

11 Die Energiewende als Sprungbrett in ein resilientes Energiesystem

Roman Korzynietz, Frauke Bierau-Delpont, Rainer Moorfeld

Energiesysteme sind essenziell für Sicherheit und Wohlstand und zählen zu Recht zu den kritischen Infrastrukturen in Deutschland. Gegenwärtig erzwingt die Energiewende ihren auf vielfältige Weise herausfordernden Umbau – verbunden unter anderem mit einer starken Kopplung der Teilsysteme, beherrschbar nur auf Basis umfassender Digitalisierung. Aber trotz dieser absehbar gewaltigen Komplexität künftiger Systeme darf die Versorgungssicherheit nicht leiden. So sollen die Energiesysteme sich an immer neue Anforderungen automatisch anpassen und auch hohen Belastungen standhalten können bzw. nach Versagen schnell wiederherstellbar sein. Mit einem Wort: Sie sollen resilient sein.

Der Energiesektor – Strom, Wärme, Prozesswärme und Transport – ist als Kritische Infrastruktur (KRITIS) entscheidend für die Sicherheit des Landes (Abb. 11.1). Ein Störfall mit Versorgungsausfällen kann innerhalb kürzester Zeit Krisen in einer Vielzahl anderer Sektoren hervorrufen. Von Gesundheit über Wasserversorgung, Ernährung, Finanzen, Kommunikation oder Transport, alle sind direkt von einem Ausfall betroffen.

Die Sicherheit der Energieversorgung und die sich daraus ergebenden Ansprüche und Erwartungen sind in Deutschland besonders hoch. Das heißt, der Bedarf soll jederzeit verfügbar und gedeckt sein, und das zu erschwinglichen Preisen. Dies soll auch zukünftig so bleiben.

Das formulierte Ziel der Energiewende ist es, die Energieversorgung vollständig auf Erneuerbare Energien umzustellen und die Bereiche Strom-, Wärme- und Verkehr vollständig regenerativ zu versorgen. Damit das so effizient wie möglich erreicht werden kann, wird die Vernetzung und größtmögliche Elektrifizierung der verschiedenen Energie- und Verbrauchssektoren angestrebt: die Sektorenkopplung. Dazu müssen auch etablierte Denkweisen und Handlungslogiken etwa zu Betrieb, Steuerung und Schutz des Energiesystems überdacht und hinterfragt werden. Besonders während der Transformationsphase ergeben sich allerdings auch unbekannte Herausforderungen und Risiken für die Versorgungssicherheit. Dies gilt beispielsweise für die volatile Stromerzeugung von Photovoltaik- und Windkraftanlagen, oder für die wachsende Komplexität der Steuerung, Verteilung und Überwachung. Um dem zu begegnen, ist eine effiziente, intelligente und dezentralisierte Energieversorgung, -speicherung und Nutzung nötig, in der das Stromnetz eine weitaus größere Rolle einnimmt als bisher.



Was ist KRITIS?

„Kritische Infrastrukturen (KRITIS) sind Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden.“ (BMI 2009)

Bemessungskriterien und Schwellenwerte werden für jeden Sektor individuell und bedarfsgerecht festgelegt. Für diese gelten besondere Regeln, Anforderungen und Mindeststandards (ISMS nach ISO 27001). Deren Einhaltung wird im Energiesektor von staatlicher Seite durch die Bundesnetzagentur überwacht.

Welche Sektoren sind KRITIS?

- › Energie
- › Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)
- › Wasser
- › Gesundheit
- › Ernährung
- › Transport und Verkehr
- › Medien und Kultur
- › Staat und Verwaltung
- › Finanz- und Versicherungssektor

Europäische kritische Infrastruktur

Hat ein KRITIS-Betreiber Einfluss auf zwei oder mehr Länder in der Europäischen Union, so verwendet man die Bezeichnung EKI („Europäische kritische Infrastruktur“). Eine Richtlinie (2008/114/EG) bestimmt Verfahren zur Ermittlung von EKI (Europäischer Rat 2008). Die EKI unterliegen gesonderten Sicherheitsvorkehrungen. Dazu gehören abgestimmte Sicherheitspläne, benannte Sicherheitsbeauftragte, die als Kontaktstelle zwischen Betreibern und Behörden fungieren, regelmäßigen Bedrohungsanalysen und Risikoberichte.

In der EU unterliegen vorerst nur die Bereiche Energie und Verkehr bzw. Transport dieser Richtlinie. In Zukunft werden voraussichtlich weitere Bereiche der KRITIS stärkere europäische Regulierungen erwarten dürfen. Der Bereich Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) verfügt beispielsweise bereits über eine sogenannte NIS-Richtlinie für eine EU-weite Netz- und Informationssicherheit (BSI 2021).



Abb. 11.1 KRITIS – Definition und europäische Entwicklung (Quelle: Institut für Innovation und Technik (iit), eigene Darstellung, enthaltene Referenzen: BMI 2009, Europäischer Rat 2008, BSI 2021)

Die im Zuge der Energiewende zu erwartenden Umwälzungen sind nicht etwas völlig Neues. Zurückblickend kann man feststellen, dass es immer wieder einschneidende Ereignisse gab, die zu Paradigmenwechseln im Energiesektor führten. Zum Beispiel die Ölkrise 1973, die den Industrienationen aufzeigte, wie abhängig sie von den Förderländern waren und dadurch die Sicherheit der Energieversorgung gefährdet war. Andere Beispiele sind die Reaktorkatastrophen in Tschernobyl 1986 und Fuku-

shima 2011, die für die Gefahren der Atomkraft sensibilisierten (VDI/VDE Innovation + Technik GmbH 2018). Konsequenterweise wurden daraufhin Technologien zur Nutzung von Wind und Sonne weiterentwickelt und Gesetze beschlossen, die die Energiewende auf den Weg gebracht haben. Der damit intendierte Wandel wurde jedoch bislang aus Angst und von sich widerstreitenden wirtschaftlichen und machtpolitischen Interessen immer wieder behindert und gebremst. Die aktuelle Krise, ausgelöst durch den Krieg in der Ukraine, zeichnet sich nun durch eine Kombination aus Nähe der schockierenden Ereignisse, deren direkte Auswirkungen und eines stärkeren Umweltbewusstseins in der Gesellschaft aus. Die Gemengelage dieser Krise hat das Potenzial, den notwendigen Paradigmenwechsel im Energiesektor nicht nur in Deutschland, sondern auch in Europa zu beschleunigen.

Dabei steht die Umsetzung der Energiewende dem Ziel eines resilienten Energiesystems nicht entgegen. Im Gegenteil. Sie ist zwingend notwendig, um sich aus der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu befreien, den ökologischen, ökonomischen und sicherheitspolitischen Risiken zu begegnen und somit die Versorgungssicherheit auch zukünftig zu gewährleisten.

Resiliente Energieversorgung

Die Initiative der Wissenschaftsakademien für eine nachhaltige, sichere und bezahlbare Energieversorgung „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) hat den Begriff Resilienz im Energiesystem 2017 wie folgt definiert: „Resilienz bedeutet, dass ein System seine Funktionsfähigkeit auch unter hoher Belastung aufrechterhält oder nach Versagen schnell wiederherstellt und aus solchen Vorgängen lernt.“ (Mayer et al. 2021). Resilienz wird hier als Gewährleistung der Versorgungssicherheit des Energiesystems verstanden.

Der Energiesektor muss Antworten auf vielfältigste Belastungen und Risiken bieten. Diese können vorhersehbar oder unvorhersehbar, kurzfristig oder langfristig, punktuell oder großflächig sein. Als Auslöser kommt eine Vielzahl von Gefahrenquellen in Frage: von technischem oder menschlichem Versagen, über Cyberattacken bis hin zu Umweltkatastrophen. Eine Übersicht von Belastungen und Risiken findet sich in Abb. 11.2.

Die Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (BMI 2009) definiert drei strategische Ziele: Prävention, Reaktion und Nachhaltigkeit, die es bei allen sicherheitspolitischen Fragestellungen konsequent zu berücksichtigen gilt. Zusammen bilden diese drei Zielsetzungen einen Kreisprozess des resilienten Handelns für Kritische Infrastrukturen (KRITIS). Auf ein modernes, resilientes Energiesystem gemünzt, kann dieser Kreisprozess im Detail verfeinert dargestellt werden (Abb. 11.3). Bewährte robuste Maßnahmen, wie das Installieren wichtiger Netzkomponenten in Redundanz,

Trends

Allgemein

- › Klimawandelauswirkungen werden deutlicher
- › Int./ EU Zusammenarbeit
- › Wachsende Akzeptanz für Energiewende
- › Energiepartnerschaften
- › Neue Gesetze und Regulierungen zur Beschleunigung der Energiewende und Schutz kritischer Infrastrukturen
- › Steigender Energiebedarf

Technisch

- › Ausstieg aus Kernkraft und Kohle
 - › Paradigmenwechsel
- › Ausbau Erneuerbare Energien
 - › Volatile Erzeugung
 - › Elektrifizierung der Sektoren
 - › Dezentralisierung
- › Digitalisierung
 - › Lernende Systeme / KI
 - › Automatisierung
 - › Internet of Things
 - › Industrie 4.0
- › Steigende Komplexität
 - › Mehr, neue Akteure
 - › Bottom-up Energieflüsse
- › Sektorenkopplung
 - › Power-to-X
 - › Flexibilität
 - › Speicher
- › EU Vernetzung

Unsicherheiten

Allgemein

- › Effekte des Klimawandels
- › Geopolitische Konflikte
- › Internationale Abhängigkeiten
- › Naturschutzkriterien
- › Lobbyismus
- › Steigende Preise
- › Schwankende Bürgerakzeptanz
- › Marktentwicklungen
- › Politische Entscheidungen
- › EU-weite Entscheidungen

Technisch

- › Effekte der Energiewende
- › Lieferkettenstörungen (Chipmangel, Rohstoffe)
- › Höhere (IKT-) Anforderungen durch Komplexität
- › Redundanz durchgängig mit n-1 Prinzip noch tragbar?
- › Cyberrisiken
- › Funktionalität vs. Sicherheit
- › Disruptive Technologien

Belastungen & Risiken

Risikodimensionen

- › Vorhersagbarkeit
- › Zeitliches Ausmaß
- › Größe der Ausdehnung der Belastung
- › Konsequenzen/Schadenpotenzial

Natur

- › Extremwetter (Hitze, Kälte, Hagel, Dürre)
- › Umweltkatastrophen (Feuer, Stürme, Überschwemmungen, Erdbeben)
- › Wetter – Fluktuationen

Konflikte

- › Cyberattacken
- › Terrorismus
- › Kriege
- › Erpressung über Abhängigkeiten (Brenn-, Rohstoffe, Komponenten)

Technisch

- › Menschliche Bedienfehler
- › Veraltete Technik
- › Technisches Versagen (u.a. Produktverschleiß, IKT Fehler)
- › Mangelndes Monitoring und Steuerung
- › Komplexität, Vertrauen in Automatisierung
- › Instandhaltungsmaßnahmen (normalerweise planbar)

Weitere

- › Komponentenmangel
- › Falsche Marktanreize
- › Personalmangel
- › EU-weite/Internationale Unterschiede in Technologie und Standards
- › Langsamer Netzausbau und -umbau



Abb. 11.2 Übersicht zu Trends, Unsicherheiten und Risiken des Energiesystems (Quelle: Institut für Innovation und Technik (iit), eigene Darstellung)

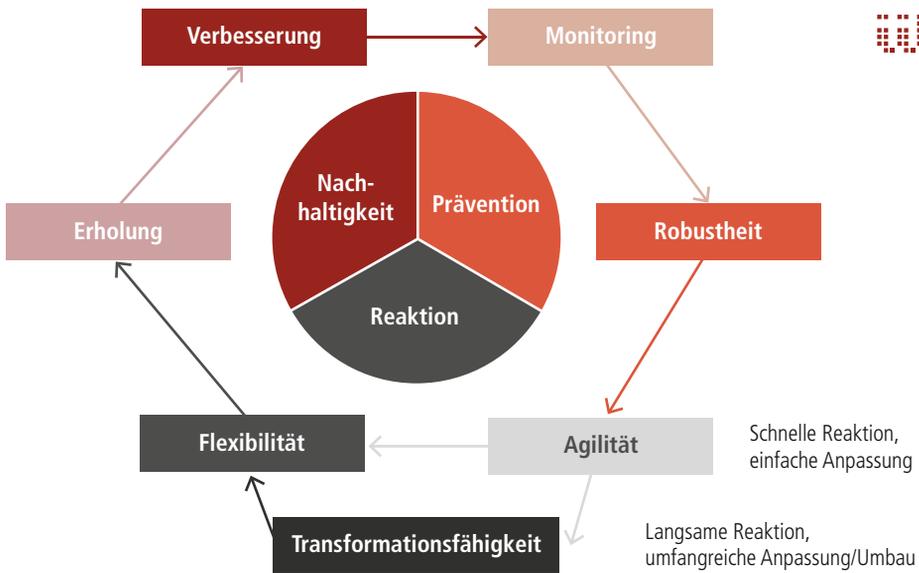


Abb. 11.3 Kreisprozess des resilienten Energiesystems (Quelle: Institut für Innovation und Technik (iit), eigene Darstellung)

ergänzen sich mit neuen agilen und flexiblen Möglichkeiten wie der automatisierten Überwachung und Steuerung, lernenden Systemen, vorausschauender Instandhaltung, Speichern, Lastmanagement und dezentralen unabhängigen Strukturen.

Für den Großteil der Vorkommnisse im Strom- und Gasnetz sind vorbeugende Schutzmaßnahmen oder praktisch augenblickliche Reaktionen das Mittel der Wahl. Dabei bleiben die Auswirkungen einer Störung im Hintergrund und werden von den Nutzern häufig gar nicht bemerkt. Allerdings müssen sich Betreiber von Energiesystemen auch auf Störungen vorbereiten, die das Potenzial haben, die Systemstabilität deutlich zu beeinflussen mit der Folge, dass es in Teilen oder im schlimmsten Fall im gesamten Netz zu Einschränkungen oder Ausfällen kommt. Bis hin zum vielbeschworenen Blackout, also einem überregionalen und länger andauernden Versorgungsausfall, der damit auch weitere kritische Infrastruktur ausfallen lässt. In solch einem Fall gilt als Prämisse für Resilienz, durch Robustheit und agiles Verhalten die Belastungen abzumildern und vorrangig kritische Strukturen des Energienetzes zu schützen oder wiederherzustellen. Daraufhin folgt eine schnellstmögliche Erholung zur Rückkehr in einen stabilen Zustand und dann schrittweise in einen Betrieb, der zukünftig besser vorbereitet ist.

Resilienzmaßnahmen für das Energiesystem entlang der Prozessschritte

Monitoring

- › Identifizieren von Schwachstellen und Risiken
- › Störungen schnell erkennen
- › Predictive Maintenance
- › Betriebsoptimierung

Robustheit

- › Energie einsparen und Effizienz
- › Redundanz wo möglich
- › Dezentralisierung
- › mehr Netzknoten
- › inselfähige Netzabschnitte
- › Infrastruktur auf Klimawandel vorbereiten
- › Netzausbau beschleunigen
- › Soziale Akzeptanz sicherstellen

Agilität / Flexibilität

- › Lastmanagement
- › Automatisierung
- › MicroGrids
- › Speicher einbinden
- › Stabilität, mit Priorisierung

Transformation

- › Gesetze, Regeln anpassen
- › Diversität von Energieträgern und Importquellen
- › Eigene Power-to-X Infrastrukturen
- › Elektrifizierung
- › Digitalisierung
- › Strommarktdesign reformieren
- › Bürgerbeteiligung
- › System von „fail-safe“ auf „safe-to-fail“ umgestalten

Erholung

- › Internationaler Zusammenhalt, z.B. EU-weiter Ausgleich
- › Notfallplanung
- › Katastrophenschutz, Schutzmaßnahmen
- › Puffer aufstocken
- › Training

Verbesserung

- › Resilienz-Strategie weiterentwickeln
- › Leistungsfähigkeit erhöhen
- › Ausbildung / Weiterbildung stärken
- › Staatliche Förderung von Resilienz
- › Ökologisch sinnvolle Anreize
- › Offene Fehlerkultur und best practice Erfahrung nutzen
- › lernende Systeme nutzen



Abb. 11.4 Maßnahmen für ein resilientes Energiesystem (Quelle: Institut für Innovation und Technik (iit), eigene Darstellung)

Belastungen im Kreisprozess resilienten Handelns können auch zu langfristigen Transformationsprozessen führen. Hierbei stehen zunächst Modifikationen von Gesetzen und Regularien im Mittelpunkt. Die Reaktion zur Minderung der politischen Abhängigkeit von russischen Rohstoffen gehört in diese Kategorie. Letztlich kann auch die sich über Jahrzehnte hinziehende Systemtransformation der Energiewende zur Umstellung auf Erneuerbare Energien und Anpassung des Energiesystems an den Klimawandel als resiliente Reaktion auf Belastungen betrachtet werden.

Im weiteren Artikel wird einerseits auf den Ist-Zustand, die Entwicklungstrends und die Risiken im Energiesystem näher eingegangen, andererseits werden potenzielle Maßnahmen und Handlungsfelder beleuchtet. Ein Überblick zu Resilienzmaßnahmen entlang der Kreisprozessschritte findet sich in Abb. 11.4.

Die Wende zu Energiesystemen der Zukunft

An die Energiesysteme der Zukunft werden altbekannte, aber auch ganz neue Anforderungen gestellt werden. Die wichtigste ist und bleibt die Ausfallsicherheit. Das klassische Stromnetz zeichnet sich durch ein Erzeugeroligopol aus. Wenige große Energieerzeuger stellen die Energie im Stromnetz bereit, die aktuell verbraucht wird. Die Zuverlässigkeit der Energienetze wird vor allem durch inhärente Redundanz sichergestellt. Nach dem sogenannten n-1 Prinzip übernehmen bei einem Ausfall einer Komponente andere Komponenten deren Funktionalität. Fällt beispielsweise eine Leitung oder ein Transformator in einem Umspannwerk aus, wird die zu transportierende Energie über andere Wege und Umspannwerke umgeleitet, so dass weiterhin ein stabiler Betrieb möglich ist. Somit dürfen die Komponenten des Systems nie voll ausgelastet sein, da zu jeder Zeit Kapazitäten für den Ausfall an anderer Stelle bereitgehalten werden müssen. Energieträger im klassischen Stromnetz waren vor allem Kohle, Erdgas und Kernenergie. Diese Art der Energieversorgung geht zwar einher mit einer guten Versorgungssicherheit, aber bekanntermaßen auch mit der immensen Problematik von Klimakrise, Abhängigkeit, Ressourcenraubbau, radioaktiven Abfällen und dem Tank-Teller-Konflikt¹ sowie dramatischer Entwaldung.

Inzwischen nimmt in Deutschland die Energiewende konkrete Formen an. Im Laufe des Jahres 2022 wird der Ausstieg aus der Kernenergie vollzogen, und die letzten drei Nuklearkraftwerke werden gemäß Atomgesetz (AtG) abgeschaltet.² Auf Basis des Urteils des Bundesverfassungsgerichts 2021, in dem das Klimaschutzgesetz der Bundesregierung von 2019 in Teilen als nicht-grundrechtskonform eingestuft wurde (Bundesrechnungshof 2022), da so die Gefahren des Klimawandels auf Zeiträume nach 2030 und zulasten jüngerer Generation verschoben würden, und gemäß des Koalitionsvertrags der neuen Bundesregierung 2021 wird der Ausstieg aus der Braunkohleverbrennung vorgezogen auf „möglichst bis 2030“. Dafür muss der Ausbau der Erneuerbaren Energien massiv vorangetrieben werden. Die im „Osterpaket“ der Bundesregierung 2022 verabschiedeten Maßnahmen unterstützen dies bereits in vielerlei Hinsicht (BMWK 2022).

¹ *Der Ausdruck Tank-Teller-Konflikt bezeichnet die Diskussion um die Konkurrenz vom Anbau von Energiepflanzen und dem Anbau von Nahrungs- oder Futtermitteln in Zusammenhang mit der Nutzung von Bioenergie. Dabei geht es zuvorderst um die Nutzungskonkurrenz vorhandener Agrarflächen.*

² *Eine Verlängerung der Laufzeiten wurde aufgrund des Ukraine-Krieges und für den Fall eines Ausfalls russischer Energielieferungen von Seiten des Bundeswirtschafts- und Bundesumweltministeriums im März 2022 geprüft und für weder sinnvoll noch verantwortungsvoll bewertet. Ein Weiterbetrieb der drei letzten Atomkraftwerke in Deutschland ist somit auszuschließen (BMWK/BMU 2022).*

Die Energieversorgung mit Strom wird künftig völlig anders organisiert sein. Das Erzeugeroligopol wird aufgebrochen und nach und nach durch eine sehr große Zahl von kleinen, mittleren und größeren Energieerzeugern ersetzt, die dezentral verteilt und mit Blick auf Versorgungssicherheit mit unterschiedlichsten Speichertechnologien hinterlegt sind. Diese Stromnetze können als nahezu unabhängige Zellen (MicroGrids) organisiert und über mehrere Ebenen zu einem Gesamtnetz gebündelt werden. Sind kleine Zellen inselbetriebs-³ und schwarzstartfähig⁴, können diese autark und unabhängig vom Gesamtsystem operieren. Die Verteilung der Energie erfolgt hier wesentlich dynamischer, überschüssige Energie wird gespeichert oder in andere Zellen abgegeben. Energieengpässe werden zuerst durch lokale Speicher oder durch andere Zellen abgedeckt. Mittels Power-to-X-Technologien können lokale Stromüberschüsse anderen Sektoren zur Verfügung gestellt werden (Konstantinidou 2021). Das heißt, überschüssiger Strom wird wahlweise in einen flüssigen Kraftstoff (Power-to-Liquid), in Wärme oder Kälte (Power-to-Heat/-Cold) oder in ein Gas (Power-to-Gas, bspw. Wasserstoff) umgewandelt – und gleichzeitig der Anteil fossiler Energieträger in den Sektoren Wärme, Verkehr und Industrie reduziert.

Allerdings ist die Erzeugung und Rückverstromung von Wasserstoff für die Energieversorgung noch nicht besonders effizient und mit hohen Energieverlusten für den Umwandlungsprozess verbunden. Wasserstoff ist kostbar. Er ist quasi der Champagner unter den Energieformen (Kemfert 2020). Die Herstellung von Wasserstoff erfordert drei- bis fünfmal so viel Energie wie die direkte Nutzung erneuerbarer Energien. Somit ist es vernünftig, Wasserstoff künftig vorrangig dort einzusetzen, wo es noch keine – vor allem elektrische – Alternative zu fossilen Energieträgern gibt. Dies trifft bspw. auf die Stahl- und Chemieindustrie sowie auf die Luftfahrt zu. Der Einsatz von Wasserstoff in anderen Sektoren beispielsweise bei der Wärmeerzeugung oder in Pkw-Antrieben, muss folglich sehr genau geprüft werden.

Ziel der Sektorenkoppelung ist es, das Energiesystem der Zukunft als abgestimmtes Gesamtsystem zu betrachten, in dem Strom, Wärme, Verkehr und Industrie mithilfe von Power-to-X-Technologien gemeinsam optimiert werden. Dies setzt allerdings voraus, möglichst viele Komponenten aktiv und dynamisch steuern zu können. Die Stabilität im klassischen Stromnetz, die auch durch die Trägheit großer Turbinen erreicht wurde, weicht mithin einem sehr agilen und reaktionsschnellen System.

³ Die Fähigkeit einer Zelle sich bei einer Netztrennung selbst und netzunabhängig zu versorgen bzw. den Eigenbedarf zu decken.

⁴ Die Fähigkeit einer Anlage (Stromerzeuger, Kraftwerk) unabhängig vom Stromnetz vom abgeschalteten Zustand ausgehend hochzufahren.

Gaskrise und Transformation der Gasinfrastruktur

Ein grundlegender Bestandteil des Energieversorgungsnetzes ist neben dem Stromnetz auch die Gasinfrastruktur. Im Jahr 2022 wurde rund ein Viertel der Primärenergieversorgung der Bundesrepublik Deutschland durch Erdgas abgedeckt (BNetzA 2022). Etwa die Hälfte aller Häuser in Deutschland wird mit Erdgas beheizt. Erdgas bleibt auch zukünftig wichtig. Nach dem Kohleausstieg soll es als letzte genutzte fossile Energiequelle die Brückentechnologie der Energiewende sein. Deutschland verfügt nach Russland, der Ukraine, den USA und Kanada über die fünfgrößten Erdgasspeicher der Welt mit einem Fassungsvermögen von rund 255 TWh (NDR 2022). In der Regel werden diese Speicher in der Heizperiode der Wintermonate geleert und in den darauffolgenden Sommermonaten wieder aufgefüllt. Die Gasinfrastruktur ist aufgrund der hohen Abhängigkeit Deutschlands von Erdgas, vor allem im Wärmesektor und in der Industrie, unbedingt als KRITIS einzustufen. Gleichwohl ist das Gasnetz in privatwirtschaftlicher Hand.

Der am 24. Februar 2022 mit dem Einmarsch russischer Truppen in die Ukraine begonnene Krieg Russlands gegen die Ukraine macht das Ausmaß der Abhängigkeit Deutschlands von russischen Rohstoffen und Energieträgern überdeutlich sichtbar.⁵ Im Jahr 2020 kamen 55,2 Prozent der Erdgasimporte aus Russland (BP und IHS Markit 2021). Über Ableger des russischen Staatskonzerns Gazprom werden weite Teile des Gasnetzes, mitunter der größte Gasspeicher Deutschlands im niedersächsischen Rehden, betrieben. Eine Gasknappheit beginnt sich bereits 2021 abzuzeichnen – eine Konsequenz dessen, dass Gazprom die von ihr betriebenen Speicher seit dem Sommer 2021 kaum befüllen ließ. Im Frühjahr 2022 lag der Füllstand des Speichers in Rehden bei weniger als 0,5 Prozent. Bundesweit waren die Gasspeicher zu rund einem Drittel gefüllt und damit etwa 12 Prozent unter dem Mittel der Vorjahre. Im April 2022 zog die Bundesregierung daraus Konsequenzen und übernahm die Kontrolle über Gazprom Germania, indem sie diese vorübergehend von der Bundesnetzagentur treuhänderisch verwalten ließ. Anfang Juni 2022 geht Bundeswirtschaftsminister Habeck mit der Gasspeicherbefüllungsverordnung (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022) noch einen Schritt weiter, um die Kontrolle über den Gasspeicher in Rehden zurückzuziehen. Die Verordnung ermöglicht die Befüllung des Speichers durch den Marktgebietsverantwortlichen Trading Hub Europe und somit die Einhaltung der Füllstandsvorgaben des Gasspeichergesetzes. Seit Kriegsbeginn in der Ukraine wurden Rufe nach einem Embargo für Öl und Gas aus Russland laut. Werden allerdings russische Steinkohle und Erdöl kurz- oder mittelfristig als substituierbar be-

⁵ Auch in der EU ist die Energieabhängigkeit von russischen Ressourcen groß. Im Jahr 2021 kamen rund 45 Prozent der Gasimporte, 27 Prozent der Rohölimporte und 45 Prozent der Steinkohleimporte aus Russland (Linher 2022).

trachtet, so könnte ein Gasembargo, egal ob von deutscher oder russischer Seite, die deutsche Wirtschaft in eine tiefe Krise stürzen (VCI 2022).

Neben einer tatsächlichen physischen Mangellage von Gas insbesondere in den Heizperioden, machen auch die explodierenden Energiepreise sowohl Unternehmen als auch Verbraucherinnen und Verbrauchern in Deutschland zu schaffen. Von der drohenden Gasmangellage ist besonders die Stahl- und die Chemieindustrie betroffen, da für Erdgas noch die Alternativen fehlen. Die Chemieindustrie nutzt Erdgas sowohl energetisch als Prozesswärme als auch stofflich zur Herstellung von Basischemikalien. Die Produkte der Chemieindustrie sind zudem in vielen Fällen Grundstoffe, die in zahlreichen anderen Industriebranchen benötigt werden. Die Abschaltung chemischer Produktionsanlagen infolge einer mangelnden Erdgaszufuhr kann sich also über sämtliche Wertschöpfungsketten bis zum privaten Endverbrauch auswirken (VCI 2022). Ein Gasembargo von deutscher und europäischer Seite ist unwahrscheinlich. Von russischer Seite hingegen wurden Gaslieferungen bereits in den ersten Monaten nach Kriegsbeginn als Reaktion auf Wirtschaftssanktionen in mehrere europäische Staaten eingestellt.

Am 30.03.2022 wurde in Deutschland die Frühwarnstufe des Notfallplans Gas (BMWi 2019) ausgerufen. In Vorbereitung auf das Eintreten einer physischen Mangellage erarbeitet die Bundesnetzagentur in ihrer Rolle als Bundeslastenverteilerin in Zusammenarbeit mit Industrievertretern mögliche Szenarien sowie eine Planung für die Verteilung und Zuteilung knapper Gasmengen. Die gegenwärtige Situation macht deutlich, dass zur Erreichung von Resilienz im Energiesystem eine umfassende Transformation der Gasinfrastruktur erforderlich ist, um sowohl eine weitgehende Unabhängigkeit herzustellen als auch die deutschen Klimaschutzziele zu erreichen (Wachsmuth et al. 2019).

Herausforderungen während der Systemtransformation

Die mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien verbundene Vervielfachung der Erzeugungsanlagen erfordert neue Ansätze, um Versorgungssicherheit herzustellen. Auch erschweren wetterbedingte Schwankungen sowie eine zunehmend inhomogene Verteilung von Erzeugungsanlagen in der Fläche eine stabile Leistung im Netz und Aufrechterhaltung einer Frequenz von 50 Hz. Häufiger auftretende Extremwetterlagen aufgrund des Klimawandels bringen zusätzliche Risiken mit sich, etwa von Sturm und Hagel beschädigte PV-Module oder Übertragungsleitungen.

Die Bereitstellung erneuerbar erzeugten grundlastfähigen Stroms⁶ kann aufgrund der Volatilität von Wind- und Solarenergie nur mithilfe weiterer Technologien, ins-

⁶ *Die Industrie benötigt erneuerbar erzeugten grundlastfähigen Strom zu international wettbewerbsfähigen Preisen.*

besondere Energiespeichern, sichergestellt werden. Auch steigen die Anforderungen an die Flexibilität der Stromerzeugung und Nutzung. So gilt es, die Einspeisung des in unterschiedlichen Anlagen erzeugten Stroms an die Verbrauchsschwankungen anzupassen. Diese Synchronisierung wird zunehmend schwieriger, je komplexer das Energiesystem wird. Eine Lösung ist die Sektorenkopplung, die die Energiewende im Sinne einer Defossilisierung auf andere Sektoren ausweitet (Konstantinidou 2021). Obschon der Fokus auf Effizienzsteigerungsmaßnahmen liegt, zeichnet sich ab, dass eine umfassende Defossilisierung aller Sektoren im Zuge einer klimaneutralen Transformation (Netto-Null-Emissionen) den Bedarf an Zukunftsressourcen wie Erneuerbaren Energien, Wasserstoff und Biomasse in ungeahnte Höhen treiben wird und eine gut durchdachte Zuteilung der Ressourcen erfordert.

Die Digitalisierung birgt als Mega-Trend sowohl Chancen als auch Risiken bei der großformatigen Transformation des Energiesystems. So sind zur Steuerung zunehmend gekoppelter Sektoren digitale Techniken zwingend erforderlich. Denn mit steigender Anzahl von Erzeugern und Verbrauchern im System und zunehmender Kopplung von Sektoren wächst der Kommunikationsbedarf einerseits zwischen den Systemelementen und andererseits zwischen Stromanbietern und -nachfragern. Nur aufgrund leistungsstarker Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) kann somit der Umbau und Betrieb der zukünftigen Energiesysteme gelingen. Dieser sieht vor, dezentrale Erzeugungsstrukturen, Elektromobilität und auch heute noch unbekannte Marktteilnehmer effizient und sicher einzubinden. Eine leistungsstarke Kommunikationsinfrastruktur wird als zentrales Nervensystem benötigt, um unterschiedliche Anwendungen, Prozesse oder virtuelle und physikalische Objekte in einem Internet der Dinge⁷ miteinander zu verknüpfen. Die Erfassung, der Austausch, die Verarbeitung und Analyse der Daten sind das Fundament für die Steuerung dieser künftig hochkomplexen Systeme. Dies wird weitgehend automatisiert stattfinden, unterstützt von Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI) und von lernenden Systemen. So werden Veränderungen im System voraussagbar, um es a priori anzupassen. Kommt es zu unvorhersehbaren Systemzuständen, kann das System einen stabilen, minimalinvasiven Zustand einnehmen, so dass es zu möglichst geringen Beeinträchtigungen kommt. Die erhobenen Daten dienen dann dazu, aus einem solchen Ereignis zu lernen und einen neuen, geeigneteren Systemzustand herzustellen. Schließlich wird ein Störfall keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die Stabilität des angepassten Gesamtsystems haben.

⁷ *Das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT) verbindet physische Objekte mit der virtuellen Welt. Intelligente Geräte und Maschinen sind miteinander und mit dem Internet vernetzt. Sie erfassen relevante Informationen über ihre unmittelbare Umgebung, analysieren diese und verknüpfen sie.*

Beim Grad ihrer Digitalisierung weisen besonders die Verteilnetze heutzutage noch eine hohe Schwankungsbreite auf (bitkom 2018). Die unteren Netzebenen (Niederspannung und Teile der Mittelspannung) sind zu großen Teilen noch nicht digitalisiert. Hoch- und Höchstspannungsnetze sind hingegen bereits mit umfassender IT-gestützter Sensorik und Aktorik ausgestattet. Die fortschreitende Digitalisierung birgt allerdings auch das Risiko, dass die Störungsanfälligkeit des Netzes zunimmt und die Gefahr von Cyberangriffen wächst. Dennoch: Die Telekommunikation wird im künftigen Energieversorgungssystem eine besondere Rolle einnehmen und ist im Rahmen der Melde-, Steuerungs- und Fernwirktechnik sowie der Sprachübermittlung integraler Bestandteil der Systemresilienz. Zu den Risiken der Digitalisierung als zentraler Voraussetzung der Transformation des Energieversorgungssystems ist schließlich auch der zu beobachtende Mangel an technischen Fachkräften anzuführen. Ohne zusätzliche Informatikkompetenzen wird es schwer, die Transformation tatsächlich umzusetzen.

Neue Risiken

Die Systemtransformation bringt auch völlig neuartige Herausforderungen mit sich, die es zu bewältigen gilt. Aufgrund der stetig zunehmenden Vernetzung im Energiebereich steigen in Zukunft die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Betreibern der IKT-Infrastruktur und der Energiesysteminfrastruktur. Die IKT-Infrastruktur ist zwar auf die Energiesysteminfrastruktur angewiesen, steuert und regelt diese aber zugleich. Angriffe auf die IKT-Infrastruktur können so direkten Einfluss auf die physikalische Welt ausüben, und ein längerer Ausfall der Energieversorgung direkten Einfluss auf die IKT-Infrastruktur haben. Mögliche neue Risiken sind:

- Die Vielzahl an kleinen, aufgrund der Digitalisierung aktiv steuerbaren Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen wird durch die Möglichkeit von simultanem Verhalten systemrelevant.
- Fehlverhalten der IKT kann massive Auswirkungen haben. Softwarefehler, Bedienungsfehler oder Cyberangriffe lassen das Risiko anwachsen.
- Die technische Systemkomplexität erschwert die Vorhersage im operativen Betrieb der Netzbetreiber.
- Die Unvorhersehbarkeit weiterer zukünftiger Entwicklungen erschweren ein optimales Systemdesign.

Die Störung des Satelliten-Netzwerks KA-SAT im Februar 2022 hat verdeutlicht, welche Gefahren mit der Digitalisierung der Energienetze verbunden sein können (Krempf 2022). Die Störung schränkte den Betrieb von etlichen tausend Windenergieanlagen in Zentraleuropa ein. Die Windkraftträder erzeugten Strom, waren aber

für eine Überwachung und Steuerung aus der Ferne nicht mehr erreichbar. Ursache war eine massive Cyberattacke auf den Betreiber des KA-SAT Netzwerkes, bei der zehntausende Breitbandmodems außer Betrieb gesetzt wurden, und zwar zeitgleich zum bewaffneten Angriff Russlands auf die Ukraine. Der Angriff sollte offenbar vor allem Kunden in der Ukraine vom Satelliteninternet abschneiden, verursachte aber auch in ganz Europa starke Einschränkungen.

Was tun gegen den Blackout?

Der Thriller „Blackout - Morgen ist es zu spät“ (2012) von Marc Elsberg veranschaulicht mit drastischen Bildern, welche Auswirkungen eine Cyberattacke auf eine vernetzte Energieinfrastruktur haben kann. Um Blackout-Risiken zu minimieren haben Expertinnen und Experten des Projektes „Energiesysteme der Zukunft“⁸ 15 Handlungsoptionen für ein resilientes Energiesystem vorgestellt, das den Neuerungen in einer digitalisierten Welt Rechnung trägt. Klassisches Risikomanagement reicht nach Einschätzung der Arbeitsgruppe nicht mehr aus. Die zunehmenden Wechselwirkungen zwischen elektrischem Energiesystem und den Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) könnten ohne die Entwicklung passender Konzepte zu bisher unbekanntem Störereignissen führen, die schlimmstenfalls großflächige und mehrere Stunden andauernde Stromausfälle verursachen. Die 15 Handlungsempfehlungen lassen sich in folgende Handlungsfelder einordnen:

- Wechselwirkung IKT und Energie verstehen und lenken
- Cyber-Sicherheit systemisch entwickeln
- Technische Resilienz durch Netzbetreiber und Netznutzer stärken
- IKT-Integration kleiner Anlagen netzdienlich gestalten
- Anreize für Netzbetreiber zur Steigerung der Resilienz stärken
- Beteiligung von Privatakteuren bei der Gestaltung und Umsetzung von Resilienz sicherstellen
- Langfristige Risiko- und Resilienzbewertung institutionalisieren

⁸ Eine Initiative der Wissenschaftsakademien (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften) für eine nachhaltige, sichere und bezahlbare Energieversorgung (Leopoldina et al. 2021).

Wege zur Resilienz

Die Resilienz des EU-Energiemarkts ließe sich bei vollständiger Umsetzung der Vorschläge von „Fit-for-55 – Der EU-Plan für den grünen Wandel“ dramatisch erhöhen (Europäischer Rat 2022). Das vorgeschlagene Paket zur Reduzierung der Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 Prozent beinhalten u. a. eine Senkung des Gasverbrauchs um 30 Prozent bis 2030. Der russische Angriffskrieg auf die Ukraine macht nun deutlich, dass energiewirtschaftliche Fragen auf europäischer Ebene auch als geopolitische Strategie- und Sicherheitsfragen behandelt werden müssen. Dazu erarbeitet die Initiative RePowerEU Strategien zur Gewährleistung der Energieversorgungssicherheit in EU Ländern und zur Abfederung hoher Energiepreise infolge des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine (Europäische Kommission 08.03.2022).

Als ein langfristiges Ziel benennt die Initiative die Beendigung der russischen Energieimporte. Der Verzicht auf russisches Gas ist hierbei die größte Herausforderung, doch ein Großteil lässt sich durch Einsparungsmaßnahmen und eine Diversifizierung der Gaslieferungen erreichen. Dazu zählen Flüssiggas, diversifizierte Pipelineimporte, die Verdopplung der Biomethanproduktion, die Beschleunigung des Wasserstoffmarkt-Hochlaufs und eine zunehmende Elektrifizierung. Gleichzeitig muss die Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen generell beschleunigt werden. Bereits innerhalb weniger Monate konnten laut dem zweiten Fortschrittsbericht Energie-sicherheit im Frühjahr 2022 bei der Reduzierung der Abhängigkeit von russischen Energieträgern in Deutschland deutliche Fortschritte erzielt werden (che/dpa 2022)⁹. Insgesamt sollte jedoch auch zwingend eine Neubewertung von Erdgas als Brückentechnologie erfolgen. Die Verstaatlichung der Gasinfrastruktur kann ebenfalls zur Resilienz des Energieversorgungssystems beitragen.

Bei der Diversifizierung von Importquellen sollten möglichst Energiepartnerschaften mit europäischen Partnern eingegangen werden, die Energieabhängigkeiten schaffen und somit zugleich Sicherheitsgarantien geben. Daneben sollte der Aufbau einer heimischen Produktion von Wasserstoffinfrastruktur intensiv vorangetrieben werden, um zumindest einen Teil des Bedarfs hierzulande decken zu können. Wie bereits in der Corona-Pandemie sichtbar wurde und nun der Krieg in der Ukraine in aller Deutlichkeit erneut vor Augen führt, muss es ebenfalls darum gehen, resiliente Lieferketten aufzubauen. Die in den letzten Jahrzehnten der Globalisierung gewachsenen Lieferketten und Stoffströme erweisen sich im Licht der aktuellen Krisen häufig als höchst anfällig. Dies gilt insbesondere für die Versorgung Deutschlands mit Energie-

⁹ Die Abhängigkeit von russischem Öl ist demnach von etwa 35 Prozent in 2021 auf 12 Prozent im April 2022 gesunken, Kohle von 50 Prozent auf rund acht Prozent. Der Importanteil von russischem Gas ist von 55 Prozent auf etwa 35 Prozent gesunken.

trägern und grundlegenden Rohstoffen. Die europäische und internationale Zusammenarbeit, unter anderem im Rahmen der Europäischen Kritischen Infrastrukturen (EKI), war und ist zwar häufig nicht einfach, sie bietet aber jetzt die aus der Not geborene Chance zur Einsicht, dass nur in dieser Zusammenarbeit auf globale Gefahren und Krisen eine weitreichende, gemeinsame Antwort zu finden ist.

Die tägliche Steuerung des Energiesystems und die Reaktion auf Störungen werden sich im weiteren Verlauf der Energiewende und unter dem Einfluss des Klimawandels immer ähnlicher. Das künftige weitaus komplexere Energiesystem befindet sich kontinuierlich „unter Belastung“ und ist andauernd aktiver Steuerung und Regelung ausgesetzt, die zum Großteil auf die angeführten Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz zurückgreifen. Der Kreisprozess des resilienten Handelns wird somit zum Normalzustand. Dies führt zu einer kontinuierlichen Alarmbereitschaft und Verbesserung, um den Risiken und Belastungen zu begegnen.

Begreift man die Energiewende und die Digitalisierung des Energiesystems als Chance und nimmt die Herausforderung an, dann können eine größtmögliche Unabhängigkeit von Energieträgerimporten, Versorgungssicherheit und die Erreichung der Treibhausgas-Neutralität Hand in Hand gehen. Nur so kann schließlich auch für zukünftige Generationen Sicherheit und Wohlstand erreicht werden.

Literatur

- bitkom (2018): Ausfallsicherheit des Energieversorgungssystems - Von der Robustheit zur Resilienz. Positionspapier. Unter Mitarbeit von Robert Spanheimer. Hrsg. v. Bitkom - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/sites/main/files/file/import/180530-Diskussionspapier-Resilienz-des-Energieversorgungssystems-online-final-2.pdf>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- BMI (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen. BMI-Broschüre KRITIS-Strategie. Hrsg. v. Bundesministerium des Innern, Referat KM 4. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.pdf%20?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- BMWi (2019): Notfallplan Gas für die Bundesrepublik Deutschland. gemäß Art. 8 der VERORDNUNG (EU) 2017/1938 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. Oktober 2017 über Maßnahmen zur Gewährleistung der sicheren Gasversorgung und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 994/2010. Hrsg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/notfallplan-gas-bundesrepublik-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 15.06.2022.

- BMWK (2022): Überblickspapier Osterpaket. Hrsg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf?__blob=publicationFile&v=14, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- BMWK/BMUV (2022): Prüfung des Weiterbetriebs von Atomkraftwerken aufgrund des Ukraine-Kriegs. Hrsg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/pruefvermerk-laufzeitverlaengerung-atomkraftwerke.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- BNetzA (2022): Gas: Krisenmanagement und -vorsorge. Hrsg. v. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Krisenmanagement_Krisenvorsorge/start.html, zuletzt aktualisiert am 02.05.2022, zuletzt geprüft am 02.05.2022.
- BP; IHS Markit (2021): Verteilung der Erdgasbezugsquellen Deutschlands im Jahr 2020. In: *BP Statistical Review of World Energy*, S. 45. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151871/umfrage/erdgasbezug-deutschlands-aus-verschiedenen-laendern/>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- BSI (2021): Gesetz zur Umsetzung der NIS-Richtlinie. Hrsg. v. BSI - Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. Online verfügbar unter https://www.bsi.bund.de/DE/Das-BSI/Auftrag/Gesetze-und-Verordnungen/NIS-Richtlinie/nis-richtlinie_node.html;jsessionid=CDDDA97F3120F736743126F680ADDDCC.internet081, zuletzt aktualisiert am 19.01.2021, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Verordnung zur Zurverfügungstellung unterbrechbarer Speicherkapazitäten zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Gasspeicherbefüllungsverordnung – GasSpBefüllV. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/gasspeicherbefuellungsverordnung-gasspbefullv.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- Bundesrechnungshof (2022): Bericht nach § 99 BHO zur Steuerung des Klimaschutzes in Deutschland. Sonderbericht. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bundesrechnungshof.de/de/veroeffentlichungen/produkte/sonderberichte/2022-sonderberichte/bund-muss-beim-klimaschutz-zielgerichtet-steuern/@@download/langfassung_pdfhttps://www.bundesrechnungshof.de/de/veroeffentlichungen/produkte/sonderberichte/2022-sonderberichte/bund-muss-beim-klimaschutz-zielgerichtet-steuern, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- che/dpa (2022): Energiekrise: Deutschland wird unabhängiger von Kohle, Öl und Gas aus Russland. In: *DER SPIEGEL Wirtschaft*, 2022. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/wirtschaft/energiekrise-deutschland-wird-unabhaengiger-von-kohle-oel-und-gas-aus-russland-a-086d3b7f-d911-4e69-ab92-0f264f6ce1e8>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- Europäische Kommission (08.03.2022): REPowerEU. Joint European action for more affordable, secure energy. Pressemitteilung. Strasbourg. McPHIE, Tim; Crespo Parrondo, Ana; Bedini, Giulia. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1511, zuletzt geprüft am 15.06.2022.

- Europäischer Rat (2008): Schutz kritischer Infrastrukturen. EUR-Lex - 32008L0114. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGIS-SUM%3Ajl0013>, zuletzt geprüft am 03.05.2022.
- Europäischer Rat (2022): „Fit für 55“. Der EU-Plan für den grünen Wandel. Rat der Europäischen Union. Online verfügbar unter <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>, zuletzt aktualisiert am 15.06.2022, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- Kemfert, Claudia (2020): Wasserstoff: Grün und effizient! In: *Wirtschaftsdienst* 100 (12), S. 906. <https://doi.org/10.1007/s10273-020-2793-1>.
- Konstantinidou, Eleni (2021): Power-to-X-Technologien für die Sektorenkopplung. VDI Agenda November 2021. In: *VDI Verlag GmbH*, 25.11.2021. Online verfügbar unter <https://www.vdi.de/news/detail/power-to-x-technologien-fuer-die-sektorenkopplung>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- Krempl, Stefan (2022): Viasat: Wiper-Malware hat Ausfall des Satellitennetzwerks KA-Sat verursacht. In: *heise online*, 02.04.2022. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/news/Viasat-Wiper-Malware-hat-Ausfall-des-Satellitennetzwerks-KA-Sat-verursacht-6661499.html>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- Leopoldina - Deutsche Akademie der Naturforscher; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften (2021): Energiesysteme der Zukunft. Fit für die Zukunft: Wissenschaftsakademien legen Optionen für resilientes, digitalisiertes Energiesystem vor. Online verfügbar unter <https://energiesysteme-zukunft.de/presse/meldung/resilienz-digitalisierter-energiesysteme>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- Linher, Sigrid (2022): Aktueller Lagebericht zu EU-energiewirtschaftlichen Maßnahmen. Aktueller Lagebericht. Unter Mitarbeit von BDI-Taskforce "Russland-Ukraine", 22.04.2022.
- Mayer, Christoph; Brunekreeft, Gert; Blank-Babazadeh, Marita; Stark, Sanja; Buchmann, Marius; Dalheimer, Mathias et al (Hrsg.) (2021): Resilienz digitalisierter Energiesysteme. Blackout-Risiken verstehen, Stromversorgung sicher gestalten. Leopoldina - Deutsche Akademie der Naturforscher; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften. München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft Analyse). Online verfügbar unter https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Analyse_Digitalisierung.pdf, zuletzt geprüft am 28.04.2022.
- NDR (2022): Gasspeicher in Deutschland: So steht es um die Füllstände. In: *NDR Nachrichten*, 15.06.2022. Online verfügbar unter <https://www.ndr.de/nachrichten/info/Gasspeicher-in-Deutschland-So-steht-es-um-die-Fuellstaende,gasspeicher120.html>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- VCI (2022): Erwartung der Branche ist gekippt. Wirtschaftslage der Chemischen Industrie und Folgen des Ukraine-Krieges, presse@vci.de. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/22-03-17-erwartung-der-branche-ist-gekippt.pdf>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (Hrsg.) (2018): 40 Jahre für Innovation und Technik.

Kapitel: Transformation der Energieversorgung. Unter Mitarbeit von Stefan Wolf, Markus Gaaß und Roman Korzynietz. Berlin.

Wachsmuth, Jakob; Michaelis, Julia; Neumann, Fabian; Wietschel, Martin; Duscha, Vicki; Degünther, Charlotte; Köppel, Wolfgang; Zubair, Asif (2019): Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe; DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_cc_12-2019_roadmap-gas_2.pdf, zuletzt geprüft am 02.05.2022.



Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de> veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.