen wären zum Beispiel IT-Systeme mit unterschiedlichen Betriebssystemen und Anwendungssoftware bei gleicher Funktionsfähigkeit denkbar. Die (n-1)-Regel der Stromnetze wird hier aber nicht einfach zu übertragen sein, schon allein weil einzelne Elemente des IKT-Systems mehrere Funktionen erfüllen (zum Beispiel Smart Meter und Gateway in einem Gerät) oder weil Funktionen über verschiedene Orte verteilt sind (zum Beispiel verteilte Steuerung in einem virtuellen Kraftwerk). Auf der anderen Seite können homogene IT-Systeme und -Landschaften jedoch deutlich leichter gewartet werden, was eine Wiederherstellung im Fehler- oder Angriffsfall unterstützt. Im Zusammenspiel von physischen und virtuellen Elementen sind daher ganz neue Strategien für Redundanz zu erarbeiten.

Eine funktionelle Redundanz schafft Flexibilität und kann vor allem gegenüber solchen schwer zu prognostizierenden Ereignissen schützen, deren Ort, Art und Wirkung bisher wenig oder gar nicht bekannt sind. Sie bietet also Schutz gegen die genannten schwarzen Schwäne. Beispielsweise sind Stromleitungen gegen den Ausfall eines Kabels gesichert, nicht aber gegen den Zusammenbruch eines Strommasts, mit dem alle von ihm geführten Kabel ausfallen. Wird allerdings die Übertragung über Freileitung und Erdkabel realisiert – zugegebenermaßen eine teure Variante der funktionalen Redundanz –, kann beim Ausfall von Strommasten die Last auf das Erdkabel umgeleitet werden. Sind die redundanten Elemente dann auch noch räumlich voneinander getrennt, wird die Wirkung der funktionellen Redundanz noch einmal gesteigert.

Da Doppelstrukturen teuer sind, ist genau zu prüfen, ob diese notwendig und wie wirksam sie sind. Hierbei können Simulationen von Störereignissen helfen, die auch die Kosten eines längeren Stromausfalls berücksichtigen. Bei den Kosten-Nutzen-Rechnungen ist zu beachten, dass Eintrittswahrscheinlichkeiten von sehr seltenen Bedrohungen nicht angemessen quantifiziert werden können. Entsprechend sollten Lösungen gewählt werden, die die Kosten bei Nicht-Eintreten der Störereignisse so klein wie möglich halten.

Redundante Messpunkte und Signalwege

Bei einem Angriff auf ein gekoppeltes Informations- und Energiesystem können Daten zur Steuerung des Systems manipuliert werden. Beispielsweise könnten Messdaten aus Ortsnetzstationen, die zur Frequenz- und Spannungsstabilisierung dienen, abgefangen und verändert werden. Auch GPS-Daten (Global Positioning System), die beim Zusammenschalten von Netzen verwendet werden, können lokal manipuliert oder blockiert werden. Überregional und koordiniert durchgeführt, können sie zu erheblichen Instabilitäten bis hin zu Netzzusammenbrüchen führen. Dem kann man vorbeugen, indem beispielsweise Messwerte ein weiteres Mal über einen unabhängigen Datenkanal übertragen werden, beispielsweise einmal über einen Funkkanal und einmal über eine Telefonleitung. Gegebenenfalls ist sogar eine redundante Messung der Werte sinnvoll, die Manipulationen erkennbar und damit beherrschbar macht. Hierfür eignen sich unter Umständen auch Messwerte von „benachbarten“ Systemen, mit deren Hilfe sich möglicherweise manipulierte Werte nicht ersetzen, aber plausibilisieren lassen. Ein Beispiel dafür ist der Abgleich von GPS-Zeitsignalen unter benachbarten Empfängern in Ortsnetzen. Eine zusätzliche und unabhängige Übertragung von GPS-Signalen über einen alternativen Kanal würde in gleicher Weise Manipulation erkennbar machen.

Dazu müssten die Messgerätehersteller und Betreiber von Messeinrichtungen und Netzknoten für die technischen Voraussetzungen sorgen. Außerdem sind Gesetze und Vorgaben dazu erforderlich, welche Komponenten und Übertragungswege im Energiesystem mit Redundanz auszustatten sind und welche nicht.

4.6 Puffer, Speicher und Reserven

Eine Knappheit von Rohstoffen kann zeitweise durch angemessene Reserven beziehungsweise ausreichende Lagerhaltung aufgefangen werden. So können beispielsweise Erdgasspeicher⁴⁷ Lieferengpässe und Ausfälle infolge von wetterbedingten Schäden an Pipelines, politischen Krisen oder Unfällen ausgleichen. Zurzeit beträgt die Speicherkapazität ungefähr ein Viertel des deutschen Jahresbedarfs. Sie könnte erhöht und als nationale strategische Gasreserve eingerichtet werden,⁴⁸ was allerdings erhebliche Kosten verursachen würde.

Darüber hinaus können Gasspeicher als Zwischenspeicher für Strom verwendet werden, wenn aus diesem durch Elektrolyse Wasserstoff oder in einem weiteren Schritt Methan hergestellt wird. Diese mehrfache Speicherfunktion kann auch Engpässe beim Strombezug (aus Nachbarländern) und beim Kraftstoffbezug zu ei-

nem Teil ausgleichen. Batterieelektrische Speicher, wie sie in den letzten Jahren in Schwerin und dem brandenburgischen Feldheim errichtet wurden, können kurzfristige Schwankungen im Stromnetz abfangen und regionale Versorgungssicherheit herstellen, ohne Netze zu belasten. Die Kosten für Batteriesysteme werden voraussichtlich in den nächsten Jahren durch die Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektromobilität deutlich sinken.

Mindestreserven könnten auch für Metalle angelegt werden. Einerseits können sowohl Primärrohstoffe als auch Zwischenprodukte in Metalllagern auf Reserve gehalten werden. Andererseits können auch Altprodukte mit geeignetem Anteil an potenziell kritischen Materialien für ein späteres Recycling gelagert werden. Dies ist insbesondere bei den Metallen sinnvoll, die derzeit nicht zurückgewonnen werden, weil zu wenige Altprodukte anfallen und das Recycling sich somit noch nicht rechnet. Zwischenlager für ausgediente Dünnschichtsolarzellen und Flachbildschirme beispielsweise können damit als Reserven für die Metalle Indium und Gallium die-

⁴⁷ In Deutschland idealerweise zu 40 Prozent Poren- und zu 60 Prozent Kavernenspeicher (vgl. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie 2016).

⁴⁸ Vgl. Becker Büttner Held 2015.

nen. Wenn der Staat diese Lagerhaltung fördert oder selbst übernimmt, können – wie bei einer nationalen Gasreserve – allerdings beträchtliche Kosten anfallen. Unternehmen können solche Aufgaben in der Regel effizienter übernehmen.⁴⁹

Ein weiteres wichtiges Element ist die Fähigkeit zur Improvisation. Hierfür sind Ressourcen (englisch *Slack*) vorzuhalten,⁵⁰ die erst bei Bedarf zum Einsatz kommen und die Funktion der betroffenen Systeme aufrechterhalten. Das können Zeitbudgets, Personal, Geräte und Komponenten sowie Infrastrukturen sein, die im Bedarfsfall abrufbar sind. Beispiele aus anderen Sektoren sind Springer an Montagebändern und in Stellwerken der Bahn oder Stabsstellen in Unternehmen, die für Zulieferketten potenziell kritischer Rohstoffe zuständig sind. Im Energiesystem könnten erweiterte Zeiten für die Übergabe zwischen Teams bei Schichtbetrieb (zum Beispiel in

Netzleitwarten), Schaltstellen für einen potenziellen vermaschten Betrieb von Stromnetzen oder geschulte Einsatzteams (Task Forces) für Krisenfälle Puffer schaffen.⁵¹

Um auf zeitlich und räumlich verteilte und abrupte Störereignisse reagieren zu können, müssen einige dieser Ressourcen mobil sein. Dies betrifft beispielsweise Einsatzteams für das Krisenmanagement einschließlich notwendiger Pläne, Werkzeuge, Materialien und Systemkomponenten für eine eventuelle Wiederherstellung des Versorgungsbetriebs. Richtig eingesetzt, führen unverplante Ressourcen zu einer loseren Kopplung⁵² der Komponenten des Energiesystems und verringern damit das Risiko, dass Störungen auf andere Teile des Systems übergreifen.⁵³

49 Zu den Vor- und Nachteilen staatlicher und staatlich geförderter Lagerhaltung vgl. acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017, S. 48–51.

50 Vgl. Schulman 1993.

51 In den letzten Jahrzehnten wurden solche unverplanten Ressourcen im Rahmen von Effizienzmaßnahmen jedoch eher abgebaut.

52 „Lose Kopplung“ ist ein Begriff aus den Sozialwissenschaften, der die Struktur und das Zusammenarbeiten von Organisationen beschreibt (vgl. Orton/Weick 1990; Beekun/Glick 2001). Er ist auf sozio-technische Systeme übertragbar. Dort bezeichnet „lose Kopplung“ ein System, in dem sich Fehler und Ausfälle in einem Subsystem nur schwach oder gar nicht auf andere Subsysteme auswirken (vgl. Perrow 1984).

53 Vgl. Perrow 1984; Orton/Weick 1990; Beekun/Glick 2001.

Unverplante Ressourcen im Energiesystem

Um auf unbekannte oder unerwartete Ereignisse reagieren zu können, könnten an zentralen Stellen des Energiesystems Systembeobachtungszentren eingesetzt werden, deren Aufgaben darin bestehen, Abweichungen vom Normalzustand zu detektieren, vorausschauend Gefährdungen zu identifizieren sowie Kontakt zu verbundenen Systemen zu halten. Für Stromnetze könnte die Aufgabe der Systembeobachtungszentren beispielsweise darin bestehen, neben Frequenz und Spannung weitere technische Parameter wie Spannungszillationen oder Leiterseiltemperaturen zu beobachten.

Andere Akteure, mit denen die Systembeobachtungszentren Kontakt halten sollen, wären Gasnetzbetreiber, die Betreiber von größeren Gas- und Batteriespeichern, die Polizei und die Innenministerien (wegen möglicher Terrorwarnungen), die Betreiber von Internetknoten und Rechenzentren (wegen möglicher Cyberangriffe) sowie Wetterdienste oder Lieferanten für Ersatzteile. Ziel ist es, möglichst frühzeitig über Gefahrensituationen informiert zu sein und die internen und externen Einsatzkräfte vorsorglich in Bereitschaft versetzen zu können. Solche Systembeobachtungszentren hätten also keine direkten operativen Aufgaben, sondern fungieren als Frühwarnsystem und helfen beim Bewältigen von überraschenden Belastungen. Verantwortlich für diese Maßnahme wären vorrangig die Netzbetreiber und Netzregulierer. Gemeinsam müssten sie die Anforderungen an die Systembeobachtung festlegen.

4.7 Dezentralität und funktionsfähige Teilsysteme

Die Verwundbarkeit des Gesamtsystems lässt sich deutlich reduzieren, wenn es als Summe einzeln funktionsfähiger Teilsysteme angelegt wird. Dem Versagen eines für das System essenziellen Elements, dem sogenannten „Single Point of Failure“, wird so vorgebeugt. Im Fall von Anschlüssen oder Störungen fielen dann nur die betroffenen Teilsysteme aus, ohne dass Dominoeffekte das Gesamtsystem in Leidenschaft zögen. Überdies könnte bei Stromausfällen von weiterhin funktionierenden Teilsystemen aus der Regelbetrieb in betroffenen Teilsystemen schneller wiederhergestellt werden.

Autarkiefähige Teilsysteme bedingen eine Dezentralisierung der Energieinfrastruktur sowie die Bereitstellung netzunterstützender Systemdienstleistungen. Das gilt für Vorräte von Erdgas oder anderen Energierohstoffen genauso wie für Batterie- oder Pumpspeicher. Sie würden bei großräumigen Ausfällen beziehungsweise einer Trennung des Versorgungsverbundes einen Inselbetrieb sicherstellen, bis die Störung behoben ist. Kohle- und Gaskraftwerke ebenso wie Erneuerbare-Energien-Anlagen müssten so verteilt sein, dass sie die wichtigsten Bereiche des Teilsystems, zu dem sie gehören, ausreichend versorgen können. Dasselbe gilt für Stromtrassen und Gasleitungen, die so verteilt und vernetzt sein müssten, dass Untersysteme mit ihnen versorgt werden können. Die Infrastruktur für den Notfall und Reparatureinheiten sollten so verteilt sein, dass mehrere Teilsysteme auf sie zugreifen können.

Die Digitalisierung des Energiesystems bietet ebenfalls Möglichkeiten, dessen Resilienz zu erhöhen. IKT-basierte Intelligenz macht dynamische zelluläre

Stromnetze möglich, in denen sich Zellen je nach Bedarf bilden, miteinander verschmelzen und wieder aufteilen, zum Beispiel um lokal erzeugte Energie optimal zu nutzen. Hierzu müssen Algorithmen und Verfahren in Bereichen wie Bedarfssteuerung und -planung, Zell- und Netzsteuerung sowie Energiepreisgestaltung angepasst und erweitert werden. Besondere Bedeutung hat intelligente Steuerung in Ortsnetzen, die bislang noch mit keiner oder wenig Sensorik ausgerüstet sind und von Stadtwerken „blind“ gesteuert werden. Auch in Fällen von Energieknappheit, -überversorgung und technischen Störungen sind intelligente zelluläre Strukturen heutigen zellulären Netzen überlegen, beispielsweise dann, wenn betroffene Netzsegmente zu isolieren und gleichzeitig benachbarte Netzsegmente weiterzubetreiben sind.

Ein weiterer Vorteil eines dezentral ausgelegten Energiesystems wäre, dass es dem Bedürfnis der Bevölkerung nach einer gerechteren Verteilung der Belastungen durch die Energieinfrastruktur entgegenkäme.⁵⁴ Dezentral ausgelegte Stromnetze sind allerdings teurer als zentrale.

⁵⁴ Vgl. acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-2, S. 32–35.

Regionale zellförmige Energienetze

Ein über sieben Jahre laufendes Pilotprojekt in West-Dänemark hat gezeigt, dass es möglich ist, lokale zellförmige Stromnetze zu bilden und vom Übertragungsnetz abzukoppeln, ohne dass es zu Stromausfällen kommt.⁵⁵ Seit Dezember 2016 läuft auch in Deutschland ein entsprechendes Projekt. Im Projekt C/Sells werden Erfahrungen mit regionalen zellförmigen Netzen gesammelt, in denen ein hoher Anteil des Stroms aus wetterabhängig schwankenden erneuerbaren Energien stammt. Diese Zellen sollen sich zuerst selbst versorgen. Dazu gehört, Spannung und Frequenz im Stromnetz lokal stabil zu halten und Wärme und Energie für Mobilität ebenfalls lokal bereit zu stellen. Damit werden auch Speicher und das Umwandeln von Strom in Wärme und in Kraftstoffe für eine regionale und dezentrale Energieversorgung relevant. Es wird getestet, wie derartige Zellen im Verbund interagieren und welche Voraussetzungen nötig sind, damit regionale Systemdienstleistungen auch an den Strommärkten gehandelt werden können.⁵⁶ Auch Kosten und Nutzen zellförmiger Energiesysteme sind noch genauer auszuloten

Der zelluläre Ansatz ist derzeit noch für die komplette Neugestaltung einer integrierten Strom-, Wärme- und Kraftstoffversorgung angelegt. Er muss sich also zunächst im Feldtest behaupten. Vor dem Einrichten zellförmiger Energiesysteme wäre außerdem zu klären, inwiefern auch Energiemärkte und Systemführerschaft regionalisiert werden müssten. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob geeignete Plattformen eingerichtet werden müssten, um Expertise aufzubauen und weiterzugeben. Daran zu beteiligen wären die Betreiber von Übertragungs- und größeren Verteilnetzen, die Kommunen und regionalen Energieversorger, sowie die Betreiber von dezentralen Erzeugungsanlagen. Die entsprechenden Gesetze müsste der Bundestag beschließen, für ihre Durchsetzung wäre die Bundesnetzagentur verantwortlich.

⁵⁵ Vgl. Energinet.dk 2011.

⁵⁶ BMWI 2016; Smart Grids BW 2017.

4.8 Information und Aufklärung der Bevölkerung

Aufklärung kann dazu beitragen, dass die Bevölkerung durch ihr Verhalten mithilft, Verwundbarkeiten des Energiesystems zu mildern und auf widrige Ereignisse wie großräumige Stromausfälle angemessen zu reagieren. Bislang trifft die überwiegende Mehrheit der Menschen keinerlei Vorsorge, um mögliche längere Stromausfälle zu überbrücken.

Ziel von Information und Aufklärung ist es, die Eigenverantwortlichkeit der Bürgerinnen und Bürger zu stärken. Der Maßnahmentyp folgt damit dem Subsidiaritätsprinzip, dem zufolge soweit möglich das Individuum beziehungsweise die jeweils kleinste Einheit eines Gemeinwesens Angelegenheiten regeln sollte. Ministerien oder Behörden müssten ent-

sprechende Strategien entwickeln. Dabei lohnt der Blick über den nationalen Tellerrand, da solche Maßnahmen in Resilienzforen oder Lehreinheiten an Schulen, etwa in Japan, den USA oder Großbritannien, zum Teil seit langer Zeit umgesetzt werden. Dabei ist es wichtig, dass Informationen nicht nur weitergegeben, sondern ausgetauscht werden. Das Ziel sind dabei „Dialoge auf Augenhöhe“.⁵⁷

Es ist wichtig, den Bürgerinnen und Bürgern zu vermitteln, dass sie durch adäquates Verhalten selbst zur Steigerung der Resilienz des Energiesystems beitragen können. Eine Möglichkeit dafür ist, Energie zu sparen, eine andere, das System durch das Installieren sicherer intelligenter Zähler oder lokaler Speicher flexibler zu machen. Es wäre zudem sinnvoll,

⁵⁷ Vgl. acatech 2014, S. 21; Thoma 2014-1, S. 83–86.

Methoden und Wege für den Austausch zwischen den relevanten staatlichen Akteuren wie dem Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe oder den Katastrophenschutzbehörden und den von Ausfällen der Energieversorgung betroffenen Bürgerinnen und Bürgern, aber auch Energieversorgern und Netzbetreibern zu entwickeln.⁵⁸

⁵⁸ Vgl. acatech 2014, S. 21; Thoma 2014-1, S. 69–70. In der Systemtheorie wird Kommunikation nicht als Übertragung, sondern als Selektion von Information aufgefasst. Diese Perspektive verdeutlicht, dass das alleinige Übermitteln von Information noch keine Grundlage für Aufklärung ist (vgl. Baecker 2005).

Soziale Medien können für solche Maßnahmen besonders hilfreich sein. Das in der Gesellschaft vorhandene Wissen über das Energiesystem wächst durch den Umbau zu einem dezentral organisierten Netz an, da lokale Energieexpertinnen und Energieexperten über nützliche Informationen zur Erhöhung der Resilienz des Energiesystems verfügen. Die Aufgabe besteht darin, dieses Wissen für relevante Stellen zu erheben und systematisch zur Verfügung zu stellen.

Aufnahme des Resilienzkonzepts in Bildungspläne

Unterricht und Schulungen können dazu beitragen, das Verständnis für die Energiewende, das Energiesystem, die Möglichkeit widriger Überraschungen und das Handeln im Extremfall zu erhöhen. So entwickelte etwa der Essex Civil Protection & Emergency Management Service des britischen Countys Essex Spiele, Bücher und weitere Unterrichtsmaterialien zum Umgang mit Katastrophen. Sie wurden zunächst im Rahmen von Pilotprojekten an Schulen eingesetzt. Die anschließende Evaluierung zeigte, dass sowohl die Schülerinnen und Schüler als auch ihre Eltern und Verwandten nach dem Projekt wesentlich besser über Risiken und das richtige Verhalten im Extremfall informiert waren.⁵⁹

In Deutschland bietet zum Beispiel das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe zielgruppengerechte Materialien zum Umgang mit Katastrophen an.⁶⁰ Ähnliches könnte für die Risiken beim Ausfall der Energieversorgung entwickelt und in Lehrpläne integriert werden. Diese Aufgabe kann nur langfristig gelingen und erfordert ein Zusammenwirken der zuständigen Organe für den Bevölkerungsschutz, der Bildungsforschung sowie der Bundesländer über die Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland.

⁵⁹ Vgl. Thoma 2014-1, S. 83–86.

⁶⁰ Vgl. hierzu beispielsweise die Website <http://www.max-und-flocke-helferland.de/>.

4.9 Notfallregelungen

Notfallvorkehrungen sind ein Mittel, die Folgen von Störungen oder Ausfällen zu mildern und dazu beizutragen, das betroffene System so schnell wie möglich wieder funktionsfähig zu machen, unabhängig davon, wodurch die Ausfälle verursacht wurden. Notstromaggregate in Krankenhäusern sind eine klassische Vorkehrung, um Ausfälle zu überbrücken.

Notfallregelungen sollten durch Fachleute (im regelmäßigen Abgleich mit Monitoring-Ergebnissen) aktuell gehalten und ständig auf Optimierungsmöglichkeiten überprüft werden. Hierbei sollten klare Prozesse und Kommunikationswege festgehalten sein (Ansprechpersonen). Grundsätzlich ist es wichtig, Notfallarten im Vorfeld zu definieren und die von Störungen (mit-) betroffenen Bereiche abzuschätzen.

Eine Resilienzoption für digital betriebene Elemente des Systems bilden Notbetriebs-Infrastrukturen, die bei Hackerangriffen die ausgefallene Primärinfrastruktur ersetzen können. Ihre Funktion ist es, die Mindestversorgung zu gewährleisten. Im

Normalfall befinden sie sich im Standby-Betrieb. Weil sie außerdem so gut wie möglich vom Primärsystem getrennt sind, können Notbetriebs-Infrastrukturen eingesetzt werden, wenn das Primärsystem beschädigt ist.

Netzbau in hierarchischen Stufen

Unter bestimmten Voraussetzungen können großräumige Stromausfälle nur noch dadurch verhindert werden, dass der Bedarf schlagartig reduziert wird. Bei der heutigen Architektur des Netzes und den heute verwendeten Notabwurfplänen können räumlich definierte Netzteile – etwa Straßenzüge oder Stadtteile – immer nur als Ganzes von der Versorgung getrennt werden. Notabschaltungen betreffen daher alle Verbraucher gleichermaßen.

Abhilfe schuf der Umbau des Netzes in „hierarchische Stufen“. Dafür müssten trennscharf Abnehmergruppen definiert und die Verteilnetze entsprechend angepasst werden. Diese müssten auch zentral ein- und abschaltbar sein. Je nach Notfall könnten zuerst weniger wichtige Verbraucher (zum Beispiel Leuchtreklamen) vom Netz getrennt werden, dann Privathaushalte und gewerbliche Verbraucher. Die Stromversorgung für Verkehrsampeln oder die Telekommunikation bliebe so lang wie möglich aufrechterhalten, die von Krankenhäusern, Pflegeheimen oder Feuerwehr- und Polizeieinstellen muss durchgehend gewährleistet bleiben. Wenn Telekommunikationssysteme weiter funktionieren, über die sich Anlagen aus der Ferne überwachen und wiedereinschalten lassen, können Probleme schneller identifiziert und die Versorgung schneller wiederhergestellt werden. Und wenn die Raumbelichtung weiterhin funktioniert, geraten die Menschen weniger schnell in Panik.

Die Rahmenbedingungen dazu müsste die Bundesnetzagentur setzen; umsetzen müssten den Umbau die Betreiber der Verteilnetze. Dabei würden erhebliche Kosten anfallen. Die Kosten könnten über die Netzentgelte umgelegt werden. Sie wären als Investition in die allgemeine Versorgungssicherheit zu sehen.

4.10 Lernen

Für Resilienz sind insbesondere Lern- und Adaptionfähigkeit von Bedeutung. Lernfähigkeit heißt, Störfälle unabhängig von ihrer Ursache systematisch dazu zu nutzen, möglichst viele Erkenntnisse zu sammeln, sodass sich Fehler nicht wiederholen und Erfolgsfaktoren systematisch gestärkt werden. Dabei ist es unerheblich, ob der Schaden bereits eingetreten ist, viel kann auch aus Beinahe-Katastrophen gelernt werden. Mit Szenarien und Modellen können potenzielle Belastungen und ihre Folgen vorausschauend simuliert werden. Ein adaptionfähiges Energiesystem wiederum ist in der Lage, auf sich verändernde

de Rahmenbedingungen dynamisch zu reagieren und unter Umständen proaktiv darauf einzugehen.⁶¹

Zu den Folgen eines großräumigen Ausfalls der Stromversorgung liegen umfangreiche Studien vor. Den Behörden dient das „Krisenhandbuch Stromausfall“ als Leitfaden bei und nach einem Blackout.⁶² Die umfängliche Wandlung der Energieversorgung im Zuge der Energiewende macht es erforderlich, derartige Studien ständig zu aktualisieren und dem immer komplexeren Versorgungssystem anzupassen. Falls

⁶¹ Vgl. Thoma 2014-2, S. 89–90.

⁶² Vgl. zum Beispiel TAB 2010, IM BW/BBK 2010.

die Versorgung tatsächlich ausfällt, sollte dies bestmöglich dokumentiert werden, um Lehren daraus ziehen zu können. Um sie auch umsetzen zu können, müssen Handlungsanleitungen stets auf dem aktuellen Stand sein. Überdies sollten Vorgaben darin nicht zu starr sein, sondern Spielraum für Improvisation lassen.

Viele Funktionslogiken, die ein zuverlässiges Arbeiten des Systems ermöglichen, können auch im Ausnahmefall hilfreich sein. Aus dem Normalbetrieb können Mechanismen abgeleitet werden, die auch im Extremfall nützlich sind.⁶³

Besonders wichtig sind neue Ansätze zur Simulation des Verhaltens komplexer Systeme bei widrigen Ereignissen. Aktuelle Simulationsmethoden basieren häufig auf vereinfachenden Annahmen und Kausalketten. Das Energiesystem lässt sich jedoch nicht allein durch die Be-

trachtung seiner einzelnen Elemente erklären, erst der systemische Blick erlaubt Voraussagen für den Extremfall.⁶⁴ Kritische Zustände, die die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems bedrohen, können durch Simulationen identifiziert werden. Hierzu bedarf es noch mathematischer und informationstechnischer Grundlagenforschung sowie routinemäßig anwendbarer Software für Infrastrukturbetreiber.⁶⁵

Zentrale Ergebnisse dieser Lernprozesse müssten stets auch auf Papier vorliegen. Verzeichnisse lokaler Stromproduzenten und Speicher könnten helfen, Netze klüger zu steuern. Dadurch können Ausfälle der überregionalen Stromversorgung besser verhindert oder abgemildert werden.

63 Ein Beispiel für die Literatur zu Resilience Engineering ist Hollnagel et al. 2006.

64 Zur Theorie komplexer adaptiver Systeme vgl. Holland 2006.

65 Vgl. Kröger 2011, S. 75–76; Scharte/Thoma 2016, S. 141. Für solche Simulationen eignen sich agentenbasierte Modellierungsansätze, die auch in unvorhergesehenen Situationen arbeiten und die Funktion aller relevanten Komponenten nicht deterministisch, sondern stochastisch simulieren.

Methoden zur Simulation gekoppelter Netzinfrastrukturen

In Zeiten der Energiewende reichen sektorspezifische Simulationsmodelle nicht mehr aus, da sie nicht in der Lage sind, die enge Kopplung verschiedener Netze (Strom, Wärme, Verkehr, Telekommunikation etc.) und damit zusammenhängende Kaskadeneffekte abzubilden. Simulationen gekoppelter Netzinfrastrukturen und deren Anwendung in Form von Software für Infrastrukturbetreiber sollten daher (weiter-)entwickelt werden. Dazu müssen zum Beispiel in der Informatik noch zahlreiche Fragen beantwortet werden, etwa zu Themen der Optimierung von Laufzeiten umfangreicher Simulationen, Softwarearchitektur, Anforderungsmanagement oder Multi-Agenten-Simulationen. Letztere könnten zum Beispiel soweit weiterentwickelt werden, dass auch bisher noch nicht bedachte Zustände von Systemkomponenten dynamisch erzeugt werden und die Anzahl möglicher Zustände erweitert wird.

Ziel ist, das Verhalten komplexer, gekoppelter Infrastrukturen in Krisensituationen möglichst szenariounabhängig abbilden zu können. Hierbei können Systemkomponenten sowohl Verbraucherinnen und Verbraucher als auch Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger, Knoten von Versorgungsnetzen oder Elemente von sonstiger Infrastruktur sein. Beim Modellieren solcher komplexer Systeme kann an die „Complex Network Theory“ angeknüpft werden.⁶⁶ Relevante Akteure zur Umsetzung der Maßnahme sind Fachleute aus Forschung und Wissenschaft und Fördermittelgeber.

66 Mit der „Complex Network Theory“ können Klimaphänomene ebenso modelliert werden wie Ökosysteme oder Stromnetze (vgl. Kröger/Zio 2011; Menck et al. 2013).

5 Wer koordiniert? Systemische Steuerung als Erfordernis

Mit der Energiewende übernimmt Deutschland Verantwortung gegenüber künftigen Generationen. Als Staat, dessen Wohlstand und Stabilität wesentlich auf der Leistungsfähigkeit seiner Industrie basieren, geht Deutschland damit aber auch ein Experiment ein, das mit Risiken verbunden ist. Diese wurden anhand exemplarischer Szenarien veranschaulicht. Zusätzliche, bisher noch wenig bedachte Komplexität resultiert aus jüngeren und zum Teil drastischen Entwicklungen: Gibt es nach dem Votum der Wählerinnen und Wähler Großbritanniens weitere Austritte aus der Europäischen Union und welche Auswirkungen hat das auf europäische Energienetze? Welche Auswirkungen können die russische Außenpolitik und Krisenherde in Europas unmittelbaren Nachbarregionen auf unsere Infrastrukturen und die Funktion und Zuverlässigkeit unserer Energieversorgung haben?

Derartige Bedrohungen und Änderungen der Rahmenbedingungen müssen bei der Neukonzeption der Energieinfrastrukturen berücksichtigt werden. Es müssen Schutzkonzepte, Strategien und Notfallpläne entwickelt werden, Reaktionen des Energiesystems auf auch überraschende Belastungen müssen durchdacht und daraus und aus vermiedenen wie überstandenen Krisen muss immer wieder neu gelernt werden.

Bei der Entwicklung und Umsetzung einer Resilienzstrategie sind allerdings Zielkonflikte unvermeidlich. So sind hohe und genau reglementierte Sicherheitsstandards sinnvoll, um Ausfällen der Energieversorgung langfristig vorzubeugen. Ebenso sinnvoll ist es, wenn diese

Standards auf Bundes- oder auf europäischer Ebene beschlossen und angeordnet werden. Auf der anderen Seite kann das rigorose Umsetzen entsprechender Standards das System unflexibel und starr machen und Improvisationsfähigkeit – in einem resilienten System von hoher Bedeutung – vermindern. Dadurch kann es schwieriger werden, Ausfälle zu überbrücken oder zu beheben.

Als zentraler Zielkonflikt wird in der Regel aber der zwischen (Kosten-)Effizienz und Resilienz angeführt. Effizienz ist zweifellos ein wichtiges Bewertungskriterium für die Auswahl und Ausgestaltung von Maßnahmen im Rahmen der Entwicklung einer Resilienzstrategie. Die Optimierung von Effizienz kann aber auch nachteilig sein, wenn sie gegenüber anderen Bewertungskriterien wie Resilienz absolut gesetzt wird. Der Konflikt zwischen Effizienz und Resilienz löst sich jedoch tendenziell auf, wenn ein Wechsel der Perspektive vorgenommen wird, von kurzfristiger Optimierung zu langfristiger strategischem Denken. Auf lange Sicht dürfte sich Resilienz dann auch eher „rechnen“.⁶⁷

⁶⁷ Da Resilienz Systeme gerade gegenüber schwer quantifizierbaren Belastungen stärken soll, ist es nicht möglich, zuverlässige Kosten-Nutzen-Analysen für Resilienzmaßnahmen durchzuführen. Wo solche Versuche trotzdem gemacht wurden, zeigen sie aber: Auf lange Sicht kann Resilienz sich auch finanziell auszahlen. So kommt eine Untersuchung des Multi-Hazard Mitigation Council zum Ergebnis, dass jeder Dollar, der in Schutzmaßnahmen gegen die Folgen von Erdbeben, Fluten und Stürmen investiert wurde, letztlich Schäden in Höhe von ungefähr vier Dollar verhindert hat (vgl. The National Academies 2012, S. 13). Allerdings dürfte es selbst in einer Langfristbetrachtung volkswirtschaftlich nicht optimal sein, ohne Rücksicht auf die Kosten alle vermeidbaren Katastrophen durch entsprechende Maßnahmen zu vermeiden (vgl. Martin/Pyndick). 2015).

Es ist vor allem die Aufgabe politischer Entscheidungsträger, Resilienz so zu fördern, dass Maßnahmen und Akteursverantwortlichkeiten sinnvoll aufeinander abgestimmt und dabei Zielkonflikte identifiziert und bestmöglich gelöst werden. Dabei ist auch die Frage zu beantworten, wer die einzelnen Resilienzmaßnahmen bezahlt. Die deutsche Energiewirtschaft ist durch Akteure wie neue Energieanbieter oder Prosumentinnen und Prosumenten kleinteiliger geworden und wird voraussichtlich noch kleinteiliger werden. Durch das Trennen von Netz und Vertrieb („Unbundling“) und Liberalisierung konnten Preise gesenkt und neue Wahlmöglichkeiten geschaffen werden. Dadurch sind aber auch Verantwortlichkeiten unklarer geworden.

Um eine Balance zwischen Effizienz und Resilienz sicher zu stellen, ist deshalb eine übergreifende systemische Steuerung notwendig. Gewährleisten kann sie nur derjenige, der die Verantwortung für das Gesamtsystem trägt. Regierungen und Parlamente haben daher die anspruchsvolle wie wichtige Aufgabe, in der Rolle des „Dirigenten“ („Conductor“) die relevanten Akteure bei der Entwicklung und Umsetzung einer Resilienzstrategie einschließlich der Neudefinition von Verantwortlichkeiten zu moderieren und zu koordinieren und im kontinuierlichen Austausch mit diesen Akteuren die geeigneten Rahmenbedingungen zu setzen: vom Anstoßen von Kooperationen bis hin zum Setzen von Resilienzstandards.⁶⁸

Nur wenn die neuen Energiesysteme resilient und mit Beteiligung aller relevanten Akteure entwickelt werden, ist damit zu rechnen, dass die Energieversorgung auch bei unerwarteten Störungen (vom Bedienfehler bis hin zum staatlich gesteuerten Hackerangriff) langfristig stabil, zukunftsicher und widerstandsfähig sein wird.

68 Der Begriff „Conductor“ geht zurück auf IRGC 2015, Appendix, S. 4.

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/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.): *Die Energiewende europäisch integrieren. Neue Gestaltungsmöglichkeiten für die gemeinsame Energie- und Klimapolitik* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-2

acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.): *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-3

acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.): *Mit Energieszenarien gut beraten. Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017

acatech/Leopoldina/Akademieunion (Hrsg.): *Rohstoffe für die Energiewende. Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2017.

Angerer et al. 2016

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

Baecker 2005

Baecker, D.: *Kommunikation*, Leipzig: Reclam 2005.

Beekun/Glick 2001

Beekun, R. I./Glick, W. H.: „Organization structure from a loose coupling perspective: A multidimensional approach“. In: *Decision Sciences*, 32: 2, 2011, S. 227–250.

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: 20.12.2016].

BGR 2014

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.): *Seltene Erden. Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe*, Hannover 2016. URL: http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_se.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [Stand: 22.02.2017].

BGR 2016

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.): *Schieferöl und Schiefergas in Deutschland. Potenziale und Umweltaspekte*, Hannover 2016. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Abschlussbericht_13MB_Schieferoelgaspotenzial_Deutschland_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=5 [Stand: 22.02.2017].

BMWi 2016

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Förderprogramm „Schaufenster intelligente Energie - Digitale Agenda für die Energiewende“ (SINTEG), 2016. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/sinteg.html> [Stand: 28.02.2017].

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 2017

Die Bundesregierung (Hrsg.): *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*. Neuauflage 2016. Entwurf, Stand: 1. Oktober 2016, Kabinettsbeschluss vom 11. Januar 2017. URL: https://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/Nachhaltigkeit-wiederhergestellt/2017-01-11-nachhaltigkeitsstrategie.pdf [Stand: 30.03.2017].

DGRV 2016

Deutscher Genossenschafts- und Raiffeisenverband e. V.: Jahresumfrage Energiegenossenschaften 2016. URL: <http://www.genossenschaften.de/jahresumfrage-energiegenossenschaften-2016> [Stand: 28.02.2017].

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.

DIHK 2016

Deutsche Industrie- und Handelskammer: Weiter auf steinigem Weg. IHK-Energiewende-Barometer 2016. Fakten | Trends | Forderungen. URL: <http://www.dihk.de/energiewende-barometer-2016> www.dihk.de/energiewende-barometer-2016 [Stand: 20.12.2016].

E-ISAC/Sans 2016

Electricity Information Sharing and Analysis Center/ Sans Industrial Control Center: Analysis of the Cyber Attack on the Ukrainian Power Grid. Defense Use Grid, 2016. URL: http://www.nerc.com/pa/CI/ESISAC/Documents/E-ISAC_SANS_Ukraine_DUC_18Mar2016.pdf [Stand: 20.12.2016].

Elsner et al. 2015

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

Energinet.dk 2011

Energinet.dk: Cell Controller Pilot Project, 2011. URL: <http://energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Engelske%20dokumenter/Forskning/Cell%20Controller%20pilot.pdf> [Stand: 20.12.2016].

EU COM 2015

Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Closing the Loop – An EU action plan for the Circular Economy, 614, 2015. URL: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF [Stand: 20.12.2016].

Forsa 2016

Forsa-Umfrage: Energieversorgung und Energiewende, 2016. URL: https://www.wingas.com/fileadmin/Wingas/content/06_Presse_Mediathek/Broschueren/Studien/WINGAS_FORSA_Studie_2016_de.pdf [Stand: 20.12.2016].

Holland 2006

Holland, J.: „Studying Complex Adaptive Systems“. In: *Journal of Systems Science and Complexity*, 19: 1, 2006, S. 1–8.

Hollnagel et al. 2006

Hollnagel, E./Woods, D. D./Leveson, N. (Hrsg.): *Resilience Engineering (Concepts and precepts)*, Hampshire: Ashgate Publishing Limited 2006.

IM BW/BBK 2010

Innenministerium Baden-Württemberg/Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Hrsg.): *Krisenmanagement Stromausfall*. Kurzfassung. Krisenmanagement bei einer großflächigen Unterbrechung der Stromversorgung am Beispiel Baden-Württemberg, Heidelberg 2010.

IRGC 2015

International Risk Governance Council: Guidelines for Emerging Risk Governance. Lausanne: International Risk Governance Council (IRGC), 2015. URL: <https://www.irgc.org/wp-content/uploads/2015/03/IRGC-Emerging-Risk-WEB-31Mar.pdf>; <https://www.irgc.org/wp-content/uploads/2015/03/IRGC-Emerging-Risk-Appendix-WEB-31Mar.pdf> [Stand: 17.03.2017]

ISO 31000 2009

ISO 31000: Risk management – Principles and guidelines, 2009.

Jackson et al. 2013

Jackson, T./Homescu, A./Crane, S./Larsen, P./Brunthaler, S./Franz, M.: „Diversifying the software stack using randomized NOP insertion“. In: *Moving Target Defense II*, New York: Springer 2013, S. 151–173.

Kasperson et al. 1988

Kasperson, R. E./Renn, O./Slovic, P./Brown, H. S./Emel, J./Goble, R./Kasperson, J. X./Ratick, S.: „The Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework“. In: *Risk Analysis*, 8: 2, 1988, S. 177–187.

Kröger 2011

Kröger, W.: „An overview of Swiss research on vulnerability of critical infrastructure“. In: Thoma, K. (Hrsg.): *European perspectives on security research*, Heidelberg: Springer 2011, S. 67–79.

Kröger/Sansavini 2016

Kröger, W./Sansavini G.: „Principles of disaster risk reduction“. In: OSCE (Hrsg.): *Protecting Electricity Networks from Natural Hazards*, 2016, S. 11–24. URL: <http://www.osce.org/secretariat/242651?download=true> [Stand: 21.02.2017].

Kröger/Zio 2011

Kröger, W./Zio E.: *Vulnerable Systems*, London: Springer 2011.

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.

Lenk et al. 2015

Lenk, T./Rottmann, O./Grüttner, A.: Finanzielle Bürgerbeteiligung im Rahmen der Energiewende: Optionen zur Finanzierung von Netzausbau und Erzeugung?, 2015, URL: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/7986B2301E93C215C1257F8F005403D4/\\$file/BS-0248%20Finanzielle%20B%3BCrgerbeteiligung%20EE_8.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/7986B2301E93C215C1257F8F005403D4/$file/BS-0248%20Finanzielle%20B%3BCrgerbeteiligung%20EE_8.pdf) [Stand: 16.03.2017]

Linkov et al. 2014

Linkov, I./Bridges, T./Creutzig, F./Decker, J./Fox-Lent, C./Kröger, W./Lambert, J. H./Levermann, A./Montreuil, B./Nathwani, J./Nyer, R./Ortwin Renn, O./Scharte, B./Scheffler, A./Schreurs, M./Thiel-Clemen, T.: „Changing the Resilience Paradigm“. In: *Nature Climate Change*, 4, 2014, S. 407–409.

Martin/Pindyck 2015

Martin, I./Pindyck, R.: „Averting Catastrophes: The Strange Economics of Scylla and Charybdis“. In: *The American Economic Review*, 105: 10, 2015, S. 2947–2985.

McDaniel/McLaughlin 2009

McDaniel, P./McLaughlin, S.: „Security and privacy challenges in the smart grid“. In: *IEEE Security & Privacy*, 7: 3, 2009, S. 75–77.

Menck et al. 2013

Menck, P. J./Heitzig, J./Marwan, N./Kurths, J.: „How basin stability complements the linear-stability paradigm“. In: *Nature Physics*, 9, 2013, S. 89–92.

The National Academies 2012

The National Academies: *Disaster Resilience. A National Imperative*, Washington, D.C., 2012.

Nennen/Garbe 1996

Nennen, H.-U./Garbe, D.: *Das Expertendilemma: zur Rolle wissenschaftlicher Gutachter in der öffentlichen Meinungsbildung*, Berlin/New York: Springer 1996.

Orton/Weick 1990

Orton, J. D./Weick, K. E.: „Loosely coupled systems: A reconceptualization“. In: *Academy of management review*, 15: 2, 1990, S. 203–223.

Pedersen et al. 2009

Pedersen, E./van den Berg, F./Bakker, R./Bouma, J.: „Response to noise from modern wind farms in The Netherlands“. In: *Journal of the Acoustical Society of America*, 126: 2, 2009, S. 634–643.

Perrow 1984

Perrow, C.: *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*, New York: Basic Books, 1984.

Pohl et al. 1999

Pohl, J./Faul, F./Mausfeld, R.: Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen (Untersuchung im Auftrag des Landes Schleswig-Holstein, vertreten durch das Staatliche Umweltamt Schleswig, des Landes Mecklenburg-Vorpommern, vertreten durch das Umweltministerium, endvertreten durch das Landesamt für Umwelt und Natur, des Niedersächsischen Umweltministeriums und des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz. Kiel, 1999. URL: http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Akzeptanz/130_Pohl_Faul_Mausfeld_1999.pdf [Stand: 16.03.2017].

Prognos/ewi/GWS 2016

Prognos/ewi Energy Research & Scenarios/Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung: Black Swans (Risiken) in der Energiewende. Risikomanagement für die Energiewende (Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie), 2016. URL: <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/black-swans-risiken-in-der-energiewende.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 20.12.2016].

10-Punkte-Programm Systemsicherheit 2014

10-Punkte-Programm der 110-kV-Verteilnetzbetreiber (VNB) und des Übertragungsnetzbetreibers (ÜNB) der Regelzone 50Hertz zur Weiterentwicklung der Systemdienstleistungen (SDL) mit Integration der Möglichkeiten von dezentralen Energieanlagen, 09.09.2014. URL: http://www.50hertz.com/Portals/3/Content/Dokumente/Medien/Positionspapiere/10_Punkte_Programm_Systemsicherheit-Langfassung.pdf [Stand: 21.03.2017].

Renn 2011

Renn, O.: „Bürgerbeteiligung – aktueller Forschungsstand und Folgerungen für die praktische Umsetzung“. In: Hilpert, J. (Hrsg.): *Nutzen und Risiken öffentlicher Großprojekte: Bürgerbeteiligung als Voraussetzung für eine größere gesellschaftliche Akzeptanz. Stuttgarter Beiträge zur Risiko- und Nachhaltigkeitsforschung*, 19, Stuttgart: Universitätsverlag 2011, S. 19–44.

Renn 2015

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

Renn 2017

Renn, O. (Hrsg.): *Risiko und Resilienz im Energiesystem. Szenarien – Handlungsspielräume – Zielkonflikte* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017.

RESILENS 2016

Realising European ReSILIENCE for Critical Infrastructure: Resilience Management Steps. Report and Templates, D2.1, 31.08.2016. URL: http://resilens.eu/wp-content/uploads/2016/09/RESILENS-D2.1-Resilience_Management_Steps.pdf [Stand: 20.03.2017]

Scharte/Thoma 2016

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

Schubert et al. 2013

Schubert, D./von Selasinsky, A./Meyer, T./Schmidt, A./Thuß, S./Erdmann, N./Erndt, M./Möst, D.: „Gefährden Stromausfälle die Energiewende? Einfluss auf Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft“. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 63: 10, 2013, S. 35–39.

Schulmann 1993

Schulman, P. R.: „The negotiated order of organizational reliability“. In: *Administration & Society*, 25: 3, 1993, S. 353–372.

Slovic 1999

Slovic, P.: „Perceived Risk, Trust and Democracy“. In: Cvetkovich, G./Löfstedt, R. (Hrsg.): *Social Trust and the Management of Risk*, London: Earthscan 1999, S. 42–52.

Smart Grids BW 2017

Smart Grids BW: *Das Smart-Grid-Schaufenster in die Zukunft*, 2017. URL: <http://www.smartgrids-bw.net/csells/csells-ueberblick/> [Stand: 22.03.2017].

Sornette 2009

Sornette, D.: „Dragon-Kings, Black Swans and the Prediction of Crises“. In: *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, 2: 1, 2009, S. 1–18. URL: <https://arxiv.org/abs/0907.4290> [Stand: 20.03.2017].

Stirling 2007

Stirling, A.: „A general framework for analysing diversity in science, technology and society“. In: *Journal of the Royal Society Interface*, 4: 15, 2007, S. 707–719.

Stirling 2010

Stirling, A.: „Multicriteria diversity analysis: a novel heuristic framework for appraising energy portfolios“. In: *Energy Policy*, 38: 4, 2010, S. 1622–1634.

TAB 2010

TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (Hrsg.): *Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung*. (Arbeitsbericht Nr. 141, Endbericht zum TA-Projekt), Berlin 2010. URL: <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab141.pdf> [Stand: 20.12.2016].

Taleb 2007

Taleb, N.: *The Black Swan. The Impact of the Highly Improbable*, London: Allen Lane, 2007.

TenneT 2013

TenneT TSO GmbH: Bürgerleitung. URL: <http://www.tennet.eu/de/unser-netz/onshore-projekte-deutschland/westkuestenleitung/buergerleitung/> [Stand: 28.02.2017]

Thoma 2014-1

Thoma, K. (Hrsg.): *Resilien Tech. Resilience by Design: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (acatech STUDIE), München: Herbert Utz Verlag 2014.

Thoma 2014-2

Thoma, K.: „Resiliente Infrastrukturen“. In: Weinert, K./Beckmann, K. J./Encarnaçao, J./Herzog, O./Höcker, H./Kuhn, A./Mühlhäuser, M./Schober, O./Spath, D./Thoma, K. (Hrsg.): *Stadt der Zukunft – Strategieelemente einer nachhaltigen Stadtentwicklung* (acatech MATERIALIEN), 2014, S. 87–96.

Umbach 2015

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

Weare 2003

Weare, C.: *The California Electricity Crisis: Causes and Policy Options*, San Francisco: Public Policy Institute of California 2003. URL: http://www.ppic.org/content/pubs/report/R_103CWR.pdf [Stand: 20.03.2017].

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.

White & Case 2016

White & Case: Entschädigung von Grundstückseigentümern und Nutzern beim Stromnetzausbau – eine Bestandsaufnahme, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Oktober 2016. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/entschaedigung-grundstueckseigentuemern-nutzern-stromnetzausbau.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 23.01.2017].

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 kann das künftige Energiesystem so gestaltet werden, dass auch unter Belastungen die Versorgung gewährleistet bleibt? Die Arbeitsgruppe „Risiko und Resilienz“ hat in der vorliegenden Stellungnahme Maßnahmentypen herausgearbeitet, um beispielsweise Hackerangriffe auf das Energiesystem oder Rohstoffknappheiten und ihre Folgen in den Griff zu bekommen. Ausgangspunkt waren vier Szenarien, die künftige Belastungen des Energiesystems skizzieren. Sie sind in der Analyse „Das Energiesystem resilient gestalten: Szenarien – Handlungsspielräume – Zielkonflikte“, die zeitgleich veröffentlicht wurde, ausführlicher beschrieben.

Prof. Dr. Ortwin Renn (Leitung)	Institute for Advanced Sustainability Studies Potsdam
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
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

Außerdem danken wir Prof. Dr. Max Mühlhäuser, TU Darmstadt, für Vorschläge zu den informationstechnischen Aspekten von Resilienz im Energiesystem und Nicole Kaim-Albers, Weltenergierat – Deutschland, für das inhaltliche Begleiten der Stellungnahme.

Wissenschaftliche Referenten

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

Gutachter

Prof. Dr. Justus Haucap	Universität Düsseldorf
Prof. Dr. Wolfgang Kröger	ETH Zürich
Prof. Dr. Hans-Joachim Kümpel	Ehemals Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Prof. Dr. Matthias Ruth	Northeastern University, Boston
Prof. Dr. Helga Weisz	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Fachgespräch

Am 30. Juni 2016 wurde auf dem Fachgespräch „Maßnahmen für ein resilienteres Energiesystem“ ein Entwurf der Stellungnahme zur Diskussion gestellt. Die dort geäußerten Rückmeldungen flossen in die weitere Texterstellung ein. An diesem Fachgespräch nahmen teil:

Dr. Ralf Bartels	IG BCE – Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie
Dr. Paul Becker	Deutscher Wetterdienst
Dr. Oliver Deke	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Dr. Eberhard Faust	Münchener Rück
Martin Hellwig	Deutsche Umwelthilfe
Nicole Kaim-Albers	Weltenergierat – Deutschland
Dr. Almut Kirchner	Prognos AG
Prof. Dr. Klaus Kornwachs	Universität Ulm
Dr. Gerd Rosenkranz	Agora Energiewende
Kristina Steenbock	Renewables Grid Initiative
Lars Waldmann	Energiewende Consult

Hintergrundgespräche

Insbesondere zu den Maßnahmen, um die Resilienz des Energiesystems zu steigern, wurden Hintergrundgespräche geführt mit:

Dr.-Ing. Karsten Burges	Ecofys
Eckard Quitmann	Enercon
Ernst Rauch	Münchener Rück

Dr.-Ing. Christoph Riegel	Bundesnetzagentur
---------------------------	-------------------

Stefan Jürgen Saatmann	Stromnetz Berlin
------------------------	------------------

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)	acatech Präsident (bis Februar 2017) Mitglied acatech Präsidium
---	--

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.

Die Stellungnahme wurde am 11.01.2017 vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet.

Die Akademien danken allen Autorinnen und Autoren sowie Gutachterinnen und Gutachtern für ihre Beiträge. Die Inhalte der vorliegenden Stellungnahme liegen in der alleinigen Verantwortung der Akademien.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Deutsche Akademie der Naturforscher
Leopoldina e. V.
Nationale Akademie der Wissenschaften

acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e. V.

Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften e. V.

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: 0345 47239-600
Fax: 0345 47239-919
E-Mail: leopoldina@leopoldina.org

Karolinenplatz 4
80333 München
Tel.: 089 520309-0
Fax: 089 520309-9
E-Mail: info@acatech.de

Geschwister-Scholl-Straße 2
55131 Mainz
Tel.: 06131 218528-10
Fax: 06131 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Hauptstadtbüro:
Pariser Platz 4a
10117 Berlin

Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung veröffentlicht werden.

Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

ISBN: 978-3-8047-3668-9