

Infrastruktursystem Energie

Ergebnisse aus dem Resilienz-Radar



Downloadversion
foresight.tab-beim-bundestag.de

Juni 2024
Foresight-Report

Foresight-Report zum Infrastruktursystem Energie, Juni 2024, Downloadversion

Die TAB Foresight-Reports fassen die Ergebnisse des Resilienz-Radars zusammen und erscheinen seit 2024 jährlich auf der Microsite <https://foresight.tab-beim-bundestag.de>.

Das Resilienz-Radar dient der Identifikation und Bewertung von Entwicklungen, die mit systemischen Risiken für kritische Infrastrukturen verbunden sind. Neben der Analyse zentraler Trends liegt der Fokus auf der Einschätzung von systemischen Risiken mit potenziell weitreichenden Auswirkungen, um die Gefährdungslage einzelner Infrastruktursysteme fundiert zu bewerten. Zudem werden jeweils infrastrukturspezifische Fokusthemen vorgeschlagen, die von besonderer Relevanz für eine vertiefende Untersuchung sind. Die Ergebnisse werden jährlich in den Foresight-Reports zusammengefasst.



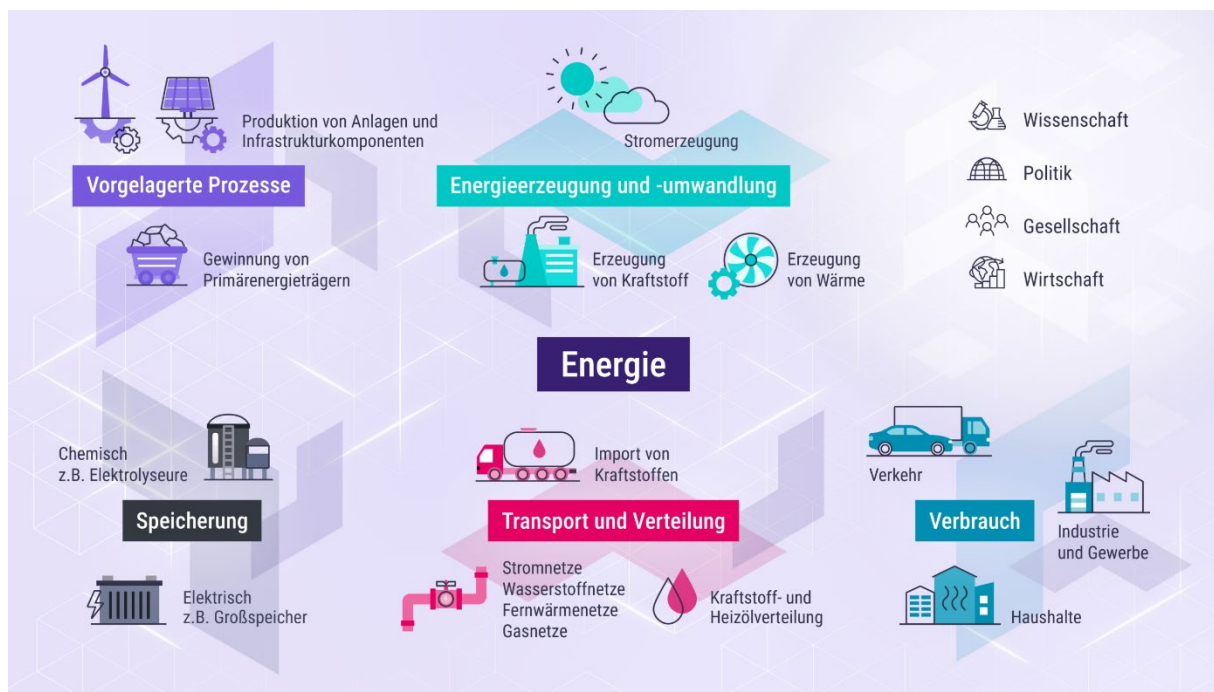
Das TAB analysiert im Auftrag des Deutschen Bundestages umfassend und vorausschauend die Potenziale wissenschaftlich-technischer Entwicklungen und ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Inhalt

Infrastruktursystem Energie	2
Überblick über aktuelle Trends.....	7
Trendcluster Digitalisierung der Netz-und Verbrauchssteuerung ..	10
Trendcluster Dekarbonisierung des Energiesystems	13
Trendcluster: Ausbau von Power-to-X-Infrastrukturen und der Sektorkopplung	21
Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Energie.....	28
Status quo der Gefährdungslagen.....	28
Entwicklungsdynamiken ausgewählter systemischer Risiken und Gefährdungslagen.....	34
Gefährdungslagen im Zuge der Transformation.....	39
Fokusthemen	46
Fokusthema 1: Dezentralität und Zentralität im zukünftigen Stromnetz.....	46
Fokusthema 2: die Rolle von Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem.....	47
Fokusthema 3: KI-Anwendungen im Stromnetz.....	47
Methodik und Vorgehen	49

Infrastruktursystem Energie

Der Energiesektor ist von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung. Gebraucht wird Energie für sämtliche technischen Prozesse und Anwendungen – beispielsweise zur Beleuchtung, für den Betrieb von Informations- und Kommunikationstechnik, zur Erzeugung von Kälte und Wärme, für den Betrieb von Industrieanlagen sowie für Verkehr und Logistik. Das politisch festgelegte Ziel der Klimaneutralität bis 2045 prägt zusammen mit der Sicherstellung der Energieversorgung das Infrastruktursystem derzeit maßgeblich. Bis 2045 sollen erneuerbare Energiequellen wie Wind- und Wasserkraft, Sonnenenergie, Geothermie und nachwachsende Rohstoffe vorrangig genutzt und der Energiebedarf durch sparsame und effiziente Nutzung reduziert werden. Die Bundesregierung hat sich zudem vorgenommen, bis 2030 in Deutschland mindestens 50 % der Wärme klimaneutral zu erzeugen, bis 2045 nahezu vollständig erneuerbar zu heizen und den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis 2030 auf mindestens 80 % zu steigern.



Systembild des Infrastruktursystems Energie

Um die klima- und energiepolitischen Ziele zu erreichen, wurde von der Bundesregierung beschlossen, den Ausstieg aus der Kohle vorzuziehen. Die Unabhängigkeit von fossilen Energien soll durch einen massiven

Ausbau erneuerbarer Energien (vor allem Solar- und Windkraft), den dafür erforderlichen Netzausbau, Elektrifizierung und Sektorkopplung erreicht werden. Wasserstoff soll außerdem als Energieträger und industrieller Rohstoff für die Energiewirtschaft und zur Dekarbonisierung von Industrie, Luftfahrt und Schifffahrt eingesetzt werden. Parallel dazu werden über die CO₂-Bepreisung im europäischen Emissionshandel und das Brennstoffemissionshandelsgesetz die Preise für fossile Energien systematisch erhöht [1].

Das Infrastruktursystem ist komplex und befindet sich nicht zuletzt aufgrund der Transformationsbestrebungen in einer kontinuierlichen Veränderungsdynamik. Dies betrifft sowohl die beteiligten Akteure als auch die Wertschöpfungsstrukturen.

Vorgelagerte Prozesse

Zu den vorgelagerten Prozessen gehört die Produktion von Anlagen und Infrastrukturkomponenten, die für die Gewinnung von Primärenergie, für die Umwandlung und Speicherung von Energie sowie ihre Verteilung und ihren Verbrauch notwendig sind. Dafür zuständig sind spezialisierte Unternehmen z.B. der Öl- und Gas-, Solar- oder Windenergieindustrie. Zu den vielfältigen Energiequellen gehören Primärenergien wie Gas, Erdöl, Braun- und Steinkohle oder Uran, die aus dem Boden gewonnen und in der Regel vor der Nutzung aufgearbeitet werden. Abgesehen von den meisten erneuerbaren Energieträgern (Solar-, Wind-, Wasserkraft), 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.

Energieerzeugung und -umwandlung

Primärenergie wird (in der Regel) in Sekundärenergie umgewandelt, damit sie in besser nutzbarer Form – sprich als Brenn- oder Kraftstoff, Wärme oder Elektrizität – vorliegt. Die Art der Umwandlung und Aufbereitung unterscheidet sich bei den verschiedenen Energiequellen, erfordert teils großtechnische Anlagen (u. a. Raffinerien, Kraftwerke) und ist in der Regel mit mehr oder weniger großen Umweltbelastungen (z. B. Stickoxid- und Treibhausgasemissionen) und Umwandlungsverlusten verbunden. Zunehmend werden fossile Energien durch erneuerbare Energien (z.B. Solar- und Windkraft) ersetzt, deren Gewinnung ebenfalls technische Anlagen erfordert, aber keine Treibhausgase verursacht.

Speicherung

Sowohl Brenn- oder Kraftstoffe als auch elektrische Energie, die nicht sofort verbraucht werden, müssen für eine spätere Nutzung zwischengespeichert werden. Energiespeicher werden im Zuge der Umstellung auf nichtfossile Energieträger für ein funktionierendes Energiesystem immer wichtiger. Grund dafür ist, dass das Angebot an Wind und Sonne als erneuerbare Energiequellen in Abhängigkeit von meteorologischen Zuständen über den Tag und das Jahr stark fluktuiert und die erneuerbar erzeugte Energie deshalb zum Teil für eine spätere Nutzung zwischengespeichert werden muss. Infrage kommen dafür die elektrische Speicherung in Form von mobilen und stationären Batterien, Pumpspeicherkraftwerke, aber auch elektrochemische Speicher (z. B. Wasserstoff) und thermische Speicher (z.B. saisonale Wärmespeicher). Die Speicherlösungen setzen wiederum den Aufbau eigener Infrastrukturen bzw. Anlagen voraus (z. B. Batterieproduktion, Elektrolyseure, Nahwärmenetze).

Transport und Verteilung

Die verschiedenen stofflichen Energieträger sowie elektrische Energie und Wärme müssen schließlich transportiert und an die Verbraucher/innen verteilt werden. In diesen Schritt sind verschiedene Akteure involviert, darunter Stromerzeuger und Energieversorger sowie Netzbetreiber, aber auch Mineralölkonzerne. Erforderlich sind entweder ausdifferenzierte logistische Prozesse, um zum Beispiel die verschiedenen Treibstoffarten entlang der Lieferkette (Raffinerie, Zwischenlager) zu den Verkaufsstellen zu transportieren, oder es werden spezielle Netze genutzt (z. B. für die Übertragung/Verteilung von Strom, Gas oder Fern- und Nahwärme). Insbesondere für das Stromnetz ergeben sich im Zuge der Verlagerung von Standorten der Stromherstellung und der Notwendigkeit, künftig Strom bidirektional zu transportieren, größere Aus- und Umbaubedarfe. Auch für neue Energieträger wie Wasserstoff müssen geeignete Speicher- und Netzinfrastrukturen aufgebaut bzw. vorhandene Erdgasinfrastrukturen angepasst werden.

Verbrauch

Der Endenergieverbrauch wird oft nach den Sektoren Industrie, Verkehr, private Haushalte und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen unterschieden. Während der Verbrauch von Industrie und Verkehr über das Jahr vergleichsweise stabil bleibt, sind die Verbräuche von privaten Haushalten sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen stark von der

Witterung abhängig, denn Raumwärme macht dort zwischen 50 % und 70 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus [\[2\]](#).

Kernergebnisse

Drei Trendcluster

prägen gemäß der Trendanalyse derzeit das Infrastruktursystem: die Digitalisierung der Netz- und Verbrauchssteuerung, die Dekarbonisierung des Energiesystems und der Ausbau von Power-to-X-Infrastrukturen.

Aufkommende Technologien

sind unter anderem der Einsatz von KI zur Vermeidung von Netzausfällen, die Entwicklung neuer Materialien für die Energiewende sowie die Entwicklung alternativer EE-Anlagen.

Der Status quo der Gefährdungslagen

des Energiesystems insgesamt gegenüber allen systemischen Risiken ist als eher hoch einzustufen. Aktuell werden Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems vor allem durch geopolitische Konflikte, Versorgungsengpässe und Wetterextreme gefährdet.

Entwicklungsdynamiken

infolge von wachsender Systemkomplexität und fortschreitender Digitalisierung sind besonders ausgeprägt und führen zu einer zunehmenden Gefährdungslage durch Cyberangriffe sowie Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit. Gleichzeitig verstärken geopolitische Konflikte die Gefährdungslage für das Energiesystem.

Die Transformation des Energiesystems

ist aufgrund langwirkender Pfadabhängigkeiten besonders herausfordernd. Darüber hinaus besteht die Gefahr von „Mid-Transition-Lock-Ins“ z.B. durch Erdgaskraftwerke als Brückentechnologie. Auch die gesellschaftliche Polarisierung in Bezug auf den Ausbau erneuerbarer Energien kann das Erreichen der Transformationsziele gefährden.

Fokusthemen

Für eine Vertiefung im Rahmen des Resilienz-Check werden folgende Fokusthemen vorgeschlagen: Dezentralität und Zentralität im

zukünftigen Stromnetz, die Rolle von Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem und KI-Anwendungen im Stromnetz.

Referenzen

1. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023): Wohlstand klimaneutral erneuern. Werkstattbericht des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), www.bmwk.de
2. Umweltbundesamt (2024): Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. www.umweltbundesamt.de

Überblick über aktuelle Trends

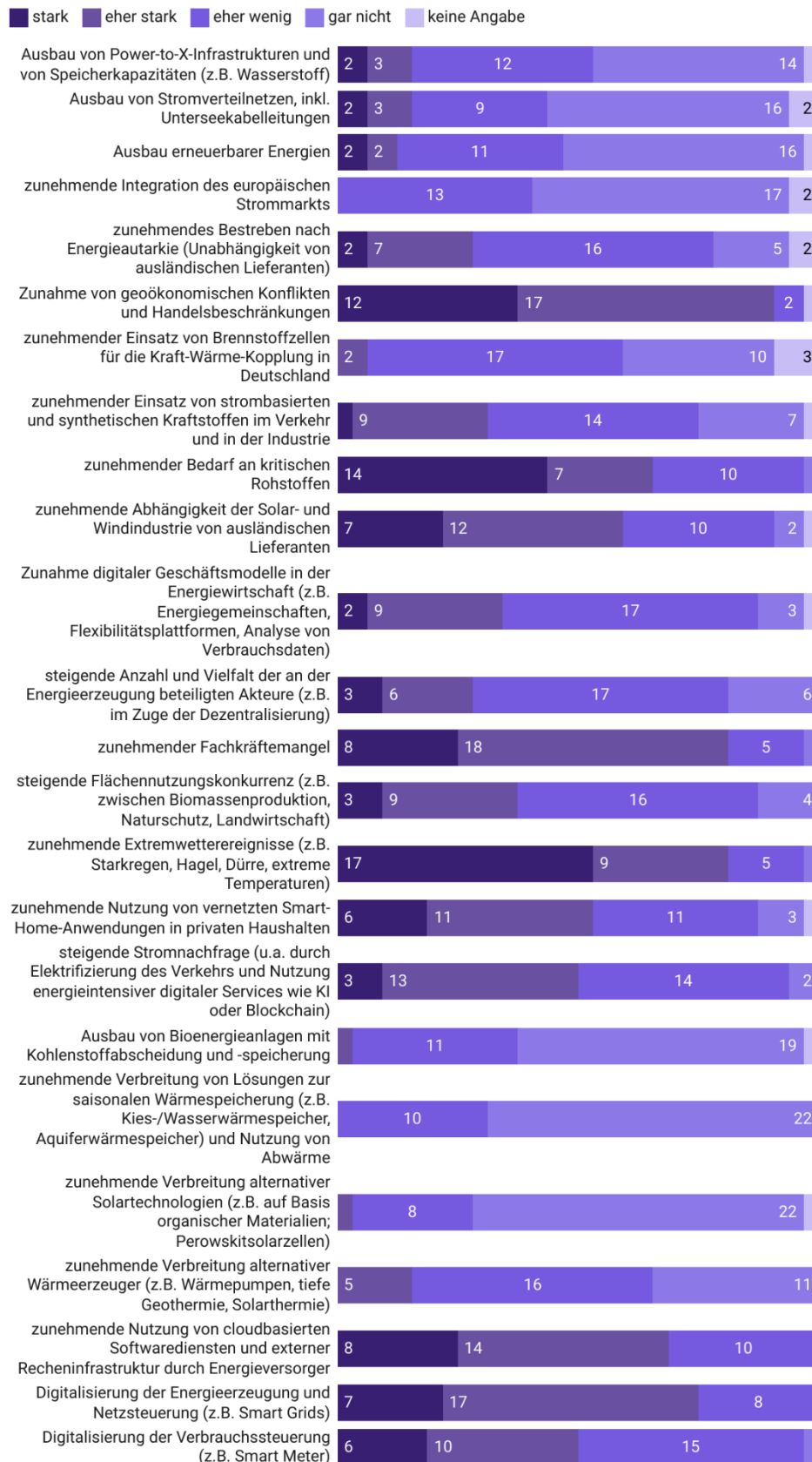
Geoökonomische Konflikte und ein Bestreben nach Energieautarkie haben in den letzten Jahren das Infrastruktursystem Energie geprägt. Darüber hinaus werden Netze und Verbräuche zunehmend digital gesteuert. Die Dekarbonisierung des Energiesystems und der Ausbau von Power-to-X-Infrastrukturen werden aktiv vorangetrieben.

Seit der Annexion der Krim [\[1\]](#) im Jahr 2014 und dem russischen Angriffskrieg gegen die Ukraine sind geoökonomische Konflikte und Handelsbeschränkungen als Vulnerabilitätsfaktor für das Energiesystem stark in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Die Sprengung der Nord-Stream-Pipelines hat die Verletzlichkeit der Energieinfrastruktur besonders deutlich gemacht. Aber auch der globale Wettstreit um kritische Rohstoffe verschärft sich und die damit zusammenhängenden Risiken steigen, begünstigt durch strukturelle Faktoren wie eine hohe Importabhängigkeit bei kritischen Rohstoffen und begrenzte kurzfristige Substitutionsmöglichkeiten [\[2\]\[3\]](#).

Geoökonomische Konflikte und Handelsbeschränkungen wurden von der überwiegenden Mehrheit der befragten Expert/innen ([Datengrafik](#)) als ein relevanter Verletzlichkeitsfaktor für das System und damit als Versorgungsrisiko eingeschätzt. Generell drohen sich geopolitische Konflikte umso stärker auf das Infrastruktursystem auszuwirken, je größer die Lieferkettenabhängigkeiten sind [\[1\]](#). Entsprechend hat seit Beginn des Konflikts zwischen Russland und der Ukraine das Bestreben nach Energieautarkie bzw. nach einem höheren Energieautarkiegrad und dabei insbesondere nach Unabhängigkeit von ausländischen Lieferanten beim Import fossiler Energieträger politisch und gesellschaftlich stark an Bedeutung gewonnen [\[4\]\[5\]](#).

Im Zuge des voranschreitenden Klimawandels ist seit einigen Jahren eine Zunahme von Wetterextremen festzustellen, die zu Schäden an der Energieinfrastruktur führen können. Infrastrukturen sind in der Regel nicht für extremes Wetter ausgelegt und unterliegen Investitionszyklen, die sich über Jahre oder Jahrzehnte erstrecken. Dies trägt laut der Expertenbefragung ([Datengrafik](#)) zur steigenden Vulnerabilität des Infrastruktursystems bei.

Inwieweit tragen die folgenden Trends aus Ihrer Sicht zu einer erhöhten Verletzlichkeit des Infrastruktursystems Energie innerhalb der nächsten 10 Jahre bei?

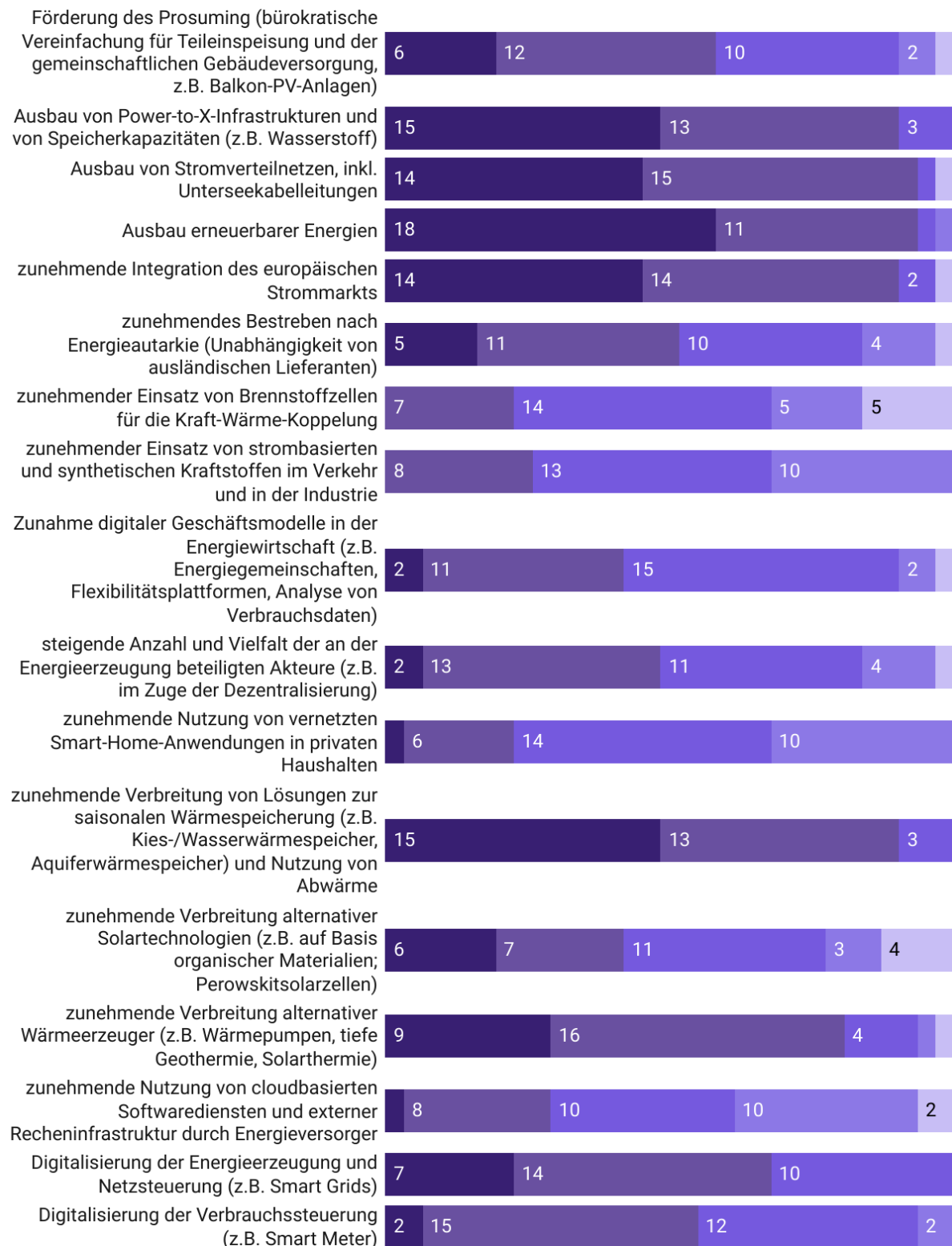


Ergebnisse aus der Panelbefragung (n=32)

Quelle: TAB, Resilienz-Radar 2023/24 • Erstellt mit Datawrapper

Inwieweit tragen die folgenden Trends aus Ihrer Sicht zu einer erhöhten Resilienz des Infrastruktursystems Energie innerhalb der nächsten zehn Jahre bei?

stark eher stark eher wenig gar nicht keine Angabe



Ergebnisse aus der Panelbefragung (n=31)

Quelle: TAB, Resilienz-Radar 2023/24 • Erstellt mit Datawrapper

Referenzen

1. DIW (2020): Iran, Russland, Hongkong: Geopolitische Risiken belasten deutsche Wirtschaft. DIW Wochenbericht 6, www.diw.de/
2. EC (2020b): Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken, eur-lex.europa.eu/
3. IRENA (International Renewable Energy Agency) (2023): Geopolitics of the energy transition. Critical materials, www.irena.org/
4. Dieter, H. (2021): Die neue Liebe zur Autarkie. Risiken für die deutsche und europäische Exportwirtschaft. SWP-Aktuell 2021/A 18, 23.02.2021, 8 Seiten. DOI: [10.18449/2021A18](https://doi.org/10.18449/2021A18)
5. Grothmann, T.; Frick, V.; Harnisch, R.; Münsch, M.; Kettner, D. E.; Thorun, C. (2023): Umweltbewusstsein in Deutschland 2022. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. Umweltbundesamt. www.umweltbundesamt.de/

Trendcluster Digitalisierung der Netz-und Verbrauchssteuerung

Die Digitalisierung hält in der Energiewirtschaft seit einigen Jahren Einzug und wird auch politisch unterstützt: 2023 beschloss der Bundestag ein **Gesetz** zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende. Die Digitalisierung betrifft insbesondere die Erfassung von Endenergieverbräuchen sowie der Energieerzeugung und Netzsteuerung. Auch die Integration des europäischen Strommarkts treibt die Digitalisierung des Infrastruktursystems.

Weltweit sind die netzbezogenen Investitionen in digitale Technologien seit 2015 um über 50 % gestiegen [2]. Digitalisiert wird zum einen die Erfassung von Endenergieverbräuchen. Mithilfe intelligenter Messgeräte (Smart Meter) kann der Stromverbrauch von Kund/innen in Echtzeit gemessen und automatisch sowohl an die Kund/innen selbst als auch an Stromanbieter und Netzbetreiber kommuniziert werden, um ein effizientes, bedarfsgerechtes Stromlastmanagement zu ermöglichen (ggf. mit dem Ziel lastabhängiger Tarife). Zum anderen ist eine Digitalisierung der Energieerzeugung und Netzsteuerung zu beobachten (Smart Grids). Damit lässt sich der zunehmende Koordinierungsaufwand senken, der sich aus der steigenden Anzahl der an der Energieerzeugung beteiligten Akteure und Unternehmen ergibt [3]. So wächst die Anzahl der Verbraucher/innen, die zugleich Energie erzeugen (Prosumer), schnell an. Beispielsweise verdreifachte

sich die Anzahl der installierten Balkonkraftwerke (kleine Solaranlagen) zwischen 2022 und 2023 [4]. Die Koordination zwischen Netz, Erzeugung und Verbrauch erfolgt immer mehr dezentral sowie bidirektional [5] und [künstliche Intelligenz](#) (KI) kommt auch dabei immer stärker zum Einsatz. Die digitale Netzsteuerung kann resilienzfördernd wirken, indem sie die Integration des europäischen Strommarkts erleichtert: Regionen mit einem Elektrizitätsüberschuss können Regionen mit einem temporären Engpass leichter unterstützen.

Um die wachsenden Datenmengen zu speichern, analysieren und zu verarbeiten, nutzen Energieversorger zunehmend cloubasierte Softwaredienste und externe Recheninfrastruktur [6]. Ihr Einsatz schafft Abhängigkeiten von der IKT-Infrastruktur und trägt – so die Einschätzung der überwiegenden Mehrheit der Befragten Expert/innen ([Datengrafik](#)) – zu einer erhöhten Verletzlichkeit des Energiesystems bei. Mit der Digitalisierung des Energiesystems geht auch die Zunahme digitaler Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft einher.

Energiegemeinschaften werden gebildet, Flexibilitätsplattformen entwickelt und Verbrauchsdatenanalysen angeboten.

Marktkonzentrationen durch digitale Geschäftsmodelle sind perspektivisch denkbar [6] und könnten ökonomische Abhängigkeiten schaffen, die nur schwer reversibel sind [3]

Die fortschreitende Digitalisierung des Energiesystems kann einerseits zur Resilienz des Energiesystems beitragen, bringt aber andererseits auch neue Risiken durch die zunehmende Abhängigkeit von IKT-Infrastruktur mit sich. Diese Ambivalenz zeigt sich auch in den Befragungsergebnissen ([Datengrafik](#)): So sind etwa zwei Drittel der befragten Expert/innen der Ansicht, dass die Digitalisierung der Energieerzeugung und Netzsteuerung die Resilienz des Infrastruktursystems erhöht, während zugleich ebenfalls zwei Drittel damit eine verstärkte Verletzlichkeit verbindet. Einher gehen damit systemische Risiken durch Cyberkriminalität sowie Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit durch Komplexitätssteigerung.

Aufkommende technologische Entwicklung

KI zur Vermeidung von Netzausfällen

Mit KI wird das Potenzial assoziiert, die Funktionsfähigkeit und Resilienz von Stromnetzen zu erhöhen. Mehrere Versorgungsunternehmen integrieren KI auch in kritische Abläufe, beispielsweise zur Wartung physischer Anlagen oder zur Optimierung

der Auslastung von Windenergieanlagen. Zahlreiche Start-ups entwickeln KI-Anwendungen für den Energiebereich [7]. Ein für die Resilienz des Systems besonders relevantes Beispiel ist die Markteinführung eines KI-Systems, das historische Daten von Versorgungsunternehmen über die Leistung von Energieanlagen mit globalen Klimamodellen verknüpft. Dies ermöglicht die Vorhersage der Wahrscheinlichkeit von Netzausfällen aufgrund extremer Wetterereignisse wie Schneestürme oder Waldbrände [8].

Referenzen

1. Deutscher Bundestag (2023): Anhörung zum »Neustart der Digitalisierung der Energiewende«. 16.3.2023. www.bundestag.de/
2. Internhttps://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-938228ational Energy Agency (2023): Digitalisation. www.iea.org/
3. Strauß, S.; Bettin, S. (2023): Digitalisierung, Vulnerabilität und (kritische) gesellschaftliche Infrastrukturen. Entwicklungsstand, Trends und zentrale Herausforderungen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, epub.oeaw.ac.at/
4. Janson, M. (2023): Mini-Solaranlagen. Der Trend geht zum Balkonkraftwerk. 29.8.2023. de.statista.com/ (26.2.2024)
5. EWI (2023): H2-Geopolitik. Geopolitische Risiken im globalen Wasserstoffhandel. ewi.uni-koeln.de/
6. Gähns, S.; Bluhm, H.; Kütemeyer, 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.www.ioew.de/
7. Dena (2024): Künstliche Intelligenz. EnerKI Map Künstliche Intelligenz im Energiesektor. dena.de/
8. June, K. (2023): Four ways AI is making the power grid faster and more resilient. www.technologyreview.com/

Trendcluster Dekarbonisierung des Energiesystems

Wachsende Strombedarfe prägen das Infrastruktursysteme und machen den Ausbau erneuerbarer Energien sowie von Stromnetzen erforderlich. Außerdem fordern steigende Abhängigkeiten der Solar- und Windindustrie von ausländischen Lieferanten sowie wachsende Knappheit kritischer Rohstoffe das Infrastruktursystem heraus. Um dagegen zu halten, wird an neuen Formen der Energieerzeugung gearbeitet, an der Erzeugung neuer Materialien für die Energiewende und an der Entwicklung von Technologien zur Abscheidung und Nutzung von Kohlenstoff (CCU).

Um die klimapolitischen Ziele zu erreichen, werden die Infrastrukturen der Energieversorgung derzeit massiv um- bzw. ausgebaut. Insbesondere der Ausbau der erneuerbaren Energien steht im Mittelpunkt. Dieser gehört laut den Befragungsergebnissen

([Datengrafik](#)) zu den Trends, die als besonders relevant für die Resilienzsteigerung des Infrastruktursystems eingeschätzt werden. Seit 2000 hat der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung von 6,6 % auf 53 % im Jahr 2023 deutlich zugenommen [\[1\]](#). Investitionen in die Errichtung von Erneuerbare-Energien-Anlagen in Deutschland steigen, nach einem mehrjährigen Rückgang, seit 2019 wieder an [\[2\]](#). Die installierte Leistung der Photovoltaikanlagen hat sich innerhalb von 10 Jahren mehr als verdoppelt [\[3\]](#). Die Bruttoenergieerzeugung aus Wind auf dem Festland (Onshorewindkraft) hat sich in diesem Zeitraum verdoppelt. Die Installation von Neuanlagen schreitet allerdings langsamer voran, als es die politisch festgelegten Klimaziele erfordern [\[4\]](#). Bei der Bruttoleistung der Offshorewindkraft ist ein Wachstum von 0,7 TWh im Jahr 2012 auf 25,2 TWh im Jahr 2022 zu verzeichnen [\[2\]](#). Es gibt zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bei der Weiterentwicklung erneuerbarer Energien. Beispielsweise wurde die größte schwimmende Solaranlage auf dem Geiseltalsee – dem größten künstlichen See Deutschlands – gebaut [\[5\]](#), und es wird an solaren Aufwindkraftwerken geforscht, bei denen die Kraft von Sonne und Wind gebündelt wird, um Strom zu erzeugen [\[6\]](#). Außerdem waren 2023 bei der Entwicklung **neuer Materialien für die Energiewende** wichtige Fortschritte zu verzeichnen. Parallel dazu werden Technologien zur **weltraumbasierten Energieproduktion** intensiv erforscht und rücken in den Bereich des Möglichen. Auch im Bereich der Fusionsenergie sind aktuell verstärkte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten festzustellen, die sich in wachsenden Investitionen (sowohl privater als auch öffentlicher Geldgeber) und einer steigenden Zahl von Start-ups manifestieren [\[7\]](#).

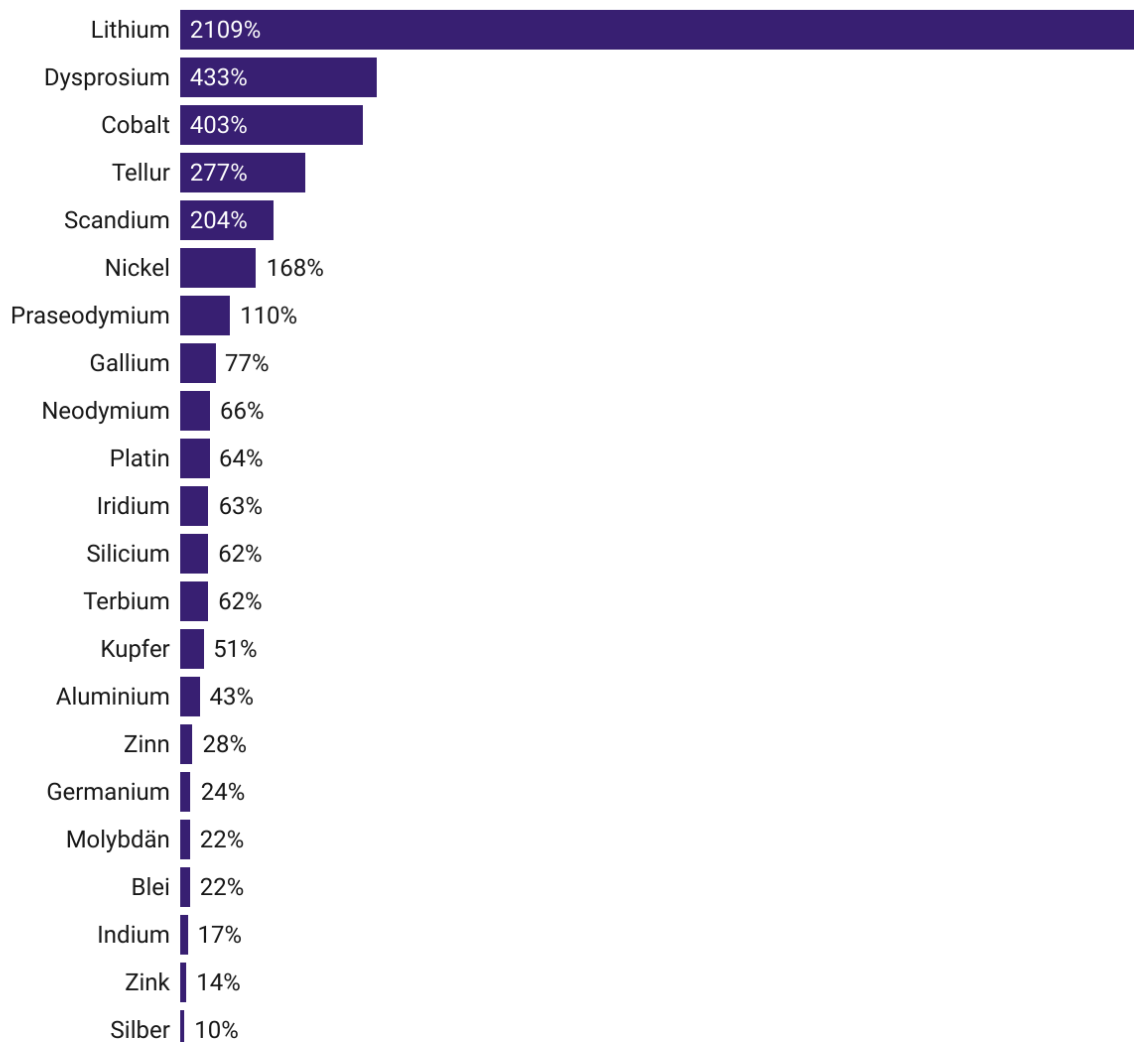
Der Ausbau der Stromnetze ist erforderlich, weil die Erzeugeranlagen teilweise weit entfernt von Nachfragezentren stehen und sich zusätzliche und schnell wachsende Strombedarfe aus der Elektrifizierung von Industrieprozessen, der Wärmeversorgung [\[8\]](#) sowie des Verkehrs ergeben. So lag der Strombedarf für E-Autos in Europa 2022 knapp 5-mal so hoch wie 2021 [\[9\]](#). Für die Hälfte der befragten Expert/innen ([Datengrafik](#)) trägt die wachsende Stromnachfrage zur Verletzlichkeit des Infrastruktursystems bei. Entsprechend ist der Ausbau von Verteilnetzen sowie von Strom-Übertragungsnetzen unter anderem mit dem Ziel, Elektromobilität, Wärmepumpen und Elektrolyseure einzubinden, für die Resilienz des Infrastruktursystems besonders wichtig.

Der verstärkte Ausbau der Energieerzeugungsanlagen benötigt außerdem Flächen und spitzt die Flächennutzungskonkurrenz zu, die auch in Deutschland bereits zu beobachten ist (z.B. zwischen Biomasseproduktion, dem Ausbau erneuerbarer Energieanlagen, Naturschutz, Landwirtschaft). Um auf weniger Fläche mehr Endenergie zu erzeugen, werden alternative Anlagen sowie Systemkonfigurationen konzipiert und getestet. Dazu gehören beispielsweise [Höhenwindräder](#) oder der Einsatz von Photovoltaik in der Landwirtschaft, aber auch Konzepte wie die Agrothermie, bei der landwirtschaftliche Nutzfläche zur Erzeugung von Lebensmitteln und zugleich als große Geothermiefelder genutzt wird [\[10\]](#).

Obwohl der Ausbau der erneuerbaren Energien von den meisten Expert/innen als resilienzfördernd eingeschätzt wird ([Datengrafik](#)), wird die zunehmende Abhängigkeit der Solar- und Windindustrie von ausländischen Lieferanten [\[11\]](#) gleichzeitig als Vulnerabilitätsfaktor des Infrastruktursystems angesehen. Der steigende Bedarf an kritischen Rohstoffen ([Datengrafik](#)) und Vorprodukten zum Aufbau der Energieinfrastruktur bringt neue Risiken von Preisschocks und Versorgungsengpässen mit sich.

Prognose zum prozentualen Anstieg der weltweiten Nachfrage von ausgewählten Metallen für erneuerbare Energien bis zum Jahr 2050

(Referenzjahr 2020)



Details: Annahme SDS-Szenario

Quelle: Eurometaux - Metals for Clean Energy, Seite 4 • Erstellt mit Datawrapper

Die geopolitische Versorgungssicherheit ist bei kritischen Mineralien vergleichsweise gering, da die Mineralienproduktion eine höhere geografische Konzentration aufweist als die Produktion fossiler Brennstoffe [\[12\]](#). Inflation, höhere Kreditkosten und Engpässe bei der Lieferung von Rohstoffen und Komponenten haben bereits den Zubau erneuerbarer Energien gebremst [\[13\]\[14\]](#) und könnten die Energiewende insgesamt bremsen [\[11\]\[15\]\[16\]](#). Der Ausbau erneuerbarer Energien trifft außerdem auf einen zunehmenden und weit überdurchschnittlich hohen Fachkräftemangel in relevanten Branchen [\[17\]](#). Auch diese

Entwicklung könnte sich auf die Geschwindigkeit des Ausbaus negativ auswirken und die Transformation des Infrastruktursystems hemmen.

Technologien zur Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff sind in letzter Zeit (wieder) stärker in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt [18]. Maßnahmen zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung ([Carbon Capture and Storage](#), CCU) werden in vielen Klimamodellszenarien vorausgesetzt, um die 1,5-°C- und 2-°C-Treibhausgasemissionspfade einzuhalten [19][20]. Gezielte Förderprogramme für Bioenergieanwendungen mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BEECS) werden beispielsweise in Europa aufgesetzt [21], etwa in Großbritannien, wo die Entwicklung entsprechender Geschäftsmodelle unterstützt wird [22]. Auch Technologien zur Abscheidung und Nutzung von Kohlenstoff (Carbon Capture and Utilization – CCU) werden zunehmend kommerzialisiert und verbreiten sich. In Deutschland wird eine Kohlenstoffstrategie (Carbon Management Strategy) erarbeitet, die darauf abzielt, die Rahmenbedingungen für einen effektiven Hochlauf von CCU und CCS zu benennen [23].

Aufkommende technologische Entwicklungen

Neue Materialien für die Energiewende

Vor dem Hintergrund der mangelnden Recyclingfähigkeit, hohen Importabhängigkeit, hoher Kosten und zunehmenden Knappheit kritischer Rohstoffe wie Gallium, Kupfer, Silber und Silizium wird an neuen Materialien für die Energiewende geforscht. Insbesondere die Entwicklung neuer Materialien für Solaranlagen unterliegt einer hohen Dynamik. Von der Perowskit-Silizium-Tandem-Photovoltaik werden große Effizienzpotenziale erwartet [24], auch wenn damit negative ökologische Auswirkungen aufgrund des Bleigehalts einhergehen könnten. Auch mit organischen flexiblen PV werden große Potenziale assoziiert [25]. Ein Durchbruch ist außerdem bei mikrometrischen Photovoltaikzellen zu verzeichnen. Durch den Einsatz dieser extrem dünnen PV-Zellen würden sowohl die Effizienz von PV-Anlagen bedeutsam steigen, als auch die Stromerzeugungskosten deutlich sinken (bis um das 3-Fache) [26]. Dies ist womöglich nicht der letzte Durchbruch, denn die Entdeckung neuer Materialien hat mithilfe der KI-gestützten Software Deepmind einen enormen Sprung gemacht [27]. Sie erspart zahlreiche Laboruntersuchungen und Zeit bei der Erforschung von Materialeigenschaften. So könnte mit neuen Technologien eine Verringerung der Abhängigkeit von ausländischen

Lieferanten und eine höhere Recyclingfähigkeit mit positiven Auswirkungen auf die Resilienz des Infrastruktursystems in Deutschland erreicht werden.

Weltraumbasierte Energieproduktion

Um die ununterbrochene Verfügbarkeit von Sonnenlicht ohne Störfaktoren zu nutzen, wird an Systemen zur weltraumbasierten Energieproduktion geforscht. Vorteile werden darin gesehen, dass Solarparks im Weltraum positiv zum Ausgleich von Peakauslastungen beitragen könnten. Sinkende Transportpreise ins All via Mikrowellen oder Laserstrahlung könnten eine Umsetzung wirtschaftlich machen. Viele Länder – darunter China, die USA und Großbritannien – streben die Marktführerschaft an [\[28\]](#). Die erforderlichen Technologien sind vorhanden und erste Erprobungen wurden 2023 abgeschlossen. Allerdings wäre die Funktionstüchtigkeit eines Gesamtsystems noch nachzuweisen. Um ausreichend große Anlagen für die Stromversorgung der Erde zu realisieren, sind ultraleichte, kostengünstige, flexible und praktikabel einsetzbare Solarstromenergieübertragungssysteme erforderlich [\[29\]](#)[\[30\]](#). Eine noch futuristischere Technologie sind negative Solarzellen, bei denen Strom aus der Kälte des Weltraums gewonnen werden soll [\[31\]](#).

Höhenwindräder

Höhenwindräder sind deutlich höher als herkömmliche Windräder (rund 300 statt 150 m) und können dadurch deutlich mehr Strom aus der höheren Strömungsgeschwindigkeit der Luftmassen produzieren, da mit zunehmender Höhe sowohl die Windkraft als auch die Windbeständigkeit zunehmen. Es sind jedoch spezielle Technologien erforderlich, die es ermöglichen, betriebswirtschaftliche und technische Herausforderungen (z.B. Widerstandsfähigkeit gegenüber höheren Windgeschwindigkeiten, Transport langer Rotoren) zu überwinden. Vorgesehen ist der Bau von zwei Prototypen in Leipzig [\[32\]](#). Daneben werden auch Flugwindkraftanlagen oder Drachensysteme entwickelt, die stärkere Winde in großen Höhen nutzen, um Strom zu erzeugen [\[33\]](#).

Technologien zur Abscheidung und Nutzung von Kohlenstoff (CCU)

In der chemischen Industrie bestehen viele Ansätze zur direkten Nutzung von abgeschiedenem CO₂, deren Entwicklung abgeschlossen ist. Unternehmen beginnen mit der Kommerzialisierung von Technologien, die abgeschiedenes CO₂ in wertvolle Produkte wie Ethanol, Polyurethane, Harnstoff und pharmazeutische Stoffe

umwandeln. Allerdings können viele der aus diesen Prozessen resultierenden Produkte bisher wirtschaftlich nicht mit herkömmlichen Produkten konkurrieren, oder es fehlen die entsprechenden Produktstandards. Außerdem braucht es noch eine standardisierte Methode, um sicherzustellen, dass die Technologien insgesamt CO₂-Emissionen effektiv reduzieren [34]. Ein Beispiel einer aktuellen Entwicklung, ist ein Ansatz, den Forscher/innen am MIT und aus Harvard kürzlich entwickelt haben, mit dem CO₂ direkt in Formiat umgewandelt werden kann – ein fester Brennstoff, der unbegrenzt gelagert werden kann und zum Heizen von Häusern oder zur Stromerzeugung in der Industrie verwendet werden könnte [35]. Welche Rolle solche Technologien im zukünftigen Energiesystem sinnvollerweise spielen könnten, ist noch unklar. Der Beitrag zum Klimaschutz durch Nutzung von CO₂ bei der Herstellung von Produkten wird teilweise als sehr gering eingeschätzt [36].

Referenzen

1. BDEW (2023): Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträger in den Jahren 2000 bis 2023 (in Terawattstunden). 18.12.2023, de.statista.com/ (26.2.2024)
2. Statista (2023c): Erneuerbare Energien in Deutschland. Statistik-Report zu Erneuerbaren Energien in Deutschland, de.statista.com/
3. Statista (2024): Photovoltaik in Deutschland. Statistik-Report zur Photovoltaik in Deutschland, de.statista.com/ (4.3.2024)
4. Windguard (2023): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland, www.windguard.de/
5. Heise (2023a): Größte schwimmende Solaranlage auf größtem künstlichen See Deutschlands. (16.5.2023). www.heise.de/ (25.1.2024)
6. Heise (2023b): Solares Turmkraftwerk mit 11 Turbinen. www.heise.de/ (25.1.2024)
7. The Economist (2023): Fusion power is coming back into fashion. www.economist.com/ (5.3.2024)
8. Deloitte (2020): Future of Energy: Vier Szenarien für das Jahr 2035, www2.deloitte.com/ (13.12.2023)
9. Kraftfahrt-Bundesamt (2023b): Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis Oktober 2023. Statista, de.statista.com/ (24.10.2023)
10. Erneuerbareenergien (2023): Agrothermie: Erdwärme vom Acker als zweites Standbein für Landwirte. 14.12.2023, www.erneuerbareenergien.de/ (4.3.2024)
11. Agora Energiewende/Agora Industry (2023b): Ensuring resilience in Europe's energy transition. The role of EU clean-tech manufacturing.

- (Buck, M.; Baccianti, C.; Hoppe, J.; Sartor, O.; Belaunde, M.), www.agora-energiewende.de/
12. Nijse, F. J. M. M.; Mercure, J.-F.; Ameli, N.; Larosa, F.; Kothari, S.; Rickman, J.; Vercoulen, P.; Pollitt, H. (2023): The momentum of the solar energy transition. In: Nature communications 14(1), S. 6542. DOI: [10.1038/s41467-023-41971-7](https://doi.org/10.1038/s41467-023-41971-7)
 13. Crownhart, C. (2024): What's next for offshore wind? www.technologyreview.com/
 14. Lichner, C. (2022): Kurzumfrage: Lieferengpässe bremsen Zubau bei Photovoltaik und Batteriespeichern, www.pv-magazine.de/
 15. EWI (2023): Regulierung in der Transformationssituation der Energiewende. Positionspapier. www.ewi.uni-koeln.de/
 16. IEA (2023): Digitalisation, www.iea.org/ (29.1.2024)
 17. Bundesagentur für Arbeit (2024): Engpassberufe: Berufe mit den längsten Vakanzzeiten von Arbeitsstellen¹ in Deutschland im Zeitraum von März 2023 bis Februar 2024 (in Tagen). 29.2.2024, de.statista.com/ (7.3.2024)
 18. Crownhart, C. (2023): How carbon removal is like a time machine, www.technologyreview.com/ (26.1.2024)
 19. Luz, S. (2022): The evidence is clear: the time for action is now. We can halve emissions by 2030. IPCC, 2022, www.ipcc.ch/ (26.1.2024)
 20. Umweltbundesamt (2023d): Sechster Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC. 12.5.2023, www.umweltbundesamt.de/ (29.1.2024)
 21. IEA (2023a): Bioenergy with Carbon Capture and Storage. 11.7.2023, www.iea.org/ (25.1.2024)
 22. Department for Energy Security and Net Zero (2023): Biomass Strategy, assets.publishing.service.gov.uk/
 23. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023a): Klimaschutzprogramm 2023 der Bundesregierung, www.bmwk.de/
 24. Peplow, M. (2023): A new kind of solar cell is coming: is it the future of green energy? In: Nature 623(7989), S. 902–905. DOI: [10.1038/d41586-023-03714-y](https://doi.org/10.1038/d41586-023-03714-y)
 25. Bogdanowicz, K. A.; Lalik, S.; Ratajczyk, P.; Katrusiak, A.; Krysiak, P.; Pawłowska, A. I.; Marzec, M.; Iwan, A. (2023): A new look at imines and their mixture with PC71BM for organic, flexible photovoltaics. In: Scientific reports 13(1), S. 13240. DOI: [10.1038/s41598-023-42036-x](https://doi.org/10.1038/s41598-023-42036-x)
 26. Lafontaine, M. de; Bidaud, T.; Gay, G.; Pargon, E.; Petit-Etienne, C.; Turala, A.; Stricher, R.; Ecoffey, S.; Volatier, M.; Jaouad, A.; Valdivia, C. E. et al. (2023): 3D interconnects for III-V semiconductor heterostructures for miniaturized power devices. In: Cell Reports Physical Science 4(12), S. 101701. DOI: [10.1016/j.xcrp.2023.101701](https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101701)

27. Fan, S. (2023): A Google DeepMind AI Just Discovered 380,000 New Materials. This Robot Is Cooking Them Up. 30.11.2023, singularityhub.com/ (25.1.2024)
28. Bundesministerium für Bildung und Forschung (2022): Der Traum von Nikola Tesla. Vorausschau: Themenblätter. Runde I bis III, www.vorausschau.de/
29. CIT (2024): Space solar power project ends first in-space mission with successes and lessons. California Institute of Technology, 17.1.2024, www.sciencedaily.com/ (25.1.2024)
30. Sciencedaily (2023): Solar Farms in Space are possible, www.sciencedaily.com/
31. Assawaworrarit, S.; Fan, S. (2023): Generating Power on Earth From the Coldness of Deep Space. We can hack thermodynamics to cool buildings and light up the night. 25.11.2023, spectrum.ieee.org/ (25.1.2024)
32. Egle, C. (2023): Warum 300 Meter hohe Windräder die Energiewende entscheidend voranbringen können. 6.6.2023, scilogs.spektrum.de/ (23.2.2024)
33. Enerkite (2024): Grüne Energie aus großen Höhen, enerkite.de/ (23.2.2024)
34. GAO (2022): Decarbonization: Status, Challenges, and Policy Options for Carbon Capture, Utilization, and Storage, www.gao.gov/
35. Chandler, D. L. (2023): Engineers develop an efficient process to make fuel from carbon dioxide, www.sciencedaily.com/
36. Richers, U.; Schütz, R. (2022): Möglichkeiten und klimarelevante Auswirkungen der stofflichen Nutzung von Kohlenstoffdioxid. KIT Scientific Reports; 7763, publikationen.bibliothek.kit.edu/1000143474

Trendcluster: Ausbau von Power-to-X-Infrastrukturen und der Sektorkopplung

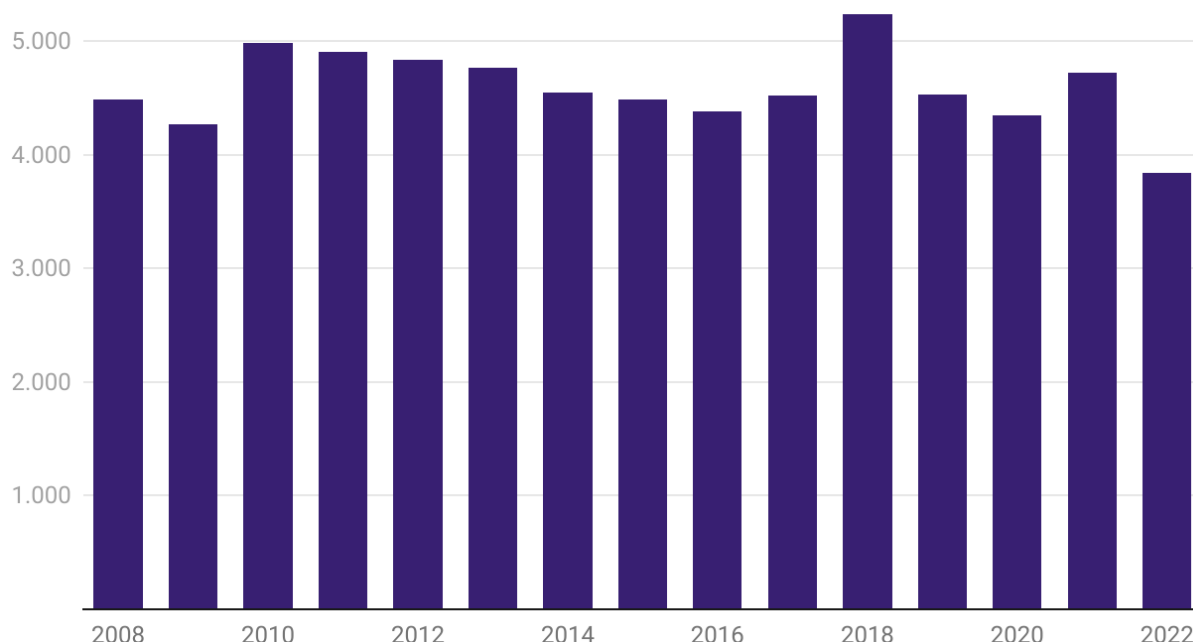
Um die Ziele eines klimaneutralen Deutschlands bis 2045 zu erreichen, sollen Prozesse auch außerhalb des Energiesektors, die auf fossilen Energieträgern beruhen, dekarbonisiert werden. Dazu soll die Verknüpfung von Strom-, Wärme-, Industrie- und Verkehrssektoren (Sektorkopplung) beitragen. Mit der Verknüpfung einzelner Sektoren können wechselseitig Energiedefizite und -überschüsse ausgeglichen werden, Effizienzsteigerungen erzielt und der Bedarf an Primärenergie gesenkt werden [1]. Um die Kopplung von Sektoren technisch zu ermöglichen, werden Power-to-X-Infrastrukturen aufgebaut sowie existierende Infrastrukturen ausgebaut oder umgestellt.

Power-to-X-Infrastrukturen ermöglichen es, aus Strom andere Formen von Energie (z.B. Wärme, flüssige Kraftstoffe) zu erzeugen. So soll beispielsweise ein Teil der Leitungen, die bisher für Ferngas genutzt wurden, so umgebaut werden, dass sie künftig auch Wasserstoff transportieren können [2]. Der Ausbau von Power-to-X-Infrastrukturen wird von den meisten befragten Expert/innen (Datengrafik) als Beitrag zur Resilienz des Systems gesehen, wobei das Risiko einer ungenügenden Versorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien besteht. Das produzierte Volumen von Wasserstoff in Deutschland ist im vergangenen Jahrzehnt tendenziell gesunken (Datengrafik), obwohl die Anzahl der in Betrieb genommenen Power-to-X-Anlagen in Deutschland seit 2018 deutlich zugenommen hat (2018: 17 Anlagen; 2019: 33; Anfang 2023: 36). Zahlreiche weitere Anlagen sind in Planung (vor allem Power to Gas), die ganz überwiegend das Ziel haben, Wasserstoff zu produzieren [3]. Allerdings können auch beim Ausbau von Power-to-X-Infrastrukturen (z.B. Wasserstoff) Pfadabhängigkeiten und neue Formen von Abhängigkeiten von ausländischen Lieferanten entstehen, die durch die zunehmenden geopolitischen Konflikte Risiken mit sich bringen [4][5][6][7].

Zum Ausbau der Power-to-X-Infrastrukturen gehört auch die zunehmende Verbreitung alternativer Wärmeerzeuger, die unter Einsatz von Strom Wärme bereitstellen (z.B. Wärmepumpen), deren Beitrag zur Resilienz des Infrastruktursystems von den Expert/innen (Datengrafik) als besonders hoch eingeschätzt wurde. Wärmepumpentechnologien, die mittels Strom und Umgebungswärme (aus dem Boden, Wasser, Luft oder rückgewonnene Abwärme) Wärme bereitstellen, erfahren stetige Verbesserung und Effizienzsteigerungen, wodurch sie perspektivisch auch zur Dekarbonisierung der Industrie beitragen könnten [8]. In Deutschland wird beispielsweise die Erzeugung von Prozesswärme mit Hochleistungswärmepumpen erprobt, die mit dem Arbeitsmedium Wasser bis zu 200 °C erreichen [9]. Auch Großwärmepumpen werden für die großstädtische Wärmeversorgung in Großbritannien, in Deutschland und in der Schweiz aufgebaut bzw. schon genutzt und könnten einen Eckpfeiler für Fernwärmenetze darstellen [10]. Neue Ansätze wie flexible Wärmepumpen ermöglichen es, höhere Prozesstemperaturen zu erreichen, und könnten perspektivisch auch mit Systemen der saisonalen Wärmespeicherung gekoppelt werden. Ein noch zu lösendes Problem stellt die Substitution des Einsatzes von Fluorkohlenwasserstoffen als Arbeitsmedium dar.

Produktion von Wasserstoff in Deutschland in den Jahren von 2008 bis 2022

(in Millionen Kubikmeter)



Details: Gemessen unter Normaldruck bei 20° C.

Quelle: VCI; Statistisches Bundesamt, Mai 2023 • Erstellt mit Datawrapper

In Deutschland werden Energiespeicherkapazitäten ausgebaut (z.B. PV-Stromspeicher). Die Anzahl der insgesamt installierten PV-Stromspeicher ist zwischen 2017 und 2023 um mehr als das 13-Fache gewachsen [11]. Ende 2022 waren bereits ca. 5,5 GWh an Speicherkapazität installiert [12]. Auch batteriebetriebene Fahrzeuge lassen sich mit neuen Technologien wie [Vehicle to Grid](#) als dezentrale Speicher in das Stromnetz einbinden. Des Weiteren sind in 2023 eine Reihe an Großbatteriespeicher in Betrieb gegangen [13]. Die Kapazität von Großbatteriespeichern in Deutschland könnte sich bis 2030 mehr als verzehnfachen [14]. Allerdings sind für den Einsatz von Batteriespeichern für großtechnische stationäre Anwendungen (z.B. für die Versorgung ganzer Quartiere) noch bedeutsame technologische und wirtschaftliche Hürden zu überwinden [4]. Großtechnische Batteriespeicher werden derzeit primär im Rahmen von Forschungs- und Demonstrationsprojekten entwickelt und aufgebaut. Es entstehen zwar zunehmend kommerzielle Anwendungen, allerdings stellt das Hochskalieren der Produktion eine große Herausforderung dar [15] und ist nicht unter allen Stromnetzausbauszenarien vorteilhaft. Vor allem Lösungen zur Nutzung von Abwärme und saisonaler Wärmespeicherung werden von den meisten befragten Expert/innen

([Datengrafik](#)) als förderlich für die Resilienz des Infrastruktursystems angesehen. Thermische Energiespeichertechnologien (kurz: Wärmespeicher) werden in Deutschland Medienberichten zufolge [\[16\]\[17\]](#) zunehmend gebaut. Ihnen kommt eine Schlüsselrolle zu, um die Kopplung zwischen Wärme- und Stromsektor voranzutreiben und zur Flexibilisierung der Energiebereitstellung sowie zur Dekarbonisierung des Wärmesektors beizutragen. Werden sie auf Quartiersebene eingesetzt, können sie lokal verfügbare und überschüssige regenerative Energie speichern und diese bei Bedarf wieder verfügbar machen [\[18\]](#).

Aufkommende technologische Entwicklungen

Flexible Wärmepumpen

Eine flexible Wärmepumpe [\[19\]](#) unterscheidet sich von einer gewöhnlichen Wärmepumpe lediglich durch einen zusätzlichen Wassertank oder Wärmespeicher, welcher die Restwärme des Kältemittels aufnimmt. Dadurch wird die sonst vergeudete Wärme zur Effizienzerhöhung genutzt. Weitere Effizienzpotenziale werden durch eine Technologie erschlossen, mit welcher Wärme mittels thermischer Solarkollektoren in den Sommermonaten in den Boden gespeichert wird. Sobald die Luft wieder kälter wird, nutzt die Wärmepumpe einen Teil der gespeicherten Wärme [\[20\]](#). Darüber hinaus können Wärmepumpen auch mehr Flexibilität im Netz schaffen, indem sie Spitzenlastnachfragen reduzieren. Dafür wird der Strombezug auf die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom softwaregestützt optimiert und die Gleichzeitigkeit ihrer Spitzenlastnachfrage reduziert [\[21\]\[1\]](#). Hier kann KI eingesetzt werden, um Lademuster und -dauer zu ermitteln, optimale Ladezeiten zu identifizieren, um den Kund/innen mittels SMS oder App-Benachrichtigung Empfehlungen für kostengünstige Zeiträume zum Aufladen ihrer Fahrzeuge oder zur Einsparung von Kosten und/oder Energie zu bieten [\[22\]](#).

Saisonale Wärmespeicherung

Zur Wärmespeicherung bieten sich zahlreiche Technologien an (z.B. Kies-/Wasserwärmespeicher, Aquiferspeicher, Eisspeicher). Manche Technologien eignen sich eher zur Kurzzeitwärmespeicherung (Stunden bis Tage), andere für die saisonale Wärmespeicherung (mehrere Monate). Für die Langzeitspeicherung lässt sich ggf. auch industrielle Abwärme nutzen – hier besteht jedoch noch Forschungsbedarf [\[18\]](#). Welche Technologie sich für ein konkretes Vorhaben am besten eignet,

ist standortabhängig bzw. vorhabensspezifisch zu ermitteln. Großes Entwicklungspotenzial für die kommunale Wärmeversorgung haben insbesondere latente Wärmespeicher, die die Nutzung von Phasenwechsel (von fest zu flüssig) des Speichermediums nutzen, sowie thermochemische Speicher, bei welchen die Wärmespeicherung als reversible thermochemische Reaktion erfolgt. Während erstere kommerziell bereits vereinzelt für einzelne Gebäude zum Einsatz kommen, befinden sich thermochemische Speicher noch in einem vorkommerziellen Entwicklungsstadium. In Berlin wird die thermochemische Speicherung in einer Pilotanlage getestet.

Vehicle to Grid (V2G) und Vehicle to Home (V2H)

Grundlage hierfür ist das bidirektionale Laden, das durch den Hochlauf der Elektromobilität an Bedeutung gewinnt. Die Idee dabei ist, dass batteriebetriebene Fahrzeuge Strom nicht nur aus dem Netz entnehmen, sondern bei großer Netzlast auch wieder in das Netz (V2G) oder das Haus (V2H) einspeisen können. Die in den Batterien der Elektrofahrzeuge gespeicherte Energie kann so dazu genutzt werden (V2G), Schwankungen von Angebot und Nachfrage im Stromnetz auszugleichen, die beim weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien zunehmen könnten. Verbraucher/innen bieten sie die Möglichkeit, Geld zu sparen, indem sie ihre Elektrofahrzeuge als Energielieferanten nutzen. Benötigt werden dafür bidirektional ladefähige Fahrzeuge sowie Ladestationen. Eine weitere Grundvoraussetzung ist die Ausstattung mit Smart Metern, bei der Deutschland noch Nachholbedarf hat [23][24]. Allerdings ist die Zwischenspeicherung verlustbehaftet. Außerdem könnte die Technologie auf Akzeptanzprobleme stoßen, da Batterien durch das häufigere Laden und Entladen schneller verschleifen und der bidirektionale Betrieb Nutzungseinschränkungen mit sich bringt. Noch unklar ist deshalb, für welche Anwendungsfälle bidirektionales Laden geeignet ist und wie tragfähige Geschäftsmodelle aussehen könnten. Während die technologischen Voraussetzungen für V2G weitgehend vorliegen, sind für die Anwendung in der Praxis zudem noch diverse regulatorische Fragen zu klären [25].

Referenzen

1. Allhutter, D.; Bettin, S.; Brunner, H.; Kleinförchner, J.; Krieger-Lamina, J.; Ornetzeder, M.; Strauß, S. (2022): Sichere Stromversorgung und Blackout-Vorsorge in Österreich. Entwicklungen, Risiken und mögliche Schutzmaßnahmen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien. DOI: 10.1553/ITA-pb-ITA-AIT-17

2. Dena (2021): Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Abschlussbericht, www.dena.de/ (9.1.2024)
3. Statista (2023): Power-to-X. Statistik-Report zu Power-to-X-Technologien, de.statista.com/
4. EPRS (2023): What if the EU was energy independent?, eprthinktank.eu/
5. EWI (2023): H2-Geopolitik. Geopolitische Risiken im globalen Wasserstoffhandel. www.ewi.uni-koeln.de/
6. Heilmann, F.; Steitz, J.; Müller, S. (2023): LNG, Climate and Energy Security: Towards a Comprehensive Approach for Europe. Agora Energiewende. hdl.handle.net/10419/277914
7. Merten, F.; Scholz, A. (2023): Wasserstoff in der Energieversorgung und mögliche Importabhängigkeiten. In: Ökologisches Wirtschaften 38(2), S. 18–20. DOI: 10.14512/OEW380218
8. MIT (2024): Heat Pumps decarbonizing homes manufacturing breakthrough technologies, www.technologyreview.com/
9. IWR (2023): Prozesswärme nachhaltig. Neue Hochleistungs-Wärmepumpen für die Industrie. 3.4.2023, www.iwr.de/ (25.1.2024)
10. ITA (2023b): Großwärmepumpen, www.parlament.gv.at/
11. Statista (2023): Energiespeicher. Statistik-Report zu Batterien, de.statista.com
12. Figgenger, J.; Hecht, C.; Haberschusz, D.; Bors, J.; Spreuer, K. G.; Kairies, K.-P.; Stenzel, P.; Sauer, D. U. (2023): The development of battery storage systems in Germany: A market review (status 2023). DOI: 10.48550/arXiv.2203.06762
13. RWE (2023): RWE stellt Megabatterie in Lingen und Werne fertig. 9.1.2023, www.rwe.com/ (23.2.2024)
14. Frontier-economics (2023): Wert von Großbatteriespeichern im Deutschen Stromsystem, www.baywa-re.de/
15. ITA (2023a): Batteriesysteme der Zukunft. (Baumann, M.; Weil, M.), www.parlament.gv.at/
16. Rbb (2022): Vattenfall stellt Deutschlands größten Wärmespeicher fertig. 2022. www.rbb24.de/
17. ZfK (2024): Fernwärme in Krefeld wird dank Speicher flexibler. 6.12.2023, www.zfk.de/ (4.3.2024)
18. Kallert, A.; Lamvers, E.; Schurig, M.; Yu, Y. J. (2023): Thermische Energiespeicher für Quartier – Aktualisierung. dena, www.dena.de/
19. Yu, Z.; McKeown, A.; Hajabdollahi Ouderji, Z.; Essadik, M. (2022): A flexible heat pump cycle for heat recovery. In: Commun Eng 1(1). DOI: 10.1038/s44172-022-00018-3
20. Beraniuk, C. (2023): Wärmepumpe reloaded. Spektrum der Wissenschaften 11/2023. www.spektrum.de/
21. Agora Energiewende/Agora Industry (2023b): Ensuring resilience in Europe's energy transition. The role of EU clean-tech manufacturing.

- (Buck, M.; Baccianti, C.; Hoppe, J.; Sartor, O.; Belaunde, M.), www.agora-energiawende.de/
22. June, K. (2023): Four ways AI is making the power grid faster and more resilient, www.technologyreview.com/ (9.1.2024)
 23. Ivañez, G. (2023): Bidirektionales Laden kann das Speicherproblem der Energiewende lösen.
12.6.2023, background.tagesspiegel.de/
 24. Perras, S. (2024): Wie Deutschland den Anschluss finden könnte.
9.1.2024, background.tagesspiegel.de/
 25. Initiative »Bidirektionales Laden« (2022): Positionspapier zu notwendigen regulatorischen Anpassungen im Kontext des bidirektionalen Ladens. Berlin, ceco.de/ (7.3.2024)

Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Energie

Die zuverlässige Bereitstellung von Energie bildet das fundamentale Rückgrat unserer Gesellschaft und ist für die Bereitstellung der Versorgungsleistungen anderer Infrastruktursysteme wie Verkehr und Mobilität essenziell. Systemische Risiken können die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems Energie grundlegend beeinträchtigen, vor allem im Hinblick auf das Schutzziel der Versorgungssicherheit. Zudem können sie das Erreichen des politisch festgelegten Ziels einer Klimaneutralität bis 2045 beeinflussen.

Systemische Risiken bezeichnen komplexe Gefahren oder Bedrohungen, die nicht nur auf bestimmte Einzelteile eines Infrastruktursystems wirken, sondern das gesamte System betreffen. Zudem gefährden sie unterschiedliche Infrastruktursysteme oftmals gleichzeitig, da multikausale Wechselwirkungen und Kaskadeneffekte auftreten.

Aus der Perspektive systemischer Risiken behandeln wir auf den folgenden Seiten die folgenden Fragen: Wie ist der gegenwärtige Stand der Gefährdungslagen für das Infrastruktursystem Energie in Bezug auf alle relevanten systemischen Risiken, welche Bereiche des Systembilds sind besonders betroffen und wie robust ist das Infrastruktursystem? Welche systemischen Risiken entwickeln sich besonders dynamisch und mit welchen Folgen für das Infrastruktursystem? Und welche Gefährdungslagen ergeben sich im Zuge der Transformation?

Status quo der Gefährdungslagen

Die Gefährdung des Infrastruktursystems Energie durch systemische Risiken betrifft verschiedene Teile des Systems und ist unterschiedlich akut. Die aktuelle Gefährdung des Infrastruktursystems Energie durch systemische Risiken ist – auf Grundlage der ausgewerteten Quellen sowie der Ergebnisse der durchgeführten Fachgespräche – insgesamt als eher hoch einzustufen. Die Funktionsfähigkeit und die Stabilität des Infrastruktursystems werden aktuell vor allem durch geopolitische Konflikte, Versorgungsengpässen und Wetterextreme gefährdet. Um diesen Risiken und ihren Folgen zu begegnen, ist die Robustheit des

Infrastruktursystems entscheidend. Die Gesamtrobustheit des gegenwärtigen Energiesystems wird im Rahmen unserer Befragung des Resilienz-Radars derzeit als mittel eingeschätzt, während sie in Bezug auf Cyberkriminalität, geopolitische Konflikte und Wetterextreme als eher gering bewertet wird. Es ist daher wichtig, aufkommende Störereignisse und Krisen frühzeitig zu erkennen und die vorhandenen Erkenntnisse zur Entwicklung innovativer Maßnahmen und zur Steigerung der Resilienz zu nutzen.

Die zunehmende Digitalisierung macht das Energiesystem effizienter, aber auch komplexer und anfälliger. Die systemischen Risiken Cyberkriminalität sowie Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit stellen ein erhebliches Gefährdungspotenzial für das Energiesystem dar. Mögliche Schäden reichen von Datendiebstahl über Erpressung mit gestohlenen oder verschlüsselten Daten bis zu Unterbrechung der Energieversorgung und Hardwaresabotage. Beide systemischen Risiken können alle im Systembild abgebildeten Bereiche beeinträchtigen. Mit zunehmender Abhängigkeit von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) nimmt das Gefährdungspotenzial von Technikversagen weiter zu, etwa durch Softwarefehler oder Fehlbedienung [1]. Betreiber kritischer Energieinfrastrukturen müssen bereits heute Anforderungen gemäß dem Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme ([IT-Sicherheitsgesetz](#)) und Energiewirtschaftsgesetz ([EnWG](#)) erfüllen und für den Fall von schwerwiegenden Versorgungsstörungen effektive Präventions- und Reaktionsmaßnahmen ergreifen [2]. Seit dem Beginn der Energiewende leisten dezentrale Anlagen einen zunehmend wichtigen Beitrag zur Energieversorgung und darauf ausgerichtete Cybersicherheitsmaßnahmen sind erforderlich [1].

Die zunehmenden geopolitischen Konflikte verstärken die Gefährdung des Energieinfrastruktursystems, wie die Folgen des russischen Angriffs auf die Ukraine und die damit verbundenen Veränderungen in den globalen Energieversorgungsketten und Rahmenbedingungen der Energieversorgung in Deutschland zeigen [3]. Versorgungsengpässe bei Energie, kritischen Rohstoffen und Lieferketten, ausgelöst durch geopolitische Konflikte und steigende Nachfrage nach kritischen Rohstoffen und Technologien, bergen ein erhebliches Gefährdungspotenzial mit potenziell gravierender Schadenshöhe und hoher Eintrittswahrscheinlichkeit [4]. Auch die Trendanalysen betonen die hohe Relevanz dieser Risiken. Diese Engpässe beeinflussen vor allem die Bereiche Vorleistungen, Primärenergieträger,

Energieumwandlung und teilweise die Speicherung im Infrastruktursystem.

Das Gefährdungspotenzial durch die eng miteinander verknüpften systemischen Risiken globale Erwärmung und Wetterextreme ist vor allem in der langfristigen Perspektive sehr hoch. Wetterextreme beeinflussen das Energiesystem von der Primärenergieversorgung über die Energieumwandlung und Speicherung bis zur Verteilung und sind eine der Hauptursachen für Energieversorgungsunterbrechungen [5][1]. Die Auswirkungen der globalen Erwärmung, wie steigende Durchschnittstemperaturen und sich verändernde Windgeschwindigkeiten, wirken auf Verbrauch und auf Erzeugung [6].

Von dem systemischen Risiko Machtkonzentration geht gemäß der Quellenanalyse für das Infrastruktursystem Energie ein mittleres Gefährdungspotenzial aus. Allerdings ist im Zuge der Digitalisierung eine zunehmende Bedeutung von Plattformen im Energiesektor zu konstatieren, die viele Daten, unter anderem zum Nutzungsverhalten, erfassen, aggregieren und verarbeiten [6], die aber nicht allen Marktteilnehmenden zur Verfügung stehen.

Das systemische Risiko Pandemien und Epidemien wird mit Bezug zum Gefährdungspotenzial dagegen als eher gering eingeschätzt. Hier sind direkte Schäden durch Personalausfälle in allen im Systembild Energie abgebildeten Bereichen möglich. Zudem kann die Stabilität des Systems durch verändertes, untypisches Verbrauchsverhalten gefährdet werden [7][1].

Des Weiteren ist das systemische Risiko gesellschaftlicher Polarisierung für das Infrastruktursystem Energie mit einem Gefährdungspotenzial verbunden, dass sich vor allem auf das Erreichen der Energiewendeziele bezieht und sich in polarisierten Haltungen zu Veränderungen äußert. Dies zeigt sich in mehr oder weniger organisiertem Widerstand, besonders in den Bereichen Energieumwandlung und Verteilung, z.B. beim Bau von Windkraftanlagen oder dem Ausbau von Übertragungsnetzen [1][8]. Die Kaskadeneffekte geopolitischer Konflikte und daraus resultierender Preiserhöhungen im Verbrauch verstärken zudem die Risiken für wirtschaftliche Abwanderung und polarisierende Energiearmut [9] und werfen gleichzeitig neue Fragen der Energiegerechtigkeit auf.

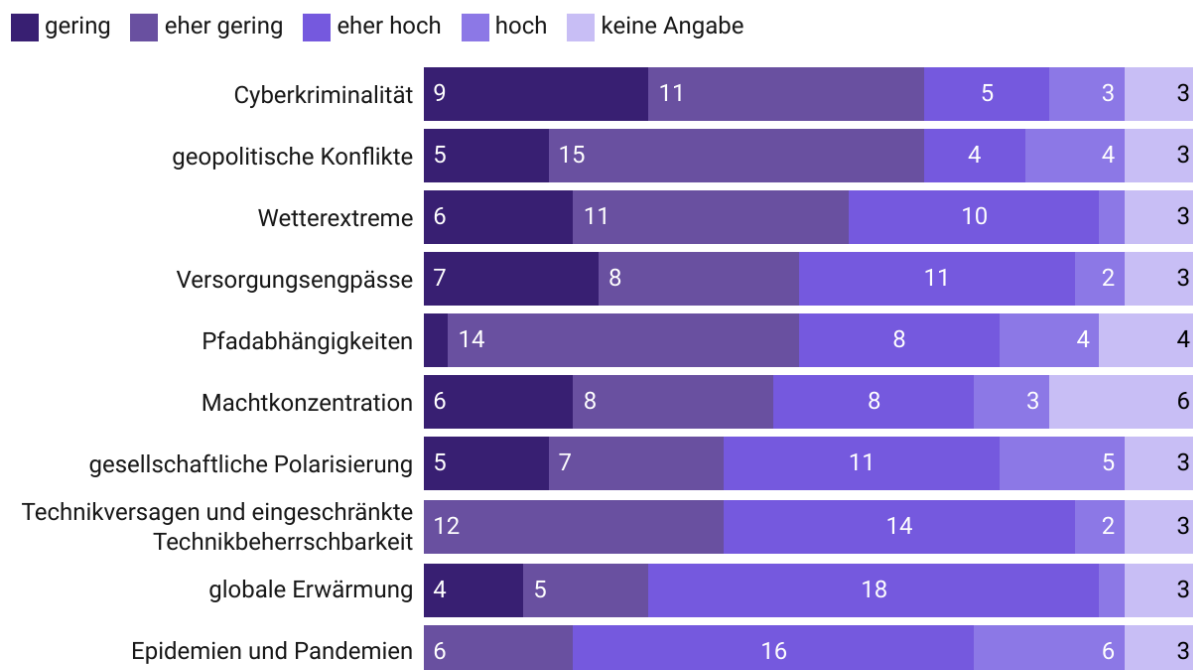
Nicht zuletzt gefährdet das systemische Risiko Pfadabhängigkeiten das Erreichen der Transformationsziele in allen Bereichen des Energiesystems. Pfadabhängigkeiten werden aktuell meist als begünstigend für die Beibehaltung eines fossilen Energiesystems

diskutiert. Sie können sich aber auch im Rahmen des Ausbaus erneuerbarer Energien herausbilden und ein langfristiges Festlegen auf bestimmte Entwicklungspfade bewirken [10][11].

Einschätzung der Robustheit: Ergebnisse der Panelbefragung

Die Robustheit des (gegenwärtigen) Infrastruktursystems Energie hinsichtlich systemischer Risiken, wurde im Rahmen der empirischen Erhebungen und der Panelbefragung bewertet. Die Gesamtbewertung des Energiesystems über alle systemischen Risiken liegt bei einer mittleren Robustheit. Bei der Bewertung einzelner systemischer Risiken zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede. Insbesondere gegenüber Cyberkriminalität wird die Robustheit am geringsten eingeschätzt, wobei etwa ein Drittel der Expert/innen sie als sehr gering und ein weiteres Drittel als gering beurteilt. Auch bei geopolitischen Konflikten und Wetterextremen wird das Energiesystem von einer deutlichen Mehrheit der Expert/innen als wenig robust wahrgenommen. Die Einschätzung der Robustheit gegenüber dem Risiko von Pfadabhängigkeiten wird als mittel bewertet. Eine hohe Robustheit wird vor allem in Bezug auf das systemische Risiko von Pandemien und Epidemien gesehen.

Wie schätzen Sie derzeit den Grad der Robustheit des Infrastruktursystems Energie in Bezug auf die folgenden systemischen Risiken ein?



Expertenbefragung zur Verletzlichkeit des Infrastruktursystems Energie (n=31)

Quelle: TAB, Resilienz-Radar 2023/24 • Erstellt mit Datawrapper

Referenzen

1. Mayer, C.; Brunekreeft, G.; Blank-Babazadeh, M.; Stark, S.; Buchmann, M.; Dalheimer, M.; Distelrath, V.; Hirschl, B. (Hg.) (2021): Resilienz digitalisierter Energiesysteme. Blackout-Risiken verstehen, Stromversorgung sicher gestalten. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina; Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften, Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft Analyse, München
2. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2023): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2023. Bonn, www.bsi.bund.de/ (5.3.2024)
3. Korzynietz, R.; Bierau-Delpont, F.; Moorfeld, R. (2023): Die Energiewende als Sprungbrett in ein resilientes Energiesystem. Volker Wittpahl, DOI: [10.1007/978-3-662-66057-7_11](https://doi.org/10.1007/978-3-662-66057-7_11)
4. Cox, A.; Jakob, M. (2023): Resilient Supply Chains for the Energy Transition: Issues for the G20. Berlin, www.ecologic.eu/ (5.3.2014)
5. Che-Castaldo, J. P.; Cousin, R.; Daryanto, S.; Deng, G.; Feng, M.-L. E.; Gupta, R. K.; Hong, D.; McGranaghan, R. M.; Owolabi, O. O.; Qu, T.; Ren, W. et al. (2021): Critical Risk Indicators (CRIs) for the electric power

- grid: a survey and discussion of interconnected effects. In: Environment systems & decisions 41(4), S. 594–615, DOI: [0.1007/s10669-021-09822-2](https://doi.org/10.1007/s10669-021-09822-2)
6. Jasiūnas, J.; Lund, P. D.; Mikkola, J. (2021): Energy system resilience – A review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews (150), DOI: [10.1016/j.rser.2021.111476](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476)
 7. BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) (2019): Stromausfall. Grundlagen und Methoden zur Reduzierung des Ausfallrisikos der Stromversorgung, www.bbk.bund.de/ (5.3.2024)
 8. Voß, M.; Kahlenborn, W.; Porst, L.; Dorsch, L.; Nilson, E.; Rudolph, E.; Lohrengel, A.-F. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur. Umweltbundesamt
 9. Henger, R.; Stockhausen, M. (2022): Gefahr der Energiearmut wächst. IW-Kurzbericht 55, Köln, www.iwkoeln.de/ (5.3.2024)
 10. Jakob, M.; Martini, L.; Meyer-Ohlendorf, N.; Evans, N. (2022): Klimadiplomatie in turbulenten Zeiten. eine Bestandsaufnahme wichtiger Entwicklungen. Ecologic Institute, Berlin, www.ecologic.eu/ (5.3.2024)
 11. PowerShift (2023): Rohstoffwende und Energiewende zusammen denken. Kreislaufführung von Erneuerbaren Energien ausbauen. (Chardayre, T. Ilya; Reckordt, M.; Schnittker, H.), power-shift.de/ (5.3.2014)

Entwicklungsdynamiken ausgewählter systemischer Risiken und Gefährdungslagen

Systemische Risiken unterliegen einer teils starken Entwicklungsdynamik. Sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit als auch die konkrete Form der durch sie ausgelösten Gefährdungslagen für das Energiesystem können sich verändern. Derzeit steigt die Gefährdung für das Energiesystem vor allem durch immer häufiger auftretende Wetterextreme. Im Zuge der Digitalisierung steigt gleichzeitig die Gefahr von Cyberangriffen sowie Technikversagen und eingeschränkter Technikbeherrschbarkeit. Aber auch der Anstieg und die Verhärtung geopolitischer Konflikte führt zu einer Veränderung der Gefährdungslage für das Energiesystem.

Das systemische Risiko globale Erwärmung wirkt durch Verbrauchsverschiebungen, beispielsweise aufgrund von steigenden Raumkühlungsbedarfen, auf das Infrastruktursystem Energie [\[1\]\[2\]](#). Zudem sind Veränderungen von Windgeschwindigkeiten und Sonneneinstrahlung zu erwarten, die sich auf die Produktion von erneuerbaren Energien auswirken können. Prognosen über deren Richtung und Stärke sind jedoch mit hohen Unsicherheiten behaftet, sodass die Konsequenzen für Energieerzeugung nicht klar absehbar sind [\[2\]](#). Darüber hinaus erhöht globale Erwärmung die Frequenz und damit die Eintrittswahrscheinlichkeit von Wetterextremen.

Die Gefährdung des Infrastruktursystems Energie durch Wetterextreme ist nicht neu, doch ihre Häufigkeit nimmt aufgrund des Klimawandels zu. Zudem treten extreme Wetterereignisse innerhalb Deutschlands vermehrt in Gebieten auf, in denen sie bisher nicht verzeichnet wurden [\[3\]](#). Stürme mit herumfliegenden Trümmern und Ästen, Hagel und Starkregen können Leitungen sowie andere Anlagen wie PV-Module beschädigen [\[1\]\[4\]\[5\]](#). Zudem kann es durch Wetterextreme zu Schwankungen in der Stromerzeugung durch Windkraft kommen: Bei Starkwinden müssen Windenergieanlagen abgeschaltet werden. Hochwasser, Schneelasten, Lawinen und Erdbeben können in verschiedenen Bereichen des Energiesystems zu Unterbrechungen und Schäden bei Netzbestandteilen oder Anlagen führen [\[1\]\[5\]](#). Aber auch Hitze ist eine grundlegende Herausforderung für das Energiesystem. Komponenten im Elektrizitätsnetz benötigen für einen effizienten Betrieb spezifische Temperaturen. In Hitzeperioden kann es zu einer starken Erwärmung kommen, was beispielsweise zu Durchhang von Leitungen mit Kurzschlussrisiko, zu verringerter Lebensdauer von Transformatoren und bei mit Öl isolierten

Transformationen zu einem Brandrisiko führen kann [6]. Bei hohen Umgebungstemperaturen ist zudem der Wirkungsgrad von PV-Anlagen reduziert, auch Staub kann deren Leistungsfähigkeit verringern [1][2]. Wassermangel in Dürrezeiten führt zu Problemen für (Speicher-)Wasserkraftwerke, für die Kühlung in thermischen Kraftwerken, bei der Reinigung von PV-Anlagen sowie bei der Produktion nachwachsender Biomasse [1][5][2].

Die zunehmende Digitalisierung im Infrastruktursystem Energie hat, z.B. durch modellbasierte und automatisierte Vorhersagen von Verbrauch und Erzeugung, das Potenzial, die Robustheit gegenüber Wetterextremen und anderen Risiken zu erhöhen. Gleichzeitig steigt jedoch die Gefahr von Cyberangriffen – es entsteht ein Resilienz-Trade-Off [1]. Obwohl Cyberkriminalität bisher nur einen geringen Anteil der Unterbrechungen im Energiesystem verursacht, nimmt das Gefährdungspotenzial zu, mit Folgen, die Datendiebstahl, Reputationsschäden für Unternehmen, Datenmanipulation und Unterbrechungen der Versorgungssicherheit umfassen können [7][1][8]. Beispielsweise war der Ransomwareangriff im Mai 2021 auf die Colonial Pipeline in den USA mit einer Lösegeldzahlung von 4,4 Mio. Dollar und Treibstoffengpässen verbunden [9]. Weitere Beispiele sind Ransomwareangriffe auf deutsche Windenergieanlagen im Frühjahr 2022, die keine Energieversorgungsengpässe bewirkten, aber die Wartung erschwerten. Die Kosten für Ermittlungen und Rechtsstreitigkeiten sind weitere Folgen. Der Energiesektor gilt als einer der Sektoren, in dem die Schadenssumme durch Cyberangriffe auf Unternehmen in Deutschland am meisten gewachsen ist [10].

Digitale Netzwerke im Energiesystem haben spezifische Anforderungen, darunter die Langlebigkeit von Hardwarekomponenten, die mit Software, deren Entwicklungsgeschwindigkeit deutlich höher ist, kompatibel sein sollen, ohne dass dabei neue Sicherheitslücken entstehen [1][5]. Im Falle von Angriffen können Systeme nicht ohne Weiteres abgeschaltet werden [1], und die Problembehebung wird ggf. durch stark eingeschränkte Kommunikation im Unternehmen infolge des Angriffs erschwert [7]. Die Konvergenz von Informationstechnologie (IT) und operativer Technologie (OT) im Infrastruktursystem Energie erhöht die Gefährdung: zusätzliche Schnittstellen von Systemen zur Anlagensteuerung mit kaufmännischen sowie Marktnetzwerken bieten neue Angriffsmöglichkeiten, beispielsweise können sich Angriffe über das Internet direkt auf technische Anlagen auswirken [7][5]. Ein Beispiel für einen kriegstaktischen Cyberangriff ist der Angriff der Gruppe Sandworm, die dem russischen Militärgeheimdienst GRU zugerechnet

wird, in der Ukraine im Oktober 2022. Hier wurde zuerst das OT-System eines Umspannwerks attackiert, was zu Stromausfällen führte. Wenige Tage später wurde ein datenvernichtendes Schadprogramm namens CaddyWiper aktiviert, um Daten im IT-System des Energieversorgers zu löschen. Der Cyberangriff fand zeitgleich mit Raketenangriffen statt [11]. Durch ähnliche Angriffe wurden bereits 2015 und 2016 Stromausfälle in der Ukraine herbeigeführt. Im Frühjahr 2022 kam es zu einem ähnlichen Angriff, der abgewendet werden konnte [12].

Die hohe Systemkomplexität einer zunehmend digitalisierten Infrastruktur mit vielen digital steuerbaren Anlagen birgt auch durch technische Störfälle, die komplexe Abläufe aufweisen können, hohe Gefährdungspotenziale [5]. Neben Cyberkriminalität ist daher auch das systemische Risiko Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit relevant. Softwarefehler spielen dabei eine Rolle, wie der großflächige Blackout in Nordamerika im Jahr 2003 zeigt, von dem 50 Mio. Menschen betroffen waren. Der Vorfall wurde durch einen Softwarefehler im Kontrollsystem der Stromnetzbetreiber ausgelöst und resultierte aus einer Verkettung von Ereignissen. Auch der Faktor Mensch spielt eine wichtige Rolle: Bedienungsfehler, Fehlmanagement von Sicherheitsprotokollen oder Sabotage können erhebliche Schäden verursachen [5]. In Kontexten von schwieriger Arbeitsmarktlage und Fachkräftemangel steigt die Eintrittswahrscheinlichkeit für solche Risiken. Zudem kann die Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal für die Bedienung und Wartung der zunehmend komplexen technischen Systeme in Zeiten akuter Krisen, wie während einer Pandemie, einer Wirtschaftskrise oder einem militärischen Konflikt, gering sein [13][1][5].

Abhängigkeiten von Energieträgern, Rohstoffen oder Technologien können effektiv als Druckmittel in geopolitischen Konflikten eingesetzt werden. Wie sich im Zuge des russischen Angriffskriegs klar gezeigt hat, ist die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern in Deutschland immer noch relativ groß. Im Jahr 2020 kamen 55,2% der Erdgasimporte aus Russland [4]. Mittlerweile wurde diese einseitige Abhängigkeit reduziert. Deutschland importierte im Jahr 2023 33% weniger Gas als im Vorjahr und dies vornehmlich aus Norwegen, den Niederlanden und Belgien [14]. Zunehmend bestehen aber auch Abhängigkeiten von Exportländern kritischer Rohstoffe, die für erneuerbare Energien wie Solar- und Windenergie sowie für Batteriespeicher benötigt werden [15][16][4]. Zudem wachsen Abhängigkeiten von technischen Komponenten, die überwiegend importiert werden, sowie teilweise von Know-how oder Software, was zu Machtkonzentration führt [17].

Darüber hinaus gewinnt die zunehmende internationale Interkonnektivität von Stromnetzen durch Stromverbundnetze an Bedeutung. Obwohl Stromverbünde weniger als Öl oder Gas von asymmetrischen Import-Export-Beziehungen zwischen Staaten geprägt sind, entstehen durch die zunehmende Elektrifizierung und den wachsenden Anteil erneuerbarer Energien im Energiemix neue Vulnerabilitäten und Abhängigkeiten, und die geopolitische Bedeutung von Stromverbünden nimmt zu [18]. Neben Abhängigkeiten können kriegsrische Konflikte auch direkt auf die Zerstörung von Energieinfrastrukturen abzielen und die Energieversorgung massiv gefährden. Auch von Staaten initiierte Cyberangriffe spielen eine zunehmende Rolle in geopolitischen Konflikten [10][5][19].

Neben geopolitischen Konflikten trägt auch die steigende Nachfrage nach kritischen Rohstoffen und Technologien, die für erneuerbare Energien benötigt werden, zu Schwierigkeiten bei bestehenden Lieferketten und damit Versorgungsengpässen bei. Die Wechselwirkung zwischen steigender Nachfrage, geografischer Konzentration von Rohstoffen, technologischem und industriellem Wettbewerb sowie geopolitischem Konfliktpotenzial schafft ein erhebliches Gefährdungspotenzial durch Lieferkettenengpässe [17]. Ein Gefährdungsszenario wäre beispielsweise eine weitere Ausweitung der Nahostkrise, die die Gefahr einer Reduktion der Ölproduktion mit sich bringen würde (vergleichbar mit dem Ölembargo 1973-1974), wodurch mit steigenden Ölpreisen und massiven Auswirkungen auf die Weltwirtschaft zu rechnen wäre [20][21].

Referenzen

1. Jasiūnas, J.; Lund, P. D.; Mikkola, J. (2021): Energy system resilience – A review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews (150), DOI: [10.1016/j.rser.2021.111476](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476)
2. Voß, M.; Kahlenborn, W.; Porst, L.; Dorsch, L.; Nilson, E.; Rudolph, E.; Lohrengel, A.-F. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur. Umweltbundesamt
3. DWD (Deutscher Wetterdienst); ExtremWetterKongress (2023): Was wir 2023 über das Extremwetter in Deutschland wissen. Stand der Wissenschaft zu extremen Wetterphänomenen im Klimawandel in Deutschland. (Friedrich, K.; Posada, R.; Kaspar, F.; Lengfeld, K.) Offenbach am Main, Deutschland, www.dwd.de/ (28.2.2024)
4. Korzynietz, R.; Bierau-Delpont, F.; Moorfeld, R. (2023): Die Energiewende als Sprungbrett in ein resilientes Energiesystem. Volker Wittpahl, DOI: [10.1007/978-3-662-66057-7_11](https://doi.org/10.1007/978-3-662-66057-7_11)

5. Mayer, C.; Brunekreeft, G.; Blank-Babazadeh, M.; Stark, S.; Buchmann, M.; Dalheimer, M.; Distelrath, V.; Hirschl, B. (Hg.) (2021): Resilienz digitalisierter Energiesysteme. Blackout-Risiken verstehen, Stromversorgung sicher gestalten. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, München
6. Agora Energiewende; Energynautics (2018): Toolbox für die Stromnetze. Für die künftige Integration von Erneuerbaren Energien und für das Engpassmanagement. (Martensen, N.; Hempel, S.; Masendorf, D.; Ropenus, S.; Godron, P.; Peter, F.; Deutsch, M.), www.agora-energiewende.de/ (5.3.2024)
7. Dena (Deutsche Energie-Agentur GmbH) (2022): Netzbetreiber-Umfrage Cybersicherheit. Zum Stand der Cybersicherheit im deutschen Stromnetz. (Wagner, J.; Chadenas, O.; Dechand, M.; Pulvermüller, B.), www.dena.de/ (5.3.2024)
8. Strauß, S.; Bettin, S. (2023): Digitalisierung, Vulnerabilität und (kritische) gesellschaftliche Infrastrukturen. Entwicklungsstand, Trends und zentrale Herausforderungen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, epub.oeaw.ac.at/ (5.3.2024)
9. Handelsblatt (2021): Ransomware-Attacke. Chef von Colonial Pipeline räumt Lösegeldzahlung an Hacker ein (19.3.2024)
10. Bitkom e.V. (2020): Spionage, Sabotage und Datendiebstahl – Wirtschaftsschutz in der vernetzten Welt. Studienbericht 2020, www.bitkom.org/ (5.3.2024)
11. Mandiant (2023): Sandworm Disrupts Power in Ukraine Using a Novel Attack Against Operational Technology. 2023, www.mandiant.com/ (20.1.2024)
12. BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (2022): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2022. Bonn, www.bsi.bund.de/ (5.3.2024)
13. BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) (2019): Stromausfall. Grundlagen und Methoden zur Reduzierung des Ausfallrisikos der Stromversorgung, www.bbk.bund.de/ (5.3.2024)
14. Pepe, J. M. (2023): Geopolitik und Energiesicherheit in Europa: Wie geht es weiter? FES Just Climate, library.fes.de/ (5.3.2024)
15. Zukunft Gas (o.J.): Informationen zur aktuellen Lage der Gas-Versorgung. o.J. gas.info/ (18.2.2024)
16. Agora Energiewende/Agora Industry (2023): Ensuring resilience in Europe's energy transition. The role of EU clean-tech manufacturing. (Buck, M.; Baccianti, C.; Hoppe, J.; Sartor, O.; Belaunde, M.), www.agora-energiewende.de/ (5.3.2024)
17. Cox, A.; Jakob, M. (2023): Resilient Supply Chains for the Energy Transition: Issues for the G20. Berlin, www.ecologic.eu/ (5.3.2024)

18. Westphal, K.; Pastukhova, M.; Pepe, J. M. (2021): Geopolitik des Stroms. Netz, Raum und Macht. SWP-STUDIE, DOI: [10.18449/2021S14](https://doi.org/10.18449/2021S14)
19. Strauß, S.; Bettin, S. (2023): Digitalisierung, Vulnerabilität und (kritische) gesellschaftliche Infrastrukturen. Entwicklungsstand, Trends und zentrale Herausforderungen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, epub.oeaw.ac.at/ (4.3.2024)
20. Allianz Research (2023): What to watch: Economic scenarios for Israel – Hamas conflict, rolling back on climate goals and drought at Panama Canal disrupts trade, www.allianz.com/ (4.3.2024)
21. WEF (World Economic Forum) (2024): The Global Risks Report 2024. 19th Edition. Insight Report, www.weforum.org/ (12.3.2024)

Gefährdungslagen im Zuge der Transformation

Ein wesentlicher Bestandteil der Transformation zur Klimaneutralität in Deutschland bis 2045 ist der Umbau des Energiesystems:

Die [Unabhängigkeit von fossilen Energien](#) soll durch einen massiven Ausbau erneuerbarer Energien, den dafür erforderlichen Netzausbau, Elektrifizierung und [Sektorenkopplung](#) sowie durch eine sparsame und effiziente Nutzung von Energie erreicht werden. Diese Transformationsprozesse bieten große Chancen, zugleich bergen sie verschiedene Risiken. Nachfolgend werden systemische Risiken beleuchtet, die sich vor allem auf das Erreichen der Transformationsziele auswirken. Zudem werden die Auswirkungen systemischer Risiken auf die Versorgungssicherheit im transformierten Energiesystem erläutert.

Die Gefährdungspotenziale des systemischen Risikos Pfadabhängigkeiten für das Erreichen der Transformationsziele resultieren aus der langfristig ausgerichteten Energieinfrastruktur und teilweise auch aus dem Regulierungsrahmen im Infrastruktursystem Energie [1]. In der Wärmeversorgung sind, neben der hemmenden Wirkung bestehender Gasnetze anstelle von Wärmenetzen, auch die hohe Anzahl unsanierter Gebäude und Eigentumsstrukturen eine zusätzliche Herausforderung, da sie durch hohe Pfadwechselkosten Schwierigkeiten verursachen [2]. Auf dem Weg zur [Dekarbonisierung](#) besteht zudem das Risiko eines Mid-Transition-Lock-Ins durch Brückentechnologien wie Erdgas, deren Nutzung zunächst intensiviert wird [3][4]. Die intensivere Nutzung (neuer) Bezugsquellen für fossile Energien wird durch aktuelle geopolitische

Konfliktlagen weiter forciert. Hierdurch sowie durch Entscheidungen über den Ausbau spezifischer Infrastrukturen für zukünftige Energieträger, z.B. Wasserstoff, können neue Pfadabhängigkeiten entstehen. Diese umfassen einerseits die hohe Lebensdauer der physischen Infrastruktur, die hohe Kosten im Fall eines Pfadwechsels nach sich zieht, und andererseits wirtschaftliche Strukturen, einschließlich Importabhängigkeiten [5][6]. Einige der heutigen Festlegungen können dazu führen, dass bei zukünftigen Entwicklungen neue Vulnerabilitäten und Risiken entstehen, und möglicherweise das Erreichen der Transformationsziele gefährden.

Gesellschaftliche Polarisierung steht im Zusammenhang mit Widerstand gegen Veränderungen im Energiesystem, vor allem dem Ausbau erneuerbarer Energien sowie von Übertragungsleitungen [1]. Die Flächennutzungskonkurrenz zwischen dem Ausbau von erneuerbaren Energien und z.B. Natur- und Landschaftsschutz sowie Landwirtschaft ist ein damit verbundener Faktor [7][8], der im gesellschaftlichen Diskurs eine bedeutende Rolle einnimmt. Für die Akzeptanz des Ausbaus von erneuerbaren Anlagen spielt auch eine Rolle, ob Anlagendichte sowie Energieverbrauch als regional fair verteilt wahrgenommen werden. Arbeitsmarktveränderungen, die im Zuge der Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energien stattfinden, können sich ebenfalls negativ auf die Akzeptanz der Umstellung auswirken [9]. Im Bereich des Energieverbrauchs tragen Faktoren wie hohe Energiepreise und Energiearmut zur Polarisierung bei [10]. Energiearmut ist ein wichtiger Aspekt der Lebenshaltungskostenkrise, die im Global Risk Report 2024 [11] auf Rang 4 der akutesten Krisen steht (vgl. auch Einschätzungen der Allianz [12]). Neuere Entwicklungen könnten entsprechende Polarisierungen verschärfen; beispielsweise macht es die anbieterseitige Fernsteuerung von Thermostaten grundsätzlich möglich, dass in Phasen geringer Energieverfügbarkeit der Energieverbrauch selektiv bei manchen Verbrauchern – je nach Tarif – verringert wird. Dies könnte insbesondere Gruppen, die bereits von Energiearmut betroffen sind, zusätzlich belasten und zu einer Mehrfachbelastung vulnerabler Gruppen führen [13]. Solche Entwicklungen könnten sich einerseits auf das Erreichen der Transformationsziele auswirken und andererseits auch die gesellschaftliche Polarisierung weiter vorantreiben.

Auch die sich dynamisch entwickelnden systemischen Risiken und deren Gefährdungslagen für das Infrastruktursystem verändern sich im Zuge der Transformation. Der notwendige Netzausbau im Rahmen der Energiewende kann beispielweise die Wahrscheinlichkeit von

Leitungsschäden durch Wetterextreme erhöhen [1][8]. Regionale Wasserknappheit kann für die Produktion von Wasserstoff, der im Energiesystem der Zukunft eine größere Rolle spielen soll und aus Wasser hergestellt wird, problematisch sein. Auch andere erneuerbare Energien sind auf Wasser angewiesen [4][8] und hängen von sich möglicherweise verändernden Faktoren wie Windgeschwindigkeiten und Sonneneinstrahlung ab [8]. Insgesamt weist ein auf erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem größere Abhängigkeiten von Wetter und Klima auf und ist damit vulnerabler gegenüber Veränderungen im Zuge der globalen Erwärmung.

Die Transformation des Energiesystems erfordert eine umfangreiche [Digitalisierung](#). Ein zunehmend dezentrales Energiesystem, das auf vielen eher kleinen Anlagen mit teilweise stark volatiler Erzeugung basiert, erhöht die Komplexität sowie den Kommunikationsbedarf zwischen den technischen Systemkomponenten [14][7][15]). Auch zwischen Systemakteuren, z.B. Anbieter/innen und Verbraucher/innen, gibt es in einem dezentralen, auf erneuerbaren Energien basierendem Energiesystem gesteigerte Kommunikationsbedarfe und zunehmende Handelsaktivitäten. Gleichzeitig vergrößert sich der Kreis der Akteure, die sowohl als Anbieter/innen als auch als Verbraucher/innen aktiv sind [16][4][15]. Dadurch vergrößert sich die Angriffsfläche für Cyberangriffe, auch weil neue Marktteilnehmer/innen möglicherweise weniger Fachkenntnis und technische Möglichkeiten haben, aber auf vernetzte Anlagen zugreifen können. KI-Anwendungen bieten großes Potenzial bei der Optimierung im Stromnetz, bringen aber auch Risiken mit sich, wie Disruption der Stromversorgung durch Datenmanipulation oder Privatsphärenverletzungen durch Datenmissbrauch, die Konsequenzen bis hin zu Einbrüchen oder persönlichen Konflikten haben können, weil sich über Verbrauchsdaten viel über Verhalten ablesen lässt [17][13]. Ein Beispiel für eine Cyberattacke im digitalisierten Energiesystem ist ein Angriffsszenario, in dem ein Computerwurm sich durch die Smart-Metering-Infrastruktur ausbreitet und eine hohe Zahl von Smart Metern zerstört. Ein solcher Angriff könnte zu Schäden an vielen tausend Stellen gleichzeitig führen, deren Behebung Zeit kosten würden [18]. Erzeugungsanlagen, deren Wichtigkeit zunimmt, wie Offshorewindparks, haben teilweise besondere Vulnerabilitäten gegenüber Cyberangriffen, auch bedingt durch Regulierungslücken [19]. Durch einen schwerwiegenden Cyberkriminalitätsvorfall wäre zudem zu erwarten, dass die Akzeptanz für digitale Elemente der Transformation des Energiesystems zurückgeht [4].

Erhöhte Komplexität und Kommunikationsbedarfe zwischen den technischen Komponenten führen darüber hinaus zu technischer Verwundbarkeit; beispielsweise kann das gleichzeitige An- oder Abschalten von vielen kleinen Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen (ob beabsichtigt oder durch Fehlfunktionen) die Stromversorgung destabilisieren [7][1]. Die volatil erzeugenden Anlagen, die an die Stelle von Großkraftwerken treten, müssen Systemdienstleistungen der Frequenz- und Spannungshaltung übernehmen, die technisch komplex sind und aus denen sich neue Risiken von Technikversagen und eingeschränkter Technikbeherrschbarkeit ergeben können.

Im Zuge der Energiewende wandelt sich das Gefährdungspotenzial von geopolitischen Konflikten: Während manche Abhängigkeiten reduziert werden, entstehen gleichzeitig neue [4][20]. Mit der Transformation des Energiesystems hin zu einem dekarbonisierten System ist eine Verringerung der Abhängigkeit von Exportländern fossiler Primärenergieträger zu erwarten. Gleichzeitig verschieben sich geopolitische Abhängigkeiten hin zu Ländern mit kritischen Rohstoffen oder Technologiekomponenten, die für erneuerbare Energien oder die Energieumwandlung benötigt werden, z.B. Elektrolyseure [21][4][20]. Aber auch Abhängigkeiten von Ländern mit Alternativen zu fossilen Brennstoffen wie grünem Wasserstoff und mit hohem Potenzial für erneuerbare Energien können sich vergrößern [20][5]. Das Risiko von Versorgungsengpässen wird durch die weltweit zunehmende Nachfrage nach erneuerbaren Energien verschärft. Es ist unklar, ob in den neuen Abhängigkeiten mehr oder weniger Konfliktpotenzial liegt. Es gibt Ergebnisse, die darauf hindeuten, dass Handelskonflikte im Zusammenhang mit erneuerbare Energietechnologien bisher häufiger auftreten als mit Bezug auf konventionelle Energieträger [22].

Im Kontext der Transformation muss auch die Verzahnung der Infrastruktursysteme berücksichtigt werden.

Die Sektorenkopplung führt zu einem deutlich größeren Anteil an Strom im nachgefragten Energiemix. Während sich dadurch die Robustheit verbessern kann, könnten sich gleichzeitig potenzielle Schäden durch Stromausfälle ausweiten, da beispielsweise die Wärmeversorgung und andere Sektoren, darunter der Verkehrssektor, stärker von Strom abhängen. Die Abhängigkeit aller anderen Infrastrukturen vom Infrastruktursystem Energie ist generell sehr ausgeprägt, wie diverse Studien zu den Auswirkungen von Blackouts illustrieren [1][23]. Gleichzeitig ist auch das Energiesystem abhängig von anderen Infrastrukturen bzw. steht in enger Interaktion mit diesen, was durch die Transformation weiter verstärkt wird. Besonders deutlich ist das im Fall

IKT: Mit der zunehmenden Digitalisierung im Energiesystem erhöht sich die Vulnerabilität bei IKT-Ausfällen. Aber auch andere Infrastruktursysteme wie Verkehr und Mobilität wirken sich auf das Energiesystem aus; so können sich Transportprobleme auf Wasserstraßen bei niedrigem Wasserstand auf die Verfügbarkeit von Kohle oder Mineralöl auswirken [8]. In Zeiten zunehmender Vernetzung auch zwischen den verschiedenen Infrastruktursystemen müssen solche Kaskadeneffekte immer stärker in den Blick genommen werden.

Referenzen

1. Mayer, C.; Brunekreeft, G.; Blank-Babazadeh, M.; Stark, S.; Buchmann, M.; Dalheimer, M.; Distelrath, V.; Hirschl, B. (Hg.) (2021): Resilienz digitalisierter Energiesysteme. Blackout-Risiken verstehen, Stromversorgung sicher gestalten. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, München
2. Kahlenborn, W.; Clausen, J.; Behrendt, S.; Göll, E. (Hg.) (2019): Auf dem Weg zu einer Green Economy. Wie die sozialökologische Transformation gelingen kann. Neue Ökologie Band 3, Bielefeld
3. Jakob, M.; Martini, L.; Meyer-Ohlendorf, N.; Evans, N. (2022): Klimadiplomatie in turbulenten Zeiten. eine Bestandsaufnahme wichtiger Entwicklungen. Ecologic Institute, Berlin, www.ecologic.eu/ (5.3.2024)
4. Jasiūnas, J.; Lund, P. D.; Mikkola, J. (2021): Energy system resilience – A review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews (150), DOI: [10.1016/j.rser.2021.111476](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476)
5. PowerShift (2023): Rohstoffwende und Energiewende zusammen denken. Kreislaufführung von Erneuerbaren Energien ausbauen. (Chardayre, T. Ilya; Reckordt, M.; Schnittker, H.), power-shift.de/ (5.3.2024)
6. Witt, U. (2023): Wasserstoff: zentrales Element für den Industrieumbau. Eine Studie im Rahmen des Projekts »Sozial-ökologische Transformation der deutschen Industrie«. Rosa Luxemburg Stiftung, www.rosalux.de/ (5.3.2024)
7. Korzynietz, R.; Bierau-Delpont, F.; Moorfeld, R. (2023): Die Energiewende als Sprungbrett in ein resilientes Energiesystem. Volker Wittpahl, DOI: [10.1007/978-3-662-66057-7_11](https://doi.org/10.1007/978-3-662-66057-7_11)
8. Voß, M.; Kahlenborn, W.; Porst, L.; Dorsch, L.; Nilson, E.; Rudolph, E.; Lohrengel, A.-F. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur. Umweltbundesamt
9. Scheele, U.; Kröcher, U. (2023): Sozial-ökologische Transformation der Energiewirtschaft in der Nordwestregion. Niedersachsen Allianz für Nachhaltigkeit; Deutscher Gewerkschaftsbund Region Oldenburg-

- Ostfriesland; Arbeit und Leben Niedersachsen; Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, niedersachsen.dgb.de/ (5.3.2024)
10. Henger, R.; Stockhausen, M. (2022): Gefahr der Energiearmut wächst. IW-Kurzbericht 55, Köln, www.iwkoeln.de/ (5.3.2024)
 11. World Economic Forum (2024): The Global Risks Report 2024. 19th Edition. Insight Report, www.weforum.org/ (12.3.2024)
 12. Allianz Research (2023): What to watch: Economic scenarios for Israel – Hamas conflict, rolling back on climate goals and drought at Panama Canal disrupts trade, www.allianz.com/ (4.3.2024)
 13. Strauß, S.; Bettin, S. (2023): Digitalisierung, Vulnerabilität und (kritische) gesellschaftliche Infrastrukturen. Entwicklungsstand, Trends und zentrale Herausforderungen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, epub.oeaw.ac.at/ (5.3.2024)
 14. Deutsche Energie-Agentur GmbH (2022): Netzbetreiber-Umfrage Cybersicherheit. Zum Stand der Cybersicherheit im deutschen Stromnetz. (Wagner, J.; Chadenas, O.; Dechand, M.; Pulvermüller, B.), www.dena.de/ (5.3.2024)
 15. Öko-Institut; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität: Welche Chancen und Risiken ergeben sich durch die Digitalisierung? (Gensch, C.-O.; Behrens, F.; Braungardt, S.; Gailhofer, P.; Gröger, J.; Sutter, J.; Degel, M.; Fritzsche, K.; Bauer, S.; Steck, L.), www.researchgate.net/ (5.3.2024)
 16. Babilon, L.; Battaglia, M.; Robers, M.; Degel, M.; Ludwig, K. (2022): Energy Communities: Beschleuniger der dezentralen Energiewende. Energy Communities: Beschleuniger der dezentralen Energiewende Mit digitalen Technologien auf dem Weg zu neuen Rollen im Energiesystem der Zukunft. dena-ANALYSE, www.dena.de/ (5.3.2024)
 17. European Union Agency for Cybersecurity (2023): Cybersecurity and privacy in AI – Forecasting Demand on Electricity Grids. Monika Adamczyk; Apostolos Malatras; Ioannis Agrafiotis; ENISA, www.enisa.europa.eu/ (5.3.2024)
 18. Hansen, A.; Staggs, J.; Sheno, S. (2017): Security analysis of an advanced metering infrastructure. In: International Journal of Critical Infrastructure Protection (18), DOI: [10.1016/j.ijcip.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2017.03.004)
 19. Chen, J.; Du, H.; Yan, J.; Zgheib, R.; Debbabi, M. (2023): A Data Integrity Attack Targeting VSC-HVDC-Connected Offshore Wind Farms. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), DOI: [10.1109/SmartGridComm57358.2023.10333872](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm57358.2023.10333872)
 20. Pepe, J. M. (2023): Geopolitik und Energiesicherheit in Europa: Wie geht es weiter? FES Just Climate, library.fes.de/ (5.3.2024)

21. Ansari, D.; Grinschgl, J.; Pepe, Jacopo Mariaio Maria Pepe (2022): Electrolysers for the Hydrogen Revolution. Challenges, dependencies, and solutions. In: SWP Comment (57), DOI: [10.18449/2022C57](https://doi.org/10.18449/2022C57)
22. Apergi, M.; Zimmermann, E.; Weko, S.; Lilliestam, J. (2023): Is renewable energy technology trade more or less conflictive than other trade? In: Energy Policy (177), DOI: [10.1016/j.enpol.2023.113538](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113538)
23. TAB (2010): Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen Ausfalls der Stromversorgung. Endbericht zum TA-Projekt. (Petermann, T.; Bradke, H.; Lüllmann, A.; Poetzsch, M.; Riehm, U.) TAB-Arbeitsbericht 141, publikationen.bibliothek.kit.edu/ (5.3.2024)

Fokusthemen

Für eine vertiefende Untersuchung im Resilienz-Check schlagen wir drei Fokusthemen für das Infrastruktursystem Energie vor. Diese basieren auf der Analyse der Trends und systemischen Risiken im Zuge des Resilienz-Radars, einschließlich der verschiedenen Expertenbefragungen. Die vorgeschlagenen Fokusthemen sind eng mit den identifizierten Trendclustern und der Transformation des Infrastruktursystems verbunden und besitzen hohe Relevanz für transformative Resilienzstrategien. In methodischer Hinsicht eignen sich die spezifischen Themenzuschnitte sowohl für die geplante Partizipation im Resilienz-Check als auch für die Entwicklung von Zukunftsszenarien.

Fokusthema 1: Dezentralität und Zentralität im zukünftigen Stromnetz

Die Transformation des Energiesystems im Rahmen der Dekarbonisierung, wie im Trendcluster [Dekarbonisierung des Energiesystems](#) beschrieben, zeichnet sich durch eine verstärkte Dezentralisierung aus. Die konventionellen zentralisierten Erzeugungsanlagen und Stromnetze sind nicht mehr geeignet, um mit einem wachsenden Anteil an erneuerbaren Energien eine stabile Stromversorgung zu gewährleisten. Dezentralität ist vielschichtig. Für die Szenarioentwicklung stehen in diesem Themenvorschlag physische und netztopologische Dimensionen im Fokus: die technische Dimension der Anlagengröße, die räumliche Dimension der Nähe von Last und Erzeugung sowie die Integrationsdimension, die den Ausgleich charakterisiert. Obwohl die Dezentralisierung des Energiesystems viele Vorteile bietet, bringt sie auch spezifische Herausforderungen mit sich: verringerte Effizienz durch parallele Strukturen, Netz(in)stabilität, komplexe Koordinationsaufgaben sowie Cybersicherheit. Für die Szenarioentwicklung werden fachliche Schwerpunkte auf zwei unterschiedliche Optionen der Dezentralisierung gesetzt. Zum einen wird eine Vielzahl kleiner Erzeugungsanlagen fokussiert, mit Flexibilitätsmaßnahmen, die auf der untersten Netzebene angesiedelt sind. Zum anderen werden große (erneuerbare) Erzeugungs- oder Speicheranlagen an besonders geeigneten Standorten untersucht, von denen der Strom in die Verbrauchsregionen transportiert wird.

Fokusthema 2: die Rolle von Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem

Die Rolle von Wasserstoff im Energiemix der Zukunft ist eine zentrale Frage der Transformation. Wie in Trendcluster [Ausbau von Power-to-X-Infrastrukturen und der Sektorenkopplung](#) beschrieben, kommt Wasserstoff bei der Sektorenkopplung eine zentrale Funktion zu. Es werden Infrastrukturen auf- und ausgebaut und die Zahl von Power-to-X-Anlagen steigt. Jedoch bestehen im Hinblick auf die Nutzungsoptionen von Wasserstoff einige Herausforderungen. Dazu gehören Kosteneffizienz, Wandlungs- und Transportverluste sowie erforderliche Infrastrukturen. Diese Herausforderungen führen zu Unsicherheiten und sind mit neuen Pfadabhängigkeiten, finanziellen Risiken, neuen geopolitischen Abhängigkeiten sowie Nutzungskonkurrenzen verbunden. Für die Szenarioentwicklung werden in diesem Themenvorschlag fachliche Schwerpunkte erstens auf die Anwendung von Wasserstoff im Industriesektor und zweitens auf das Anwendungsfeld Verkehr gelegt. In beiden Sektoren ist der zukünftige Einsatz von Wasserstoff zwar unumstritten, bezüglich des Ausmaßes divergieren die Einschätzungen jedoch erheblich.

Fokusthema 3: KI-Anwendungen im Stromnetz

Anwendungen von KI eröffnen vielversprechende Einsatzmöglichkeiten in unterschiedlichen Bereichen des Energiesystems. Sie können maßgeblich zur Förderung der Energiewende und eines umweltfreundlichen Energiesystems beitragen. Wie im Trendcluster [Digitale Netz- und Verbrauchssteuerung](#) beschrieben, hat KI im Stromnetz ein großes Potenzial. Anwendungen sind hier unter anderem das Monitoring der Netze durch Netzoptimierung, Vorhersagen potenzieller Ausfälle oder das Erkennen von Angriffen sowie weitere Funktionalitäten im Netzbetrieb und zukünftiger Smart Grids. Ein weiterer Einsatzbereich ist die vorausschauende Wartung. KI im Stromnetz ist gleichzeitig mit großen Herausforderungen verbunden, wie erhöhte Risiken durch Cyberangriffe sowie Softwarefehler, die die Stabilität und damit die Versorgungssicherheit gefährden können. Zudem ist die Zuverlässigkeit bei der Datenbereitstellung und die Datensicherheit zentral: Die zunehmende Nutzung von cloudbasierten Softwarediensten und externer Recheninfrastruktur zur Datenbereitstellung und -verarbeitung kann zu neuen Abhängigkeiten und Verletzlichkeiten führen. Für die Szenarioentwicklung werden in

diesem Themenvorschlag aussichtsreiche KI-Anwendungen im Stromnetz fokussiert.

Methodik und Vorgehen

Die Umsetzung des Resilienz-Radars erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen. In allen Phasen wird die Expertise interner und externer Expert/innen einbezogen.

In der ersten Phase wurden vor allem Foresight- und TA-Studien im Umfeld der ausgewählten Infrastruktursysteme erfasst und analysiert. Hierbei wurden insbesondere mittel- bis langfristige Trends identifiziert, die nachweisbare Auswirkungen auf die Infrastruktursysteme haben. Ergänzend wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse des [TA-Projekts](#) „Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken“ relevante wissenschaftliche Quellen zur Analyse von systemischen Risiken ausgewertet. Diese können eine Gefährdung von Gesellschaften oder Wirtschaftssystemen als Ganzes zur Folge haben und beinhalten damit grundsätzlich auch die Gefahr, dass Funktionsfähigkeit und Stabilität von Infrastruktursystemen erheblich beeinträchtigt werden, wenn sich diese Risiken verwirklichen.

Die Identifikation aufkommender soziotechnischer Trends erfolgte zusätzlich durch den Einsatz von Software- und KI-Technologien. Dafür wurde ein Quellenpool aufgebaut, der einschlägige Datenbanken (z.B. EPTA, ORBIS, Knowledge4Policy, OpenTA), Publikationen (Foresightstudien, Trendberichte, Konferenzsammelbände und Preprints), wissenschaftliche Plattformen (z.B. ScienceDaily) sowie journalistischen Hintergrundanalysen (Tagesspiegel Background, Heise online) umfasst. Die neuesten Veröffentlichungen wurden über eine zentrale Plattform semiautomatisch und kontinuierlich abgerufen. Das Team sichtete die Beiträge regelmäßig und bewertete deren Relevanz für die ausgewählten Infrastruktursysteme. Ergänzend wurde nach Innovationen mithilfe einer Medienanalysesoftware mit Zugang zu 150 Mio. Onlinequellen gesucht. Dabei lag der Fokus vor allem auf Tages- und Wochenzeitungen sowie Onlinenews.

In der zweiten Phase wurden Interviews mit ausgewählten Expert/innen geführt, um deren Fachwissen, Einschätzungen und Meinungen zu wesentlichen Trends und Herausforderungen sowie zu Wirkungszusammenhängen im Kontext systemischer Risiken für die Infrastruktursysteme zu erfassen. Für die Interviews wurde ein einheitlicher Leitfaden und Fragenkatalog erstellt. Auf den Ergebnissen der Interviews aufbauend wurden moderierte infrastrukturspezifische Workshops mit ausgewählten Expert/innen durchgeführt. Hier wurden

erste Arbeitsergebnisse zum Systembild des jeweiligen Infrastruktursystems sowie zu relevanten Trends und möglichen Folgen von systemischen Risiken vorgestellt und diskutiert. Abschließend erfolgte eine Einschätzung hinsichtlich politischer Relevanz und möglicher Vertiefungsthemen. Die Antworten der Befragten sowie weitere Kommentare, Hinweise und detaillierte Ausführungen wurden während der Interviews und Workshops protokolliert und die Ergebnisse anschließend qualitativ ausgewertet.

In der dritten Phase wurde für jedes der Infrastruktursysteme eine explorative Onlineerhebung unter Einbeziehung des Expertenpanels mithilfe der Software SoSci Survey durchgeführt. Aufgabe war es, auf Grundlage der vorangegangenen Schritte Trends auszuwählen und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Verletzlichkeit und Resilienz des genannten Infrastruktursystems zu bewerten. Außerdem wurden die insgesamt etwa 80 Expert/innen dazu befragt, welche Trends in den nächsten 10 Jahren zu einer erhöhten Resilienz der Infrastruktursysteme beitragen könnten und welche Trends die Transformation der Infrastruktursysteme in Richtung Klimaneutralität besonders hemmen. Darüber hinaus sollten sie einschätzen, wie derzeit der Grad der Robustheit des jeweiligen Infrastruktursystems in Bezug auf prioritäre systemische Risiken eingeschätzt wird. Abschließend wurde für jedes System erfragt, auf welche Schwerpunktthemen die Politik in den nächsten 5 Jahren in Bezug auf die Resilienz des Infrastruktursystems vorrangig fokussieren sollte. Der quantifizierbare Teil der Ergebnisse wurde statistisch ausgewertet, die Kommentare, Hinweise und detaillierten Ausführungen einer qualitativen Analyse unterzogen.

Die Resultate aller drei Arbeitsphasen wurden abschließend integrativ analysiert und in dem vorliegenden Foresight-Report zusammengefasst.

Autorinnen und Autoren

Das Resilienz-Radar sowie der Foresight-Report sind eine gemeinsame Aktivität des TAB-Betreibers ITAS zusammen mit dem Konsortialpartner IZT. Verantwortlich für die Inhalte sind die [folgenden Wissenschaftler/innen](#). Bei inhaltlichen Fragen zum Foresight-Report wenden Sie sich bitte an Michaela Evers-Wölk oder Christoph Kehl.

Beteiligte Expert/innen

Die Umsetzung des [Resilienz-Radars](#) erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen. In allen Phasen wird die Expertise interner und externer Expert/innen einbezogen. Für die Analyse des Infrastruktursystems Energie wurden u.a. die [folgenden Fachleute](#) im Rahmen von leitfadengestützten Fachgesprächen, moderierten Gruppendiskussionen oder einer explorativen Online-Erhebung eingebunden.

Zitationsvorschlag

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2024): Foresight-Report zum Infrastruktursystem Energie (Autor/innen: Bledow, N.; Eickhoff, M.; Evers-Wölk, M.; Kahlisch, C.; Kehl, C.; Nolte, R.; Rioussset, P.). Berlin. <https://foresight.tab-beim-bundestag.de/reports/energie>

Das TAB analysiert im Auftrag des Deutschen Bundestages umfassend und vorausschauend die Potenziale wissenschaftlich-technischer Entwicklungen und ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Betreiber: [ITAS](#) im [KIT](#)
Partner: [IZT](#) und [iit](#) in der [VDI/VDE-IT](#)
Auftraggeber: [Deutscher Bundestag](#)
Steuerungsgremium: [Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung](#)



Kontakt

[Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag \(TAB\)](#)

[Mediananfragen](#)

Organisation

foresight.tab-beim-bundestag.de