



BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Pauline Riousset
Christoph Kehl

Komplexe Systeme – Nutzen oder Last?

TA-Vorstudie

März 2024
Arbeitsbericht Nr. 208





Pauline Rioussel
Christoph Kehl

Komplexe Systeme – Nutzen oder Last?

TA-Vorstudie

TAB-Arbeitsbericht Nr. 208



Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de

2024

Umschlagbild: pitinan/123RF

ISSN-Internet: 2364-2602

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.



Inhalt

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	7
2 Was sind komplexe Systeme?	9
3 Zwischen Ordnung und Unordnung: systemische Risiken und Resilienz	17
4 Fallbeispiel Energiesystem	25
5 Schlussfolgerungen und mögliche Vertiefungsthemen	33
6 Literatur	37
7 Abbildungen	45

^
v >



Zusammenfassung

Komplexität ist vielen Systemen inhärent – von lebenden Organismen bis hin zum globalen Finanzsystem. Komplexe Systeme haben gemeinsam, dass sie nicht vollständig verstanden oder beschrieben werden können. Das liegt an ihren strukturellen und dynamischen Eigenschaften, die von nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen gekennzeichnet sind und unter Umständen zu unerwartetem Systemverhalten führen können. Politisch relevant sind insbesondere soziotechnische Systeme, die für das Funktionieren der Gesellschaft von kritischer Bedeutung sind – sogenannte kritische Infrastruktursysteme. Kritische Infrastrukturen bestehen in der Regel aus vielen Komponenten, die in einer Netzstruktur zusammenwirken. Aufgrund ihrer Komplexität und engen Vernetzung können relativ kleine Störungen zu Kaskadeneffekten bis hin zu Systemversagen führen. Systemische Risiken, die ein weitreichendes Systemversagen auslösen können, lassen sich am ehesten über die Analyse soziotechnischer Trends untersuchen. In dieser Vorstudie wird dargelegt, warum das Energiesystem für eine Analyse im Rahmen eines umfassenden TA-Projekts besonders geeignet erscheint. Darüber hinaus werden Themenbereiche aufgezeigt, die sich für eine Vertiefung anbieten. Dazu gehören die Analyse systemischer Risiken durch Sonnenstürme, der Einsatz künstlicher Intelligenz, die Rohstoff- und Lieferantenabhängigkeiten, die sich aus einem zunehmend komplexen Energiesystem ergeben können, sowie die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit kritischer Energieinfrastrukturen unter sich ändernden klimatischen Bedingungen.





1 Einleitung

Komplexe Systeme bilden das Rückgrat moderner Industriegesellschaften. Dazu gehören etwa Energie-, Kommunikations-, Logistik- und Produktions- sowie Frühwarnsysteme. Das Funktionieren derartiger Systeme hängt vom Zusammenspiel verschiedener Elemente unterschiedlicher Art ab und ist entsprechend potenziell störungsanfällig. Die zahlreichen Wechselwirkungen und Rückkopplungen machen es schwer, das Verhalten eines solchen Systems vorherzusagen. Schon kleine Störungen können zu weitreichenden, ggf. unerwünschten Veränderungen im Systemzustand führen. Durch die fortschreitende Digitalisierung haben der Vernetzungsgrad sowie die Komplexität kritischer Infrastrukturen in den letzten Jahren zugenommen und dürften in Zukunft noch weiter zunehmen. Deshalb stellt sich die Frage, wie sich die wachsende Komplexität auf Vulnerabilität und Resilienz der Infrastrukturen auswirkt.

Das TAB wurde vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung mit der Durchführung dieser TA-Vorstudie beauftragt. Ziel ist es, Systeme und Teilsysteme zu identifizieren, die einen Komplexitätsgrad erreicht haben, bei welchem bei einer Störung oder einem Ausfall von einer Gefahrenlage für die Gesellschaft ausgegangen werden kann und für die eine vertiefte Untersuchung als TA-Projekt geeignet erscheint. Mit der vorliegenden Analyse werden die Ergebnisse dieser Voruntersuchung zusammengefasst: Sie basiert auf einer Literaturübersicht sowie der Befragung von Expert/innen. Ergänzend wurde die durch künstliche Intelligenz (KI) unterstützte Medienmonitoringplattform »RS-Lynx« einbezogen, um zu untersuchen, welche der Risiken komplexer Systeme in der Öffentlichkeit besonders diskutiert werden und welche Themen dabei im Vordergrund stehen.

Die Vorstudie ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden komplexe Systeme und ihre Merkmale charakterisiert und es wird erläutert, warum Infrastruktursysteme als komplexe Systeme gesellschaftlich besonders im Fokus stehen. In Kapitel 3 werden weitere zentrale Begriffe wie systemisches Risiko und Resilienz eingeführt, die für die Analyse komplexer Systeme und ihrer Ausfallrisiken von Bedeutung sind. Mit dem Energiesystem wird in Kapitel 4 ein Infrastruktursystem diskutiert, das – so das Ergebnis dieser Vorstudie – für eine Analyse im Rahmen eines umfassenden TA-Projekts besonders geeignet erscheint. Die möglichen inhaltlichen Schwerpunkte eines solchen Projekts sowie das jeweilige Vorgehen werden zusammen mit weiteren Schlussfolgerungen im abschließenden Kapitel 5 dargestellt.

^
v >



2 Was sind komplexe Systeme?

In verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, wie der Physik, der Biologie, der Kybernetik sowie der Ökologie, wird der Begriff der Komplexität schon lange verwendet. Er beschreibt, grob zusammengefasst, funktionale Strukturen bzw. Systeme, die aus einer heterogenen Vielfalt von Komponenten bestehen, die miteinander und mit der Umwelt in nichtlinearer Weise interagieren und zu einem kohärent funktionierenden Gesamtsystem beitragen. So ist ein lebender Organismus ein komplexes System, weil er unzählige Bestandteile umfasst, die in kaum überschaubaren Beziehungen zueinanderstehen, und beständig Energie, Stoffe und Informationen mit der Umwelt austauschen. Gleichzeitig handelt es sich bei Lebewesen um hochgradig geordnete Strukturen, die durch Umsetzung genetischer Codes entstehen (Goldenfeld/Kadanoff 1999, S. 87).

Komplexität ist vielen Systemen inhärent. Das globale Finanzsystem, internationale Beziehungen oder Verkehrsmuster können und wurden als komplex beschrieben (Page 2015, S. 23). Auch wenn die Betrachtung menschlichen Verhaltens bislang eher selten Gegenstand von Forschungsvorhaben zu Komplexität war, ist Komplexität auch in der Soziologie ein begrifflicher Ankerpunkt zur Erklärung gesellschaftlicher Phänomene und Ordnungen (Hauff 2022; Lutz-Bachmann 2022; Page 2015, S. 23). Im Zuge der Globalisierung werden zunehmend auch Beziehungsmuster zwischen Gesellschaften aus der Komplexitätsperspektive soziologisch erforscht. So beschreiben Centeno et al. (2015), wie gesellschaftliche Interaktionen auf globaler Ebene systemisch zusammenwirken, und zeigen anhand von vier Beispielen (kontinuierlicher Fluss von Waren sowie von Geld, Aufrechterhaltung einer globalen Infrastruktur und Interaktion menschlicher Gesellschaften mit dem Klimasystem), wie daraus globale systemische Risiken entstehen.

Komplexe Systeme haben gemeinsam, dass sie über unzählige Zustände und Verhaltensmöglichkeiten verfügen können, die unter Umständen schwer oder gar nicht vorhersagbar sind (Johansen/Rausand 2014, S. 276). Dennoch ist das Systemverhalten in der Regel nicht chaotisch. Wie die Kybernetik gezeigt hat, beruhen komplexe Systeme auf den Prinzipien der Selbstorganisation und Selbstregulierung, wodurch sich ein Gleichgewicht einstellt (Müggenburg 2019). Diese systemische Ordnung beruht allerdings auf nichtlinearen internen Regelungsprozessen: Das Verhalten einzelner Komponenten wird durch das Verhalten anderer Einzelkomponenten, aber auch durch die Makroeigenschaften des Systems und durch externe Einflüsse bestimmt, die wiederum durch das Verhalten einzelner Komponenten beeinflusst werden (Page 2015, S. 27). In der Konsequenz können sich die Effekte eines Ereignisses durch positive Rückkopplungsschleifen im System verstärken oder durch negative Rückkopplungsschleifen abschwächen. Dieses dynamische Systemverhalten ist für Anpas-



sungsprozesse an veränderte Bedingungen erforderlich, kann aber zu Chaos und im Extremfall zum Systemzusammenbruch führen.

Ein Unterschied besteht zwischen Komplexität und Kompliziertheit (Dekker et al. 2011, S. 942): Komplizierte Systeme (wie z. B. ein Flugzeug) sind zwar schwer zu verstehen, aber im Prinzip vollständig beschreibbar. Auf komplexe Systeme trifft das hingegen nicht zu, da sie aufgrund ihrer strukturellen und dynamischen Eigenschaften nicht vollständig versteh- oder beschreibbar sind (Abb. 2.1). Sind Menschen mit einem System konfrontiert, dessen Komponenten und Interaktionen sie kennen, dessen Verhalten sich allerdings nicht gänzlich verstehen und vorhersehen lässt, kann Komplexität bei Ihnen ein Gefühl der Unbehaglichkeit hervorrufen (Mitchell 2009).

Abb. 2.1 Unterschied zwischen komplexen und komplizierten Systemen

Vielzahl/Vielfalt	hoch	kompliziertes System › viele Elemente und Beziehungen › wenige Verhaltensmöglichkeiten › stabile Wirkungsverläufe	äußerst komplexes System › Vielzahl von unterschiedlichen Elementen mit vielfältigen Beziehungen › hohe Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten › veränderliche Wirkungsverläufe
	gering	einfaches System › wenige Elemente und Beziehungen › wenige Verhaltensmöglichkeiten › stabile Wirkungsverläufe	relativ komplexes System › wenige Elemente und Beziehungen › hohe Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten › veränderliche Wirkungsverläufe
		gering	hoch
		Veränderung/Eigendynamik	

Quelle: nach Grösser 2015

Kritische Infrastruktursysteme als komplexe Systeme

Aus der Perspektive der Technikfolgenabschätzung sind vor allem komplexe soziotechnische Systeme interessant. Darunter werden Systeme verstanden, die aus technischen und sozialen Elementen (z. B. Menschen und Organisationsprinzipien) bestehen (Johansen/Rausand 2014, S. 273).

Zu den soziotechnischen Systemen, die einen hohen Anteil technischer Komponenten und einen hohen Komplexitätsgrad aufweisen, gehören kritische Infrastrukturen (Strauß/Bettin 2023, S. 13). Seit 2023 verpflichtet die Richtlinie



(EU) 2022/2557¹ EU-Mitgliedstaaten dazu, kritische Einrichtungen zu identifizieren und deren Widerstandsfähigkeit gegenüber Bedrohungen wie Naturgefahren, Terroranschlägen oder Sabotage zu stärken. In Deutschland werden kritische Infrastrukturen wie folgt definiert (BBK o. J.c): »Kritische Infrastrukturen (KRITIS) sind Organisationen oder 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«. 2011 entschieden Bund und Länder, kritische Infrastrukturen in neun Sektoren zu unterteilen, die 2021 mit der Novellierung des BSI-Gesetzes (BSIG)² um einen zehnten Sektor (die Siedlungsabfallwirtschaft) ergänzt wurden (Abb. 2.2).

Abb. 2.2 Kritische Infrastrukturen



- 1 gemäß BSIG
- 2 gemäß Bund-Länder-AG

Quelle: BBK o.J.a

1 Richtlinie (EU) 2022/2557 über die Resilienz kritischer Einrichtungen und zur Aufhebung der Richtlinie 2008/114/EG
2 BSI-Gesetz vom 14.8.2009, zuletzt geändert am 23.6.2021



Für jeden Sektor wurden kritische Dienstleistungen identifiziert. Mit dem BSIG sowie der BSI-Kritisverordnung (BSI-KritisV)³ sind kritische Infrastrukturen in Deutschland umfassend reguliert. In der BSI-KritisV werden kritische Dienstleistungen definiert sowie Einrichtungen, Anlagen oder Teile, deren IT-Infrastruktur es besonders zu schützen gilt (BSI o. J.). Die Einteilung der Infrastrukturen in Sektoren und Branchen wird allerdings stetig evaluiert und angepasst, um den politischen Diskurs widerzuspiegeln (BBK o. J.a). Das von der aktuellen Bundesregierung geplante KRITIS-Dachgesetz soll einen übergreifenden institutionellen Rahmen für kritische Infrastrukturen schaffen, Mindeststandards für deren physischen Schutz festlegen und wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Infrastrukturen berücksichtigen (BMI 2023).

Während kritische Infrastrukturen nach dem BSIG vor allem (größere) Infrastrukturen ab einem festgelegten Schwellenwert bezeichnen, werden Infrastrukturen in der Forschung zu Technik und Wissenschaft breiter gefasst, um die Interaktionen zwischen Technik und Mensch, die Rolle digitaler Infrastrukturen sowie die wachsenden Vernetzungen und Abhängigkeiten zwischen Systemen und Dienstleistungen zu berücksichtigen. So beschreiben Strauß und Bettin (2023, S. 13) kritische Infrastrukturen aus Perspektive der TA als »Systeme, Systemteile und Anwendungen, die für eine funktionsfähige Grundversorgung [...] relevant sind«. Kritische Infrastrukturen bestehen in der Regel aus vielen Komponenten, die in einer Netzstruktur zusammenwirken. Meistens sind die Komponenten physisch und funktional heterogen und in einer Hierarchie von Subsystemen organisiert, die in ihrer Gesamtheit zur Funktion des Gesamtsystems beitragen (Zio 2016, S. 138). Dessen Hauptfunktion besteht darin, die für das jeweilige Infrastruktursystem konstitutiven Versorgungsleistungen in einer verlässlichen und möglichst effizienten Weise der Gesellschaft zur Verfügung zu stellen. Dafür sind unzählige, miteinander verschachtelte Prozesse erforderlich, die Endnutzer/innen meist verborgen bleiben und den konstanten Austausch von Finanzmitteln, Stoffen, Energie, Information etc. innerhalb des Systems und mit seiner Umgebung organisieren. Wie alle komplexen Systeme sind auch kritische Infrastrukturen nicht trennscharf gegenüber ihrer Umwelt abgrenzbar (und somit nicht vollständig beschreibbar), da sie in ständigen Wechselwirkungen mit ihren Umfeldern stehen.

Um eine funktionsfähige Grundversorgung zu gewährleisten, ist es nicht mehr ausreichend, jeden einzelnen kritischen Sektor in den Blick zu nehmen, sondern es sind auch die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den kritischen Sektoren zu berücksichtigen. Durch die zunehmende Verflechtung aller kritischer Infrastrukturen entsteht eine Megainfrastruktur, die als System von Systemen bezeichnet werden kann. Wesentlicher Treiber dafür ist die Digitalisierung, die praktisch alle gesellschaftlichen Bereiche und Infrastrukturen umfasst, aber grundlegend auf Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)

3 BSI-Kritisverordnung vom 22.4.2016, zuletzt geändert am 29.11.2023



und die Versorgung mit Energie angewiesen ist (Strauß/Bettin 2023). Auf diese Weise werden verschiedene, ursprünglich unabhängige, Systeme eng miteinander vernetzt. Erst durch das Zusammenwirken dieser Systeme entstehen die gewünschten Funktionen (Nielsen et al. 2015).⁴ So beruht die Versorgung mit gesundheitlichen Dienstleistungen beispielsweise auf den Interaktionen zwischen Energie-, Verkehr- und IKT-Infrastruktur mit dem Gesundheitssektor (Mentges et al. 2023, S. 7). Entstehen neue Verbindungen zwischen kritischen Dienstleistungen (z. B. zwischen Stromsektor und Mobilität oder zwischen dem Abfall- und dem Energiesektor) können relativ kleine Störungen durch die Komplexität und enge Kopplung schnell zu komplexen multiinfrastrukturellen Krisen führen (Perrow 1984). Denn wenn kritische Systeme miteinander verbunden sind, werden die kritischen Elemente eines jeden Systems zu kritischen Elementen aller Systeme, da die Möglichkeit besteht, dass der Ausfall eines Teils des Systems sich auf die anderen Systeme auswirkt (Egan 2007, S. 7).

Da es heutzutage kaum noch möglich ist, kritische Infrastruktursysteme voneinander zu entkoppeln, erstreckt sich die Governance kritischer Infrastrukturen über verschiedene, oft fragmentierte Politikbereiche sowie institutionell unverbundene Versorgungs(teil)bereiche (Monstadt/Schmidt 2019, S. 2360 ff.). Die Klärung von Verantwortung und Verantwortlichkeiten stellt für Systeme, in denen Handlungen innerhalb eines Teilsystems Auswirkungen auf andere Teilsysteme haben, eine zentrale Herausforderung dar.

Komplexitätsmerkmale kritischer Infrastruktursysteme

Die Komplexität kritischer Infrastruktursysteme zeigt sich sowohl in struktureller als auch in dynamischer Hinsicht. Beide Komplexitätsdimensionen sind für das Verständnis der Systeme relevant (zum Folgenden Centeno et al. 2015, S. 71 f.; Johansen/Rausand 2014, S. 276 ff.; Zio 2016).

Strukturelle Komplexität

Die strukturelle Komplexität ergibt sich im Wesentlichen aus der inneren Struktur eines Systems. In struktureller Hinsicht umfassen komplexe Systeme zum einen eine Vielzahl *heterogener Einzelkomponenten* über verschiedene Technologiedomänen hinweg. Beispielsweise besteht das Stromnetz aus elektrischen Komponenten (Maschinen und Kabelleitungen), aber auch aus IKT-Komponenten. Auch die *Vielfalt der beteiligten Akteure* und ihr Autonomiegrad im System tragen zur strukturellen Komplexität eines soziotechnischen Infrastruktursystems bei (Johansen/Rausand 2014, S. 284). So hängt z. B. die Stabilität des Energiesystems nicht nur von den Netzbetreibern ab, sondern zunehmend auch von diversen anderen Akteuren, die dezentral Strom in das Netz ein- und ausspeisen

4 DIN EN ISO 22300:2018: Sicherheit und Resilienz – Vokabular



(z. B. Privatpersonen, die über Photovoltaikanlagen Strom produzieren). Auch Gerätehersteller und Betreiber von Kommunikationsnetzen sind Teil des komplexen Akteursnetzes im Energiesektor (Leopoldina et al. 2021, S. 39). Zum anderen hängt die strukturelle Komplexität vom Grad und Ausmaß der (wechselseitigen) *Abhängigkeiten* der Einzelkomponenten voneinander ab. Je strukturell komplexer ein System ist, desto stärker sind dessen Komponenten miteinander, aber auch mit den Komponenten benachbarter Systeme verbunden. So besteht das Stromsystem u. a. aus vielfältigen verteilten, jedoch miteinander vernetzten Komponenten, wie z. B. unterschiedlichen Energiequellen, Umwandlungstechnologien und Speichergeräten (Zio 2016, S. 139). Wechselseitige Abhängigkeiten können bei der Erbringung kritischer Dienstleistungen auch auf der Ebene von Nationalstaaten bestehen, beispielsweise bei der Versorgung mit Strom oder Wärme (Assemblée Nationale 2022, S. 43).

Dynamische Komplexität

Die dynamische Komplexität manifestiert sich im Systemverhalten, das sich in Reaktion auf interne Veränderungen bzw. äußere Einwirkungen ergibt. Dynamisch-komplexe Infrastruktursysteme reagieren oft in unerwarteter Weise auf externe Einflüsse. Das heißt, die Wechselwirkungen der Teilsysteme sind nicht linear, das Verhalten des Systems folgt keinen einfachen Ursache-Wirkungs-Beziehungen, sondern ist durch Verzögerungen sowie Kaskaden- und Rückkopplungseffekte geprägt (Grösser 2015). Strukturelle und dynamische Komplexität hängen eng zusammen, da komplexes Verhalten sich u. a. aus den vielfältigen Abhängigkeiten und Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten des jeweiligen Infrastruktursystems ergibt (Dekker et al. 2011, S. 941). Typische Merkmale dynamisch-komplexer Infrastruktursysteme sind Selbstorganisation und Emergenz:

- > *Selbstorganisation* heißt, dass ein System über die Fähigkeit verfügt, sich an äußere Einflüsse anzupassen, indem es seine innere Struktur spontan zu neuen kohärenten Mustern organisiert, ohne dass dafür eine steuernde Instanz oder eine externe Steuerung erforderlich sind.
- > *Emergenz* bedeutet, dass sich durch die Wechselwirkungen zwischen den Elementen eines Systems – etwa durch Prozesse der Selbstorganisation – auf der höheren Systemebene neue Muster oder Verhaltensweisen herausbilden können. Beispielsweise haben Stromnetze in der Vergangenheit emergentes Verhalten gezeigt, indem lokale Ausfälle unerwartete Kaskadeneffekte verursacht und zu transnationalen, branchenübergreifenden Effekten geführt haben (Zio 2016, S. 139).

Die Einflussfaktoren, die bei Infrastruktursystemen ein unvorhersehbares (dynamisch-komplexes) Systemverhalten auslösen können, sind vielfältig. Dazu



gehören Naturgefahren (z. B. Extremwetter), gezielte Angriffe (z. B. Cyberattacken), zunehmende Zahl an Nutzer/innen oder Veränderungen im Nutzerverhalten (Zio 2016, S. 139 f.).

Fazit

Kritische Infrastruktursysteme sind hochkomplex und gehören aufgrund ihrer Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen zu den bedeutendsten soziotechnischen Systemen. Ihre strukturelle und dynamische Komplexität kann zu emergentem, also unvorhersehbarem Verhalten führen. Um mögliche Störungen vorherzusehen und die Systeme darauf vorzubereiten, ist es essenziell, ihre Komplexität besser zu verstehen. Dazu gehört insbesondere eine Charakterisierung der Heterogenität der Einzelkomponenten und ihres Zusammenspiels, der Vielfalt beteiligter Akteure sowie von Abhängigkeiten und Interdependenzen, außerdem der Einflussfaktoren, die auf das System einwirken.



3 Zwischen Ordnung und Unordnung: systemische Risiken und Resilienz

Kritische Infrastrukturen stellen Dienstleistungen bereit, die für moderne Gesellschaften essenziell sind. Auch wenn die Prozesse und Strukturen, die das Bereitstellen dieser Dienstleistungen sicherstellen, kaum überschaubar und sehr variabel sind, ist es unerlässlich, dass sie zuverlässig und störungsarm funktionieren. Wie sich die zunehmende Komplexität dieser Systeme auf ihre Stabilität und Funktionsfähigkeit auswirkt, ist deshalb eine entscheidende Frage. Ein wichtiger Begriff in diesem Zusammenhang ist derjenige der Vulnerabilität, der wörtlich übersetzt Verletzlichkeit oder Verwundbarkeit bedeutet. Generell lässt sich von der Vulnerabilität eines Systems sprechen, wenn es anfällig gegenüber internen oder externen Störereignissen ist und diese zu einer problematischen Zustandsänderung im System führen, welche dessen Stabilität und Funktionsfähigkeit gefährden (Climate Service Center Germany o. J.; Strauß/Bettin 2023, S. 13 f.). Zu diesen Störereignissen gehören schleichende Entwicklungen, wie die Abnutzung interner Komponenten, Veränderungen im Nutzerverhalten oder den Umweltbedingungen, aber auch disruptive Störereignisse, die von innen (z. B. Ausfall einzelner Komponenten) oder auch außen (z. B. Cyberangriff) kommen können.

Der Zusammenhang zwischen Komplexität und Vulnerabilität ist nicht eindeutig. Auf der einen Seite können komplexe Organisationsstrukturen, die sich auf eine hohe Zahl interagierender Komponenten stützen, besonders anfällig für Störungen sein, da es unmöglich ist, diese Interaktionen wirksam zu überwachen oder zu kontrollieren. Auf der anderen Seite kann jedoch auch gelten: Je mehr und je unterschiedlicher die Komponenten sind und je komplexer deren Wechselwirkungen, desto mehr Flexibilität kann ein System aufweisen, um Störungen (z. B. auch mithilfe geeigneter Steuerungsmaßnahmen) abzufedern bzw. schnell zu überwinden, ohne dass es zu katastrophalen Zustandsänderungen kommt (Johansen/Rausand 2014, S. 276). Angesichts dieser vielschichtigen Zusammenhänge ist die Analyse der Vulnerabilitätseigenschaften eines Systems (z. B. Instabilitäten von Systemkomponenten, überraschendes Systemverhalten) wichtig, um auf mögliche Bedrohungen vorbereitet zu sein (Johansen/Rausand 2014, S. 280). Besonders problematisch für komplexe soziotechnische kritische Infrastrukturen sind systemische Risiken.

Systemische Risiken

Unter Risiken werden – sehr allgemein gesprochen – mögliche Ereignisse mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit verstanden, die mit negativen Auswirkungen einhergehen. Als systemisch werden in der Regel solche Risiken



bezeichnet, die »weit über den Ort ihres Ursprungs oder ihrer unmittelbaren Wirkung hinaus negative Effekte in anderen Bereichen oder Systemen haben – Effekte, die sich im Verlauf der Risikoausbreitung noch verstärken können« (OECD 2003, S. 30; Renn/Keil 2008, S. 350). Der Begriff des systemischen Risikos stammt ursprünglich aus der Finanzwissenschaft, wird inzwischen aber darüber hinaus auch auf ökologische oder soziotechnische Systeme angewendet. Potenzielle Bedrohungen, wie z. B. Naturkatastrophen, Störfälle, Terrorangriffe, menschliches Versagen oder Instabilitäten von Systemkomponenten (Renn/Keil 2008, S. 350), die die Funktionsfähigkeit von Systemen mit kritischer Bedeutung für die Gesellschaft – wozu auch kritische Infrastrukturen gehören – gefährden, sind als systemische Risiken zu verstehen (Renn et al. 2022, S. 1903). Legt man diese Definition zugrunde, sind alle Risiken, die kritische Infrastrukturen und ihre Dienstleistungen zum Versagen bringen können, als systemische Risiken zu klassifizieren. Wesentlich ist, dass ein weitreichender Ausfall des Systems droht, der dessen Funktionsfähigkeit gefährdet. In der Literatur werden fünf charakteristische Merkmale von systemischen Risiken hervorgehoben (Renn 2019; Renn et al. 2022; Schweizer/Renn 2019a):

- > *Komplexität*: Systemische Risiken sind durch hohe Komplexität gekennzeichnet, was die Identifizierung kausaler Zusammenhänge erschwert. Sie können im Lauf ihrer Entwicklung mit konventionellen Risiken interagieren und konvergieren.
- > *Grenzüberschreitung*: Obwohl sie ihren Ursprung in einem bestimmten System oder Ereignis haben, breiten sich systemische Risiken auf andere Systeme aus – über geografische, sektorale oder soziale Grenzen hinweg.
- > *Stochastische Wirkungsketten*: Die Ergebnisse von systemischen Risiken sind stochastisch und nicht deterministisch. Für Teileffekte können kausale Parameter und Einflussfaktoren identifiziert werden.
- > *Kipppunkte*: Systemische Risiken sind oft durch Kipppunkte gekennzeichnet, die ein Schwellenverhalten aufweisen und bei denen komplexe Systeme plötzliche und drastische Veränderungen erfahren können.
- > *Verzögerte Wahrnehmung und Regulierung*: Die Wahrnehmung und Regulierung von systemischen Risiken erfolgt häufig verzögert und Maßnahmen werden als fragmentiert wahrgenommen (z. B. beim Klimawandel).

In Bezug auf die Identifizierung systemischer Risiken gibt es verschiedene Risikoanalysen. Gemäß dem Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (ZSKG)⁵ ist der Bund verpflichtet, in Kooperation mit den Bundesländern eine Risikoanalyse für den Zivilschutz durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Analyse müssen dem Deutschen Bundestag vom Bundesministerium des Innern (BMI) jährlich mitgeteilt werden (Bundesregierung 2011). Die Risikoanalyse deckt ein breites Spektrum an systemischen Risiken ab. Dazu gehören Naturgefahren, wie

5 Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz vom 25.3.1997, zuletzt geändert am 19.6.2020



meteorologische Ereignisse (z.B. Stürme, Sturmfluten, Starkniederschläge, Kälte- und Hitzewellen), hydrologische Gefahren (z.B. Hochwasser, Niedrigwasser und Wasserknappheit), geophysikalische Gefahren (z.B. Erdbeben, Bergstürze, Meteoriteneinschläge) sowie biologische Gefahren (z.B. Infektionskrankheiten, Tierseuchen). Darüber hinaus werden Risiken berücksichtigt, die durch menschliches oder technisches Versagen entstehen können, sowie solche, die auf kriminelle oder terroristische Handlungen zurückzuführen sind und die Freisetzung von biologischen, chemischen und radioaktiven Stoffen miteinschließen können (mehr hierzu in TAB 2024; im Erscheinen).

Wie sich systemische Risiken auf Infrastruktursysteme auswirken, hängt sowohl von systeminternen als auch -externen Faktoren ab. Üblicherweise braucht es ein auslösendes Ereignis, das auf das System einwirkt. Damit diese Einwirkung zum Systemzusammenbruch führt, müssen zudem bestimmte systemische Bedingungen gegeben sein, insbesondere eine hohe Vulnerabilität bzw. eine geringe Resilienz des Systems gegenüber äußeren Störungen. Entsprechend müssen bei der Analyse der Gefährdungslage kritischer Infrastruktursysteme zum einen Veränderungen in den Umfeldbedingungen, die schädliche Ereignisse auslösen können, beobachtet werden. Zum anderen gilt es, die Kapazitäten des Sektors, auf Störungen zu reagieren, zu analysieren.

Trends und Einflussfaktoren

Systemische Risiken für komplexe soziotechnische Infrastruktursysteme sind fast immer multifaktoriell bedingt. Typische Beispiele für Ereignisse, die systemische Risiken auslösen können, sind Pandemien und der Klimawandel (Schweizer 2023, S. 3 ff.; Schweizer/Renn 2019b, S. 217) sowie Naturkatastrophen und Terrorangriffe (Renn/Keil 2008, S. 350). Generell tragen »Kontextfaktoren aus den Domänen der Demografie, der Umwelt, der Technologie und der sozioökonomischen Strukturen« maßgeblich zur Entstehung systemischer Risiken bei (Schweizer/Renn 2019b, S. 213). Insbesondere bei kritischen Infrastrukturen ist es essenziell, ihre Resilienz gegenüber schädlichen Einflüssen zu stärken. Sie müssen so gebaut und gestaltet werden, dass ihre Basisinfrastruktur möglichst lange bestehen bleiben kann und durch Instandhaltung, Aktualisierung sowie Integration neuer Technologien gepflegt und nach Bedarf optimiert wird. Wichtig ist, dass die jeweiligen Infrastrukturen sich an neue Umfeldbedingungen (z.B. technologische Entwicklungen, Anforderungen durch Politik und Gesellschaft oder veränderte marktwirtschaftliche Bedingungen) anpassen können (Zio 2016).

Veränderungen in den Umfeldbedingungen lassen sich am ehesten über die Analyse der Entstehung und Entwicklung soziotechnischer Trends untersuchen. Der Trendbegriff stammt aus der Marktforschung und der wirtschaftlichen Statistik und hat eher eine phänomenologische Bedeutung. Er beschreibt eine



Veränderung, ohne dass eine Bewertung der Kausalität erforderlich ist. Unsicherheiten können durch gegenläufige Entwicklungen (Gegentrends) oder Sättigungseffekte innerhalb eines Trends auftreten. Außerdem ist ein plötzlicher Trendbruch (z. B. aufgrund äußerer Umstände) möglich. Laut Definition des Zukunftsbüros des BMBF (2022, S. 4) beschreibt ein Trend »einen relevanten Sachverhalt, der seit einiger Zeit beobachtbar ist und eine nachhaltige Entwicklung zeigt. Er ist nicht zyklisch, (empirisch) beschreibbar und verfügt über eine Reichweite von mindestens 10 bis 20 Jahren«. Bei Trends handelt sich also um mittels statistischer bzw. empirischer Methoden erfassbare Entwicklungen. Ein Merkmal ist ihr Gegenwartsbezug, denn sie beschreiben eine Zustandsveränderung, die sich aktuell vollzieht (Deckers/Heinemann 2008). Im Rahmen der Trendforschung werden aus den gegenwärtigen Gegebenheiten Annahmen abgeleitet, die es ermöglichen, prognostische Abschätzungen über zukünftige Entwicklungen, wie z. B. potenzielle systemische Risiken, zu treffen.

Trends und ihre Auswirkungen können anhand verschiedener Kriterien unterschieden und kategorisiert werden. Um besser zu verstehen, wie sie als externe Faktoren auf Systeme einwirken und welche Chancen, aber auch Risiken sie mit sich bringen, können sie bestimmten Kategorien zugeordnet werden. Im Rahmen der STEEP-Umfeldanalyse werden beispielsweise die folgenden fünf Bereiche unterschieden (UNDP 2022):

- > *Soziale Faktoren* umfassen gesellschaftliche Entwicklungen wie demografischer und kultureller Wandel, menschliche Verhaltensänderungen und Lebensstil.
- > *Technologische Faktoren* resultieren aus wissenschaftlicher Forschung, technischem Fortschritt, Innovationen und Produktentwicklungen.
- > *Ökonomische Faktoren* betreffen das wirtschaftliche Umfeld, wie z. B. gesamtwirtschaftliches Wachstum, Zinsen, Einkommen, Markt- und Wettbewerbsumfeld.
- > *Ökologische Faktoren*: Hierzu gehören Umweltveränderungen wie der Klimawandel oder der Biodiversitätsverlust, aber auch ökologische Auswirkungen von Produkten und/oder Dienstleistungen.
- > *Politische Faktoren* umfassen Gesetzgebung, nationale und internationale Konflikte und alle weiteren politischen Einflüsse (z. B. aus den Bereichen Handel, Sicherheit, Finanzen).

Weitere Aspekte, mit denen sich Trends differenzieren lassen, sind Fristigkeit, Tiefe, Reichweite und Auswirkungen. Ein einheitliches Schema für die Einteilung der Trends nach ihrer Fristigkeit (Dauer) existiert in der Trend- bzw. Zukunftsforschung nicht. Üblicherweise werden kurzfristige (bis ca. 5 Jahre), mittelfristige (5 bis deutlich über 10 Jahre) und langfristige Trends (etwa ab 15 bis 50 Jahre) unterschieden (Kreibich et al. 2011). Neben der Kategorisierung und Abschätzung der Fristigkeit können Trends nach der Art ihres Einflusses auf das System (inkrementell oder disruptiv) und der Charakterisierung möglicher



Auswirkungen beschrieben werden. So werden Trends unterschieden, die abstrakt, langlebig und robust sind und die ihre tiefgreifende Wirkung global entfalten. Es gibt aber auch Trends, die nur in ausgewählten Bereichen des gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Lebens wirken und damit greifbare, kurzlebige Phänomene sind. Die Trendkategorien hängen zusammen und beeinflussen sich gegenseitig, sodass kurzlebige Trends als Indikatoren für tiefgreifendere dienen können (Postma/Papp 2021). Umgekehrt kann das Verständnis langfristiger Trends helfen, kurzlebige Trends zu antizipieren.

Für die Analyse der Vulnerabilität bzw. Resilienz kritischer Infrastrukturen sind vor allem Mega- sowie Makro- und Mesotrends von maßgeblicher Bedeutung:

- > *Megatrends* (auch Globaltrends genannt) sind langanhaltende und tiefgreifende Kräfte, die auf globaler Ebene ein breites Spektrum von Aktivitäten, Prozessen und Wahrnehmungen in zahlreichen Bereichen beeinflussen werden, möglicherweise über Jahrzehnte (Naisbitt/Aburdene 1992). Sie treiben die Trends auf der Meso- und Makroebene voran (EFP 2023). Megatrends sind vielschichtig, von hoher Heterogenität und durch Wechselwirkungen mit anderen Trends und Gegentrends gekennzeichnet (Göll 2020). Sie zeichnen sich zudem durch ihren globalen Einfluss aus, der jedoch nicht in allen Bereichen der Gesellschaft und Wirtschaft gleichzeitig und in gleichem Maße spürbar ist. Beispiele für Megatrends sind der Klimawandel, die Globalisierung, die Digitalisierung und die Urbanisierung.
- > *Makro- und Mesotrends* spielen sich auf der Ebene von Gesellschaften bzw. Organisationen ab und umfassen sich abzeichnende Muster des Wandels, die Akteure auf staatlicher Ebene, Unternehmen oder große gesellschaftliche Gruppen betreffen. Sie sind tendenziell durch eine mittelfristige Wirkungsdauer gekennzeichnet und lassen sich bestimmten Megatrends zuordnen bzw. werden von diesen beeinflusst. Zu den Makro- und Mesotrends gehören beispielsweise viele der aus TA-Perspektive besonders relevanten technologischen Trends, die im Zuge der Digitalisierung an Bedeutung gewinnen und die Vulnerabilität von Systemen stark beeinflussen können (Strauß/Bettin 2023, S.17). Ein Beispiel für einen technologischen Makrotrend, der die industrielle Produktion grundlegend verändert, ist die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mithilfe von IKT (Industrie 4.0).

Resilienz

Zur Charakterisierung der Vulnerabilität eines Systems gehört neben der Beschreibung möglicher Einflussfaktoren auf das System, aus denen systemische Risiken erwachsen könnten, die Abschätzung dessen Fähigkeit, möglichen Störungen standzuhalten und diese zu bewältigen – sprich seiner Resilienz.



Das Resilienzkonzept hat eine sehr wechselvolle Vorgeschichte: Ursprünglich aus der Psychologie stammend wurde es in den 1970er Jahren in die Katastrophen- und Ökosystemforschung übertragen und dient heute auch dazu, Eigenschaften sozialökologischer sowie soziotechnischer Systeme zu beschreiben. Entsprechend variieren die wissenschaftlichen Definitionen und Verständnisse stark und sind teilweise widersprüchlich. In einem sehr allgemeinen Sinn bezeichnet Resilienz die Fähigkeit von komplexen Systemen – seien es Ökosysteme, Infrastruktursysteme oder Organisationen –, mit Störungen, Stress oder Schocks umzugehen und sich davon zu erholen (Olsson et al. 2015, S. 2 u. 9). Dafür ist z. B. die redundante Auslegung wichtiger Systemkomponenten notwendig, sodass Ausfälle einzelner Komponenten kompensiert werden können (z. B. alternative Bahnstrecken, Notfallaggregate), das Vorhandensein von Notfallplänen und geschultem Personal für den Umgang mit Störungen oder auch die Substituierbarkeit von Einzelkomponenten (Lenz 2009, S. 58; Strauß/Bettin 2023, S. 16). Ein resilientes System widersteht nicht nur äußeren Einflüssen und absorbiert diese, sondern es ist in der Lage, sich zu erholen und zu transformieren, und es tut dies nicht nur rechtzeitig, sondern auch in effizienter Weise (UNDRR o. J.). Resilient ist ein System gemäß dieser Definition folglich, wenn es die Fähigkeit besitzt, nicht nur Schockereignisse zu überstehen, sondern auch gestärkt aus der Situation herauszugehen (Böschen et al. 2017, S. 216) oder gar auf unvorhergesehene externe Faktoren zu reagieren (Leopoldina et al. 2021).

Nach dem zuvor skizzierten Verständnis ist Resilienz allerdings kein statisches Merkmal, sondern umfasst vor allem auch dynamische Aspekte. Sie ist als Fähigkeit von Systemen zu verstehen, sich kontinuierlich an verändernde Bedingungen und Störereignisse anzupassen (TAB 2024; im Erscheinen). Dabei werden üblicherweise drei Phasen unterschieden (hier und im Folgenden (Gunderson/Holling 2002 nach; Rudloff 2022)):

- > *Absorption* als die Fähigkeit des Systems, bereits eingetretene Schäden aufzufangen oder abzumildern;
- > *Adaption* als die Fähigkeit des Systems, sich auf mögliche Schadensereignisse und Stressfaktoren vorzubereiten, um Schäden zu minimieren;
- > *Transformation* als die Fähigkeit des Systems, sich weiterzuentwickeln und neue und nachhaltigere Strukturen zu nutzen, wo vorhandene Strukturen nicht mehr tragfähig sind.

Zur Stärkung der Resilienz eines Systems ist dementsprechend ein Verständnis darüber notwendig, wie eine Veränderung von Umfeldfaktoren oder Systemeigenschaften sich sowohl auf die aktuelle als auch auf die zukünftige Funktionsweise des Systems und auf seine Fähigkeit, sich weiterzuentwickeln, auswirken könnte (Mentges et al. 2023, S. 33). Im Gegensatz zum Ansatz des Risikomanagements geht es beim Resilienzmanagement auch darum, die zeitliche Dimension zu integrieren, sprich die Fähigkeit des Systems zu bewerten, nicht nur



unter den aktuellen, sondern auch unter künftigen Rahmenbedingungen widrige Ereignisse zu absorbieren und sich davon zu erholen. Deswegen ist die Stärkung von Resilienz eine permanente Aufgabe (Linkov et al. 2014, S. 407). Diese Aufgabe erfordert es, laufend Entwicklungen zu beobachten, aus denen sich Schwachstellen im System ergeben könnten (Tapia et al. 2020, S. 23).

Fazit

Um Infrastruktursysteme zukunftssicher zu machen, ist es erforderlich, systemische Risiken und die sie befördernden Entwicklungen bzw. auslösenden Ereignisse frühzeitig zu antizipieren. Hilfreich sind hierbei die Beobachtung soziotechnischer Trends (insbesondere auf den Mega-, Makro- und Mesoebenen), die sich fünf Umfeldkategorien zuordnen lassen, sowie die Analyse von möglichen Trendauswirkungen auf das Infrastruktursystem und von dessen Bewältigungskapazitäten. Aus einer solchen Analyse können Hinweise für die Stärkung der Resilienz von Infrastruktursystemen abgeleitet werden. Die resiliente Ausgestaltung ist als ein fortlaufender Transformationsprozess an sich kontinuierlich verändernde Umfeldbedingungen zu verstehen.





4 Fallbeispiel Energiesystem

Wie in Kapitel 2 dargelegt, verfügen alle kritischen Infrastruktursysteme über eine hohe Komplexität sowohl in struktureller als auch dynamischer Hinsicht. Jedoch ist der Energiesektor – wie zunehmend auch der IKT-Sektor – besonders hervorzuheben. Denn ein funktionierendes Energiesystem ist unerlässlich für die Funktionsfähigkeit aller anderen Infrastruktursysteme (Strauß/Bettin 2023, S. 12): Gebraucht wird Energie für sämtliche Prozesse und Anwendungen, beispielsweise zur Beleuchtung, für den Betrieb von Informations- und Kommunikationstechnik, zur Erzeugung von Kälte sowie mechanischer Energie (Stromanwendungen), für den Betrieb von Anlagen sowie für Verkehr und Logistik, zur Wärmeversorgung von Gebäuden und zur Erzeugung von Prozesswärme für die Industrie (Sterchele et al. 2020).

Für Verbraucher/innen ist die Versorgung mit Energie in der Regel eine selbstverständliche Angelegenheit: Der Strom kommt kontinuierlich aus der Steckdose, die Heizung lässt sich über den Thermostaten regulieren und flüssige Brennstoffe sind an Zapfsäulen erhältlich. Allerdings erfordert die störungsfreie Erbringung dieser Dienstleistungen den reibungslosen Ablauf einer Vielzahl von Prozessen, die eng aufeinander abgestimmt sein müssen. Zu den einzelnen Aufgaben gehören insbesondere:

- > *Förderung oder Import von primären Energieträgern*: Primärenergieträger, wie Gas, Rohöl, Braun- und Steinkohle oder Uran, sind Energierohstoffe, die in unverarbeiteter Form vorliegen und nicht direkt verbraucht werden können. Sie müssen in Deutschland gefördert (Braunkohle) oder – wie im Fall von Gas und Rohöl – nach Deutschland eingeführt werden. Abgesehen von den erneuerbaren Energieträgern (Solar-, Wind-, Wasserkraft) und Biomasse, die ebenfalls zur Primärenergie zählen, ist Deutschland bei den meisten Primärenergieträgern – bis auf Braunkohle – auf Importe aus dem außereuropäischen Ausland und damit funktionierende globale Lieferketten angewiesen (UBA o.J.d).
- > *Energieumwandlung*: Primärenergie muss für gewöhnlich in Sekundärenergie umgewandelt werden, damit sie in verbrauchsfertiger Form, also als Brenn- oder Kraftstoff, Fernwärme oder Strom, vorliegt. Die Art der Umwandlung und Aufbereitung unterscheidet sich bei den verschiedenen Primärenergieträgern, erfordert teils großtechnische Anlagen (u. a. Raffinerien, Kraftwerke, Biogasanlagen) und ist in der Regel mit mehr oder weniger großen Umweltbelastungen (z. B. Treibhausgasemissionen) und Umwandlungsverlusten verbunden.
- > *Speicherung*: Auch wenn die Speicherung bisher von Bund und Ländern nicht als kritische Dienstleistung (BBK o.J.b) eingestuft wurde, spielen Energiespeicher im Zuge der Umstellung auf nichtfossile Energieträger eine



zunehmend wichtige Rolle für ein funktionierendes Energiesystem. Grund dafür ist, dass das Angebot an erneuerbaren Energien fluktuiert und deshalb unter Umständen für eine spätere Nutzung zwischengespeichert werden muss. Infrage kommen dafür die elektrische Speicherung in mobilen und stationären Batterien, Pumpspeicherkraftwerke, aber auch elektrochemische Speicher (z. B. Wasserstoff). Die Speicherlösungen setzen wiederum den Aufbau eigener Infrastrukturen bzw. Anlagen voraus (z. B. Batterieproduktion, Elektrolyseure) sowie spezifische kritische Rohstoffe, die in der Regel importiert werden müssen und deren Versorgungslage oft unsicher ist.

- *Transport und Verteilung*: Die verschiedenen stofflichen Energieträger sowie elektrische Energie müssen schließlich transportiert und an die Verbraucher/innen verteilt werden. Dafür sind entweder ausdifferenzierte logistische Prozesse erforderlich, um z. B. die verschiedenen Treibstoffarten entlang der Lieferkette (Raffinerie, Zwischenlager) zu den Verkaufsstellen zu transportieren, oder es werden dafür spezielle Verteilnetze genutzt, z. B. für die Übertragung/Verteilung von Strom, Gas oder Fernwärme. Insbesondere das Stromnetz steht im Zuge der Umstellung auf dezentral erzeugte erneuerbare Energien vor größeren Aus- und Umbaubebedarfen, aber auch für neue Energieträger wie Wasserstoff müssen geeignete Speicher- und Netzinfrastrukturen aufgebaut werden.

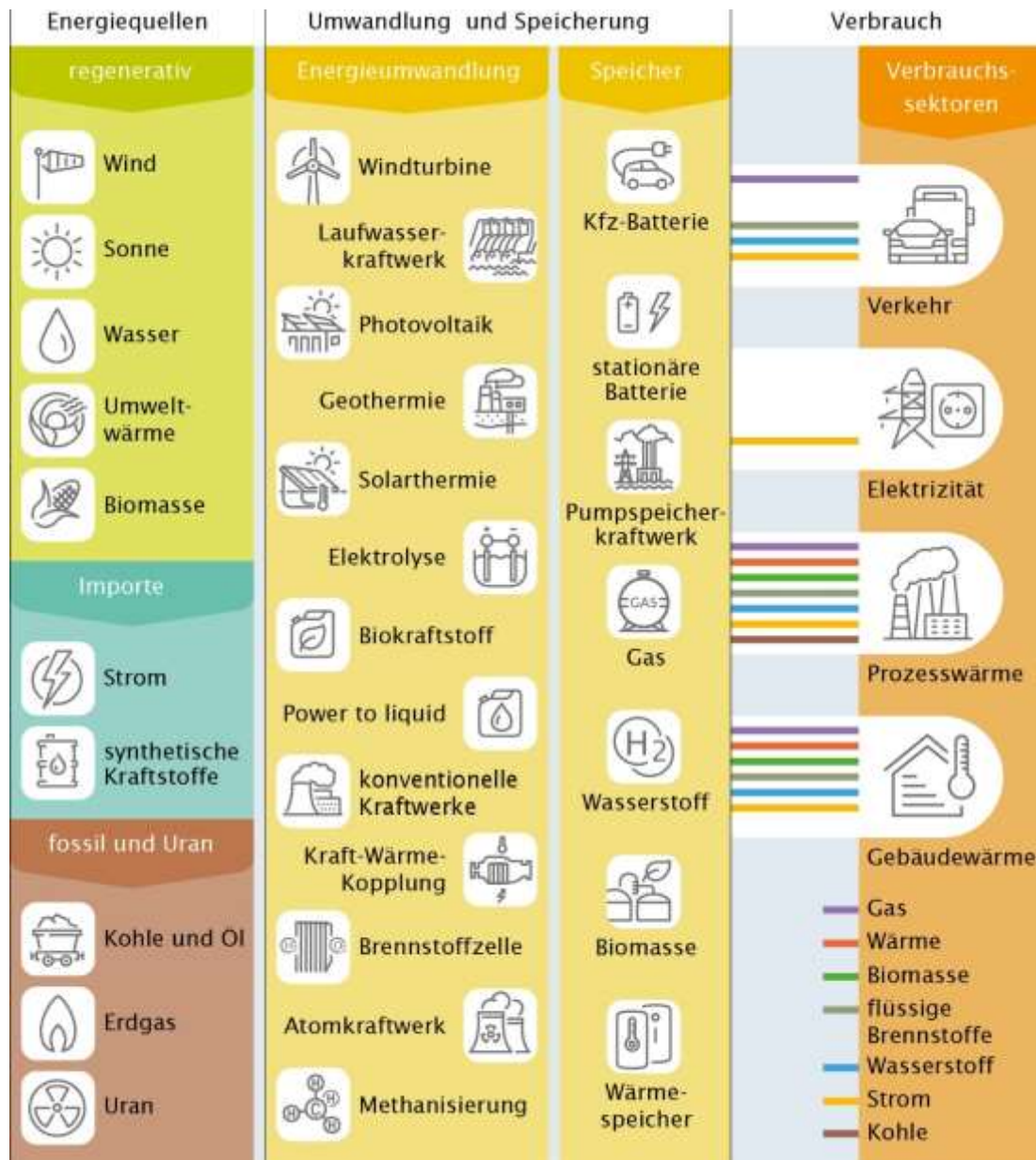
Abbildung 4.1 zeigt die verschiedenen Energiequellen, die wichtigsten Technologien für Energieumwandlung und -speicherung sowie die Verbrauchssektoren gegliedert nach den wesentlichen Nutzungsformen (Sterchele et al. 2020, S. 13).

Zunehmende Komplexität

Die Komplexität des Energiesystems ergibt sich nicht zuletzt daraus, dass Energie in sehr unterschiedlichen Stoffen und Formen gespeichert und weitergegeben werden kann, was eine große Vielfalt an Anlagen und Infrastrukturen bedingt. So lässt sich Biomasse als primärer Energieträger beispielsweise über unterschiedliche Nutzungspfade verwerten: entweder direkt (z. B. Holzverbrennung) oder indirekt nach Umwandlung in einen anderen Energieträger (z. B. Wasserstoff, Methan oder flüssige Brennstoffe, Biodiesel). Auch Strom wird sowohl importiert als auch aus unterschiedlichen primären Energieträgern erzeugt. Er wird für den direkten Endverbrauch bereitgestellt, dient aber beispielsweise auch zur Erzeugung von Wärme oder in gespeicherter Form für die Elektromobilität. Entsprechend stark differieren die für den Endverbrauch erforderlichen Aufbereitungspfade (Sterchele et al. 2020, S. 13 ff.), aber auch die dafür maßgeblichen ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen, die für Strom beispielsweise ganz andere sind als für Rohöl, sowie die mit Import, Handel, Aufbereitung und Verteilung von Energie befassten Einrichtungen und Unternehmen.



Abb. 4.1 Quellen, Umwandlung/Speicherung und Verbrauch von Energie



Quelle: nach Sterchele et al. 2020, S. 13

Insgesamt ist der Energiesektor dementsprechend durch eine überaus hohe Akteursvielfalt, eine große Diversität technischer Komponenten, Anlagen und Netze gekennzeichnet. Aktuell unterliegt er zusätzlich einer besonders hohen Veränderungsdynamik. Verantwortlich dafür sind zum einen geopolitische Konflikte – insbesondere der Angriff Russlands auf die Ukraine – die beim wichtigen Primärenergieträger Erdgas zu einem Wegfall der etablierten Versorgungsstrukturen, zu einem umfangreichen Umbau der Gasversorgung (u. a.



Ausbau der Infrastruktur für Flüssiggas) und einer Reduktion der Abhängigkeit von Erdgas aus Russland führte. Nicht zuletzt sind die Unverzichtbarkeit des Energiesektors für Gesellschaft und Wirtschaft sowie mögliche Auswirkungen seiner großflächigen Störung durch die Gaskrise erneut in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Neben der Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern sind Klimaneutralität bis 2045 und eine störungsfreie Energieversorgung, die wirtschaftlich und für Industrie und Haushalte bezahlbar bleiben soll, wichtige gesellschaftspolitische Ziele (Prognos 2022), die jedoch in der Umsetzung in Konflikt geraten können (Luderer et al. 2022). So hat die Gaskrise im Zuge des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine kurzfristig auch zu einer steigenden Bedeutung der klimaschädlichen Energieträger Kohle und Öl geführt.

Infolge dieser Entwicklungen müssen nicht nur Energieinfrastrukturen wie das Stromnetz aus- und neue Infrastrukturen (z. B. für Flüssiggas oder Wasserstoff) aufgebaut, sondern auch Lösungen gefunden werden, mit denen sich die Volatilität der erneuerbaren Energien ausgleichen lässt. Es ist klar, dass die Komplexität des Sektors dadurch in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird, was sich in einer wachsenden Konvergenz mit anderen Sektoren, einer zunehmenden Vielfalt an Technologien sowie Akteuren manifestiert:

- > *Konvergenz mit anderen Sektoren:* Verantwortlich dafür sind Digitalisierung und Sektorenkopplung. Die Digitalisierung bietet für die Transformation des Energiesystems große Chancen, da die Koordination der zahlreichen, heute teilweise noch unbekanntem Marktteilnehmer künftig weitgehend automatisiert mithilfe von IKT erfolgen muss, um die neue Komplexität der Akteure und Technologien bewältigen zu können (Korzynietz et al. 2023, S.191). Energie- und IKT-System verschmelzen dadurch zu einem »cyberphysischen Gesamtsystem«, wodurch neue Abhängigkeiten und Wechselwirkungen entstehen (Tapia et al. 2020). Dasselbe gilt auch für die Sektorenkopplung. Darunter wird die Vernetzung des Stromsektors mit den Sektoren Industrie (Prozesswärme), Verkehr und Gebäudewärme verstanden (Korzynietz et al. 2023, S.181) – Bereiche, deren Versorgung bisher weitgehend getrennt voneinander sichergestellt wurde, die im Zuge der Ersetzung fossiler Energien nun aber zunehmend elektrifiziert werden (Büschler et al. 2020).
- > *Wachsende technologische Vielfalt:* Mit der schwindenden Bedeutung konventioneller fossiler Kraftwerke kommt Windenergie- und Photovoltaikanlagen sowie Stromspeichern wie Power-to-X-Technologien oder Batterien eine immer wichtigere Rolle zu (Büschler et al. 2020; UBA o. J.b). Bei den Transportwegen ist künftig nicht nur an den Import von primären natürlichen Energieträgern zu denken, sondern auch von aus erneuerbaren Energien hergestellten synthetischen Energieträgern wie Wasserstoff, Methan, flüssige Kraftstoffe. Bei der Wärmebereitstellung werden neben konventionellen Heizkesseln auf Basis von fossilen Energieträgern wie Methan, Biomasse oder Öl



neuerdings vermehrt auch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Wärmepumpen unterschiedlicher Bauart sowie Brennstoffzellensysteme basierend auf Methan oder Wasserstoff eingesetzt (Sterchele et al. 2020, S. 14). Im Zuge der Digitalisierung spielen schließlich zunehmend intelligente Netze mit neuen Mess-, Steuer- und Regelungstechniken (dena o. J.) eine zentrale Rolle, die dafür eingesetzt werden, Verbrauch und Nachfrage nach Energie besser aufeinander abzustimmen, was im Zuge einer zunehmend dezentralen und fluktuierenden Energieerzeugung an Bedeutung gewinnt.

- > *Veränderte Akteursstruktur*: Durch den Kohle- und Atomausstieg werden vermehrt Großkraftwerke außer Betrieb genommen und im Gegenzug vervielfacht sich die Anzahl der Akteure, die sich dezentral an der Energieerzeugung beteiligt (Prosumenten, die Energie sowohl erzeugen als auch verbrauchen, z. B. über Photovoltaikanlagen). Diese Tendenzen brechen die traditionelle Struktur einer geringen Anzahl von Produzenten und einer großen Anzahl an Konsumenten auf (Büscher et al. 2020; Strauß/Bettin 2023, S. 25). Neue Marktakteure und Geschäftsmodelle entstehen in der Energieversorgung (z. B. Marktplattformen für den Energiehandel; Leopoldina et al. 2021, S. 20), eine Tendenz, die durch die Digitalisierung des Energiesystems verstärkt wird (Dekker/van Est 2020, S. 34).

Wachsende systemische Risiken

Bereits seit Längerem wird diskutiert, welche Folgen bei einem langanhaltenden Stromausfall zu erwarten wären und wie gut Deutschland bzw. deutsche Städte und Kommunen auf einen solchen Fall vorbereitet sind (TAB 2010). Wie relevant diese Fragen nach wie vor sind, zeigen aktuelle Beispiele, bei denen Kaskadeneffekte im Energiesystem zu einer unerwarteten Versorgungsunterbrechung geführt haben (Kasten 4.1). Durch die neuen Strukturen, die durch die Dekarbonisierung des Energiesektors und insbesondere durch Dezentralisierung, Sektorenkopplung und Digitalisierung entstehen, steigen die *Unsicherheiten über das künftige Verhalten des Systems* (Korzynietz et al. 2023; Leopoldina et al. 2021). Je komplexer das Energiesystem wird, desto schwieriger wird es, Stromangebot, Netzbedarf und -nachfrage zu synchronisieren. Diese Entwicklungen fordern »technologische Paradigmen und Wirtschaftsstrukturen sowie individuelle und kollektive Handlungsmuster heraus« (Büscher et al. 2020, S. 17) und werfen neue Regulierungsfragen auf (z. B. Marktzugangsrechte, Dateneigentum) (Dekker/van Est 2020, S. 34; Korzynietz et al. 2023, S. 191).

Auf der einen Seite erhöhen Dezentralisierung, Digitalisierung und Sektorenkopplung die Flexibilität des Energiesystems, was dabei helfen kann, Schwankungen bei der Stromerzeugung auf Grundlage erneuerbarer Energien auszugleichen. Außerdem entstehen tendenziell durch die Dezentralisierung



auch redundante Strukturen, welche die Resilienz des Gesamtsystems erhöhen können (Büscher et al. 2020, S.21).

Stromausfall in Texas

Am 14. Februar 2021 zogen schwere Winterstürme über weite Teile der Vereinigten Staaten, darunter auch über den Bundesstaat Texas. Das Stromnetz des Bundesstaates fiel aus, sodass mehr als 3 Mio. Haushalte während 4 Tagen ohne Strom waren. Diese Stromausfälle wurden nicht allein durch die extremen Wetterbedingungen ausgelöst. Vielmehr zeigt die Rekonstruktion des Ereignisses, wie unterschiedliche Einflussfaktoren zusammenwirkten und zur Katastrophe führten: problematische Wartungspraktiken, unzureichende Investitionen in eine angemessene Überwinterung, fehlende Verbindungen zu zwei anderen Hauptverbindungsleitungen des US-Stromnetzes und Herausforderungen bei der Verwaltung des Netzes. Die Auswirkungen wurden durch Faktoren wie soziale Ungleichheiten verstärkt (Clark-Ginsberg et al. 2021).

Auf der anderen Seite bringen diese Entwicklungen aber auch neue systemische Risiken mit sich, nicht zuletzt bedingt durch die Komplexität der notwendigen Transformation, die in kürzester Zeit zu vollbringen ist (Korzynietz et al. 2023). So wird durch die umfassende Elektrifizierung von Gebäuden (Kühlen und Heizen mit Wärmepumpen), von Verkehr (Elektromobilität) und industriellen Prozessen der Strombedarf sehr schnell deutlich steigen (Leopoldina et al. 2021, S.2). Allein der Strombedarf für Elektroautos könnte sich beispielsweise bis 2030 versiebenfachen (Statista o.J.). Zusammen mit dem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien führt das zu stark steigenden Anforderungen an das Stromnetz und macht eine umfangreiche Anpassung der Netzinfrastruktur sowie der Netzsteuerung erforderlich (UBA o.J.c). Zu den wachsenden systemischen Risiken gehören außerdem neue Angriffsmöglichkeiten für Cyberkriminelle (z.B. über Smart Meter) und Abhängigkeiten von Anbietern digitaler Dienste bzw. dafür notwendiger Komponenten (z.B. Halbleiter) (Strauß/Bettin 2023, S. 25 f.). Diese neuen Abhängigkeiten können zu unvorhergesehenen oder gar unvorhersehbaren Ereignissen mit großem Bedrohungspotenzial führen (Leopoldina et al. 2021; Strauß/Bettin 2023). Insgesamt ergibt sich so eine hohe Verwundbarkeit gegenüber direkten Angriffen, die neue Ansätze zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit erfordern (Korzynietz et al. 2023; Leopoldina et al. 2021; Zio 2016, S. 139).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit der wachsenden Komplexität des Energiesystems – bedingt hauptsächlich durch die Digitalisierung und Sektorenkopplung – das Risiko steigt, dass Ausfälle in einem Teilsystem zu Kaskadeneffekten führen und Versorgungsunterbrechungen in anderen Teilen



des Systems verursachen (Büscher et al. 2020, S. 21). Gleichzeitig erschwert die steigende technische Systemkomplexität die Vorhersage von Auswirkungen im operativen Betrieb (Leopoldina et al. 2021, S. 24) und es ist bisher weitgehend unklar, nach welchen Gesetzmäßigkeiten sich Störereignisse auf das Energiesystem auswirken und wie es resilienter ausgestaltet werden kann. Obwohl die Risiken, die mit der Kopplung von Sektoren einhergehen, grundsätzlich bekannt sind, fehlt es an Studien, in denen die Gefahren und Ungewissheiten, die mit dem Betrieb von integrierten Infrastrukturen verbunden sind, im Detail erörtert wurden.



5 Schlussfolgerungen und mögliche Vertiefungsthemen

Alle kritischen Infrastruktursysteme verfügen über einen hohen Grad an Systemkomplexität und sind qua Definition grundlegend für die Funktionsfähigkeit unserer Gesellschaft. Das Energiesystem ist dennoch in beiderlei Hinsicht besonders hervorzuheben: Zum einen führen die Umstellung auf erneuerbare Energien, die Elektrifizierung von Verkehr, Industrie und Gebäuden (Sektorkopplung) sowie die zunehmende Digitalisierung zu einer enorm steigenden Komplexität dieses kritischen Infrastruktursystems. Zum anderen ist eine funktionierende Energieversorgung für alle kritischen Infrastrukturen unerlässlich und bildet das Rückgrat moderner Industriegesellschaften. Für das Energiesystem werden deshalb die mit dem Zuwachs an Komplexität zusammenhängenden Ausfallrisiken als besonders hoch eingeschätzt, sodass vorgeschlagen wird, das Energiesystem aus der Komplexitätsperspektive näher zu untersuchen. Dazu schlägt das TAB vier Vertiefungsthemen vor, aus denen eins für eine vertiefte Betrachtung im Rahmen einer TA-Untersuchung in Auftrag gegeben werden könnte. Die hier vorgeschlagenen Themen schließen an aktuelle Entwicklungen bzw. systemische Risiken an, die entweder die Komplexität des Energiesystems erhöhen oder durch diese verstärkt werden und damit die Funktionsfähigkeit des Energiesystems grundlegend betreffen:

- > *Systemische Risiken durch Sonnenstürme*: Von einer Sonneneruption spricht man, wenn der Teilchenstrom, den die Sonne kontinuierlich in den Weltraum ausstößt, kurzzeitig deutlich stärker ausfällt. Die entstehende Strahlung kann auf die Erde treffen und einen Sonnensturm verursachen (MPS o. J.). Neben Stromausfällen beispielsweise durch beschädigte Transformatoren kann ein Sonnensturm auch zu Störungen der Satellitenkommunikation, des Flugverkehrs oder des Behördenfunks führen (BABS 2020). Zwar werden Weltraumereignisse in der Resilienzstrategie der Bundesregierung (2022, S. 16) als mögliches Bedrohungsszenario erwähnt, das zum Ausfall oder Zerstörung der digitalen Infrastruktur führen könnte. Dennoch wurden potenzielle Auswirkungen bisher nicht umfassend untersucht, Frühwarnsysteme noch nicht implementiert und Maßnahmen zur Eindämmung der Auswirkungen nicht konzipiert (Bundesregierung 2018 u. 2020; Strauß/Krieger-Lamina 2017, S. 6). Es könnte anhand von Szenarien untersucht werden, wie eine Störung der Stromversorgung oder der digitalen Infrastruktur durch Kaskadeneffekte sich auf die Energieversorgung auswirken könnte. Daraus wären mögliche Präventivmaßnahmen sowie eine Strategie zur Stärkung der Resilienz des Energiesystems gegenüber dieser Art von Ereignis abzuleiten.
- > *Künstliche Intelligenz (KI) im Energiesystem*: Perspektivisch ist davon auszugehen, dass Energiesteuerungsprozesse durch Verfahren der KI unterstützt werden (Korzynietz et al. 2023, S. 191). Auf der einen Seite bietet KI



vielfältige Potenziale für das Energiesystem (Niet et al. 2023). Bereits jetzt ist ein starker Anstieg der Patente für KI und maschinelles Lernen in energiebezogenen Bereichen zu verzeichnen (Entezari et al. 2023). Ein aktiver Netzbetrieb mittels intelligenter Automatisierungs- und Regelungstechnik kann helfen, schneller mehr Photovoltaikanlagen oder Elektroautos in das Netz zu integrieren (VDE 2023). Bisher haben Automatisierungslösungen in vielen Bereichen (z. B. Nieder- und Mittelspannungsnetz, Frequenz- oder Spannungshaltung) allerdings noch Pilotcharakter (VDE 2023). Außerdem soll KI nicht nur im Stromsektor, sondern beispielsweise auch zur Optimierung der Wärmeerzeugung zum Einsatz kommen (ZfK 2023a). Auf der anderen Seite stellt KI ein Risiko für die Vorhersag- und Nachvollziehbarkeit von Handlungen dar (Gähns et al. 2022), sodass bereits kleinere Störungen gravierende Konsequenzen für das gesamte Versorgungssystem haben können – bis hin zum Blackout (Krebs/Hagenweiler 2021, S. 17). Governancestrategien für KI im Energiebereich wurden bisher nicht ausreichend diskutiert (Niet et al. 2023). Es könnte zunächst eine Bestandsaufnahme des aktuellen und perspektivischen Einsatzes von KI im Energiebereich durchgeführt werden. Auf dieser Grundlage könnten die Potenziale und Herausforderungen von KI für die Koordinierung der steigenden Akteursvielfalt bei der Energieerzeugung, für die Produktion von Strom oder Wärme untersucht werden. Dabei könnten sowohl die Chancen für die Flexibilisierung und Diversifizierung der Energieerzeugung sowie für die Stabilisierung des Netzbetriebs als auch die Risiken, die damit einhergehen, betrachtet werden.

- *Rohstoff- und Lieferantenabhängigkeit beim zukünftigen Bau, der Instandhaltung und dem Betrieb kritischer Energieinfrastrukturen:* Im Zuge der geopolitischen Auswirkungen des Angriffs Russlands auf die Ukraine wurden die systemischen Risiken, die mit der Abhängigkeit Deutschlands von ausländischen Importen fossiler Kraftstoffe einhergehen, deutlich und eine Diversifizierung der Gasimporte vorangetrieben. Ähnlich könnten die Investitionen in Wasserstofftechnologien zu Importabhängigkeiten führen (Möst et al. 2023, S. 21). Durch die Förderung und Verbreitung von Technologien für die Energiewende (z. B. Wasserstofftechnologien, Lithium-Ionen-Batterien, Brennstoffzellen, elektrische Traktionsmotoren, Windkraftanlagen) steigt die Nachfrage nach kritischen Rohstoffen. Engpässe durch Lieferkettenstörungen stellen ein systemisches Risiko für die Energieversorgung dar (Merten/Scholz 2023). Die Widerstandsfähigkeit industrieller Wertschöpfungsketten für die Energiewende hängt von der Höhe der EU-Produktion und der inländischen Versorgung, dem Vorhandensein verschiedener internationaler Lieferanten für kritische Materialien und/oder Komponenten, der Rückgewinnung kritischer Materialien aus Abfallströmen und den vorhandenen Substitutionsmöglichkeiten ab (EP 2021). Im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland stellt sich die Frage, welche neuen



Abhängigkeiten von Rohstoffen bzw. Lieferanten im Energiesystem entstehen und wie sich mögliche Versorgungsengpässe auf die Energieversorgung und/oder den Umbau des Energiesystems auswirken könnten. Im Rahmen eines TA-Projekts könnten Kriterien und Methoden für die Bemessung der Komplexität bzw. von Abhängigkeiten bei der Rohstoffversorgung erarbeitet und die Möglichkeiten der Reduzierung der bestehenden bzw. neuen Abhängigkeiten ausgelotet werden, um die Resilienz zu erhöhen. Dabei sollten mögliche Synergien mit laufenden Forschungsvorhaben wie »KI-gestützte Vorausschau zur Erkennung wertschöpfungsrelevanter Signale« (Fraunhofer IMW o.J.) genutzt werden.

- > *Sicherstellung der Funktionsfähigkeit kritischer Energieinfrastrukturen unter sich verändernden klimatischen Bedingungen:* Einen zentralen Risikofaktor für die Funktionsfähigkeit der Energieinfrastruktur stellen die sich verändernden klimatischen Bedingungen dar, denn diese bringen systemische Risiken mit sich. Infrastrukturen müssen zukünftig Extremwetterereignissen von zunehmender Stärke und Häufigkeit standhalten, wofür sie ursprünglich nicht ausgelegt wurden (ZfK 2023b). Höhere Durchschnitts- und Spitzentemperaturen könnten beispielsweise die Funktionsfähigkeit von E-Batterien beeinträchtigen. Es ist nicht nur an direkte Effekte auf die bestehende Infrastruktur hierzulande zu denken, sondern auch an die Auswirkungen auf Importe (z. B. steigender Kühlungsbedarf von französischen Atomkraftwerken oder von Rechenzentren), die sich bei anhaltenden Dürren auf den Energiebedarf in Deutschland auswirken könnten (Allhutter et al. 2022, S. 67; Krebs/Hagenweiler 2021, S. 13; Möst et al. 2023). Außerdem wirken sich geänderte klimatische Bedingungen aufgrund der stärkeren Wetter- und Jahreszeitabhängigkeit erneuerbarer Energien perspektivisch auch auf die verfügbaren Primärenergiepotenziale aus (Gernaat et al. 2021). Infrastruktursysteme müssen deshalb schon jetzt so gebaut bzw. angepasst werden (inklusive der Versorgungswege), dass sie nicht nur heute, sondern auch unter veränderten klimatischen Bedingungen die Versorgungssicherheit gewährleisten können. Untersucht werden könnte, wie gut ein digitalisiertes und in einer Megainfrastruktur integriertes Energieinfrastruktursystem systemischen Risiken durch klimatische Veränderungen standhalten kann und welche Technologiepfade wie zur Vulnerabilität bzw. Resilienz des Gesamtsystems beitragen können. Dabei sollen nicht nur die Risiken des Klimawandels für die aktuelle Energieinfrastruktur in den Blick genommen (z. B. UBA o. J.a), sondern vor allem Indikatoren für das Monitoring des künftigen Energiesystems erarbeitet werden.

Das Energiesystem dient dabei als Fallbeispiel, um allgemeinere Schlussfolgerungen dahingehend abzuleiten, mit welchen Chancen, aber auch Risiken die wachsende Komplexität von Infrastruktursystemen einhergeht. Relevant sind dabei insbesondere folgende Fragen:



- > Unter welchen Bedingungen trägt Komplexität zur Stärkung der Resilienz bei?
- > Lassen sich Kriterien identifizieren, die bei steigender Komplexität ein besonderes Risiko darstellen?
- > Welche Vorkehrungen oder Maßnahmen können negative Auswirkungen zunehmender Komplexität mindern, stoppen oder umkehren bzw. Potenziale von Komplexität heben?

Der Energiesektor zeigt exemplarisch, dass kritische Infrastruktursysteme zwar große Beharrungskräfte aufweisen alleine schon aufgrund ihrer materiellen Basis, aber auch aufgrund der fein austarierten Funktionen, die vom Zusammenspiel vieler Akteure und Einrichtungen abhängen. Gleichwohl unterliegen sie – auch dafür ist der Energiebereich ein hervorragendes Beispiel – kontinuierlichen Veränderungsprozessen, die derzeit gesellschaftspolitisch vorangetrieben werden. Festzuhalten ist deshalb: Für eine Einschätzung relevanter Entwicklungen, welche die Komplexität sowie die sich daraus ergebende Vulnerabilität bzw. Resilienz kritischer Infrastruktursysteme betreffen, sind Einzeluntersuchungen (die immer nur eine Momentaufnahme abbilden können) nur begrenzt geeignet. Aufgrund der Dynamik, der der Energiesektor (wie alle anderen Infrastruktursysteme in mehr oder weniger ausgeprägten Weise) derzeit unterliegt, sind dafür vielmehr ein kontinuierliches, langfristig angelegtes Monitoring von Trends und eine Abschätzung ihrer potenziellen Auswirkungen erforderlich.

Eine entsprechende, fortlaufend angelegte Untersuchung zur Resilienz kritischer Infrastrukturen führt das TAB seit Beginn der Vertragsperiode 2023 bis 2028 im Rahmen seiner erweiterten Foresightaktivitäten durch. Methodisch basiert das Resilienzradar auf der KI-gestützten Quellenanalyse sowie der Befragung von Expert/innen zur Validierung der Ergebnisse. Ausgehend von Themen, die in Gesellschaft, Wissenschaft und Politik aktiv diskutiert werden, werden für eine Auswahl von Sektoren Trends erfasst, die sich auf die Funktionsfähigkeit und Resilienz der jeweiligen kritischen Dienstleistungen und Infrastrukturen kurz-, mittel- oder langfristig auswirken könnten. Auf dieser Grundlage werden für jedes betrachtete Infrastruktursystem Potenziale, aber auch systemische Risiken und Gefährdungslagen abgeschätzt, die durch die identifizierten Trends und Entwicklungen sowie die sich daraus ergebenden Auswirkungen entstehen könnten. Zudem werden Fokusthemen vorgeschlagen, die sich für eine Vertiefung im Rahmen des Resilienzchecks eignen, in dem szenariobasiert tragfähige Resilienzstrategien entwickelt werden.

Da das Infrastruktursystem Energie Gegenstand der ersten Runde des Resilienzradars ist, dessen Ergebnisse im Frühjahr 2024 vorgelegt werden sollen, besteht neben den hier vorgeschlagenen Vertiefungsthemen für den Berichterstattungskreis die Möglichkeit, aus den dann identifizierten Fokusthemen ebenfalls ein Thema zur Vertiefung auszuwählen – sei es im Rahmen des Resilienzchecks oder einer TA-Untersuchung.



6 Literatur

- Allhutter, D.; Bettin, S.; Brunner, H.; Kleinfurter, J.; Krieger-Lamina, J.; Ornetzer, M.; Strauß, S. (2022): Sichere Stromversorgung und Blackout-Vorsorge in Österreich. Entwicklungen, Risiken und mögliche Schutzmaßnahmen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien
- Assemblée Nationale (2022): Rapport d'Information déposé en application de l'article 145 du Règlement PAR LA MISSION D'INFORMATION sur la résilience nationale N°5119. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/resinat/115_b5119_rapport-information.pdf (9.1.2024)
- BABS (Bundesamt für Bevölkerungsschutz) (2020): Sonnensturm. Katastrophen und Notlagen Schweiz 2020/Gefährdungsdossier. https://www.babs.admin.ch/content/babs-internet/de/aufgabenbabs/gefahrdrisiken/natgefaehrdanalyse/gefaehrdossier/_jcr_content/contentPar/accordion/accordionItems/naturbedingte_gefahr/accordionPar/downloadlist/downloadItems/142_1604482773548.download/15-Sonnensturm-GD-de.pdf (12.1.2024)
- BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) (o. J.a): Sektoren und Branchen KRITIS. https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/Sektoren-Branchen/sectoren-branchen_node.html (9.1.2024)
- BBK (o. J.b): KRITIS-Sektor: Energie. https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/Sektoren-Branchen/Energie/energie_node.html (11.1.2024)
- BBK (o. J.c): Was sind Kritische Infrastrukturen und warum sind sie so wichtig? https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/kritische-infrastrukturen_node.html (9.1.2024)
- BMI (Bundesministerium des Innern und für Heimat) (2023): Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der CER-Richtlinie und zur Stärkung der Resilienz kritischer Anlagen. <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/DE/KRITIS-DachG.html> (9.1.2024)
- Böschen, S.; Binder, C.; Rathgeber, A. (2017): Resilienzkonstruktionen: Divergenz und Konvergenz von Theoriemodellen – Eine konzeptionell-empirische Analyse. In: GAIA 26(1), S. 216–224
- BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (o. J.): Was sind Kritische Infrastrukturen? <https://www.bsi.bund.de/dok/kritis-kompakt> (9.1.2024)
- Bundesregierung (2011): Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz. Deutscher Bundestag, Drucksache 17/8250, Berlin
- Bundesregierung (2018): Auswirkungen von Weltraumwetter auf elektrotechnische Infrastruktur. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Ralph Lenkert, Dr. Gesine Löttsch, Lorenz Gösta Beutin, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. – Drucksache 19/360 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/493, Berlin
- Bundesregierung (2022): Deutsche Strategie zur Stärkung der Resilienz gegenüber Katastrophen. Umsetzung des Sendai Rahmenwerks für Katastrophenvorsorge (2015–2030) – Der Beitrag Deutschlands 2022–2030. Berlin
- Büscher, C.; Scheer, D.; Nabitz, L. (2020): Future converging infrastructures: Assessing the consequences of increasing sector coupling and integration. In: TATuP 29(2), S. 17–23



- Centeno, M.; Nag, M.; Patterson, T.; Shaver, A.; Windawi, A. (2015): The Emergence of Global Systemic Risk. In: *Annual Review of Sociology* 41, S. 65
- Clark-Ginsberg, A.; DeSmet, D.; Rueda, I. A.; Hagen, R.; Hayduk, B. (2021): Disaster risk creation and cascading disasters within large technological systems: COVID-19 and the 2021 Texas blackouts. In: *Journal of Contingencies and Crisis Management* 29(4), S. 445–449
- Climate Service Center Germany (o. J.): Vulnerabilität. https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063303/index.php.de (9.1.2024)
- Deckers, R.; Heinemann, G. (2008): Trends erkennen – Zukunft gestalten. Vom Zukunftswissen zum Markterfolg. Göttingen
- Dekker, R.; van Est, R. (2020): The convergence of electricity and digitalization in the Netherlands: Data governance as an emerging policy issue. In: *TATuP* 29(2), S. 31–37
- Dekker, S.; Cilliers, P.; Hofmeyr, J.-H. (2011): The complexity of failure: Implications of complexity theory for safety investigations. In: *Safety Science* 49(6), S. 939–945
- Dena (Deutsche Energie-Agentur) (o. J.): Umbau mit Blick fürs Ganze. Energiesysteme. <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme> (12.1.2024)
- EFP (European Foresight Platform) (2023): Megatrend/Trend/Driver/Issue. <http://foresight-platform.eu/community/forlearn/how-to-do-foresight/methods/analysis/megatrend-trend-driver-issue/> (9.1.2024)
- Egan, M. (2007): Anticipating Future Vulnerability: Defining Characteristics of Increasingly Critical Infrastructure-like Systems. In: *Journal of Contingencies and Crisis Management* 15(1), S. 4–17
- Entezari, A.; Aslani, A.; Zahedi, R.; Noorollahi, Y. (2023): Artificial intelligence and machine learning in energy systems: A bibliographic perspective. In: *Energy Strategy Reviews* 45, Art. 101017
- EP (Europäisches Parlament) (2021): Europäische Strategie für kritische Rohstoffe – P9_TA(2021)0468. Entschließung des Europäischen Parlaments vom 24. November 2021 zu einer europäischen Strategie für kritische Rohstoffe (2021/2011 [INI]). Angenommene Texte, https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0468_DE.pdf (14.2.2024)
- Fraunhofer IMW (o. J.): Wertschöpfungsradar: KI-gestützte Vorausschau zur Erkennung wertschöpfungsrelevanter Signale. <https://www.imw.fraunhofer.de/de/forschung/wissenstransfer/wissenstransferprozesse/projekte/wertschoepfungsradar.html> (12.1.2024)
- Gährs, S.; Bluhm, H.; Küttemeyer, L. (2022): Nachhaltige Digitalisierung einer dezentralen Energiewende. Stand der Forschung, relevante Fragestellungen und aktuelle Herausforderungen. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, ECOLOG – Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung, Berlin
- Gernaat, D. E. H. J.; Boer, H. S. de; Daioglou, V.; Yalaw, S.; Müller, C.; van Vuuren, D. (2021): Climate change impacts on renewable energy supply. In: *Nature Climate Change* 11(2), S. 119–125
- Goldenfeld, N.; Kadanoff, L. (1999): Simple lessons from complexity. In: *Science* 284(5411), S. 87–89
- Göll, E. (2020): Trends und Megatrends als Ansatz der modernen Zukunftsforschung. Entwicklung und Praxis. In: Janik, J.; Engler, S.; Wolf, M. (Hg.): *Energiewende*



- und Megatrends. Wechselwirkungen von globaler Gesellschaftsentwicklung und Nachhaltigkeit. Bielefeld, S. 45–59
- Grösser, S. (2015): Definition: Dynamische Komplexität. Gabler Wirtschaftslexikon, 14.2.2018, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/dynamische-komplexitaet-54122> (9.1.2024)
- Gunderson, L.; Holling, C. (2002): Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Washington D.C.
- Hauff, M. (2022): Komplexität in den Sozialwissenschaften. In: Lutz-Bachmann, M.; Schwalbe, H. (Hg.): Komplexität – System – Evolution. Eine transdisziplinäre Forschungsperspektive. Baden-Baden, S. 93–118
- Johansen, I.; Rausand, M. (2014): Defining complexity for risk assessment of sociotechnical systems: A conceptual framework. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability 228(3), S. 272–290
- Korzynietz, R.; Bierau-Delpont, F.; Moorfeld, R. (2023): Die Energiewende als Sprungbrett in ein resilientes Energiesystem. In: Wittpahl, V. (Hg.): Resilienz. Leben – Räume – Technik. Berlin/Heidelberg, S. 181–198
- Krebs, H.-A.; Hagenweiler, P. (2021): Energieresilienz und Klimaschutz. Energiesysteme, kritische Infrastrukturen und Nachhaltigkeitsziele. Wiesbaden
- Kreibich, R.; Oertel, B.; Wölk, M. (2011): Futures Studies and Future-oriented Technology Analysis Principles, Methodology and Research Questions. IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH, Berlin
- Lenz, S. (2009): Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Forschung im Bevölkerungsschutz 4, Bonn Leopoldina (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina); acatech (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften); Akademieunion (Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften) (2021): Resilienz digitalisierter Energiesysteme. Wie können Blackout-Risiken begrenzt werden? München u. a. O.
- Linkov, I.; Bridges, T.; Creutzig, F.; Decker, J.; Fox-Lent, C.; Kröger, W.; Lambert, J.; Levermann, A.; Montreuil, B.; Nathwani, J.; Nyer, R. et al. (2014): Changing the resilience paradigm. In: Nature Climate Change 4(6), S. 407–409
- Luderer, G.; Bartels, F.; Blesl, M.; Burkhardt, A.; Edenhofer, O.; Fahl, U.; Gillich, A.; Herbst, A.; Hufendiek, K.; Kaiser, M.; Kittel, L.; Koller, F.; Kost, C. et al. (2022): Deutschland auf dem Weg aus der Gaskrise: Wie sich Klimaschutz und Energie-souveränität vereinen lassen. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam
- Lutz-Bachmann, M. (2022): Komplexität sozialer Systeme. Philosophische Überlegungen im Anschluss an die Systemtheorie von Niklas Luhmann. In: Lutz-Bachmann, M.; Schwalbe, H. (Hg.): Komplexität – System – Evolution. Eine transdisziplinäre Forschungsperspektive. Baden-Baden, S. 119–145
- Mentges, A.; Halekotte, L.; Schneider, M.; Demmer, T.; Lichte, D. (2023): A resilience glossary shaped by context: Reviewing resilience-related terms for critical infrastructures. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2302/2302.04524.pdf> (9.1.2024)
- Merten, F.; Scholz, A. (2023): Wasserstoff in der Energieversorgung und mögliche Importabhängigkeiten. In: Ökologisches Wirtschaften 38(2), S. 18–20
- Mitchell, M. (2009): Complexity: A Guided Tour. New York
- Monstadt, J.; Schmidt, M. (2019): Urban resilience in the making? The governance of critical infrastructures in German cities. In: Urban Studies 56(11), S. 2353–2371
- Möst, D.; Lorenz, L.; Glynos, D. (2023): Versorgungssicherheit braucht Diversifizierung. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 47(3), S. 20–25



- MPS (Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung) (o.J.): Was ist ein Sonnensturm und wie entsteht er? <https://www.mps.mpg.de/sonnenstuerme-sonnenaktivitaet-faq/1> (12.1.2024)
- Müggenburg, J. (2019): Kybernetik. In: Liggieri, K.; Müller, O. (Hg.): Mensch-Maschine-Interaktion. Handbuch zu Geschichte – Kultur – Ethik. Berlin, S.280–282
- Naisbitt, J.; Aburdene, P. (1992): Megatrends 2000. Zehn Perspektiven für den Weg ins nächste Jahrtausend. Düsseldorf
- Nielsen, C.; Larsen, P.; Fitzgerald, J.; Woodcock, J.; Peleska, J. (2015): Systems of Systems Engineering: Basic Concepts, Model-Based Techniques, and Research Directions. In: ACM Computing Survey 48(2), S. 1–41
- Niet, I.; van den Berghe, L.; van Est, R. (2023): Societal impacts of AI integration in the EU electricity market: The Dutch case. In: Technological Forecasting and Social Change 192, Art. 122554
- OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) (2003): Emerging Risks in the 21st Century. An Agenda for Action. Paris
- Olsson, L.; Jerneck, A.; Thoren, H.; Persson, J.; O'Byrne, D. (2015): Why resilience is unappealing to social science: Theoretical and empirical investigations of the scientific use of resilience. In: Science advances 1(4), Art. 1400217
- Page, S. (2015): What Sociologists Should Know About Complexity. In: Annual Review of Sociology 41, S.21–41
- Perrow, C. (1984): Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies. Princeton
- Postma, A.; Papp, B. (2021): Of trends and trend pyramids. In: Journal of Tourism Futures 7(2), S. 162–167
- Prognos (2022): 10. Monitoring der Energiewende. <https://www.prognos.com/de/projekt/10-monitoring-der-energiewende> (11.1.2024)
- Renn, O. (2019): Gefühlte Wahrheiten. Orientierung in Zeiten postfaktischer Verunsicherung. Leverkusen
- Renn, O.; Keil, F. (2008): Systemische Risiken: Versuch einer Charakterisierung. In: GAIA 17(4), S. 349–354
- Renn, O.; Laubichler, M.; Lucas, K.; Kröger, W.; Schanze, J.; Scholz, R.; Schweizer, P.-J. (2022): Systemic Risks from Different Perspectives. In: Risk Analysis 42(9), S. 1902–1920
- Rudloff, B. (2022): Wirtschaftliche Resilienz: Kompass oder Catchword? Welche Fallstricke und Folgeeffekte die EU im Krisenmanagement beachten muss. Stiftung Wissenschaft und Politik, SWP-Studie 1, Berlin
- Schweizer, P.-J. (2023): Transdisziplinäre Governance systemischer Risiken. In: Sonnberger, M.; Bleicher, A.; Groß, M. (Hg.): Handbuch Umweltsoziologie. Wiesbaden, S. 1–16
- Schweizer, P.-J.; Renn, O. (2019a): Governance of systemic risks for disaster prevention and mitigation. In: Disaster Prevention and Management 28(6), S. 862–874
- Schweizer, P.-J.; Renn, O. (2019b): Systemische Risiken und Transformationsprozesse auf dem Weg zu einer nachhaltigen Wirtschafts- und Gesellschaftsentwicklung. In: Englert, M.; Ternès, A. (Hg.): Nachhaltiges Management. Nachhaltigkeit als exzellenten Managementansatz entwickeln. Berlin, S. 211–227
- Statista (o.J.): Strombedarf von E-Autos in Europa bis 2030. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1409123/umfrage/strombedarf-e-autos-europa/> (12.1.2024)
- Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T.; Bett, A.; Henning, H.-M. (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg



- Strauß, B.; Bettin, S. (2023): Digitalisierung, Vulnerabilität und (kritische) gesellschaftliche Infrastrukturen. Entwicklungsstand, Trends und zentrale Herausforderungen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien
- Strauß, S.; Krieger-Lamina, J. (2017): Digitaler Stillstand. Die Verletzlichkeit der digital vernetzten Gesellschaft – Kritische Infrastrukturen und Systemperspektiven. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2010): Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und lagandauernden Ausfalls der Stromversorgung. (Petermann, T.; Bradke, H.; Lüllmann, A.; Poetzsch, M.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 141, Berlin
- TAB (2024): Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken. (Behrendt, S.; Evers-Wölk, M.; Kollosche, I.; Revermann, C.; Sauter, A.; Sonk, M.; Thomas, D.; Uhl, A.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 209, Berlin (im Erscheinen)
- Tapia, M.; Thier, P.; Gößling-Reisemann, S. (2020): Building resilient cyber-physical power systems: An approach using vulnerability assessment and resilience. In: TATuP 29(1), S. 23–29
- UBA (Umweltbundesamt) (o.J.a): Anpassung: Handlungsfeld Energiewirtschaft. 11.1.2022, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgenanpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene/handlungsfeld-energiewirtschaft> (12.1.2024)
- UBA (o.J.b): Kraftwerke: konventionelle und erneuerbare Energieträger. 22.3.2023, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraftwerke-konventionelle-erneuerbare#kraftwerkstandorte-in-deutschland> (12.1.2024)
- UBA (o.J.c): Netzausbau. 2.8.2023, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/netzausbau#Netzausbau> (12.1.2024)
- UBA (o.J.d): Primärenergiegewinnung und -importe. 16.12.2022, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe> (12.1.2024)
- UNDP (United Nations Development Programme) (2022): UNDP RBAP: Foresight Playbook. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-07/UNDP-RBAP-Foresight-Playbook-Appendix-2022_0.pdf (11.1.2024)
- UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (o.J.): Resilience. <https://www.undrr.org/terminology/resilience> (9.1.2024)
- VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.) (2023): Neue VDE Studie: Mit Automatisierung der Stromverteilnetze erneuerbare Energien schneller und zuverlässiger integrieren. <https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/vde-studie-etg-hochautomatisierung-stromnetze-energie> (12.1.2024)
- ZfK (Zeitung für kommunale Wirtschaft) (2023a): Gasag optimiert Wärmeerezeugung mit KI. <https://www.zfk.de/energie/waerme/gasag-optimiert-waermeerzeugung-mit-ki> (12.1.2024)
- ZfK (2023b): IEA: deutliche Veränderungen im Energiesektor bis 2030. <https://www.zfk.de/unternehmen/nachrichten/iea-deutliche-veraenderungen-im-energiesektor-bis-2030> (12.1.2024)
- Zio, E. (2016): Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. In: Reliability Engineering & System Safety 152, S. 137–150
- Zukunftsbüro des BMBF (2022): voraus:schau! I-III. Runde: 112 Themen. https://www.vorausschau.de/SharedDocs/Downloads/vorausschau/de/112_Themenbl%C3%A4tter.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (9.1.2024)





7 **Abbildungen**

Abb. 2.1	Unterschied zwischen komplexen und komplizierten Systemen	10
Abb. 2.2	Kritische Infrastrukturen	11
Abb. 4.1	Quellen, Umwandlung/Speicherung und Verbrauch von Energie	27



**BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG**

Karlsruher Institut für Technologie

Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de
Twitter: @TABundestag