



FVEE-Themen

■ Forschung für ein resilientes Energiesystem in Zeiten globaler Krisen

Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2023

Veranstalter:



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



FVEE • Themen 2023

Forschung für ein resilientes Energiesystem in Zeiten globaler Krisen

Jahrestagung 2023
des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien
10. und 11. Oktober 2023
Umweltforum Berlin • Pufendorfstr. 11 • 10249 Berlin

Wissenschaftliche Leitung
Prof. Dr. Uwe Rau • FZ Jülich
Prof. Dr. Ingo Sass • GFZ

Programmkomitee

CAE	• Dr. Hans-Peter Ebert
DBFZ	• Dr. Peter Kornatz
DLR	• Stephan Lehnen
Fraunhofer IEE	• Dr. Reinhard Mackensen
Fraunhofer ISE	• Dr. Georg Krugel
Fraunhofer IWES	• Prof. Dr. Andreas Reuter
GFZ	• Prof. Dr. Ingo Sass
HBZ	• Dr. Tobias Sontheimer
ISFH	• Dr. Stefan Bordihn
IZES gGmbH	• Prof. Dr. Marc Deissenroth-Uhrig
FZ Jülich	• Prof. Dr. Uwe Rau
	• Dr. Stefan Haas
KIT	• Prof. Dr. Joachim Knebel
	• Dr. Witold-Roger Pogonietz
UFZ	• Dr. Matthias Jordan
Wuppertal Institut	• Dr. Sascha Samadi
ZAE Bayern	• Dr. Andreas Hauer
ZSW	• Dr. Peter Bickel
	• Prof. Dr. Frithjof Staiß

Veranstalter:



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

■ Einführung

5 Forschung für ein resilientes Energiesystem in Zeiten globaler Krisen

Prof. Dr. Uwe Rau • FZ Jülich

Prof. Ingo Sass • GFZ

■ Energieforschung in Zeiten globaler Krisen

6 Auswirkung globaler Krisen auf das Energiesystem

Dr. Karin Arnold • Wuppertal Institut

9 Nationale Eigenversorgung und Bedarf an internationalem Energiebezug

Dr. Nicole Neumann • DLR

■ Resiliente Lieferketten und Rohstoffversorgung

14 Grüner Wasserstoff und andere regenerative Energierohstoffe im globalem Energiesystem

Dr. Heidi Heinrichs • FZ Jülich

19 Closing the gap between sustainable aviation fuels and fossil aviation fuels

Dr. Sonya Calnan • HZB

26 Ist die Versorgung mit kritischen Rohstoffen ein Hindernis für die Energiewende?

Prof. Dr. Sarah Gleeson • GFZ

■ Szenarien und Pfade für ein resilientes Energiesystem

32 Krisenprävention mit Suffizienz – Ergänzung zu erneuerbaren Energien und Energieeffizienz

Dr. Benjamin Best • Wuppertal Institut

35 Energiesystem-Resilienz in Szenarien und Transformationspfaden

Dr. Hans Christian Gils • DLR

■ Technologien und Marktdesign

40 Technologiespektrum und Strategien für resilientere Energiesysteme

Prof. Dr. Fabian Scheller • CAE

46 Resilienz durch Energiespeicher

Anna Kümmel • ZAE

52 Effiziente Cyber-Resilienz

Dr. Kaibin Bao • KIT

59 Systemstabilität durch Leistungselektronik

Gesa Quistorf • Fraunhofer IWES

65 Resiliente Stromnetze

Prof. Dr. Martin Braun • Fraunhofer IEE & Universität Kassel

71 Energiewende ermöglichen durch Niederspannungsbetriebsführung*Andrea Schön • Fraunhofer IEE***79 Ressourcen für die Energiewende –
Status quo der Energiesystemmodellierung***Dr. Charlotte Senkpiel • Fraunhofer ISE***83 Circular Economy als Basis für resiliente und erneuerbare Rohstoffkreisläufe***Dr. Jochen Brellachs • ZSW***■ Resilienz vor Ort****88 Stärkung der Resilienz sozialer Systeme –
welchen Beitrag kann die sozialwissenschaftliche Forschung leisten?***Jan Hildebrand • IZES***92 Dezentralisierung der Daseinsvorsorge durch blau-grün-rote Infrastrukturen***Dr. Frank Hüesker • UFZ***96 Resilienz im Quartier***Dr. Michaela Reim • CAE***101 Shorten up! Mit regionalen Kreisläufen zum resilienten Wirtschaftssystem***Dr. Peter Kornatz • DBFZ***■ Über den FVEE****106 Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien
Standorte der FVEE-Mitgliedseinrichtungen****107 Mitgliedseinrichtungen und Ansprechpartner****■ Impressum****108 Themen 2023
Forschung für ein resilientes Energiesystem in Zeiten globaler Krisen**

Einführung

Forschung für ein resilientes Energiesystem in Zeiten globaler Krisen

Multiple Krisen setzen die Energieversorgung unter Druck

Die letzten Jahre waren geprägt von politischen, sozialen und ökonomischen Krisen in bisher unbekanntem Ausmaß. Zusammen mit der fortschreitenden Klimakrise stellen sie Gesellschaft, Politik und Wirtschaft vor große Herausforderungen. Die multiplen Krisen schlagen auch auf das Energiesystem durch, dessen Verletzlichkeit und Angreifbarkeit drastisch sichtbar wird. Die Energieversorgung muss deshalb unabhängiger gestaltet und ertüchtigt werden, um die sichere Bereitstellung von Strom und Wärme auch unter Krisenbedingungen und gegen Angriffe zu gewährleisten.

Energieforschung erhöht die Resilienz des Energiesystems

Die Beiträge der FVEE-Jahrestagung 2023 untersuchen die technischen, politischen und gesellschaftlichen Möglichkeiten, um die Resilienz der deutschen und europäischen Energiesysteme zu stärken. Die Energieforschung liefert Lösungsbeiträge, um die Abhängigkeit von Rohstoff- und Energieimporten zu verringern, die Versorgungssicherheit zu erhöhen und die Energiewende zu beschleunigen.

Die Tagungsbeiträge untersuchen auch wie Märkte und Lieferkette resilienter gestaltet werden können, welche Handlungsoptionen die Politik hat, um den Auswirkungen globaler Krisen auf das Energiesystem entgegenzusteuern und welche Rolle die Digitalisierung für ein resilientes Energiesystem spielt.

Dank

Wir danken allen Autorinnen und Autoren für ihre Beiträge und dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft für die Förderung der Tagung.



Prof. Dr. Uwe Rau
Wissenschaftliche Tagungsleitung
FZ Jülich
u.rau@fz-juelich.de



Prof. Dr. Ingo Sass
Wissenschaftliche Tagungsleitung
GFZ
ingo.sass@gfz-potsdam.de

Auswirkung globaler Krisen auf das Energiesystem

Resilienz und Wechselwirkungen zwischen Systemen



Wuppertal Institut
Dr. Karin Arnold
karin.arnold@wupperinst.org

KIT
Dr. Christine Rösch
christine.roesch@kit.edu

Dr. Martina Haase
martina.haase@kit.edu

FZ Jülich
Dr. Johannes Jarke-Neuert
j.jarke-neuert@fz-juelich.de

Im FVEE wird seit vielen Jahren mit einem ganzheitlichen und dynamischen Ansatz an einem Energiesystem geforscht, das im Zielbild nachhaltig und resilient sein soll. Nur diese umfassende, mehrdimensionale Betrachtung ermöglicht die Entwicklung eines resilienten Gesamtsystems. Das Resilienzkonzept stellt einen theoretischen Ansatz dar, um den Herausforderungen wachsender Komplexität, Unsicherheiten und einschneidender Veränderungen des Energiesystems zu begegnen. Diese resultieren aus systemexternen oder -internen Stressphänomenen, insbesondere globalen Krisen und Herausforderungen wie etwa dem Klimawandel oder dem russischen Krieg gegen die Ukraine (e.g., Jones et al. 2021).

Es gibt viele Definitionen von Resilienz, wobei aber keine einen allgemeingültigen Anspruch hat. Das Konzept geht zurück auf Holling (1973), der Resilienz als die Fähigkeit ökologischer Systeme definiert, auf Störungen so zu reagieren, um wesentliche Funktionalitäten und Leistungen zu erhalten oder wiederherzustellen (e.g., Folke et al. 2010). Das Konzept von Holling wurde zu einem weiteren und dynamischeren Verständnis entwickelt „(...) deal with change and continue to develop“ (Stockholm Resilience Center, 2022). Es geht also wesentlich um Veränderung und den Umgang damit. Das Konzept der Anpassung in Reaktion auf Veränderungen und Störungen wurde auf sozio-technische Systeme übertragen (e.g., González-Quintero and Avila-Foucat 2019).

Resilienz und Nachhaltigkeit

Während die Resilienz auf die Möglichkeit einer Krise fokussiert, ist das Konzept der Nachhaltigkeit ein Handlungsprinzip der zukunftsfähigen Ressourcennutzung. Die konzeptionellen und praxisbezogenen Synergien und Trade-offs zwischen Resilienz und Nachhaltigkeit werden kontrovers diskutiert (e.g., Zanotti et al. 2020). Einerseits wird auf Kompatibilitäten und Synergien zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen hingewiesen (e.g., Zeng et al. 2022), andererseits auf mögliche Konflikte mit Nachhaltigkeitszielen,

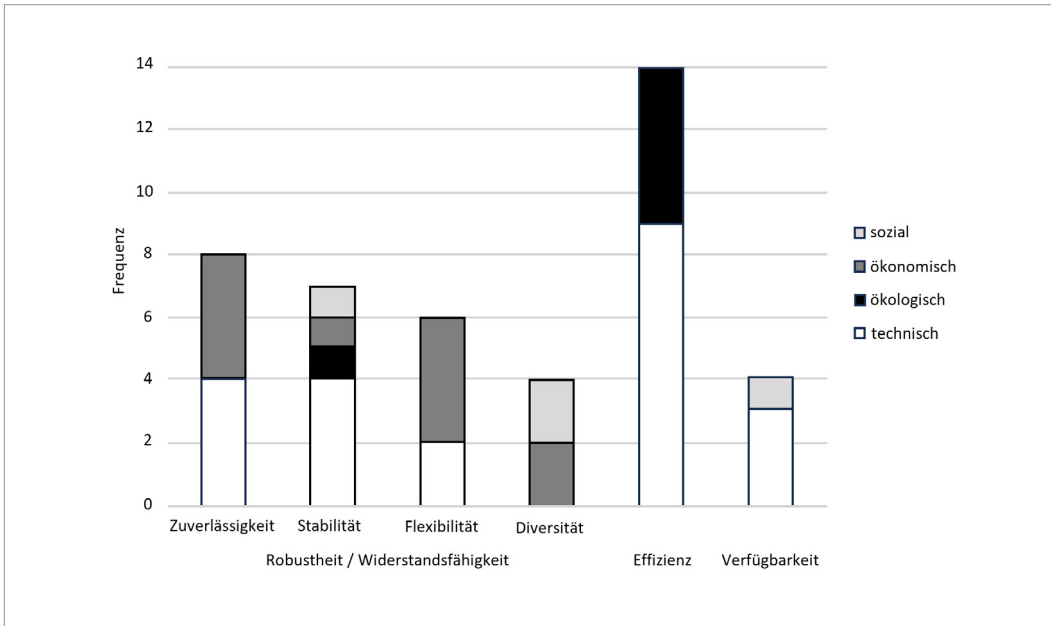
insbesondere dem Effizienzparadigma (Chaigneau et al. 2022).

Relevante Merkmale von Resilienz sind Widerstandsfähigkeit, Robustheit, Anpassungsfähigkeit und Entwicklungsfähigkeit. Daraus wird ersichtlich, dass Resilienz – so wie das Energiesystem auch – kein Selbstzweck ist, sondern seinen Nutzer:innen als Mittel zum Zweck dienen muss; die Nutzer:innen bzw. Endanwender:innen müssen stets mitgedacht werden. Zugespielt wird dies durch eine zielführende Leitfrage, die auch in der Literatur häufig zitiert wird: „*Resilience of what against what?*“ Für das Zielbild des resilienten Energiesystems ist damit die Definition des „Systems“ relevant und die Frage, welche Art von „System“ im Fokus steht und was Resilienz für das Leitbild der Nachhaltigkeit bedeutet. Schneidewind (2018) führt im Rahmen der großen Transformation einen Systembegriff ein, der technologische, ökonomische, institutionelle und kulturelle Dimensionen umfasst und über eine rein technische Betrachtung des Energiesystems hinaus geht. Ähnlich hat schon Rohrbach et al. (2008) Energiesysteme als „(...) *socio-technical configurations where technologies, institutional arrangements (...), social practices and actor constellations (...) mutually depend on each other (...)*“ charakterisiert.

Die Resilienz des Energiesystems umfasst dabei die folgenden Aspekte:

- Versorgungssicherheit/Ausfallsicherheit mit Strom, Wärme, Gas, Kraftstoff und die Versorgung mit anderen Roh- und Brennstoffen
- Widerstandsfähigkeit gegenüber politischen Konflikten (Bezug von Roh- und Brennstoffen; Handelsbeziehung; Im-/Export; Austausch von Knowhow; Diversifizierung von Bezugsregionen)
- Substitution kritischer Rohstoffe (Bezug von Roh- und Brennstoffen; Diversifizierung in Umwandlung und Nutzung)

In einer Meta-Analyse zur Bewertung von Technologien für erneuerbare Energietechnologien haben Rösch et al. (2024) nach Ummannakwe et al. (2021) deren Robustheit/Widerstandsfähigkeit, Effizienz und Verfügbarkeit für die Bewertung eines resilienten Systems verwendet. Zudem haben Rösch et al. (2024) die Interdependenz zwischen Resilienz



► Abbildung 1

Häufigkeit resilienzbezogener Kriterien
und der damit verbundenen Nachhaltigkeitsdimension in den untersuchten Artikel (n=24)

(Quelle: Rösch et al 2024)

und Nachhaltigkeit im Kontext der Technologiebewertung analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Nachhaltigkeitsbewertungen resilienzbezogene Kriterien genutzt werden, ohne jedoch direkten Bezug auf das Resilienzkonzept zu nehmen. Wir fanden insgesamt 43 resilienzbezogene Kriterien (davon 30 unterschiedliche Kriterien), die in 24 der untersuchten 52 Artikeln analysiert wurden (Rösch et al. 2024). Für die Kategorie Robustheit/Widerstandsfähigkeit haben wir die Kriterien in vier Cluster unterteilt (Zuverlässigkeit,

Stabilität, Flexibilität und Diversität). Die Kriterien wurden größtenteils der technischen Dimension, teilweise aber auch der ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimension von Nachhaltigkeit zugeordnet (► Abbildung 1).

Eine weitere Untersuchung von Kriterien fußt auf der Gegenüberstellung zweier unterschiedlicher Resilienz-Begriffe, der technischen und ökologischen Resilienz (► Tabelle 1). Durch die Betrachtung der ökologischen Resilienz wird ein weiterer Rahmen gespannt. Dem System wird so eine

	technische Resilienz	ökologische Resilienz
Kennzeichen	Risikomanagement	basierend auf der Ökosystemtheorie
Betrachtungsweise	quantitativ	qualitativ
Gleichgewicht	Ein globaler Gleichgewichtszustand (GGW)	Existenz mehrerer GGW Zustände
Unsicherheit	niedrig	hoch
Dynamik	statisch, linear	dynamisch, nicht-linear
Fokus	Widerstandsfähigkeit, Anpassungsfähigkeit	zusätzlicher Fokus auf Transformations- und Weiterentwicklungsfähigkeit
Stressoren	Keine Berücksichtigung von unbekanntem/unvorhersehbaren Stressoren	Möglichkeit des Umgangs mit unbekanntem/unvorhersehbaren Stressoren
Design	Ausfallsicherheit (fail safe)	Sicheres Scheitern (safe fail)

► Tabelle 1

Kriterien bei der Gegenüberstellung von technischer und ökologischer Resilienz

(Quelle: eigene Darstellung nach Mitzinger et al, 2020 und Senkel, 2022)

Weiterentwicklung auf eine andere Ebene erlaubt bzw. ermöglicht. Diese Betrachtungsweise stützt die These, dass eine umfassendere Betrachtung eine größere Resilienz zur Folge hat sofern die Ergebnisse implementiert werden.

Globale Dimension und verbindliche Definitionen

Die Betrachtung sollte dabei nicht auf die nationale Ebene begrenzt werden. Eine (Energie-/Rohstoff-) Autarkie Deutschlands und der EU ist wenig realistisch und wird nicht angestrebt. Daher muss die Reflexion des Energiesystems und seiner Infrastruktur im Kontext von globaler Resilienz und Nachhaltigkeit erfolgen. Notwendig sind die Identifikation von Wechselwirkungen im internationalen Systemdenken sowie von Trade-offs und Faktoren, welche die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen erschweren. Für das Leitbild der „nachhaltigen Resilienz“ ist ein vorsorglicher Umgang mit den sich stetig verändernden Rahmenbedingungen bspw. durch das Vorhalten kritischer Fähigkeiten und Ressourcen angeraten.

Trotz seiner politischen Relevanz wird das Resilienzkonzept aufgrund seiner Mehrdeutigkeit und der fehlenden Verständigung auf eine einheitliche Definition in der Forschung wenig berücksichtigt (e.g., Gasser et al. 2021) und es werden in den Analysen eine Vielzahl unterschiedlicher Kriterien verwendet (e.g., Rosowsky 2020). Um dieses Dilemma aufzuheben, muss die Wissenschaft das Resilienzthema für den Energiebereich expliziter adressieren und sich auf geeignete Bewertungskriterien auf System- und Technologieebene verständigen. Das deutsche Energiesystem ist Teil eines global vernetzten Systems und steht mit diesem in Wechselwirkung. Nur eine globale Betrachtung kann zu einem wirklich resilienten und nachhaltigen System im übergreifenden Sinne führen.

Literatur

- Chaigneau, T., et al., Reconciling well-being and resilience for sustainable development. *Nature Sustainability*, 2022. 5(4): p. 287-293.
- Folke, C., et al., Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and society*, 2010. 15(4).
- Gonzalez-Quintero, C. and V.S. Avila-Foucat, Operationalization and measurement of social-ecological resilience: a systematic review. *Sustainability*, 2019. 11(21): p. 6073.
- Gasser, P., et al., A review on resilience assessment of energy systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2021. 6(5): p. 273-299.
- Holling, C.S., Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 1973. 4(1): p. 1-23.
- Jones, L., et al., Advancing resilience measurement. *Nature Sustainability*, 2021. 4(4): p. 288-289.
- Mitzinger, T., et al., Operationalization and Application of Resilience Enhancing Design Principles for District Heating Systems. *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*. 2020
- Rohrbacher, H. (2008): "Energy systems in transition: contributions from social sciences", *International Journal of Environmental Technology and Management* 9(2/3), 144-161. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2008.019026>. 2008
- Rosowsky, D.V., Defining resilience. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2020. 5(3): p. 125-130.
- Rösch, C., et al., With RRI and Resilience from Technology Assessment to Integrated Sustainability Assessment of Technologies: The Example of Renewable Energy Technologies. Submitted to the *Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024
- Schneidewind, U.; Wiegandt, K.; Welzer, H. (2018): *Die große Transformation - Eine Einführung in die Kunst gesellschaftlichen Wandels*.
- Senkel, A., et al., Modellierung und Bewertung der Resilienz gekoppelter Energiesysteme. *Doctoral Thesis*. <https://doi.org/10.15480/882.4472>, 2022
- Stockholm Resilience Center, Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environ. Sci. Technol.* 2022, 56, 3, 1510–1521. 2022
- Umunnakwe, A., et al., Quantitative analysis of power systems resilience: Standardization, categorizations, and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. 149: p. 111252.
- Zanotti, L., et al., Sustainability, resilience, adaptation, and transformation: tensions and plural approaches. *Ecology and Society*, 2020. 25(3).
- Zeng, X., et al., Urban resilience for urban sustainability: Concepts, dimensions, and perspectives. *Sustainability*, 2022. 14(5): p. 2481.

Nationale Eigenversorgung und Bedarf an internationalem Energiebezug

Aktuelle Situation

Die verschärfte geopolitische Lage im Jahr 2022 hat die gefühlte Versorgungssicherheit an Energie und Energieträgern in Deutschland erschüttert. Als Resultat wurde der Ruf nach einem resilienteren Energiesystem lauter und Deutschlands Importabhängigkeit von Energieträgern wurde gesellschaftlich in Frage gestellt.

In diesem Kontext lohnt ein Blick auf die Primärenergieversorgung Deutschlands in den letzten Jahren. Unsere Primärenergieversorgung wird noch immer massiv von fossilen Energieträgern dominiert. 2021 lag dieser Anteil bei 77%, wobei Mineralöl und Erdgas zusammen bereits 59% des Primärenergieverbrauchs ausmachen (Weltenergieat - Deutschland e.V., 2022). Sowohl Mineralöl als auch Erdgas wird nahezu vollständig importiert (98% bei Mineralöl, 95% bei Erdgas), sowie Steinkohle zu 100%. Daher lag 2021 die Importabhängigkeit, definiert als Verhältnis der importierten Primärenergie zum gesamten Primärenergieverbrauch, in Deutschland bei 71%.

Die Energieversorgungslage in 2022 wurde maßgeblich dadurch verschärft, dass wir den Hauptteil der fossilen Importe an Mineralöl, Erdgas und Steinkohle aus Russland bezogen und somit zu diesem Land die stärkste energiebedingte Abhängigkeit bestand (Weltenergieat - Deutschland e.V., 2022). Durch die forcierten Energieeinsparmaßnahmen und den milden Winter konnte der Erdgasbedarf 2022 zwar um 15% gesenkt werden. Doch dieser Rückgang wurde teilweise durch einen erhöhten Import von Öl und Steinkohle aufgebraucht, was insgesamt dazu führte, dass der Primärenergiebedarf nur um 2% zurückging. Dabei wurde der Wegfall russischer Energieimporte durch einen verstärkten Bezug an Energieträgern aus den USA, Niederlanden, Norwegen und Südafrika ausgeglichen, so dass insgesamt auch 2022 die Importabhängigkeit bei 71% blieb.

Deutschlands Ziel der Klimaneutralität bis 2045 stellt unser Energiesystem vor eine weitere Herausforderung. Insbesondere die Sektoren Wärme und Verkehr verzeichnen einen eher stagnierenden

Anteil erneuerbarer Energien bei lediglich 7% im Verkehr und 17% im Wärmesektor im Jahr 2022 (AGEE-Stat, 2023). Daher stellt sich die Frage: Wie könnte sich der Primärenergiebedarf von einem klimaneutralen Deutschland verändern und wie wirkt sich dies auf unsere Energieimportabhängigkeit aus?

Mögliche Transformationspfade des Energiesystems für ein klimaneutrales Deutschland

Eine Studie des Fraunhofer ISE hat mögliche Transformationspfade hin zu einem klimaneutralen Deutschland aufgezeigt. Als Grundlage für die Szenarienentwicklung wurden vier unterschiedliche gesellschaftliche Verhaltensweisen genutzt (Brandes, et al., 2021) (Sterchele, et al., 2020): Von einem Beharren auf konventionellen Technologien („Beharrung“) bis hin zu einem breiten gesellschaftlichem Wandel, der auch größere Energieeinsparmaßnahmen ermöglicht („Suffizienz“).

Es zeigte sich, dass alle Szenarien zu einem geringeren Primär- und Endenergiebedarf in allen Sektoren führen, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß (► *Abbildung 1*). Dies kann auf die direkte Elektrifizierung des Endenergieverbrauchs zurückgeführt werden, sowie erhöhte Energieeffizienz und die indirekte Elektrifizierung durch den verstärkten Einsatz von Wasserstoff, E-Fuels und Biomasse. So würde der Anteil der Elektrizität am Endenergiebedarf von 18% im Jahr 2019 auf 40% bis 70% in 2045 ansteigen. Die voranschreitende Elektrifizierung wird den Strombedarf Deutschlands bis 2045 in allen Szenarien somit mehr als verdoppeln. Dafür könnten Wind- und Solarenergie die tragenden Säulen des zukünftigen Energiesystems darstellen mit insgesamt ca. 1300 TWh Primärenergiebereitstellung in 2045 (Brandes, et al., 2021).



DLR

Dr. Nicole Neumann
nicole.neumann@dlr.de

Juan Pablo Rincon Duarte
juan.rinconduarte@dlr.de

Dr. Martina Neises-von Puttkamer
martina.neises@dlr.de

Dr. Thomas Pregger
thomas.pregger@dlr.de

Dirk Krüger
dirk.krueger@dlr.de

DBFZ

Dr. Kathleen Meisel
kathleen.meisel@dbfz.de

Fraunhofer ISE

Dr. Christoph Kost
christoph.kost@ise.fraunhofer.de

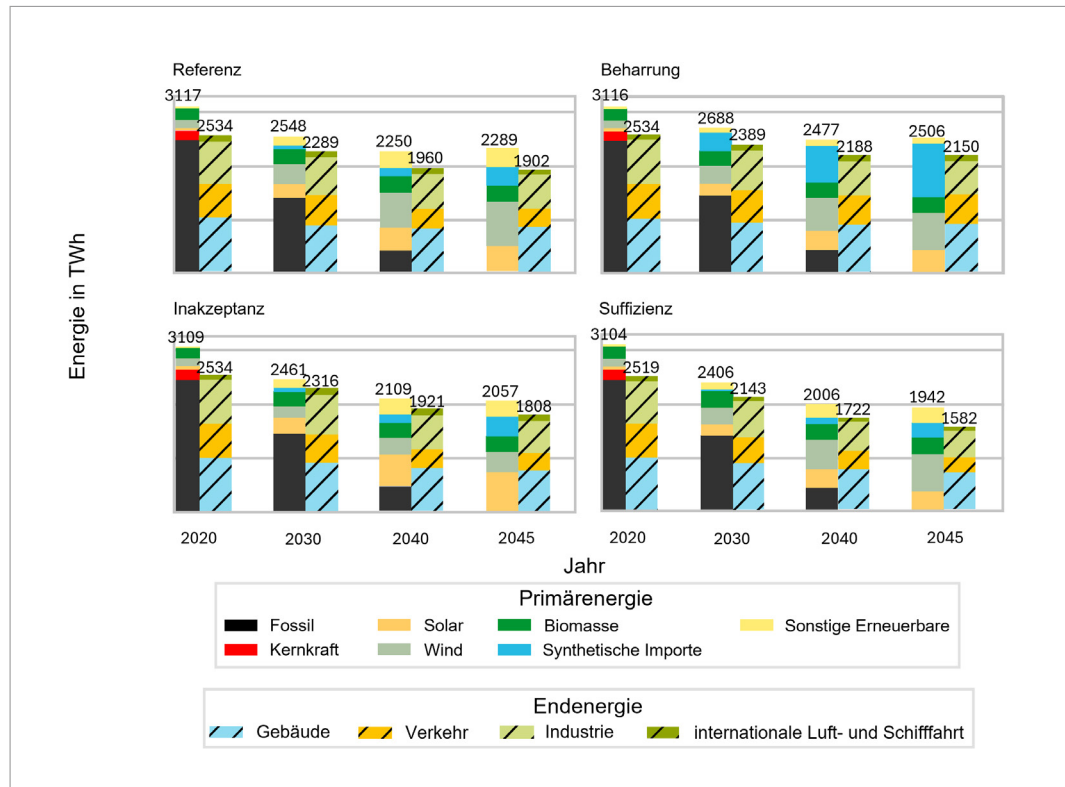
UFZ

Dr. Matthias Jordan
matthias.jordan@ufz.de

► Abbildung 1

Primär- und Endenergiebedarf für vier Szenarien möglicher Transformationspfade zur Klimaneutralität Deutschlands bis 2045

(Quelle: Brandes, et al., 2021)



Um diese Energiesystemtransformation zu bewerkstelligen, muss neben einem starken Ausbau der installierten Leistung an Wind und PV auch das Wasserstoffnetz ausgebaut werden sowie die inländischen und grenzübergreifenden Stromnetzkapazitäten.

Potenziale und Beiträge erneuerbarer Technologien zur Energieeigenversorgung

Eine Potenzialanalyse des Fraunhofer IEE zum Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland zeigt, wie sich das Erreichen eines klimaneutralen Energiesystems auf die installierte Leistung auf regionaler Ebene auswirken könnte. Dafür wurden drei Szenarien definiert, welche auf dem Netzausbauplan für ein klimaneutrales Deutschland 2045 basieren. Hier werden die Ergebnisse für ein Szenario mit hohem Anteil Wasserstoff und für ein Szenario mit intensiver Elektrifizierung dargestellt (Pape & Geiger, 2023).

Windenergie

Zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2045, müsste sich die installierte Nennleistung an Windkraftanlagen an Land von derzeit 56 GW auf etwa 160 GW erhöhen, was einer Verdreifachung der Leistung entspricht.

Insbesondere entlang der Westküste Schleswig-Holsteins, der westfriesischen Nordseeküste und im Paderborner Land gibt es noch signifikante Ausbaupotenziale. Hingegen sind geringere Zuwächse in Regionen wie dem Rhein-Main-Gebiet, dem Ruhrgebiet und dem Nationalpark Harz zu erwarten.

Das Ergebnis liegt auch im Rahmen der Resultate der Fraunhofer ISE-Studie, die in einzelnen Szenarien sogar Werte bis 200 GW installierte Nennleistung Wind an Land beinhalten. Potenzialstudien gehen für Deutschland von einem möglichen Ausbau bis zu 230 GW installierter Leistung für Windkraftanlagen an Land aus (Masurowski, Drechsler, & Frank, 2016). Die im Windenergieflächenbedarfs-gesetz 2023 festgelegten 2% der Bundesfläche für Windkraftanlagen an Land könnten bei einer vergleichbaren Leistungsdichte wie bisher die benötigte Leistung für einen klimaneutralen Energiesystem bereits abdecken.

Allerdings muss sich in den nächsten Jahren die Zubaurate um den Faktor 5 im Vergleich zum Durchschnitt von 2020-2022 drastisch erhöhen. Im Jahr 2023 wird das Ausbaziel voraussichtlich verfehlt, was die Situation weiter verschärft (Windguard).

Photovoltaik

Hier müsste sich nach den Studien von Fraunhofer IEE und Fraunhofer ISE die installierte Leistung

bis 2045, je nach Szenario, fast versiebenfachen auf ca. 400 GW.

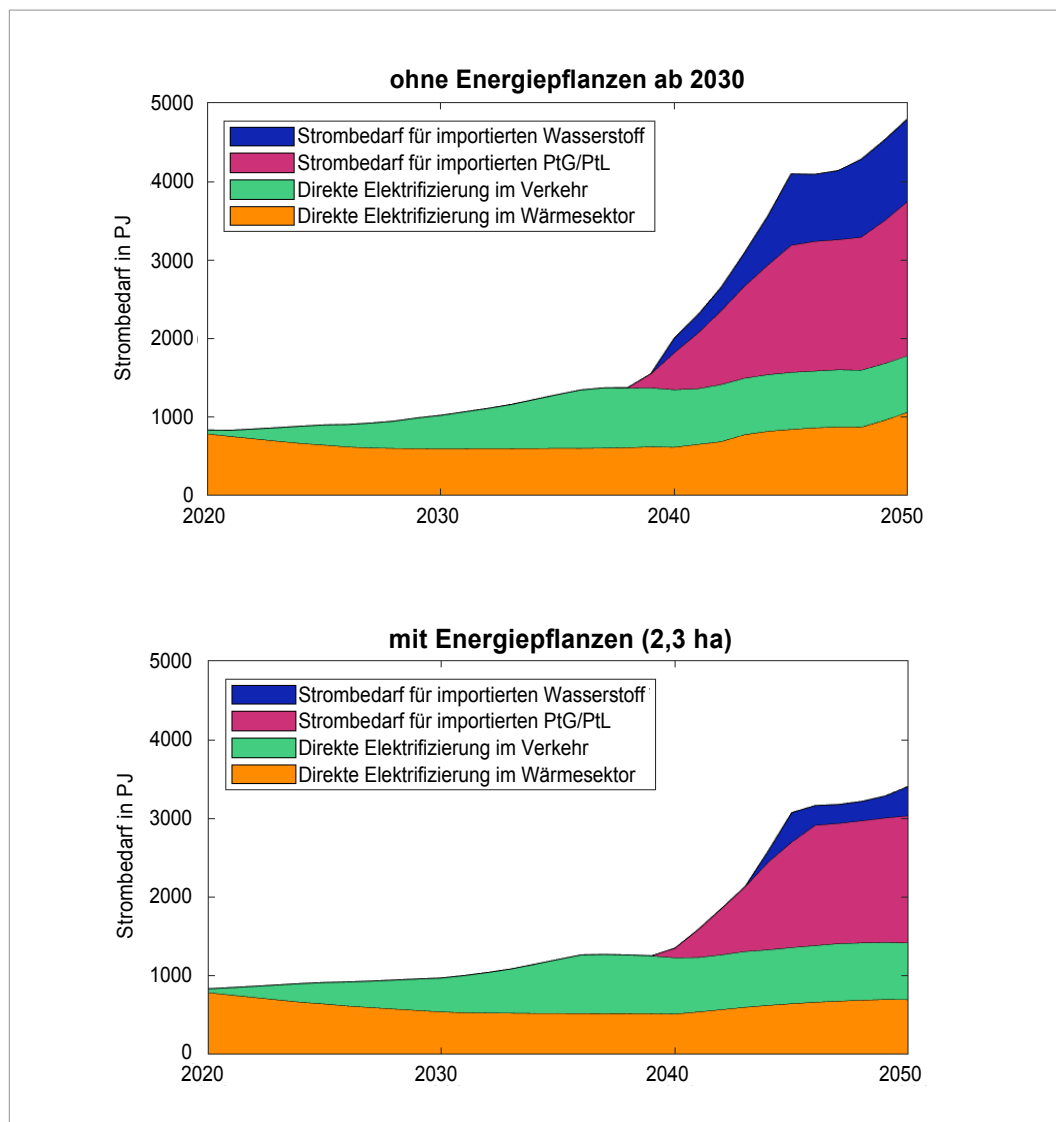
Das höchste Potenzial wird bei Aufdach-PV gesehen, insbesondere in den Metropolregionen. Freiflächen-PV kann mit Flächen entlang von Autobahnen und Schienenwegen sowie Agrarflächen mit niedriger Bodenqualität beitragen. Auch hier liegt die benötigte installierte Leistung noch unterhalb des ermittelten Ausbaupotenzials. So ergab eine Studie des KIT (Fath, 2018) ein Potenzial für Freiflächen-PV von 190 GW und Aufdach-PV von 610 GW. Die Herausforderung besteht hier wieder in dem schnelleren Ausbau, im Falle von PV um den Faktor 2 bis 4 im Vergleich zu 2020 mit 4.9 GWp Zubau. (Wirth, et al., 2021).

Energiepflanzen

Die Nutzung von Energiepflanzen kann ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Transformation des Energiesystems leisten. Aktuell werden ca. 6,4% der

Bundesfläche für den Anbau von Energiepflanzen genutzt. Eine langfristige Umverteilung der aktuell genutzten Biomassepotenziale in die schwer zu elektrifizierenden Bereichen des Energiesystems, kann die zukünftige Importabhängigkeit von Power-to-X-Energieträgern (PtX) deutlich verringern. Dies betrifft insbesondere Hochtemperatur-Industrieanwendungen mit einem Wärmebedarf über 500 °C, in denen eine direkte Elektrifizierung nicht oder nur sehr kostenintensiv möglich ist.

Weitere sinnvolle Einsatzgebiete für Biomasse sind der Schiffs- und Flugverkehr sowie die Bereitstellung von Flexibilität im Stromsektor. Die erneuerbare Alternative in diesen Bereichen ist in der Regel der Import von PtX-Energieträgern (Bundesregierung, 2020). Langfristig kann durch den weiteren Einsatz von Energiepflanzen der Strombedarf zur Herstellung von H₂ und PtX, sowie der direkten Elektrifizierung um ~389 TWh reduziert



► Abbildung 2

Vergleich des Strombedarfs ohne bzw. mit die Nutzung von Energiepflanzen

für die direkte Elektrifizierung im Strom- und Wärmesektor sowie für die Produktion von importiertem H₂ und PtX

(Quelle: Jordan, et al., 2023)

(► *Abbildung 2*) und damit die Importabhängigkeit und die Kosten der Energiewende deutlich verringert werden (Jordan, et al., 2023). Da ein Verzicht auf Energiepflanzen auch mit vielen positiven Effekten verbunden ist, wie z.B. der Reduktion des Flächendrucks in Deutschland, sollte diese Entscheidung sorgfältig abgewogen werden.

Solarthermie

Bei konzentrierender Solartechnik bietet sich eine Kopplung mit kostengünstigen thermischen Energiespeichern an, wodurch hohe Deckungsgrade erreicht werden können. Vielversprechende Anwendungsgebiete umfassen insbesondere die Wärmeversorgung der Industrie oft zwischen 100 und 200 °C, aber auch bis ca. 350 °C, z.B. für Chemiebranche, Lebensmittelbranche und Textilindustrie.

Insbesondere Parabolrinnenkollektoren können in großen Anlagen unter deutschen Wetterbedingungen ab ca. 5 MW niedrigere Wärmegestehungskosten als die Verbindung aus PV und Elektroheizern erreichen mit ca. 4 cent/kWh statt ca. 6 cent/kWh (Krüger, Inigo Labairu, Dersch, Hirsch, & Stengler, 2021) und benötigen erheblich weniger Fläche zur Aufstellung als PV. Daher hat diese Technologie ein hohes Potenzial zur Dekarbonisierung des Wärmesystems. In Nachbarländern mit ähnlichen solaren Bedingungen wurden kürzlich Anlagen im Pilotmaßstab erfolgreich getestet, z.B. die Versorgung eines Chemiewerks mit 2,5 MW und 280°C (Krüger, Inigo Labairu, Dersch, Hirsch, & Stengler, 2021), sodass auch für den Standort Deutschland eine zeitnahe Einführung in industriellem Maßstab zu erwarten ist.

Fazit

Deutschland hat also das Potenzial die benötigte installierte Leistung an PV und Windkraftanlagen für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2045 zu verwirklichen. Dafür müssen die Zubauraten drastisch und schnellstmöglich erhöht werden, um das Ausbauziel fristgerecht zu erreichen. Auch Biomasse, Solarthermie oder Geothermie können insbesondere bei der Wärmebereitstellung einen wichtigen Beitrag leisten und damit auch den steigenden Strombedarf Deutschlands abmildern.

Deutschlands zukünftiger Bedarf an Energieimporten

Die Abhängigkeit Deutschlands von Energieimporten hat im Jahr 2022 verstärkt Aufmerksamkeit erhalten, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Transformation unseres Energiesystems hin zu einem klimaneutralen Deutschland.

Je nach gesellschaftlicher und politischer Verhaltensweise können sich unterschiedliche Transformationspfade mit abweichendem Importbedarf ergeben (Brandes, et al., 2021) (Sterchele, et al., 2020). Die benötigte Importmenge an Wasserstoff und dessen Derivaten (PtX) hängt entscheidend von den zu erwartenden Effizienzsteigerungen, dem Elektrifizierungsgrad und dem totalen Endenergiebedarf ab (Brandes, et al., 2021) (Jordan, et al., 2023), aber auch von der Technologie- und Energieträgerwahl wie Biomasse, Solarthermie oder Geothermie für schwer zu elektrifizierende Bereiche (Jordan, et al., 2023) (Krüger, Inigo Labairu, Dersch, Hirsch & Stengler, 2021).

Ein Festhalten an konventionellen Technologien würde zu einem erheblichen Bedarf an PtX von ca. 20% im Szenario „Beharrung“ für das Jahr 2045 führen. Dazu kommt noch inländisch produzierter Wasserstoff, so dass der Wasserstoffanteil am Primärenergiebedarf auf ca. 29% stiege.

Dagegen würden eine Anpassung der Verbrauchsgewohnheiten und die Umsetzung von Suffizienz-Szenarien den Importbedarf erheblich reduzieren. Trotzdem bleibt selbst in einem Suffizienz-Szenario ein gewisser Bedarf an Energieimporten bestehen, wenn auch in geringerem Umfang von ca. 3% im Jahr 2045.

Dies verdeutlicht die Bedeutung des Aufbaus von Infrastruktur und Produktionskapazitäten für Wasserstoff und dessen Derivate. Besonders im Schiffs- und Luftverkehr, der Stahlindustrie und im Chemiebereich werden diese Energieträger eine wichtige Rolle spielen, sodass der Aufbau und Ausbau einer innerdeutschen Wasserstoff-erzeugungs- und Verteilungsstruktur unverzichtbar sind. Ebenso ist die innerdeutsche Produktion von synthetischen Kraftstoffen aus systemischer Sicht sinnvoll, trotz geringerer Volllaststunden. Dies könnte eine wichtige Ergänzung zu anderen nachhaltigen Energiequellen sein (Brandes, et al., 2021) (Sterchele, et al., 2020).

Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Deutschland die Klimaneutralität bis 2045 aus technologischer und systemischer Sicht erreichen kann. Wind und Photovoltaik werden die wichtigsten Primärenergiequellen sein und somit stark zur Reduzierung der Importabhängigkeit beitragen, vorausgesetzt, die Zubauraten steigen drastisch. Energielieferanten wie Energiepflanzen und konzentrierte Solarthermie können den Umbau des

Wärmesektors unterstützen. Der Bedarf an Energieimporten hängt jedoch von den politischen Rahmenbedingungen und dereingesetzten Technologie ab.

Ein klimaneutrales Energiesystem kann insgesamt zu einer geringeren Importabhängigkeit führen als das aktuelle System. Um allerdings ein resilienteres Energiesystem zu schaffen, sollte Deutschland auf eine diverse Importstruktur von Energieträgern und Importländern setzen. Dies ist auch im Hinblick auf geopolitische Entwicklungen in den exportierenden Ländern von großer Bedeutung. Mögliche Kandidaten für zukünftige exportierende Länder könnten z.B. Spanien, die Ukraine, Brasilien, Australien und Algerien sein (Hank, et al., 2023).

Literatur

- AGEE-Stat. (15. 11 2023). Von Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick> abgerufen
- Brandes, J., Haun, M., Wrede, D., Jürgens, P., Kost, C., & Henning, H.-M. (2021). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen - Update November 2021: Klimaneutralität 2045. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Bundesregierung. (06 2020). Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Fath, K. (2018). Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Hank, C., Holst, M., Thelen, C., Kost, C., Längle, S., Schaadt, A., & Smolinka, T. (2023). Site-specific, comparative analysis for suitable Power-to-X pathways and products in developing and emerging countries. Freiburg: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE.
- Jordan, M., Meisel, K., Dotzauer, M., Schröder, J., Cyffka, K.-F., Dögnitz, N., Schmid, C., Lenz, V., Naumann, K., Daniel-Gromke, J., Costa de Paiva, G., Schindler, H., Esmaili Aliabadi, D., Szarka, N., Thrän, D. (2023): The controversial role of energy crops in the future German energy system: The trade offs of a phase-out and allocation priorities of the remaining biomass residues Energy Rep. 10 , 3848 - 3858 10.1016/j.egy.2023.10.055
- Krüger, D. R., Inigo Labairu, J., Dersch, J., Hirsch, T., & Stengler, J. (17. 06 2021). Concentrating collectors for Central Europe. Konferenzbeitrag, 24tes Kölner Sonnenkolloquium. Köln, Deutschland: <https://elib.dlr.de/145703/>.
- Krüger, D., Leicht, J., Fahr, S., Epp, B., Krüger, J., Bonleitner, S., . . . Stengler, J. (2022). Standardized Balance of Plant Engineering for Solar Process Heat. 28th SolarPACES Conference.
- Masurowski, F., Drechsler, M., & Frank, K. (10 2016). A spatially explicit assessment of the wind energy potential in response to an increased distance between wind turbines and settlements in Germany. Energy Policy, S. 343-350.
- Pape, C., & Geiger, D. (2023). Regionalisierung des Ausbaus der Erneuerbaren Energien. Kassel: Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE.
- Sterchele, P., Brandes, J., Heilig, J., Wrede, D., Kost, C., Schlegl, T., . . . Henning, H.-M. (2020). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE.
- Weltenergieat - Deutschland e.V. (2022). Energie für Deutschland - Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext. Berlin: Weltenergieat - Deutschland e.V.
- Windguard. (kein Datum). Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland - Jahr 2022. Varel: Deutsche WindGuard GmbH.
- Wirth, H., Kost, C., Kramer, K., Neuhaus, H., Peper, D., Rentsch, J., & Senkpiel, C. (2021). Solaroffensive für Deutschland - Wie wir mit Sonnenenergie einen Wirtschaftsboom entfesseln und das Klima schützen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

Grüner Wasserstoff und andere regenerative Energierohstoffe im globalen Energiesystem



FZ Jülich

Dr. Heidi Heinrichs
h.heinrichs@fz-juelich.de

Dr. Amin Lahnaoui
a.lahnaoui@fz-juelich.de

DBFZ

Dr. Franziska Müller-Langer
franziska.mueller-langer@dbfz.de

Dr. Marco Klemm
marco.klemm@dbfz.de

DLR

Jürgen Kern
juergen.kern@dlr.de

Fraunhofer IEE

Lukas Jansen
lukas.jansen@iee.fraunhofer.de

Norman Gerhardt
norman.gerhardt@iee.fraunhofer.de

ISFH

Florian Peterssen
f.peterssen@isfh.de

IZES

Eva Hauser
hauser@izes.de

Henrik Mantke
mantke@izes.de

KIT

Prof. Dr. Daniel Banuti
daniel.banuti@kit.edu

Dr. Christine Rösch
christine.roesch@kit.edu

Wuppertal Institut

Fabio Schojan
fabio.schojan@wupperinst.org

1. Motivation

Grüner Wasserstoff (H₂) ist gemäß Transformations-szenarien für das deutsche Energiesystem eine Säule der Treibhausgasneutralität (Stolten et al. 2021). Dabei ermöglicht der Import von grünem Wasserstoff oder anderen regenerativen Energierohstoffen vorteilhafte Bedingungen für erneuerbare Energien in anderen Ländern (bspw. bessere Wetterbedingungen und eine höhere Landverfügbarkeit) für uns nutzbar zu machen. Wie dies erfolgen könnte und was es dabei zu beachten gilt, wird in diesem Beitrag anhand von Forschungsergebnissen aus verschiedenen Projekten umrissen.

2. Aktuelle Forschungsergebnisse

Im Folgenden wird zunächst auf Beispiele von Wasserstoffproduktions- und Transportrouten neben den hauptsächlich betrachteten Routen via Wasserelektrolyse und Fischer-Tropsch Synthese eingegangen. Daran schließt sich eine Betrachtung möglicher Wasserstoff-Exportländer und relevanter Aspekte im potenziellen Importland Deutschland an

2.1 Wasserstoffproduktions- und Transportrouten

2.1.1 Nachhaltige, resiliente Wasser- und Landnutzung der Wasserstoffproduktion

Befragungsergebnisse (z.B. Konrad et al. 2021) zeigen, dass die Gesellschaft dem Thema Wasserstoff positiv und offen gegenübersteht. Jedoch sind Akzeptanzprobleme in Teilbereichen möglich, insbesondere bei der nachhaltigen und resilienten Nutzung begrenzter Wasser- und Landressourcen. Dabei gibt es große regionale Unterschiede. Einige der techno-ökonomisch guten Standorte liegen in wasserarmen Gebieten mit teilweise prekärer Wasserversorgung oder sinkenden Grundwasser- und Oberflächenwasservorkommen. Der Wassernachschub durch Niederschläge ist aufgrund des Klimawandels zunehmend volatil.

Wenn eine internationale Verständigung auf verbindliche ökologische und soziale Kriterien in einem Zertifizierungssystem gelingt, ist ein Ausbau resilienter Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff möglich, ohne knappe lokale Wasser- und Landressourcen zu gefährden und Nutzungskonflikte zu verstärken (acatech, DECHEMA 2022).

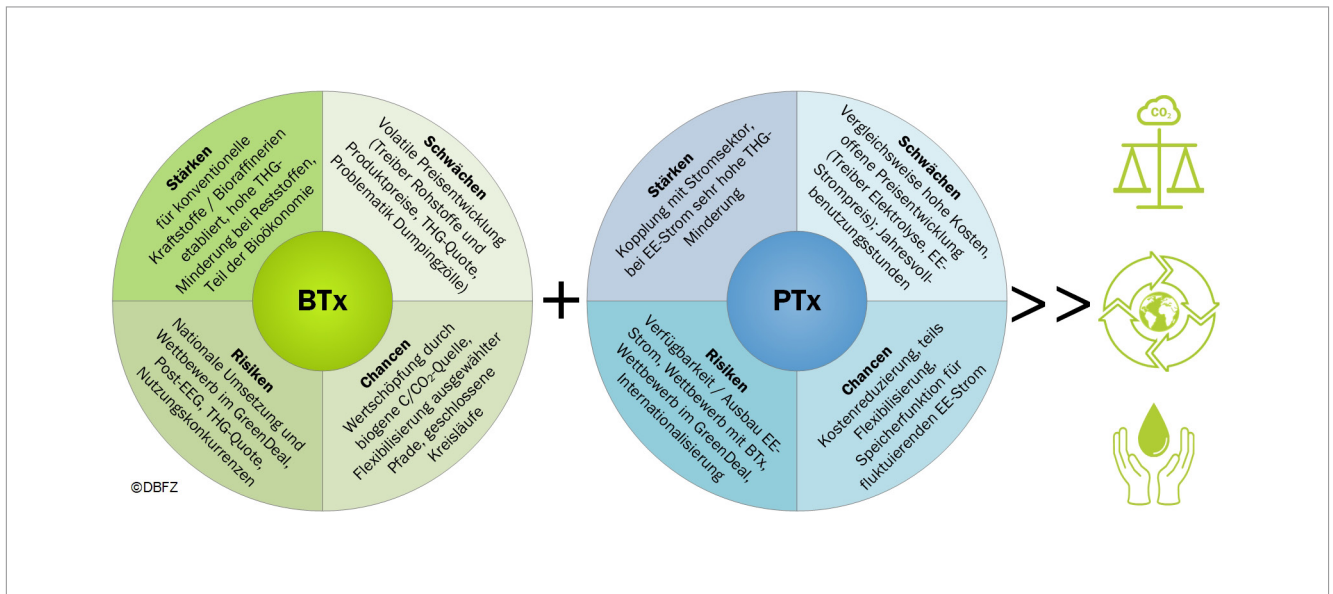
2.1.2 Synergien von biomasse- und strombasierten Technologien

Durch geschickte Kombination von biomasse- und strombasierten Technologien können Synergien für die Treibhausgasneutralität, die Kreislaufwirtschaft und den Ressourcenschutz erreicht werden, wie an einer vereinfachten SWOT ablesbar ist (► *Abbildung 1*).

So ermöglicht die Nutzung von biogenem Kohlenstoff gute Treibhausgasbilanzen bei geringem Aufwand. Prozesse wie die Biomassevergasung können als Zwischenprodukt CO liefern, welches aufgrund seiner Reaktivität Prozesse ermöglicht, die mit CO₂ nicht möglich sind oder eine Reverse-Shift-Reaktion erfordern. Ein Beispiel für den SynBioPtX-Ansatz ist die katalytische Methanisierung mit Wasserstoff unter Nutzung des CO₂ im Biogas im Vorhaben Pilot-SBG mit dem Ziel einer maximalen Nutzung von Kohlenstoff aus biogenen Rest- und Abfallstoffen für Bio-LNG als Kraftstoff.

2.1.3 Pyrolyse kombiniert mit CO₂-Abscheidung und LH₂-Transport

Bei der Pyrolyse von Biomasse im Flüssigmetallreaktor mit Carbon-Capture werden sogar negative CO₂-Emissionen erreicht, wenn Kohlenwasserstoffe in gasförmigen Wasserstoff und festes Kohlenstoffpulver (Carbon Black) gespalten werden. Der zuvor aus der Atmosphäre gebundene Kohlenstoff kann dann sequestriert oder als Rohstoff in die Industrie gebracht werden („Teal Hydrogen“ / „grün-blauer Wasserstoff“), was im Rahmen der Projekte „NECO₂C“ und „Solar Hydrogen“ erforscht wird.



Für den Transport ist verflüssigter kryogener Wasserstoff (LH₂, liquid hydrogen) eine attraktive Möglichkeit, da dessen Dichte die des gasförmigen komprimierten Wasserstoffs deutlich übersteigt, ohne dabei Drucktanks zu benötigen. In den europäischen Projekten PRESLHY und ELVHYS werden hier die technischen und insbesondere sicherheitstechnischen Grundlagen erforscht, die LH₂ als Breitentechnologie ermöglichen soll.

2.2 Potenzielle Wasserstoffexportländer

2.2.1 Chile

Die globale Flächenidentifizierung und Anlagenauslegung an repräsentativen Inselform-Standorten für den globalen PtX-Atlas hat ein kosteneffizientes und nachhaltiges PtX-Erzeugungspotenzial von 2062 TWh Fischer-Tropsch Kraftstoff in Chile ergeben (Pfennig et al., 2023). Da diese Analysen keine heimischen Bedarfe und keine Restriktionen im Markthochlauf berücksichtigten, hat das Fraunhofer IEE diese Aspekte mithilfe einer länderspezifischen, modellbasierten Szenarienanalyse betrachtet. Das Ergebnis der sektorenübergreifenden Energiesystemanalyse ist, dass sich das flächenbasierte Exportpotenzial von 2062 TWh je nach Sensitivität um 74-97% reduziert.

2.2.2 ECOWAS in Westafrika

Die Machbarkeit einer grünen Wasserstoffindustrie in der ECOWAS-Region wurde mittels zusammengesetzter Indikatoren (grüne H₂-Produktion (HP), grüner H₂-Export (HE), Rahmenbedingungen der Energieversorgung (ER) und Energiepolitik (EP)) untersucht (► *Abbildung 2b*).

Ghana sticht mit den höchsten Punktzahlen hervor,

während Togo zeigt, dass ER und EP nicht korrelieren müssen. Niger und Mali haben die höchsten HP-Punkte und die Länder am Golf von Guinea für den Export (HE). Dies zeigt, wie wichtig die Kooperation zwischen (benachbarten) Ländern für eine Exportwirtschaft für grünen Wasserstoff sein kann (hohe HP und hohe HE in (► *Abbildung 2a*)). Vorteilhaft politische Rahmenbedingungen für H₂ (hohe ER & EP in ► *Abbildung 2a*) könnten dabei auf benachbarte Handelspartner übergreifen.

2.2.3 MENA Region

Die MENAfuels Studie untersuchte die Rolle des Nahen Ostens und Nordafrikas bei der Versorgung Deutschlands und Europas mit Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Ressourcen. Hierzu wurden erstmals regional hochaufgelöste Daten zu technischen Potenzialen, Produktionskosten und Investitionsumfeldern vereint. Die MENA-Region hat mit insgesamt mehr als 400 PWh/a sehr große Erzeugungspotenziale an erneuerbaren Energien vor allem an Solarenergie, die den deutschen Bedarf an synthetischen Kraftstoffen um das 60- bis 1.200-fache übersteigen können.

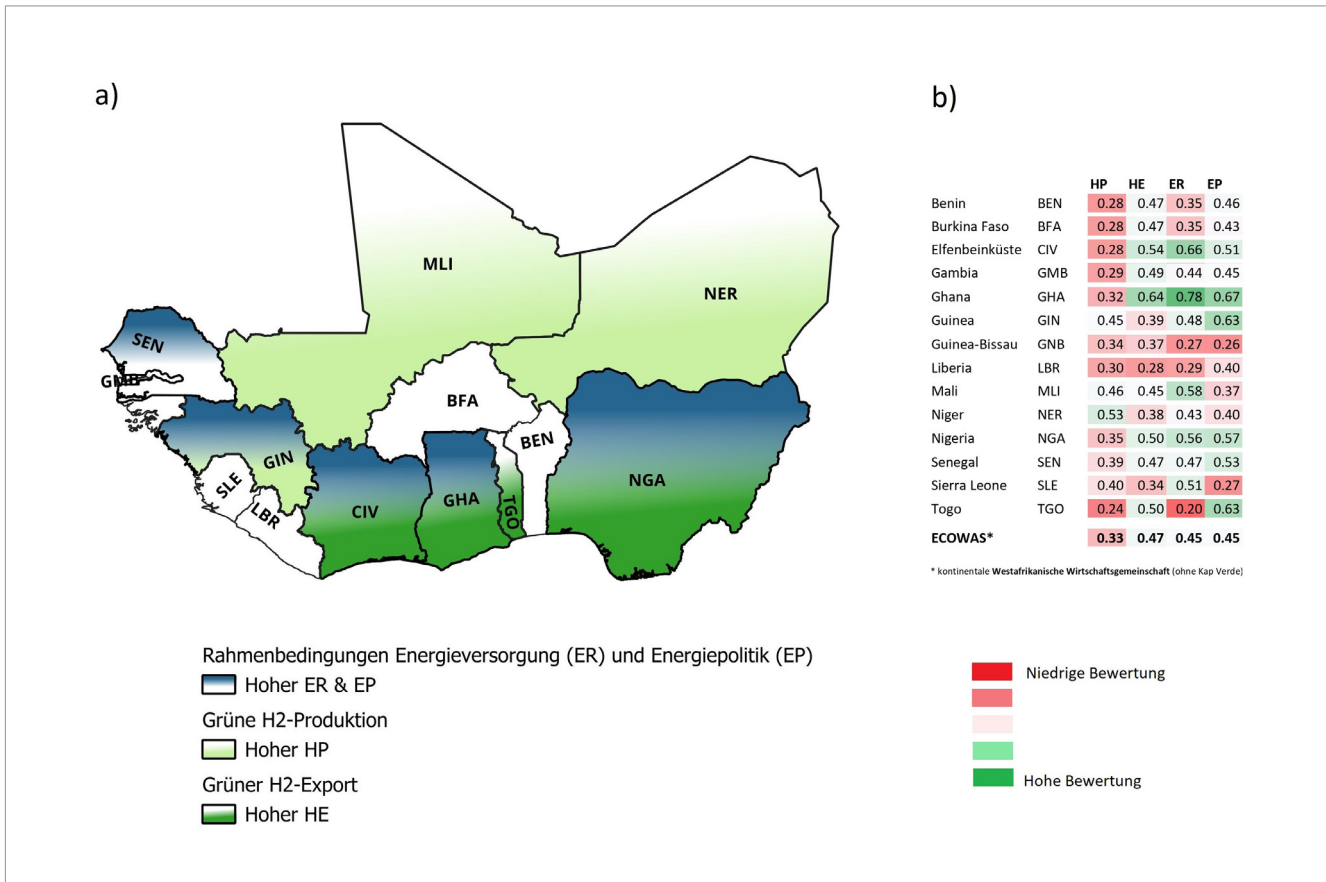
Während die Risiken der MENA-Länder insgesamt erheblich variieren, gelten Länder wie Saudi-Arabien, Oman und Marokko aufgrund niedriger Risikobewertungen in Politik, Ökonomie und Technologie als vielversprechende Exportpartner (Viebahn et al. 2022). Deswegen ist eine umfassende Analyse von Chancen und Risiken in den Exportländern erforderlich. Erfahrungen aus vergangenen Energiepartnerschaften, wie im Öl- und Gassektor, weisen auf mögliche innen- und außenpolitische Risiken hin. Dazu gehören Verteilungskonflikte, ungleiche

► *Abbildung 1*

Vereinfachte SWOT-Analyse für das Zusammenwirken von BtX (biomassebasierten) und PtX (strombasierten) Technologien

SWOT= Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken)

(Quelle: DBFZ)



► *Abbildung 2*

a)
Hauptschwerpunkt-
länder in ECOWAS

b)
Zusammenfassung
der Ergebnisse für
die verschiedenen
zusammengesetzten
Indikatoren
(HP, HE, ER, EP)

(Quelle: FZ Jülich)

Exportverteilung, politische Instabilität, ethnische Konflikte und Sicherheitsbedenken in den Ländern und den Lieferketten. Weitere Herausforderungen sind nicht nachhaltige Produktion, Abhängigkeit von Autokratien und institutionelle Hürden. Diese Risiken müssen berücksichtigt werden, um ein widerstandsfähiges Energiesystem zu gewährleisten.

2.2.4 Globale Verteilung von Wasserstoffexportländern

Potenzielle Wasserstoffexportländer sind nicht regional begrenzt. Im Projekt ETSAP-DE wurden die Kostenpotenziale für den Export von Flüssigwasserstoff für 28 Länder weltweit räumlich und zeitlich hochaufgelöst untersucht, inklusive der kompletten Wasserstoff-Infrastrukturkette bis zum Exporthafen (Franzmann et al. 2023). Das Gesamtpotenzial von rd. 1540 PWh/a im Jahr 2050 übersteigt das 8-fache des globalen Primärenergieverbrauchs in 2020 (Energy Institute 2023).

Dabei lassen sich die betrachteten Länder in drei Gruppen unterteilen (► *Abbildung 3*):

1. Länder mit günstigen, stabilen, sehr großen und PV-dominierten H₂-Potenzialen
2. Länder mit mittleren bis eher teuren, großen Potenzialen mit starkem Kostenanstieg bei höherer

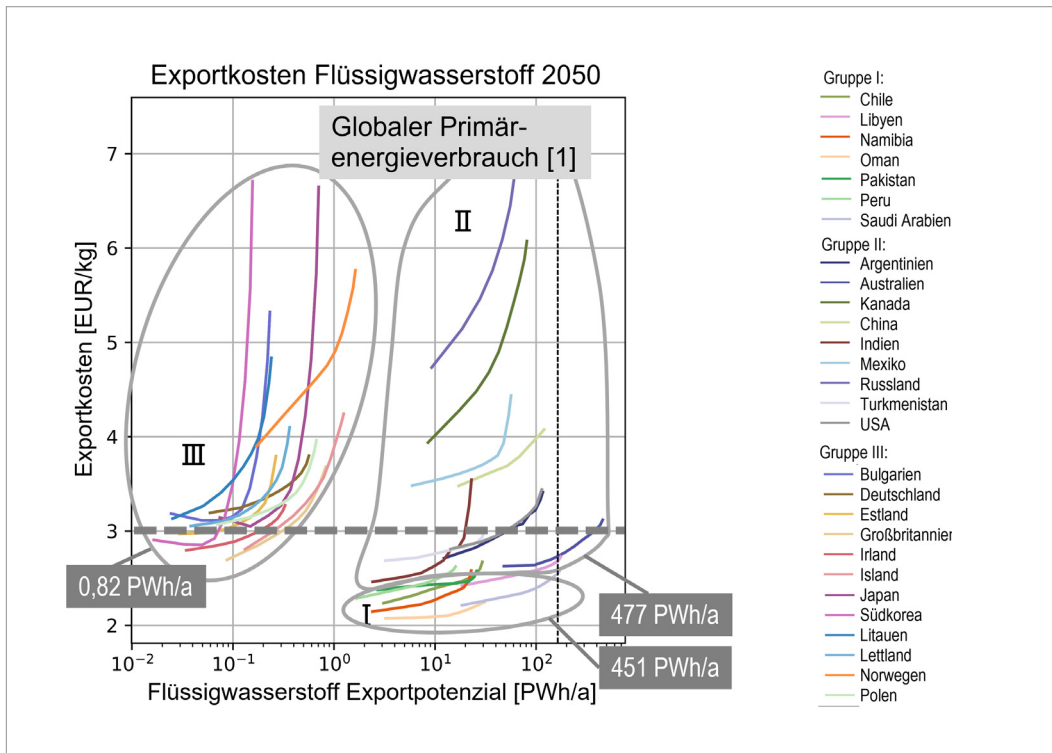
Potenzialausnutzung bedingt durch Windenergie 3. kleinere Länder mit Potenzialen <1 PWh/a mit erkennbaren Skalierungseffekten und insgesamt starken Kostenanstiegen bei steigender Potenzialnutzung.

Alle Ländergruppen weisen für das Jahr 2050 Potenziale unter 3 /kgH₂ für Flüssigwasserstoff im Exporthafen auf (► *Abbildung 3*).

2.3 Deutschland als Importland

2.3.1 Einfluss von Wasserstoffimporten

Da es für Wind- und Bioenergie aufgrund verschiedener Randbedingungen klare Begrenzungen gibt, verbleiben vor allem Photovoltaik und der Import grüner Energieträger für ein treibhausgasneutrales Energiesystem. Mit einem Energiesystemmodell untersucht das ISFH, wie abhängig das deutsche Energiesystem vom Importangebot grüner Energieträger bei unterschiedlichen Photovoltaik-Ausbauleistungen ist. Es zeigt sich, dass 500 GW Photovoltaik no-regret sind, wenn die verfügbare Importmenge von billigem Wasserstoff nicht höher als 500 TWh liegt (► *Abbildung 4*).



► *Abbildung 3*

Kostenpotenziale für Flüssigwasserstoff im Exporthafen

(Quelle: Franzmann et al. 2023)

2.3.2 Priorisierung der Wasserstoffnutzung

Im Rahmen des Projektes BeniVer wurde durch eine Analyse von angekündigten Wasserstoffproduktionsmengen bis 2030 festgestellt, dass grüner Wasserstoff zunächst ein knappes Gut bleiben wird, was eine Priorisierung der Nutzung erfordert. Dafür bietet sich die kriterielle Bewertung der ökologisch-systemischen Sinnhaftigkeit an, welche im Projekt BeniVer für Marktmechanismen im Verkehrssektor erarbeitet wurde. Hierbei werden für jeden Technologiepfad dessen Alternativen mit ihren technologischen Reifegraden und dem jeweiligen Ressourcenverbrauch verglichen. Technologiepfade mit schlechten Alternativen und geringem Ressourcenverbrauch sind zu bevorzugen, was auf synthetische Kraftstoffe in der Schiff- und Luftfahrt, nicht aber auf den bodengebundenen Verkehr

zutrifft. Eine solche Analyse kann auf weitere Sektoren ausgeweitet werden, um Lock-in Effekte zu vermeiden.

3. Fazit und Ausblick

Über die Forschungsprojekte hinweg zeigt sich, dass grüner Wasserstoff und andere regenerative Energierohstoffe zur Erreichung des Ziels der Treibhausgasneutralität bis 2045 erforderlich sind. Die globalen Wasserstoffpotenziale sind weltweit stark verteilt und sehr groß und ein starkes Kostensenkungspotenzial bis 2050 wird angenommen.

Die Produktions- und Transportrouten sind vielfältig, so dass je nach Situation die beste Option gewählt werden kann. Bei der Auswahl der Exportländer muss

Verfügbarer teurer H ₂ -Import (5 €/kg)	Verfügbarer billiger H ₂ -Import (3 €/kg)	Inst. Photovoltaik Leistung	Inst. Wind Onshore Leistung	Inst. Wind Offshore Leistung	Verfügbare Biomasse
unbegrenzt	wird variiert	wird variiert	210 GW ¹⁾ (§3 Abs. 1 WindBG)	70 GW (§1 Abs. 2 WindSeeG)	362 TWh (Ruiz et al. 2019)

¹⁾ Annahme: 29,4 MW/km²

► *Abbildung 4*

Spanne der Energiesystemkosten in Abhängigkeit von der installierten Photovoltaikleistung bei unterschiedlichen Importpotenzialen für billigen Wasserstoff

(Quelle: ISFH)

darauf geachtet werden, dass die lokale Energienachfrage zuerst gedeckt wird und für jede Exportregion eine Chancen-Risiko-Analyse erfolgt, um nachhaltig sichere Energiepartnerschaften zu ermöglichen.

Einschränkungen oder Verzögerungen im nationalen Ausbau erneuerbarer Energien erhöhen die Abhängigkeit Deutschlands von Wasserstoffimporten, erschweren den geplanten Markthochlauf für Wasserstoff und können eine Priorisierung des Einsatzes in schwer zu dekarbonisierenden Sektoren erforderlich machen.

Offene Fragen in diesem Kontext betreffen den Einfluss von Importen von Wasserstoff und -derivaten auf die Entwicklung der deutschen Wertschöpfung (Stichwort: Standortverlagerungen), die resiliente Ausgestaltung von Handelsbeziehungen mit ausreichender Diversifizierung sowie Engpässe und Wechselwirkungen mit der maritimen Infrastruktur und die Gestaltung einer nachhaltigen und resilienten Wasserstoffproduktion ohne Wasser- und Landnutzungskonflikten im Rahmen eines globalen Zertifizierungssystems.

4. Danksagung

Ein Teil dieser Arbeit wurde im Rahmen folgender Projekte durchgeführt: ETSAP-DE (03EI1032B) gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), H2-Wegweiser Niedersachsen (VWZN3770) gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur, BEniVer (03EIV116B) gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

5. Literatur

- acatech, DECHEMA (Hrsg.): Auf dem Weg in die deutsche Wasserstoffwirtschaft: Resultate der Stakeholder*innen -Befragung, Berlin 2022. DOI: https://doi.org/10.48669/h2k_2022-1
- Konrad, W., Kuhn, R., Wist, S.-K., und Witzel, B. (2021). Einstellungen in Deutschland zu Wasserstofftechnologien: Ergebnisse von Repräsentativbefragungen in der Übersicht. Stuttgart: DIALOGIK gemeinnützige Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH. Zugriff am 13.01.2022. <https://www.dialogik-expert.de/sites/default/files/downloads/de/arbeitsbericht-wasserstoff-umfragen.pdf>
- Mills, R. (2020). A Fine Balance: The Geopolitics of the Global Energy Transition in MENA. In: Hafner, M., Tagliapietra, S. (eds) The Geopolitics of the Global Energy Transition. Lecture Notes in Energy, vol 73. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39066-2_6
- Viebahn, P. et al. (2022). Synthese und Handlungsoptionen – Ergebnisbericht des Projekts MENA-Fuels. Teilbericht 14 des Wuppertal Instituts, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Instituts für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Wuppertal, Stuttgart, Köln, Saarbrücken.
- Ruiz, P. et al. (2019): ENSPRESO - an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials. Energy Strategy Reviews 26, 100379. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100379>.
- Stolten, D. et al. (2021). Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045.
- Franzmann, D. et al. (2023) Green hydrogen cost-potentials for global trade, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.012>.
- Energy Institute (2023) Statistical Review of World Energy, <https://www.energyinst.org/statistical-review>.
- EC (2022): Hydrogen. European Commission (EC). Online verfügbar unter https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en, zuletzt geprüft am 08.11.2023.
- IEA (2022): Global hydrogen demand by production technology in the Net Zero Scenario, 2020-2030. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-production-technology-in-the-net-zero-scenario-2020-2030>, zuletzt geprüft am 08.11. 2023.
- IEA (2023): International Energy Agency: Global Hydrogen Review 2023. Paris.
- Müller-Langer, F. (2022) SynBioPTx-Ansätze | Wettbewerber oder Teamplayer? in: DBFZ (Hrsg.) DBFZ Tagungsreader, Nr. 24 SynBioPTx – Synergien biomasse- und strombasierter Technologien. Workshop im Rahmen der ProcessNet Energieverfahrenstechnik. DOI: 10.48480/xqvx-q424.
- M. Pfennig et al. (2023) Global GIS-based potential analysis and cost assessment of Power-to-X fuels in 2050, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121289.

Closing the gap between sustainable aviation fuels and fossil aviation fuels

1. Introduction

Sustainable aviation fuels (SAFs) are synthetic liquid fuels for commercial aviation that are produced from a variety of feedstocks of non-fossil origin and thus can potentially reduce emissions significantly. SAFs significantly reduce emissions of CO₂, NO_x and particulate matter that form condensation trails (contrails) and thus, reduce the degree of effective radiative forcing by anthropogenic gases and aerosols compared to fossil-aviation fuels/jet fuels.

Non-fossil sources of the feedstocks include carbon dioxide captured from air or point sources, hydrogen from electrolysis of water and/or gasification of biomass or other solid wastes. SAFs that use hydrogen from electrolysis, powered by electricity or heat from renewable energy sources, are currently the only means to de-carbonise aviation which needs fuels with a high energy density.

Though the current contribution of SAFs is rather low (0.1 % on a global scale, [1]), this value is projected to rise due to ambitious targets set on national and global levels. For example, the Renewable Energy Directive (RED III) sets the EU's binding renewable target for 2030 to a minimum of 42.5% aiming for 45% to support the drive to decarbonise its economy [2]. Specifically, the Green Deal stipulates that by 2030, 29% of the energy mix for transport must be produced from renewable energy to reduce greenhouse gas emissions in the sector including aviation by 14.5% reduction. Thus, the EU aims for an increased share of SAFs from 1.2% in 2030 to 35% in 2050. Also, the ReFuelEU regulation sets blending targets for SAFs to increase from 2% in 2025 (about 0.8 million tonnes) to 70% in 2050 (about 40 million tonnes) [3].

Since future SAF supplies will depend on renewable energies, which are intermittent, there is a challenge of always fulfilling the demand reliably. The increasing dependence of air transport on SAFs thus raises a question of how resilient the SAF supply is. Resilience of SAFs is important to minimise negative economical and operational impacts on aviation resulting from catastrophic events, especially when

the use of fossil aviation fuels is reduced. We discuss here the resilience of SAFs in comparison to fossil aviation fuels used for aviation. A comprehensive overview of SAFs can be found elsewhere [4].

2. Standards for defining SAFs

The Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), among other organisations, defines criteria that allow classification of a synthetic fuel as sustainable aviation fuel [5]:

1. The fuel should achieve net greenhouse gas emission reductions of at least 10% compared to the baseline life cycle emissions values for aviation fuel.
2. The fuel should not be derived from biomass obtained from land with high carbon stock, nor from land converted after 1 January 2008 from primary forests, wetlands, or peat lands. If land use conversion occurred after 1 January 2008, the direct land use change emissions thereafter will be used in evaluations if they exceed the default induced land use change value.

The document further outlines how the criteria are evaluated including net GHG emissions reduction on a life cycle basis, contributions to local social and economic development and avoidance of competition with food and water.

Quality specifications govern which synthetic fuels including SAFs may be used in aviation today. These "drop-in" fuels must have almost the same physical and chemical properties as conventional fossil fuels to enable the use of the same supply infrastructure and aeroplane technology.

The "reference" is Aviation Turbine Fuel (JET A or JET A-1) compliant with the American Society for Testing and Materials (ASTM) standard ASTM D1655-22 [6]. Individual synthetic blending components e.g., FT SPK, HEFA SPK, etc. and their blends with Jet A-1, must be compliant to ASTM D7566 [7], which is in turn equivalent to ASTM D1655-22 and Defence Standard 91-091 Issue 16 [8].



HZB

*Dr. Sonya Calnan
sonya.calnan@helmholtz-berlin.de*

DBFZ

*Dr. Franziska Müller-Langer
franziska.mueller-langer@dbfz.de*

FZ Jülich

*Nils Beltermann
n.beltermann@fz-juelich.de*

*Ralf Peters
ra.peters@fz-juelich.de*

*Dr. Remzi Can Samsun
r.c.samsun@fz-juelich.de*

3. Technological pathways for sustainable/synthetic fuels

The term sustainable is used to indicate that the CO₂ which is released from SAFs is captured again either artificially or by plants as feedstocks that are in turn used again for SAF production thus forming a closed carbon cycle. Sustainable aviation fuels can be synthetically produced via carbon captured from the air and hydrogen generated by electrolyzers powered by renewable energy. SAFs of biological origin are only considered sustainable if they do not compete with food crops or cause forest degradation. As observed by the IATA, there will thus likely be a variety of feedstocks and regional supply chains based on local conditions.

► *Figure 1* shows a summary of the technological paths for SAFs currently approved by ASTM [4]. An overview on TRL (technology readiness level) of different renewable fuels (also including SAF) can be seen here [9]. Inclusion on the list is contingent on the fuel being functionally equivalent to and as being compatible with existing infrastructure of fossil aviation fuels.

Lipids conversion uses oil as a feedstock to produce Hydro-processed Esters and Fatty Acid-Synthetic Paraffinic Kerosene (HEFA-SPK). The maximum certified blend ratio is 50%.

Biochemical conversion uses sugar, starch, and wood as feedstock to produce Alcohol to Jet-Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK) and Hydro-processed Fermented Sugars to Synthetic Iso-paraffins(HFS-SIP). The maximum certified

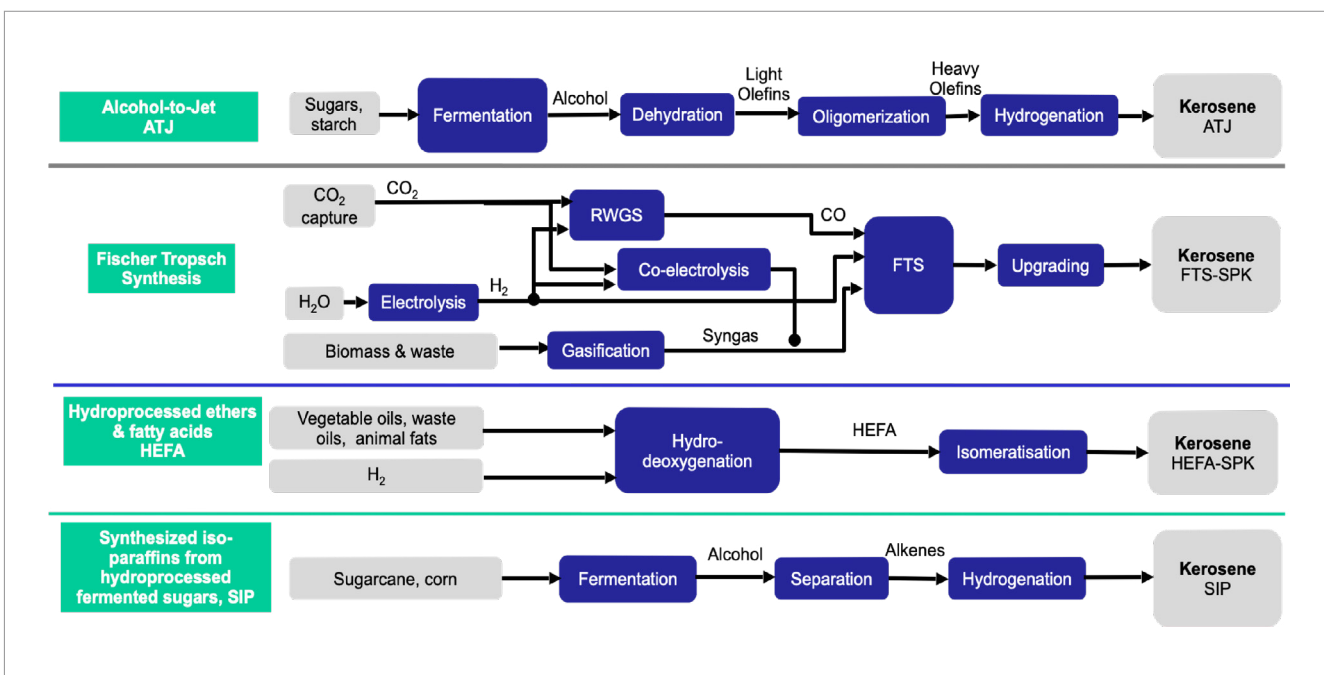
blend ratio of (ATJ-SPK) is 30% while that of HFS-SIP is 10%.

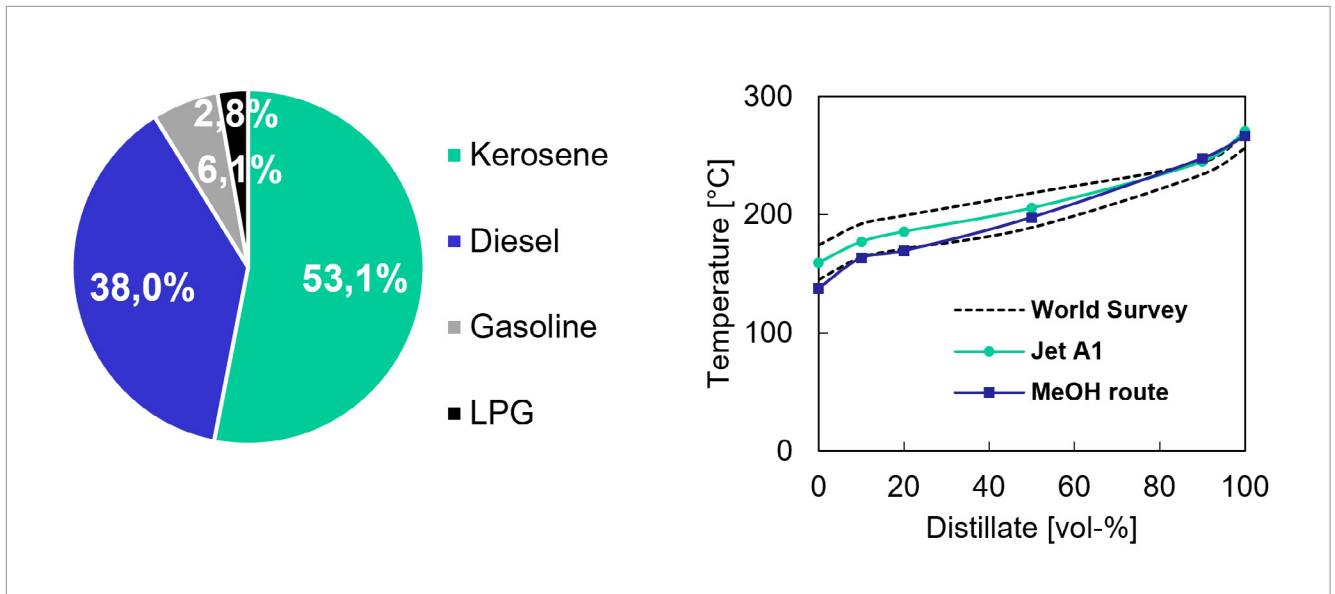
Thermochemical conversion (FT-SPK, FT-SPK/A) uses wood or green hydrogen and (in-)directly captured CO₂. These fuels currently have a maximum certified blend limit of 50%.

Note that two other pathways exist in which either fats, oils and greases (FOG) or Fischer-Tropsch biocrude are co-processed with petroleum derived hydrocarbons in conventional refineries. Since the maximum allowed blend ratio is 5%, the impact of possible net CO₂ emission reductions of these routes is debatable. Specifically for renewable fuels of biological origin, there is a transition to change feedstocks from oils, fats, and greases towards using agriculture and forest waste on the medium to long-term. Even though other pathways for producing synthetic kerosene exist these have not yet been certified for use as SAFs [4]. For example, the methanol-to-kerosene (MtK) pathway uses a combination of process steps, all of which have a high Technology Readiness Level (TRL) of 9 [10,11]. Methanol, synthesized from hydrogen and carbon dioxide, is converted into dimethyl ether (DME) and then the mixture of methanol, DME and water is converted into short olefins which are then oligomerized to shift the chain length into the desired range (C₅+). Finally, the long olefins are hydrogenated into iso-paraffins and separated by distillation into different fuel fractions. Since the optimal integration of these steps has still not yet been achieved, the TRL of the whole integrated process is much lower.

► *Figure 1*
Certified technological pathways for synthetic paraffinic kerosene (SPK) used as SAFs excluding the co-processed route.

(Quelle: HZB)





As shown in ► *Figure 2*, around 50% of the Mtk product spectrum is in the kerosene fraction and because of its isoparaffinic character, the produced kerosene shows good cold flow properties with a high cetane number around 50 [12,13]. Furthermore, adjusting the operating conditions of the Mtk pathway can potentially produce kerosene with 8 vol-% of aromatics thus fulfilling the requirements of ASTM D7655 [7,14]. Nevertheless, SAF produced via the Mtk pathway is not yet approved by ASTM, moreover the whole process chain has a much lower TRL than 9.

4. Resilience in the context of fuel supply

Different interpretations of resilience exist, and some researchers argue that the complexity of energy systems makes a straightforward definition of their resilience difficult [15, 16]. Nevertheless, we borrow the definition used by the United Nations Office for Disaster Risk Reduction's (UNDRR) for infrastructure resilience, as being the ability to prevent, absorb, recover, adapt, and transform in a timely and efficient manner when exposed to current and potential future hazards [17].

Several other definitions of resilience exist which include some or all the aspects such as the ability of a system to anticipate, avoid, withstand, recover from and eventually evolve and adapt to disruption. These aspects of resilience are normally defined by attributes including robustness or the ability to keep functioning after a disruptive event by withstanding and absorbing external shocks, rapid recovery and restoration of expected operation, ability, and

flexibility to adapt and transform in response to disruptive events, and redundancy and diversity of plant and inputs [18, 19].

Disruptions to fuel supply may be caused by natural disasters such as extreme weather, climate change, geological events such as earthquakes, landslides and volcanic eruptions or anthropological threats which may range from human error to antagonistic actions including cyberattacks, physical sabotage and vandalism [20]. Additionally armed and/or geopolitical conflict as well as regulatory and policy changes may also disrupt the fuel supply system. We hereby examine the resilience of SAFs from the perspective of the system and from that of its interaction with a transforming environment [15]. We consider the SAF value chain as the entity whose resilience is of interest with the function of ensuring a reliable supply of SAFs for the aviation sector following a framework proposed by Hamborg et al., for electricity systems [17]. Thus, in this context, SAF resilience means the safeguarding of a reliable, regular supply of SAF and having appropriate contingency measures ready, in the event of a disruption from external forces.

5. Comparison of resilience of sustainable aviation fuels and fossil-based aviation fuels

Resilience in fuel supply chains for aviation is crucial to avoid negative effects of disruptions despite the ever-increasing demand for air travel while needing to reduce environmental impacts. Sustainable aviation fuel being a sustainable, non-conventional,

► *Figure 2*

Left:
Typical product spectrum of the Methanol to Kerosene pathway.

Right:
Distillation curve showing the similarity of the kerosene fraction to Jet A-1.

(Quelle: FZ Jülich)

alternative to fossil-based jet fuel, its value chain and thus some aspects of resilience are different.

In the long term, the resilience of conventional aviation fuel supply may be affected by diminishing amounts of economically viable reserves of oil, gas, or coal, all of which are derived from fossilised organic but non-renewable matter.

SAFs, in contrast, benefit from a wider range of feedstocks, most of which are renewable [21] and are thus potentially agile in responding to disruptions. However, a shift to third generation feedstocks (bio/agriculture wastes and residues) has been necessary to avoid competition for feedstocks of biological origin, with the food sector and land cover, which are considered more essential for society [22]. Both the ReFuel EU Aviation Regulation and EU's REDIII directive include mandates to increase the contribution of renewable fuels of non-biological origin (RFNBOs) to SAF production. For this reason, power-to-X (PtX) paths are being developed for SAFs but these too, depend on the availability of hydrogen generated from renewable energy and carbon dioxide that is extracted using high energy intensive processes, both of which are also needed to de-carbonise other sectors. Overall, there is still a lack of economical and sustainable feedstocks, treatment infrastructure for feedstocks including process and value chains for SAFs. Thus, the availability of feedstocks in sufficient quantities is likely to be a critical factor for the resilience of SAFs over the long-term. Specifically, the HEFA and biomass routes are feedstock constrained while the feedstocks for PtX pathways though theoretically limitless, still have a very high levelized cost of production.

The consumption of jet fuel is more geographically distributed than the sources (locations of exploration) of fossil fuels which tend to be concentrated in specific regions. As such, the exploration, processing, and transportation of fossil-based aviation fuel is performed on a relatively large scale increasing the risk of disruptions at one point in the value chain affecting the whole supply system. Also, recovery and transformation of fossil fuel supply after disruption tends to be relatively slow because of the large scale and the associated high financial cost.

Conversely, the variety of possible starting materials and inputs for SAFs ensures a more even geographical spread of availability leading to relatively smaller production and processing plants. This in turn enables and fosters formation of local production and processing networks that shortens the value chain and potentially increases the resilience of supply against unexpected disruptions.

Smaller plants are likely to be based on modular configuration and standard parts allowing redundancy enabling faster recovery and restoration of SAF supply after disruptions. However, though the total capital cost for small plants may be low, the total product cost can be rather high since the benefits of economy of scale are missing.

Since SAF technology is emergent, apart from some pathways, many of the processing steps are still at a low technological level on a system level which increases risks associated with high costs, time to commercial deployment and poor performance of the technology. Currently, most of the technologies used for SAFs are less energy efficient, less reliable, and less durable than those of fossil aviation fuels. Also, SAF production is unlikely to achieve a similar scale of economy as fossil aviation fuels since the scale of CO₂ sources is much smaller than typical fossil sources. Moreover, the uncertainty in the pace of advancement towards commercial deployment of SAFs affects aspects of safety and quality as manifested by the long development track towards certification of new pathways. The higher costs of feedstocks, low carbon energy inputs as well as production equipment of SAFs makes the cost of ensuring their resilience e.g. through redundancy and diverse sourcing, higher than that for fossil aviation fuels.

Policies and regulations and amendments thereof, especially those associated with the energy transition may affect the resilience of all types of aviation fuels. While such policies may promote the use of SAFs at the expense of fossil-based fuels, they might not go far enough to enable an environment conducive for innovations and investment in technologies for SAFs. The energy transition will also drive competition for low carbon hydrogen, carbon containing feedstocks, critical raw materials e.g., nickel, cobalt etc., needed for catalysts as well as the processing and production capacity, that may cause the market to favour more lucrative products over SAFs. The standard for fossil-based JET A-1 fuel (ASTM D1655-22) is well established such that aircraft and other jet fuel infrastructure are designed to be compatible with it. Moreover, presently SAFs produced by different pathways are certified according to ASTM D7566, only if they are compatible with equipment compliant with ASTM D1655-22 and/or Defence Standard 91-091, Issue 16. Nevertheless, there is future scope for technological progress in the production of SAFs enabled by the energy transition as the costs of compliance rise for the more mature fossil aviation fuels.

6. Contributions of several key public funded projects towards resilience of SAFs

In Germany, several consortia and research groups were or are involved in projects which address a variety of challenges that currently limit large scale production of SAFs that in turn (in)directly contribute to improving their resilience. A selection of SAF-related projects that are funded by the German Federal Government as well as the European Council is summarised in ► Figure 3. For brevity, we describe projects with contributions by the authors in detail then summarise the rest to provide an overview of the research and development landscape.

The DEMO-SPK project carried out by a consortium of 20 international partners including DBFZ, investigated and verified the behaviour of renewable kerosene prepared via Fischer-Tropsch blended with fossil JET A-1 used in commercial aircraft [23]. The project also considered a blend of fossil JET A-1 with ATJ and HEFA. The use of the multi-blend JET A-1 reduced particle emissions in ground runs by approximately 30 to 60% and reduced CO₂ equivalent emissions by about 35% compared to pure fossil-based JET A-1 fuel.

Within the NRW-Revier-Power-to-BioJetFuel project, FZJ compared the methanol-to-kerosene (MtK) pathway to SAFs, to the Fischer-Tropsch (FT) pathway in a concept study using sewage sludge biomass and hydrogen generated by electrolysis using wind energy. [24]. The study revealed that for greenfield plants, there is no significant difference in the cost of SAF produced via MtK and FT since in both

cases, the cost of generating the hydrogen is dominant. However, for brownfield plants, the higher operating costs of FT lead to a higher cost of SAF production than for MtK.









More recently, the CARE-O-SENE project funded by the BMBF focuses on developing catalysts for the low temperature Fischer-Tropsch pathway as part of a Power to Liquid Process for SAFs. The Project connects seven major German and South African partners that have the goal of increasing the kerosene yield of the present catalysts by about 10% in absolute terms, to over 80% in 2025. The project has already reached its first milestone of producing an improved catalyst, that approaches this target, on a semi-commercial scale of 1.8 tonnes [25] as well as testing thereof in a demonstration reactor (100 bbl/day). The newly developed catalysts will also significantly increase the utilisation of hydrogen from green energy and carbon feedstock and thus ultimately reduce the production costs of green kerosene.

The other projects address a broad spectrum of issues relevant to resilience, such as integration with renewable energy sources (KEROSyN 100 and Kerogreen CO₂), using waste (FLITE) and by-products (GLAMOUR) as sources of carbon, reducing process steps (ecoco₂), and examining the effect of using variable diverse biomass feedstocks (HyFlexFuel).

We emphasise that the list in ► Figure 3 is a snapshot of the research and development landscape towards large scale deployment of SAFs and is by no means complete.

► Figure 3
Selection of SAF projects
with contributions from Germany, funded by the German government and the European commission, that address a variety of challenges for scale up.

(Quelle: HZB)

	Next generation catalysts for efficient production of sustainable aviation fuels in relevant volumes to transform the aviation sector	https://care-o-sene.com/en/ 2022 - 2025
	Power to liquid plant using wind energy and the Methanol to Kerosene route	https://www.kerosyn100.de/ 2018 - 2022
	DEMO-SPK: Demonstration of the supply chain for and the use of blended jet fuel with synthetic paraffinic kerosene in commercial aviation	https://www.dbfz.de/news/ergebnispraesentation-demo-spk 2016 - 2020
	GLycerol to Aviation and Marine prOducts with sUustainable Recycling using CO ₂ removal and Fischer Tropsch Synthesis	https://www.glamour-project.eu/ 2020 - 2024
	Sustainable Aviation Fuel Produced From Waste-Based Ethanol Resources	https://flite.eu/about/ 2020 - 2024
	Direct electrocatalytic conversion of CO ₂ into chemical energy carriers (e.g. SAF) in a single stage co-ionic membrane reactor	www.ecoco2.eu 2019 - 2023
	Kerogreen CO ₂ : Demonstration of SAF production from renewable electricity, captured CO ₂ and water to kerosene via Fischer Tropsch Synthesis	https://www.kerogreen.eu/ 2018 - 2022
	HyFlexFuel: Hydrothermal liquefaction: Enhanced performance and feedstock flexibility for efficient biofuel production	https://www.hyflexfuel.eu/ 2017 - 2021

7. Summary and conclusion

Currently, the SAF technology can be considered as nascent because of the small contribution to the aviation sector compared to conventional fossil fuels. Various regulations mandate progressive but drastic increases in the minimum share of SAFs for aviation by 2050. Thus, technological advances are required for production pathways that would either produce SAFs certified for blend ratios well above the currently certified maximum SAF blend ratio of 50% (v/v), or for changes in aircraft and handling infrastructure. Due to limited direct experience, first indications of what may prove to be important resilience characteristics of SAFs can only be qualitatively analysed. However, as time progresses, the sector players will learn from inevitable disruptions and use this knowledge to evaluate the effectiveness of different resilience measures as well as their effectiveness singly or in combination. However, fossil aviation fuels can currently be considered as more resilient than SAFs because of their maturity. Moreover, as the contribution of SAFs to aviation increases with time, stakeholders will be increasingly concerned about the resilience of the technology due to its almost exclusive dependence on energy inputs from variable renewable sources and in some cases, from feedstocks whose availability is uncertain. An improvement in the resilience of SAFs requires implementation of enabling standards and specifications – both from a technical as well as a sustainability viewpoint – more efficient, larger scale and yet less complex processing technologies, and a lasting solution to the problem of limited and/or costly feedstocks. No specific pathway for SAF has emerged as the most dominant and thus project demonstrations for various pathways for SAF production play an important role in proving the techno-economic and sustainable feasibility on a large scale, which would also contribute further to a better understanding of the resilience of SAFs.

Acknowledgements

S. Calnan acknowledges funding through the CARE-O-SENE Project by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) (03SF0673A).

References

1. <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/SAF/ICAO%20SAF%20short-term%20projections%20-%20methodology%20and%20results.pdf>.
2. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_2061.
3. European Union 2023, <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-refueleur-and-fueleur/>.
4. International Energy Agency- Advanced Motor Fuel Technology Collaboration Programme (IEA AMF TCP). Sustainable Aviation Fuels – Status quo and national assessments. URL: https://iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Task_63.pdf. Accessed 08 Nov. 2023.
5. International Civil Aviation Organisation (ICAO) — Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels, Available at: https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202022.pdf. Accessed 16 Aug. 2023.
6. ASTM D1655-22: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. Nov. 2022.
7. ASTM D7566-22: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. Nov. 2022.
8. Defence Standard 91-091/16:2023, Turbine Fuel, Aviation Kerosine Type, Jet A-1 NATO Code: F-35, Joint Service Designation: AVTUR”, Issued by the United Kingdom (U.K.) Ministry of Defence. Glasgow, UK.
9. S. Hauschild, G. Costa de Paiva, U. Neuling, T. Zitscher, J. Köchermann, K. Görsch, (2023): Production technologies for supplying renewable fuels. In: Schröder, J.; Naumann, Karin (Ed.): Monitoring renewable energies in transport. (DBFZ Report No. 44). Leipzig: DBFZ. ISBN: 978-3-946629-83-2. P. 57–91. DOI: 10.48480/4xdx-xy05.
10. P. Schmidt, et al., Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. 2016, German Environment Agency/ Umwelt Bundesamt: Dessau-Roßlau.

11. W. Liebner, and M. Wagner, (2004), MtSynfuels®, die effiziente und wirtschaftliche Alternative zu Fischer-Tropsch-Treibstoffen. Erdöl, Erdgas, Kohle, 120(10): p. 323-326. S.A. Tabak and S. Yurchak, (1990), Conversion of methanol over ZSM-5 to fuels and chemicals. Catal. Today, 6(3): p. 307-327. [https://doi.org/10.1016/0920-5861\(90\)85007-B](https://doi.org/10.1016/0920-5861(90)85007-B).
12. C.P. Nicholas, (2017), Applications of light olefin oligomerization to the production of fuels and chemicals. Appl. Catal. A: Gen., 543: p. 82-97.
13. P. Schmidt, V. Batteiger, A. Roth, W. Weindorf, T. Raksha. (2018), Power-to-Liquids as renewable fuel option for aviation: a review. Chem. Ing. Tech., 90(1-2): p. 127-140.
14. B. -J. Jesse, H.U. Heinrichs, W. Kuckhinrichs, (2019), Adapting the theory of resilience to energy systems: a review and outlook, Energ. Sustain. Soc. 9:27, <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0210-7>.
15. J. Jasiunas, P.D. Lund, J. Mikkola, (2021), Energy Resilience - A review, Renew. Sustain. Energ. Rev., 150 111476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476>.
16. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Principles for resilient infrastructure, 2022. Available at: <https://www.undrr.org/quick/70250>. Accessed 09 Sept. 2023.
17. K. Anderson, E. Hotchkiss, L. Myers, S. Stout, (2019), Energy Resilience Assessment Methodology. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-7A40-74983. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74983.pdf> . Accessed 16 Aug. 2023.
18. S. Hamborg, J.N. Meya, K. Eisenack, T. Raabe, (2020), Rethinking resilience: a cross-epistemic resilience framework for interdisciplinary energy research, Energy Res. Soc. Sci. 59. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101285>.
19. L. Urciuoli et al, (2014), A multiple case study approach on oil and gas supply chains to Europe, Int. J. Supply Chain Manag., 19(1) 46-63. <https://doi.org/10.1108/SCM-09-2012-0307>.
20. L. Molyneaux, C. Brown, L. Wagner, J. Foster, (2016), Measuring resilience in energy systems: insights from a range of disciplines, Renew. Sustain. Energy Rev., 59, 1068-1079, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.063>.
21. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Alt-aviation-fuel-sustainability-mar2021.pdf>. Accessed on 16 Aug 2023.
22. N. Bullerdiek, J. Buse, N. Dögnitz, et al. (2019): Use of Multiblend JET A-1 in practice. Summary of the results from the model project of the Mobility and Fuel Strategy. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig. https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Download/Extern/DEMO-SPK_Final_report.pdf.
23. S. Weiske, et al., (2022), Konzepte und Potenziale von Demonstrationsanlagen für die Produktion von erneuerbarem synthetischen Flugzeugtreibstoff als Beitrag zur Transformation der Reviere in NRW, ed. 580. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag. https://user.fz-juelich.de/record/908315/files/Energie_Umwelt_580.pdf.
24. <https://care-o-sene.com/en/2023/11/17/weiterer-erfolg-fuer-care-o-sene-neuer-katalysator-besteht-stresstest/>.

Ist die Versorgung mit kritischen Rohstoffen ein Hindernis für die Energiewende?



GFZ

Prof. Dr. Sarah Gleeson
sarah.gleeson@gfz-potsdam.de

Dr. Christof Kusebauch
c.kusebauch@gfz-potsdam.de

DBFZ

Dr. Steffi Formann
steffi.formann@dbfz.de
formann@biogasundenergie.de

Prof. Dr. Ingo Hartmann
ingo.hartmann@dbfz.de

DLR

Dr. Tobias Naegler
tobias.naegler@dlr.de

FZ Jülich

Dr. Petra Zapp
p.zapp@fz-juelich.de

KIT

Dr. Manuel Baumann
manuel.baumann@kit.edu

Dr. Marcel Weil
marcel.weil@kit.edu

Einleitung

Die Energiewende und die dafür notwendigen Zukunftstechnologien werden große Mengen an kritischen und strategischen Metallen benötigen. Schon jetzt verbraucht jeder Europäer zwischen 17 und 25 Tonnen Metalle und mineralische Produkte pro Jahr [1]. Die Erzeugung erneuerbarer Energien und die Elektrifizierung des Verkehrssektors werden die zukünftige Nachfrage noch deutlich erhöhen. Windturbinen, Solarpaneele, Wärmepumpen, Stromleitungen, Batterien: sie alle benötigen sehr große Mengen verschiedener Metalle [2, 3] (► *Abbildung 1*).

Recycling wird dabei nur einen Bruchteil des künftigen Bedarfs decken können, und das auch nur für einige Metalle [4]. Für die sichere Versorgung mit notwendigen zum Teil kritischen Metallen bedeutet das, dass auch weiterhin die primäre Gewinnung durch Bergbau einige Zeit andauern wird. Da sich Lagerstätten durch seltene Ereignisse in der Erdgeschichte bilden, sind sie nur in bestimmten Regionen und Ländern der Welt zu finden, was wiederum ein geopolitisches Risiko für Lieferketten darstellen kann. Darüber hinaus gilt, selbst wenn ein potenzielles Mineralvorkommen gefunden wird, kann es aufgrund von Umwelt-, Sozial- und Governance-Restriktionen dazu kommen, dass es nie in Produktion geht.

In diesem Beitrag diskutieren wir Szenarien für die zukünftige Versorgung mit Metallen, neue Ansätze für das Auffinden von „klassischen“ Lagerstätten, Methoden für die Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Bergbau sowie das Potenzial unkonventioneller Ressourcen und Materialsubstitutionen. Die vorgestellten Forschungsergebnisse können dazu beitragen, die zukünftige Versorgung mit Rohstoffen zu verbessern und dadurch die Resilienz eines zukünftigen Energiesystems zu stärken.

Szenarien deuten auf Rohstoff-Engpässe hin

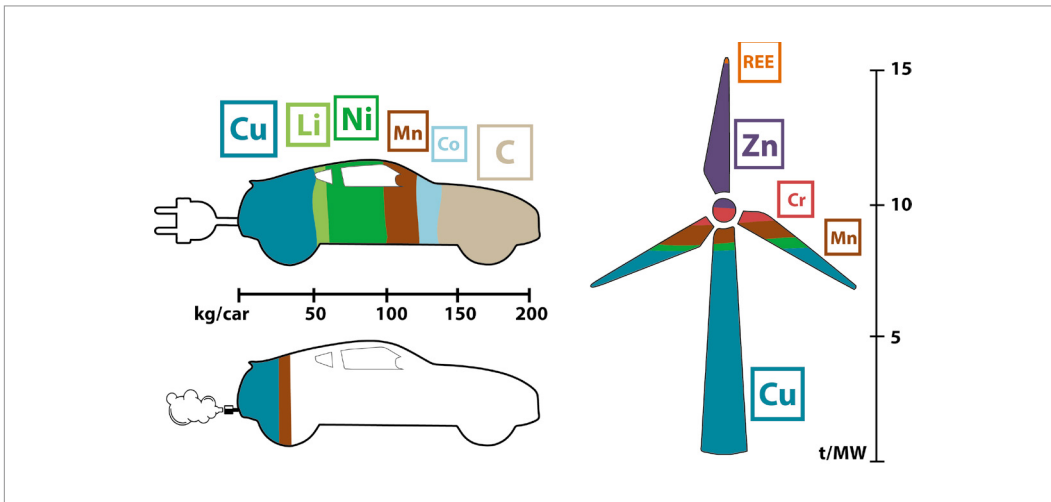
Der globale Bedarf vieler Rohstoffe, die in Technologien der Energie- und Verkehrswende verwendet werden, wird voraussichtlich in den kommenden Jahren deutlich ansteigen. Dies hat einerseits zur Folge, dass globale Produktionskapazitäten für bestimmte Rohstoffe in sehr kurzer Zeit zum Teil deutlich ausgeweitet werden müssen, andererseits steht zu erwarten, dass zeitnah Lagerstätten abgebaut werden, die heute noch nicht wirtschaftlich zu betreiben sind. In beiden Fällen ist mit kurz- bis mittelfristigen Versorgungsengpässen zu rechnen, die sich in entsprechenden Preisanstiegen der betroffenen Rohstoffe widerspiegeln werden.

► *Abbildung 2* zeigt potenzielle Engpässe für viele Rohstoffe auf, die für die Energiewende relevant sind: Die nötige Ausweitung der Produktion wird auf der y-Achse, der Abbau neuer Lagerstätten auf der x-Achse dargestellt.

Die blauen Punkte berücksichtigen ausschließlich den Rohstoffbedarf für Energie- und Verkehrstechnologien in einem ambitionierten globalen Transformations-Szenario, die roten Punkte darüber hinaus eine (grobe) Abschätzung des gesamten Bedarfs aller Anwendungen [5].

Aus diesem Angebots-/Nachfrage-Szenario geht hervor, dass zentrale Technologien der Energie- und Verkehrswende wie Batterien (Lithium, Kobalt, Nickel), Permanentmagnete in Elektromotoren und getriebelosen Windkraftanlagen (Neodym, Dysprosium), bestimmte Typen von Dünnschicht-PV-Modulen (Tellur, Selen, Gallium, Indium) und Elektrolyseuren (Iridium) von potenziellen Engpässen betroffen sein werden.

Eine Abmilderung dieser Engpässe ist prinzipiell durch Erhöhung der Materialeffizienz bei Herstellung der Anlagen, eine Verlängerung der Lebensdauer und - zumindest langfristig - durch deutlich erhöhte Recycling-Raten möglich. Zudem spielt Substitution auf der Material-, aber auch der Technologie-Ebene eine große Rolle. So könnte z.B. der Bedarf vieler Materialien, die aktuell in Batterien Verwendung



► Abbildung 1

Verbrauch kritischer und strategischer Metalle:

- für ein Elektroauto
- für ein konventionelles Auto
- für ein off-shore Windrad

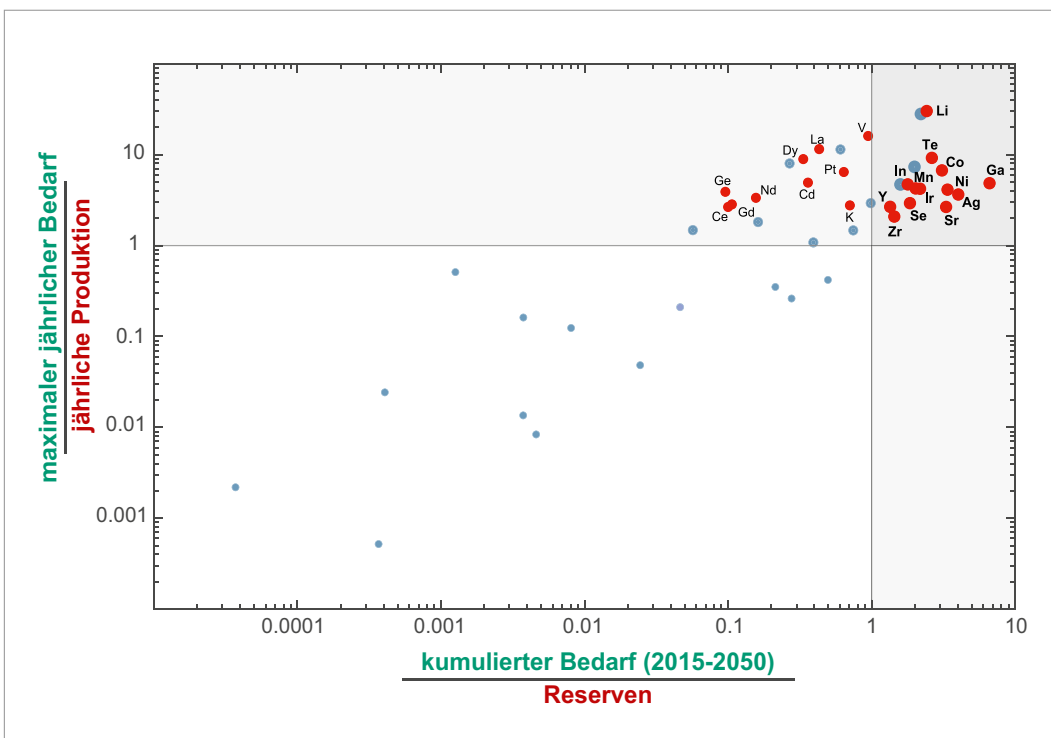
(Quelle: [4])

finden, durch die Marktreife neuer Batterie-Technologien deutlich reduziert werden. Da der motorisierte Individualverkehr einen starken Treiber des Bedarfs darstellt, könnten Mobilitäts-Konzepte, die den Verzicht auf eigene Pkw und den Umstieg auf öffentlichen Transport erleichtern, ebenfalls den Rohstoffbedarf reduzieren. Dennoch steht zu erwarten, dass neue und insbesondere auch unkonventionelle Lagerstätten gefunden und erschlossen werden müssen, die mit entsprechend höheren Kosten sowohl monetärer, aber auch ökologischer und sozialer Natur einhergehen können.

**Primäre Rohstoffe:
Wie bilden sich Lagerstätten
und wie können wir sie finden?**

Große Metallvorkommen sind selten und bilden sich nur in bestimmten geologischen Umgebungen und zu bestimmten Zeiten der Erdgeschichte, daher findet man sie nur in bestimmten Gegenden auf der Erde. Auch findet man nicht alle Metalle in der gleichen Lagerstätte, sondern jedes Metall (bzw. Metallgruppe) bildet sein eigenes separates Vorkommen.

Da es 10-15 Jahre dauern kann, bis eine Lagerstätte nach ihrer Entdeckung in Produktion geht, müssen



► Abbildung 2

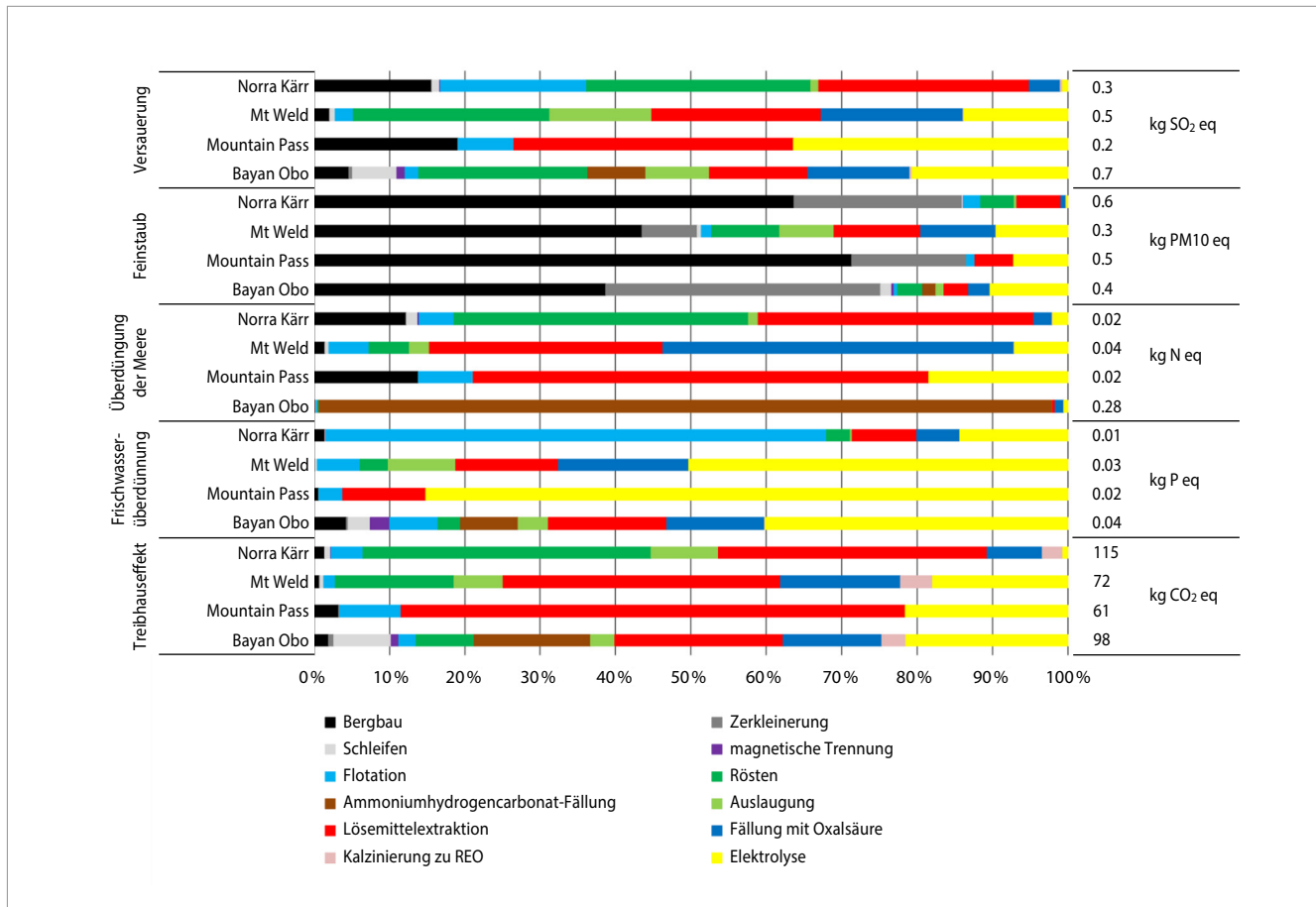
Potenzielle Engpässe für relevante Rohstoffe in Energie- und Verkehrs-Technologien

Die Achsen zeigen den jährlichen Bedarf im Verhältnis zur jährlichen Produktion (y-Achse) bzw. im Verhältnis zu den Reserven (x-Achse):

Werte oberhalb der 1-Linie zeigen Rohstoffe, deren Bedarf die Produktion übertrifft. Werte rechts der 1-Linie zeigen Rohstoffe, deren Bedarf die Reserven übertrifft.

- Blau:** Bedarf für Energie- und Verkehrs-Technologien
- Rot:** Gesamtbedarf (grobe Abschätzung)

(Quelle: [5])



► **Abbildung 3**
Umwelteffekte bei der Neodymherstellung:
 Anteile der verschiedenen Prozessstufen für verschiedene Rohstoffketten an verschiedenen Umwelteffekten

(Quelle: [9])

wir wissen, wo diese Ressourcen sind, bevor wir sie benötigen. Deshalb beschäftigt sich die aktuelle Rohstoffforschung mit der Frage, wie und wo die größten Lagerstätten der Welt entstehen und liefert grundlegende Daten für die Suche in der Tiefe. Dabei wird der "Mineral Systems"-Ansatz verfolgt, der Feldarbeit, Experimente und Modellierung kombiniert, um zu erforschen, welche Prozesse notwendig sind, um Metalle in Gesteinen anzureichern [6]. Darüber hinaus sind viele Lagerstätten an der Erdoberfläche schon abgebaut, sodass sich aktuell die Erkundung auf Vorkommen im Untergrund fokussiert, was eine große technische Herausforderung darstellt. Die Entwicklung neuer Explorationstechniken wird dabei immer wichtiger und neue Anwendungen von umweltfreundlichen geophysikalischen Methoden für die Rohstoffexploration wie Magnetotellurik und passive Seismik werden erforscht [7]. Ziel der Forschung ist dabei, Lagerstätten zu untersuchen und zu finden, die nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch bestmöglich nutzbar sind.

Umweltrisiken quantifizieren

Umweltrisiken spielen bei der Gewinnung von Primärrohstoffen eine große Rolle und müssen daher bei Abbau und Verarbeitung von Metallerzen minimiert werden. Um verschiedene Umweltauswirkungen einer ganzen Prozesskette zu bewerten, wird die Methode des „Life Cycle Assessments (LCA)“ angewendet. Wie im folgenden Beispiel zu Seltenen Erden dargestellt (► **Abbildung 3**), kann LCA dabei helfen, ökologische Risiken zu quantifizieren und dadurch einen Beitrag für die nachhaltige Gewinnung von Rohstoffen für die Energiewende leisten.

Bei der Gewinnung und Produktion von Seltenen Erden werden Techniken eingesetzt, die häufig nicht umweltverträglich sind. Mögliche Umwelteffekte hängen vor allem von der Geologie einer Lagerstätte, der Art und Zusammensetzung der Mineralien, den Abbaumethoden, der örtlichen Versorgung mit Energie und Betriebsstoffen sowie mit (umwelt) rechtlichen Rahmenbedingungen zusammen. Daher können die Umweltauswirkungen je nach Lagerstätte, Förderland und Ort der weiteren Verarbeitung sehr unterschiedlich ausfallen und

müssen für jede Lieferkette individuell untersucht werden [8]. Einige Umweltauswirkungen können durch Prozessanpassungen oder Reinigungstechniken verringert werden, andere sind durch die Mineralzusammensetzung unvermeidbar [9]. Hauptursachen, die für die verschiedenen Umwelteffekte identifiziert werden konnten, sind zum einen große Mengen an Chemikalien, die für die Separierung der Seltenen Erden benötigt werden, sowie zum anderen große Rückstandsmengen, die bei der Aufbereitung, dem Abbau und der Trennung anfallen. In den Erzen vorkommende radioaktive Begleitelemente können über die Luft und das Abwasser in die Umwelt gelangen.

Neben den Verbesserungspotenzialen bei der Primärerzeugung, durch Emissionsminderungstechniken und Recycling der Betriebsstoffe, könnte eine Erhöhung der Recyclingquoten aus sekundären Rohstoffen die Umweltauswirkungen deutlich reduzieren.

Unkonventionelle Ressourcen

Neben den bekannten „klassischen“ Erzlagerstätten stellen „unkonventionelle“ Ressourcen eine neue, möglicherweise umweltschonendere, Quelle für benötigte Metalle dar. Ein Forschungsschwerpunkt liegt hierbei auf der kombinierten Gewinnung von Energie und Rohstoffen. Wissenschaftler/innen von GFZ und KIT erforschen in verschiedenen Projekten, die Möglichkeit kritische und strategische Rohstoffe aus geothermischen Fluiden zu extrahieren, die schon jetzt zur Energiegewinnung genutzt werden. Hierbei steht vor allem Lithium im Fokus. Ein aktuelles Demonstrator-Projekt untersucht innovative Technologien zur Gewinnung dieses Schlüsselmetalls der Batterietechnik aus heißen Wässern.

Daneben kann die kombinierte stofflich-energetische Aufbereitung von Biomassereststoffen und landwirtschaftlichen Nebenprodukten durch umweltverträgliche Bioökonomie-Technologien einen Beitrag zu einer nachhaltigen und effizienten Ressourcennutzung leisten [10]. Während Pflanzen verschiedene bioverfügbare Elemente in Form von Ionen aus dem Boden aufnehmen, können diese Spuren- und Wertelemente im zellulären Gewebe angereichert werden. Diese natürliche Fähigkeit kann gezielt angewandt werden um über den Prozess des Phytomining Wertelemente zu gewinnen. Aktuell vorhandene grundlegende Kenntnisse über Phytomining-Verfahren und Phytoremediationsstrategien ermöglichen weitere Schritte zur stofflichen Verwertung elementangereicherter Biomasse. Kontinuierlich hohe Ernteerträge mit

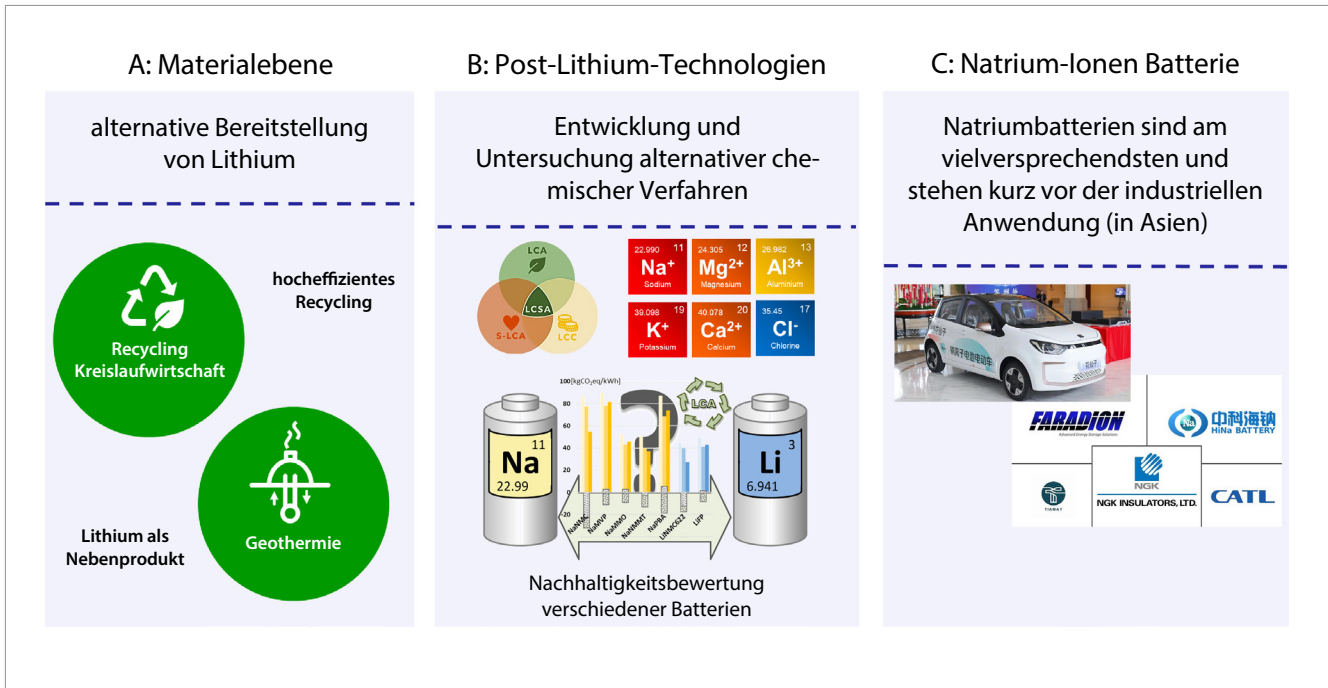
hoher Reststoffbildung erlauben dabei eine qualitative Betrachtung von Verwertungs-technologien für biogene Wertelemente und liefern Ansätze für das Management von Biomasse aus Phytominingprozessen [11].

Durch eine gezielte Verwertungsstrategie der gekoppelten stofflich-energetischen Nutzung von Biomasse, als Quelle für metallische oder mineralische Rohstoffe und Energie, können diese aus verschiedenen Biomassen zurückgewonnen und für eine Kaskadennutzung in Technologieanwendungen aufbereitet werden [12]. In einem interdisziplinären Team wird am DBFZ die Gewinnung von Metallen, vor allem von Silizium (Si), Germanium (Ge) und Seltenen Erden (REE), auf Basis einer gezielten Analyse der Biomasserohstoffe und deren Eigenschaften, erforscht. Durch Nutzung einer etablierten stofflich-energetischen Prozesskette mit den Teilschritten Vorbehandlung, Aufkonzentration, Extraktion und Nachbehandlung können über diesen Weg biogene Ressourcen einen Teil des zukünftigen Bedarfs an wertvollen Rohstoffen abdecken [13].

Die Nutzung von Wertstoffen und Rohstoffen aus Biomasse ist eine attraktive und umweltfreundliche Versorgungsquelle und kann daher langfristig einen Beitrag zu einer nachhaltigen, ressourcenschonenden und kreislauforientierten Nutzung von Ressourcen leisten.

Alternative Technologien und Materialsubstitutionen

Die Entwicklung alternativer Technologien und die Substitution von kritischen Metallen stellen eine weitere Möglichkeit dar, um Engpässe bei der zukünftigen Versorgung mit bestimmten Rohstoffen für die Energiewende zu minimieren. Lithium-Ionen-Batterien (LIB) gelten derzeit als meistversprechende Technologie für die Speicherung von erneuerbaren Energien und Umsetzung der Elektromobilität. Mit der Nutzung dieser Technologien ergeben sich aber auch Herausforderungen hinsichtlich Umweltauswirkungen und die Nutzung kritischer und knapper Ressourcen wie Kobalt, Lithium und Naturgraphit. Der steigende weltweite Bedarf an Batterien im Mobilitäts- und Energienetzsektor kann je nach Szenario, die derzeit bekannten Reserven für viele Metalle, wie Co, Li, aber auch Ni, Cu und Naturgraphit übersteigen [14]. Dies erfordert einerseits die Implementierung effizienter Recyclingansätze (hydrometallurgische Verfahren) sowie das Erschließen unkonventioneller Lagerstätten. Andererseits müssen alternative Batteriechemien untersucht werden, um potenzielle Einschränkungen existierender LIB zu überwinden.



► *Abbildung 4*
Beispiele alternativer Technologien
 (Quelle: [4])

Hierfür wird ein breites Spektrum verschiedener Anoden-Kathoden-Kombinationen, sogenannte Post-Lithium-Technologien in Form von Natrium-Ionen-, Magnesium-Ionen-, Lithium-Schwefel-, Lithium-Luft- und Zink-Luft-Batterien erforscht (► *Abbildung 4*).

Unter den derzeitigen Post-LIB-Entwicklungen gelten Natrium-Ionen-Batterien (SIB) als die am weitesten fortgeschrittene Technologie, mit einer Vielzahl an Start-ups und größeren Batterieherstellern, die eine zeitnahe Markteinführung dieser Zellchemie anstreben. Die größten Stärken von SIB sind die Verwendung billigerer und häufiger vorkommender Materialien (vor allem Aluminium anstelle von Kupfer für den Stromkollektor, Natrium anstelle von Lithium im aktiven Kathodenmaterial und im Elektrolytsalz sowie die Verwendung von kobaltfreien Kathodenmaterialien) [15]. Die Verwendung von unkritischen Materialien führt jedoch nicht automatisch zu einer nachhaltigeren Technologie, weshalb eine gründliche Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen und Ressourcenfragen notwendig ist [16]. Nichtsdestotrotz sind SIB ein vielversprechender Kandidat für unterschiedliche Anwendungen als stationäre Energiespeicher oder ausgewählten Elektromobilitätsformen und können so helfen, zukünftige Engpässe bei der Rohstoffversorgung zu beheben.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Versorgung mit kritischen Rohstoffen wird ein Hindernis für die Energiewende sein, und prognostizierte Engpässe müssen auch im Sinne der Resilienz betrachtet werden. Für grüne Technologien werden große Mengen an Metallen benötigt, die über die derzeitige und geplante Minenproduktion hinausgehen. Das Recycling von kritischen und strategischen Rohstoffen muss verbessert werden, wird aber kurz- und mittelfristig nicht reichen, um den künftigen Bedarf zu decken. Die Erfolgsquoten eine Lagerstätte zu finden sind gering, da die einfachen, an der Erdoberfläche vorkommenden, Metallerze schon abgebaut werden. Nun sind neue Explorationstechniken erforderlich, um Metalle unter der Erdoberfläche zu finden. Selbst wenn diese gefunden werden, kann es über ein Jahrzehnt dauern, bis eine neue Mine in Betrieb genommen werden kann. Zusätzlich zu den technischen Herausforderungen, die mit der Suche nach Mineralvorkommen verbunden sind, ist die gesellschaftliche Akzeptanz des Bergbaus in vielen Ländern, insbesondere in Europa, gering. Das bedeutet, dass selbst wenn eine riesige, ökonomisch sinnvolle Lagerstätte gefunden wird, Umwelt-, Sozial- und Governance-Fragen (ESG) einen Abbau verhindern können [17]. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, zukünftig sowohl die technischen als auch die gesellschaftlichen Aspekte von Mineralvorkommen zu berücksichtigen. Darüber hinaus können Rohstoffe aus unkonventionellen Ressourcen sowie technische Innovationen und

Materialsubstitutionen einen Beitrag leisten, Engpässe bei der Versorgung zu vermindern und stabile Versorgungsketten zu gewährleisten. Da die Versorgung mit Rohstoffen essenziell für ein Gelingen der Energiewende ist, sollten zukünftig die Verfügbarkeit und die Kosten von Rohstoffen in Energiesystemmodelle einbezogen werden.

Literatur

1. United Nations, The Sustainable Development Goals Report. 2019: New York.
2. Vidal, O., B. Goffé, and N. Arndt, Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*, 2013. 6(11): p. 894-896.
3. Arndt, N.T., et al., Future Global Mineral Resources. *Geochemical Perspectives*, 2017. 6(1): p. 1-171.
4. IEA, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. 2021: Paris.
5. Schlichenmaier, S. and T. Naegler, May material bottlenecks hamper the global energy transition towards the 1.5 °C target? *Energy Reports*, 2022. 8: p. 14875-14887.
6. Magnall, J.M., et al., Wie Wasser Lagerstätten bildet. *System Erde*, 2023. 13: p. 30 - 35.
7. Ryberg, T., et al., Ambient seismic noise analysis of LARGE-N data for mineral exploration in the Central Erzgebirge, Germany. *Solid Earth*, 2022. 13(3): p. 519-533.
8. Schreiber, A., J. Marx, and P. Zapp, Life Cycle Assessment studies of rare earths production- Findings from a systematic review. *Science of the Total Environment*, 2021. 791.
9. Zapp, P., et al., Environmental impacts of rare earth production. *Mrs Bulletin*, 2022. 47(3): p. 267-275.
10. Formann, S., et al., Beyond Sugar and Ethanol Production: Value Generation Opportunities Through Sugarcane Residues. *Frontiers in Energy Research*, 2020. 8.
11. Schliermann, T., et al., High quality biogenic silica from combined energetic and material utilization of agricultural residues. *Proceedings, 7th International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venedig*, 2018.
12. Prempeh, C.O., et al., Extraction and Characterization of Biogenic Silica Obtained from Selected Agro-Waste in Africa. *Applied Sciences-Basel*, 2021. 11(21).
13. Formann, S., Schliermann, T., Value Element Recovery from Biomass Resources. *eebionews - EERA Bioenergy Newsletter*, 2023, issue 19:12.
14. Weil, M.; Peters, J. F. und Baumann, M., Stationary battery systems: Future challenges regarding resources, recycling, and sustainability, 2020. *The Material Basis of Energy Transitions*. Ed.: A. Bleicher, 71–89, Academic Press.
15. Baumann, M., et al., Prospective Sustainability Screening of Sodium-Ion Battery Cathode Materials. *Advanced Energy Materials*, 2022. 12(46).
16. Peters, J.F., et al., On the environmental competitiveness of sodium-ion batteries under a full life cycle perspective - a cell-chemistry specific modelling approach. *Sustainable Energy & Fuels*, 2022. 6(2): p. 512-513.
17. Jowitt, S.M., G.M. Mudd, and J.F.H. Thompson, Future availability of non-renewable metal resources and the influence of environmental, social, and governance conflicts on metal production. *Communications Earth & Environment*, 2020. 1(1).

Krisenprävention mit Suffizienz – Ergänzung zu erneuerbaren Energien und Energieeffizienz



Wuppertal Institut

Dr. Benjamin Best

Johannes Thema

johannes.thema@wupperinst.org

Fraunhofer ISE

Dr. Christoph Kost

christoph.kost@ise.fraunhofer.de

UFZ

Prof. Dr. Paul Lehmann

paul.lehmann@ufz.de

KIT

Dr. Witold-Roger Pogonietz

pogonietz@kit.edu

Einleitung

Seit der russischen Invasion der Ukraine wird in Deutschland intensiv über Energiesicherheit diskutiert (1-3). Langsam aber sicher rückt ins Bewusstsein, dass wir als Gesellschaft noch sehr viel tun können, um Energie nicht nur zu sparen, sondern überhaupt nicht zu benötigen (4) – und damit Abhängigkeiten zu reduzieren (5), ohne hierbei die Lebensqualität zu vermindern. Der Fachbegriff für diese Strategie: Suffizienz.

Suffizienz taucht in der ökonomischen Debatte der 70er Jahre als radikaler Gegenentwurf zu nicht nachhaltigem Wachstum auf. Ökologische Ökonomen wie Herman Daly formulierten auf thermodynamischen Grundlagen eine Absage an das materielle Wirtschaftswachstum (6).

Heute wird Suffizienz in der wissenschaftlichen Literatur unterschiedlich definiert. Hier eine umfassende Definition einer aktuellen Publikation unter Beteiligung des Wuppertal Instituts:

„We define sufficiency as a strategy for reducing, in absolute terms, the consumption and production of end-use products and services through changes in social practices in order to comply with environmental sustainability while ensuring an adequate social foundation for all people.“ (7)

Ziel von Suffizienz ist also, ökologische Schäden zu vermeiden und gleichzeitig gute Lebensgrundlagen sicher zu stellen. Das Mittel der Suffizienz ist die Veränderungen sozialer Praktiken – sowohl im Konsum als auch in der Produktion. Dabei grenzt sich Suffizienz klar von Armut ab – eine angemessene Grundversorgung soll gewährleistet werden.

Energiesuffizienz-Maßnahmen haben dort die höchste Wirkmöglichkeit, wo Gruppen oder Individuen noch einen hohen Energiebedarf je Konsumeinheit haben. Hierbei ist zu beachten, dass „Energiearme“ vielfach ungewollt eine hohe Energienachfrage haben, ihre Bedarfe teils trotzdem nicht befriedigen können und dass ihre Möglichkeiten, sparsamer zu handeln, begrenzt sind.

Potenziale von Suffizienz für ein nachhaltiges und resilientes Energiesystem

Die Diskussion zu Suffizienz findet zunehmend auf den großen politischen Bühnen statt. Sie wird als zentrale Strategie zur Bekämpfung des Klimawandels und anderer sozial-ökologischer Krisen anerkannt. Der Weltklimarat IPCC hat im Jahr 2022 erstmals Suffizienz als wichtige Strategie beschrieben (8,9). In Deutschland mahnt der Expertenrat für Klimafragen (ERK), dass die Bundesregierung die Klimaziele verfehlen werde, wenn das Wachstum der Wohnfläche und des PKW-Bestands nicht durch eine Strategie der „Aktivitätsreduktion“ begrenzt wird. Auf der FVEE-Jahrestagung im Oktober 2023 stellte Prof. Dr. Sarah Gleeson fest, dass metallische Rohstoffe wie Kupfer und Lithium riskante Engpässe für die Energiewende sind. Suffizienz hat ein hohes Potenzial, solche Pfadrisiken zu reduzieren und zur Beschleunigung der klimaneutralen Transformation beizutragen.

Vereinfacht betrachtet vermindert Energiesuffizienz die gesamtwirtschaftliche Energienachfrage. Daraus ergeben sich folgende theoretische Potenziale für die Nachhaltigkeitsperformanz des Energiesystems:

- umweltseitig – kurzfristig: verminderter Bedarf an fossil-basierten Energieträgern mit den entsprechend reduzierten Treibhausgas- und weiteren umweltrelevanten Emissionen
- umweltseitig – mittel-/langfristig (im Falle einer erfolgreichen Energiewende): verminderter Bedarf an kritischen/strategischen Ressourcen, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Umweltwirkungen bei ihrer Gewinnung; außerdem ergeben sich geostrategische Implikationen
- ökonomisch – Energiesektor: verminderter Bedarf zur Bereitstellung von Energie (und damit auch sinkende Energiepreise (oder weniger stark steigende Energiepreise) und damit ggf. verminderter Bedarf an entsprechenden Infrastrukturen
- sozial: Wenn Energiesuffizienz nicht mit einer Verschlechterung der individuellen Wohlfahrt einhergeht, dann kann Energiesuffizienz die Akzeptanz der Energiewende erhöhen.

Eine Szenario-Analyse auf Basis des Modells REMod (10) ergab, dass die Kosten eines Suffizienz-Szenarios geringer sind als die eines Referenz-Szenarios (welches ebenfalls Klimaneutralität erreicht, was aber z.B. durch steigende Wohnflächen/Kopf und Verkehrsleistung erschwert wird). Ein Suffizienz-Szenario ist demnach aus finanzieller Sicht vorzugswürdig. Es kann, wie ► *Abbildung 1* zeigt, auch den Bedarf an erneuerbaren Importen reduzieren. Noch weiter geht das EU-Szenario „CLEVER“: Durch Suffizienz, Effizienz und Erneuerbare verzichtet es im klimaneutralen Zustand fast vollständig auf Energieimporte von außerhalb der Europäischen Region. Zwischen den EU-Ländern findet hingegen ein intensiver Handel mit Wasserstoff und Strom statt (11). Jeder Ausbau der erneuerbaren Energien erzeugt außerdem Zielkonflikte (ökonomische, soziale und ökologische), die durch unterschiedliche Maßnahmen minimiert werden können, u.a. durch Abschaltzeiten von Windenergieanlagen und natürlich durch die Reduktion des Bedarfs/Suffizienz (12). Dadurch können Auswirkungen auf Anwohnende, auf das Landschaftsbild und auf Tiere vermieden werden.

Üblicherweise werden zur Erreichung von Suffizienz in Modellen Parameter wie Personenkilometer und Quadratmeter im Vergleich zu heute statisch fortgeschrieben (statt erhöht oder sogar reduziert). Das Ergebnis wird üblicherweise ex-post narrativ mit einem Szenario verknüpft und durch Policies begründet. Policy-Szenarios gehen einen direkten Weg, von Policies zu Parametern und anschließend in Modellläufe. Policies entscheiden ex ante z. B. wie hoch eine Steuer ist oder wie weit Punkte in einem Mobilitätsmodell voneinander entfernt sind, so dass das quantitative Ergebnis direkt auf dem Policy Setting basiert.

Um eine Verlagerung vom PKW- auf den Rad-, Fuß- und Bahnverkehr zu erreichen und den Verkehrsaufwand zu vermeiden, also um eine echte Verkehrswende zu induzieren, sind „Push“- und „Pull“-Instrumente notwendig. Beispiele:

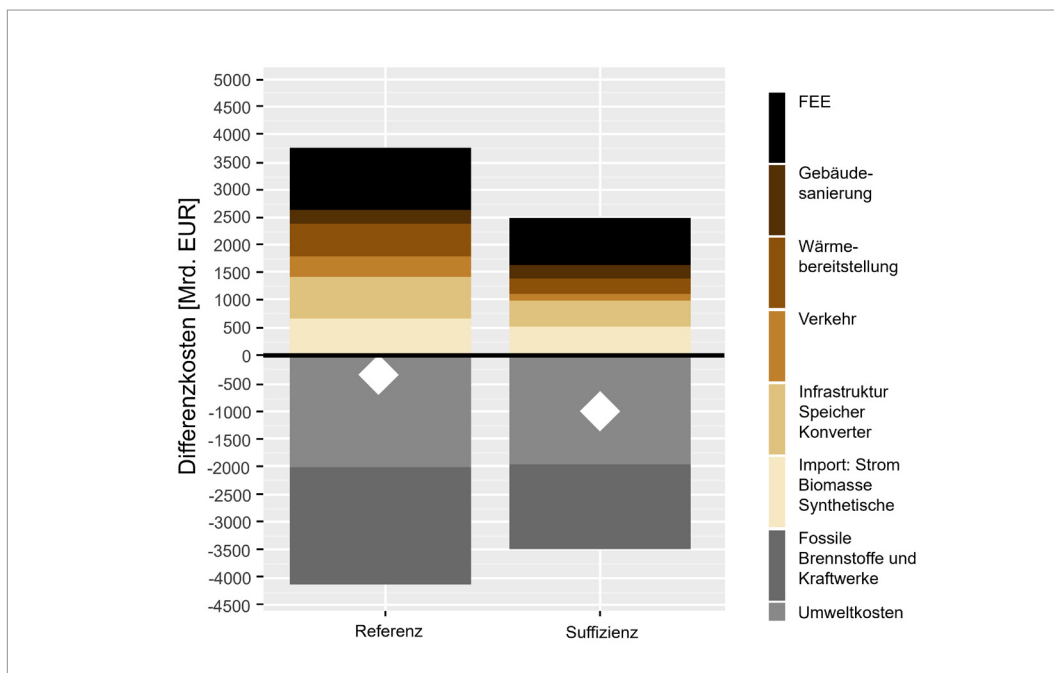
- Verlagerung
 - Push: Besteuerung/Deattraktivierung des PKW
 - Pull: attraktive Preise/Infrastruktur
- Vermeidung
 - Push: Verbote, können auch SUV-Werbeverbote sein
 - Pull: Attraktivitätssteigerung kurzer Wege (lokale Infrastruktur)

Modelle und Instrumente für Suffizienzpolitik

Um das Potenzial von Suffizienz zu quantifizieren und Argumente zur Realisierbarkeit von Suffizienz anbieten zu können, arbeiten Wissenschaftler:innen derzeit an einer Verknüpfung von Policies in Modellen, insbesondere in Nachfrage-Modellen (13).

Legitimität von Suffizienzpolitik

Die Legitimität von Suffizienzpolitik in der sozialen Marktwirtschaft ist umstritten. Im Rahmen der BMBF-Nachwuchsforschungsgruppe EnSu (<https://energysufficiency.de/>) wurde daher die Rolle von Suffizienzpolitik in unterschiedlichen



► *Abbildung 1*

Suffizienz kann Transformationskosten senken.

Die Abbildung zeigt die Differenzkosten (Mehrkosten im Vergleich zu einem Fortschreiben des heutigen Systems) für zwei Szenarien mit und ohne Suffizienz.

rechts: Suffizienz-Szenario links: Referenz-Szenario

Die Raute zeigt die Summe aus Mehr- und Minderaufwendungen. FEE = Fluktuierende Erneuerbare Energien (PV, Wind)

(Quelle: Fraunhofer ISE [10])

politischen Arenen analysiert: Eine vergleichende Inhaltsanalyse der nationalen Energie- und Klimaläne (NECPs) von EU-Staaten und der Empfehlungen von Bürger:innenräten auf nationaler Ebene in zehn europäischen Staaten sowie der EU wurde durchgeführt (7). Die Empfehlungen der Bürger:innenräte beinhalten 332 Suffizienzmaßnahmen (39% an allen Klimaschutzmaßnahmen), womit der Anteil je nach Land drei bis sechs Mal über dem Anteil in den NECPs liegt. Die meisten Maßnahmen beziehen sich auf den Mobilitätssektor, die wenigsten auf den Gebäudesektor. Anders als bei den NECPs werden ordnungspolitische Instrumente mit Abstand am häufigsten vorgeschlagen. Die durchschnittliche Zustimmungsraten zu Suffizienzmaßnahmen ist hoch (93%), wobei die höchsten Raten bei ordnungspolitischen Maßnahmen zu verzeichnen sind. Folglich können die Empfehlungen als Forderung nach einer Suffizienzwende mit Fokus auf Ordnungspolitik interpretiert werden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die untergeordnete Rolle von Suffizienz in der gegenwärtigen Klimaschutzpolitik nicht auf einen Mangel an Legitimität zurückzuführen ist. Die Vernachlässigung der Suffizienz scheint vielmehr dem fehlendem Mut seitens der Politik, dem Ablauf politischer Entscheidungsprozesse und einflussreichen Gegeninteressen geschuldet.

Fazit

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass Suffizienz auf verschiedenen Ebenen zur Prävention von Krisen beitragen kann. Insbesondere die Reduktion von Abhängigkeiten und Zielkonflikten sind hier zu nennen. In unterschiedlichen Forschungsvorhaben von Instituten des FVEE werden Potenziale von Szenarien und Politikmaßnahmen gezeigt. Diese Potenziale künftig stärker zu berücksichtigen und Suffizienz als Strategie umzusetzen ist wichtig, zusätzlich zu etablierten Klimaschutzstrategien, um die Resilienz des Systems und des Transformationsprozesses zu erhöhen. Die konkrete Umsetzung in Politik und Gesellschaft erscheint als das zentrale Problemfeld der Zukunft. Der FVEE ist mit vielfältigen Ansätzen auf den verschiedensten Ebenen der Suffizienzforschung aktiv. Ein systematisches Monitoring und ein Ausbau dieser Aktivitäten wären wünschenswert.

Literatur

1. Best, B. Kurzanalyse: Suffizienzansätze in der nationalen Energie- und Klimapolitik in Deutschland. (2022).
2. Dratsdrummer, F., Witzel, B. & Kuhn, R. Akzeptanz für erneuerbare Energien und energie-suffizientes Verhalten: Faktoren, Potenziale und Bereitschaften in Deutschland. (2023).
3. Wuppertal Institut. Suffizienzpolitik als Booster zum Erreichen der Klimaschutzziele. (2023).
4. Herrmann, U. Das Ende des Kapitalismus: Warum Wachstum und Klimaschutz nicht vereinbar sind – und wie wir in Zukunft leben werden. (Kiepenheuer & Witsch, 2023).
5. Autor:innengruppe Energiesuffizienz. Energiesparen als Schlüssel zur Energiesicherheit – Suffizienz als Strategie. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6419202> (2022).
6. Daly, H. E. The Economics of the Steady State. *The American Economic Review* 64, 15–21 (1974).
7. Lage, J. et al. Citizens call for sufficiency and regulation — A comparison of European citizen assemblies and National Energy and Climate Plans. *Energy Research & Social Science* 104, 1–14 (2023).
8. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change - Summary for Policymakers. (2022).
9. IPCC. Figure SPM.6: Indicative potential of demand-side mitigation options by 2050. [ipcc.ch https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/figures/summary-for-policymakers/figure-spm-6/](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/figures/summary-for-policymakers/figure-spm-6/) (2022).
10. Brandes, J. et al. Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen - Update unter der Zielvorgabe von 65% CO₂-Reduktion in 2030 und 100% in 2050. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html> (2020).
11. négaWatt Association. CLEVER Executive summary - Climate neutrality, Energy security and Sustainability: A pathway to bridge the gap through Sufficiency, Efficiency and Renewables. https://clever-energy-scenario.eu/clever_final_report-exec_summary/ (2023).
12. Lehmann, P. et al. Der Windenergie an Land ausreichend Flächen bereitstellen. <https://home.uni-leipzig.de/multiplee/wp-content/uploads/2022/05/Multiplee-Policy-Brief-Der-Windenergie-an-Land-ausreichend-Fla%CC%88chen-bereitstellen.pdf> (2022).
13. Thema, J., Reul, J., Arnz, M. & Wiese, F. Drivers of Car Driving: Lessons from a Survey on Car Ownership and Usage in Germany. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* (under review).

Energiesystem-Resilienz in Szenarien und Transformationspfaden

Im Zentrum dieses Beitrags steht die Frage, wie Resilienz bei der Modellierung zukünftiger Energiesysteme berücksichtigt werden kann. Dabei wird einerseits die Ausgestaltung von Zielsystemen und andererseits die Pfadentwicklung zur Erreichung dieser Systeme betrachtet. Die Resilienz umfasst die Fähigkeit der Zielsysteme, bei Störungen oder Teilausfällen nicht vollständig zu versagen, sondern wesentliche Systemdienstleistungen ohne größere Beeinträchtigungen aufrecht zu erhalten, aber auch die Fähigkeit der Pfade, trotz disruptiver Ereignisse die Klimaziele zu erreichen.

Energieszenarien liefern wichtiges Orientierungswissen für Entscheidungsträger:innen, die an der Transformation des Energiesystems beteiligt sind. Die Szenarien sind in der Regel auf die Ermittlung von Pfaden zur Erreichung einer klimaneutralen Energieversorgung ausgerichtet. In vielen Fällen kommen dabei kostenminimierende Energiesystemmodelle zum Einsatz.

Der Aspekt der Versorgungssicherheit wird häufig durch die Annahme von Überkapazitäten bei der Stromerzeugung und -übertragung abgebildet (Merten et al. 2023). Die Versorgungssicherheit mit anderen Energieträgern wie Wasserstoff oder synthetischen flüssigen Kraftstoffen steht in den meisten Szenarien nicht im Mittelpunkt.

Resilienz ist allerdings nicht mit Versorgungssicherheit oder der Vorhaltung zusätzlicher Leistung gleichzusetzen. Es besteht daher der Bedarf einer ergänzenden Berücksichtigung der Resilienz bei der Erstellung von Szenarien für die Umsetzung der Energiewende.

Die Transformation des Energiesystems führt zu neuen Anforderungen an die Resilienz. Einflussfaktoren sind dabei insbesondere die Volatilität erneuerbarer Energiequellen, die Dezentralisierung, die Digitalisierung und die Sektorenkopplung. Hinzu kommen Auswirkungen des Klimawandels, der sich nicht nur auf mögliche Extremwetterlagen, sondern auch auf den regulären Systembetrieb auswirkt. Mit Blick auf die verschiedenen Transformationspfade sind zudem insbesondere politische, wirtschaftliche, gesellschaftliche und technologische Entwicklungen zu nennen, die einen Einfluss auf die Resilienz haben.

Sektorenkopplung

Wie sich die veränderten Systemeigenschaften auf die Resilienz auswirken, soll exemplarisch anhand der Sektorenkopplung dargestellt werden. Mit dem Ausbau der Sektorenkopplung kommen zusätzliche Wandlungsanlagen und Speicher zum Einsatz. Die damit erhöhte Redundanz und Dezentralität der Anlagen kann eine Ausbreitung von Störungen reduzieren, was beides der Resilienz zuträglich ist. Andererseits kann die erhöhte Abhängigkeit von Strominfrastrukturen auf Verteilnetzebene eine Ausbreitung von Störungen auf die Wärmeversorgung und den Verkehrssektor begünstigen. Am Beispiel der Sektorenkopplung wird auch deutlich, dass sich Akteursinteressen auf den effektiven Resilienzbeitrag dezentraler Technologien auswirken: so spielen z.B. Kriterien wie Klimafreundlichkeit und Stromsystemnutzen beim Kauf von Elektrofahrzeugen weder für die Kaufentscheidung noch für das Nutzungs- und ggf. Ladeverhalten eine wesentliche Rolle.

Modellbasierte Analyse von Resilienz

Eine modellgestützte Untersuchung von Resilienz erfordert die Definition sowie eine Abschätzung der kurz- und langfristigen Wirkungen von Stressfällen bzw. disruptiven Ereignissen. Ein Beispiel für einen Stressfall könnte eine Extremwetterlage im Winter sein, bei der zunächst ein Sturm Schäden an Windenergieanlagen und Stromleitungen verursacht, und eine anschließende Dunkelflaute zu weiteren Herausforderungen bei der Energieversorgung führt. Für eine solche Berücksichtigung im Modell müssen die Wirkungen auf das Energiesystem, wie Ort, Zeitpunkt und Dauer der Beeinträchtigung, quantifiziert werden. Dies gilt gleichermaßen auch für disruptive Ereignisse und deren Einbindung in die modellgestützte Analyse von Transformationspfaden. Aufgrund der Vielzahl möglicher Ereignisse empfiehlt sich zunächst eine Fokussierung auf ausgewählte Ereignisse. Hierzu bietet sich der Einsatz von Stakeholder-Konsultationen unterstützt durch z.B. Risiko-Matrizen an (► Abbildung 1).



DLR

Dr. Hans Christian Gils
hans-christian.gils@dlr.de

Dr. Henning Wigger
henning.wigger@dlr.de

Fraunhofer IEE

Dr. Philipp Härtel
philipp.haertel@iee.fraunhofer.de

FZ Jülich

Dr. Stefan Vögele
s.voegel@fz-juelich.de

ISFH

Dr. Raphael Niepelt
niepelt@isfh.de

KIT

Dr. Sadeeb S. Ottenburger
sadeeb.ottenburger@kit.edu

UFZ

Dr. Reinhold Lehneis
reinhold.lehneis@ufz.de

David Manske
david.manske@ufz.de

Wuppertal Institut

Dr. Larissa Doré
larissa.dore@wupperinst.org

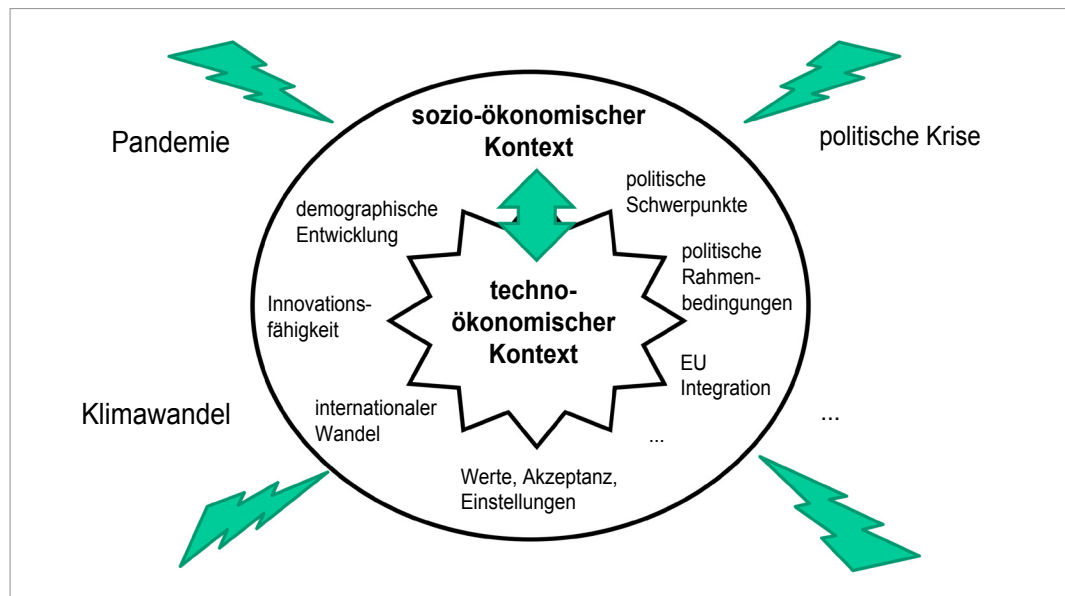
Frank Merten
frank.merten@wupperinst.org

ZSW

Andreas Püttner
andreas.puettn@zsw-bw.de

► Abbildung 1

Analyse der Resilienz von Zukunftssystemen:
exemplarischer Untersuchungsrahmen
 (Quelle: RESUR/FZ)



Die beschriebene Vorgehensweise einer Quantifizierung und modellbasierten Untersuchung spezifischer Stressfälle oder Disruptionen wird als inzidenzbasierte Verletzlichkeitsanalyse bezeichnet. Mit Blick auf die übliche Vorgehensweise bei der Modellierung von Energiesystemen werden zur Modellierung dieser Beeinträchtigungen spezifische Modelleingangsdaten modifiziert. Dies kann insbesondere eine Anpassung der Nachfrageprofile verschiedener Energieträger, der Verfügbarkeit von Energie aus erneuerbaren Quellen, eine reduzierte Verfügbarkeit von (Netz-)Infrastrukturen oder eine reduzierte Performance von gewissen Anlagen umfassen (Gils et al. 2023).

Ein alternatives Vorgehen stellt die strukturelle Verletzlichkeitsanalyse dar, bei der die Analyse von Systemcharakteristika im Vordergrund steht, die zu einer Stärkung oder Schwächung der Resilienz führen können. Beispiele hierfür sind eine hohe technologische Vielfalt oder die Abhängigkeit von einzelnen Anlagen. Resilienzfördernde Eigenschaften wie die genannte technologische Vielfalt können als zusätzliche Randbedingungen in das Systemdesign mit Energiesystemmodellen integriert werden (Sasanpour et al. 2021).

Die Resilienzanalyse erfordert auch eine erweiterte Berücksichtigung von Unsicherheiten in Energiesystemmodellen. Sensitivitätsanalysen mittels deterministischer Analysewerkzeuge, wie z.B. Optimierungsmodelle, können zwar wichtige Aufschlüsse hinsichtlich wichtiger Determinanten im Energiesystem geben, haben aber letztlich wenig mit der Optimalität einer Optimierung zu tun, bei der ein

Teil der Parameter mit Unsicherheiten behaftet ist (Wallace, 2000).

So sollte das bisher dominante Vorgehen der Berücksichtigung von Sensitivitätsanalysen ergänzt oder ersetzt werden durch eine endogene Betrachtung von Unsicherheiten. In Abhängigkeit der Forschungsfrage kommt es hierbei auf die Wahl sogenannter Risikoooperatoren an. Diese quantifizieren das mit den unsicheren Parametern verbundene Risiko, welches mit übermäßigen Systemkosten oder -verlusten oder der Verletzung wichtiger Nebenbedingungen im Energiesystem einhergeht. Die Festlegung der Risikoooperatoren und somit auch der Modellformulierung hängt zum einen von dem vorhandenen Wissen über die unsicheren Parameter ab und wird zum anderen dadurch bestimmt, wie die Auswirkungen auf das Entscheidungsproblem modelliert werden. Beispielsweise können hier Verfahren der zwei- und mehrstufigen stochastischen Optimierung (Härtel & Frischmuth, unveröffentlicht) oder der robusten Optimierung realisiert werden. So können gleichermaßen kurz- und langfristige Unsicherheiten modelliert, und Lösungen gefunden werden, die eine optimierte Abwägung zwischen Risiken und zusätzlichen Kosten widerspiegeln.

Konfliktpotenziale in Energiewendeszenarien

Energiewendeszenarien können aufgrund ihrer vorgegebenen Zielsetzungen häufig nur am Rande auf gesellschaftliche Herausforderungen oder Konflikte eingehen. Mit einer systematischen und prospektiven Betrachtung kann ein Beitrag dazu

	Fokusjahr	Klimaneutrales D	RESCUE – Green Late	RESCUE- Green Supreme	BMWi TN Strom	BMWi TN H2G	BMWi TN PtG / PtX
1) Flächennutzungs-konkurrenz	2030	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	2050	Orange	Orange	Yellow	Orange	Orange	Yellow
2) Regelungen zur Ausgestaltung der Energiewende	2030	Yellow	Yellow	Yellow	Orange	Yellow	Yellow
	2050	Red	Red	Yellow	Red	Red	Orange
3) Wohn- und Lebensqualität vor Ort	2030	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	2050	Red	Red	Orange	Red	Red	Orange
4) Nutzung von Technologien und Infrastruktur	2030	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Orange
	2050	Orange	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange

geleistet werden, Konflikte, die mit der Umsetzung der Energiewende im Strombereich verbunden sind, hinsichtlich ihres (zukünftigen) Konfliktpotenzials zu bewerten.

Im Projekt SyKonaS¹ wurde eine Typologie von Energiewendekonflikten erarbeitet und um eine korrespondierende Aufarbeitung bestehender Instrumente zur Konfliktbearbeitung ergänzt. Auf dieser Basis wurde das Konfliktpotenzial verschiedener Energiewendeszenarien mittels eines Indikatorensystems abgeschätzt (► Abbildung 2). Die Analyse zeigt auf, dass je nach gewählten Energiewendepfaden bzw. Technologieschwerpunkten Konflikte unterschiedlich schwer ausfallen können.

Zugleich bestehen aber auch Themen, die szenario-unabhängig zu schweren Konflikten führen können. Mittels einer semi-quantitativen Systemanalyse (Cross-Impact Bilanzanalyse) konnten zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen Konfliktlinien und Richtungsentscheidungen der Energiewende abgeschätzt werden, die es für die weitere Umsetzung zu beachten gilt. Zukünftig sollten sozio-technische Aspekte daher in techno-ökonomische Energiewendeszenarien integriert werden. Dadurch können frühzeitig bzw. vorausschauend Informationen für Energiewendeakteure zur Verfügung gestellt werden, welche Konfliktthemen in besonderem Maße mit Konfliktlösungsinstrumenten bei der Wahl von konkreten Energiewendepfaden, aber auch pfadunabhängig, für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende bespielt werden müssen. Dies bietet die Möglichkeit, bestehende Instrumente auf zu erwartende Konfliktthemen anzupassen und dadurch die Resilienz des Energiesystems insgesamt zu erhöhen.

Datengrundlage

Eine fundierte Bewertung der Resilienz erfordert zudem eine gute Datengrundlage über das heutige Energiesystem mit all seinen Teilsystemen von der Stromerzeugung über den Transport bis zu den Verbrauchern. Der Datenbedarf modellgestützter Resilienzanalysen umfasst dabei nicht nur Bestandsinfrastrukturen, sondern beinhaltet z.B. auch Informationen über die Nachfrageentwicklung und die Ausprägung von Stressfällen.

Der schnell fortschreitende Klimawandel und die daher notwendige beschleunigte Dekarbonisierung des Stromsektors rücken auch die erneuerbaren Energien immer stärker ins Blickfeld der Resilienz-bewertung. Die Stromerzeugung aus diesen zahlreichen und dezentralen Energieanlagen ist aufgrund strenger Datenschutzrichtlinien in Deutschland derzeit nicht öffentlich verfügbar. Die Bestimmung der Stromerzeugung aus wetterabhängigen erneuerbaren Energien, wie Windenergie und Photovoltaik, kann stattdessen mit Hilfe von Simulationsmodellen unter Verwendung detaillierter Anlagen- und Wetterdaten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung berechnet werden (Lehneis et al. 2022). Die räumlich aufgelöste Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Verbindung mit dem Stromverbrauch zeigt mögliche Schwachstellen auch bezüglich der Resilienz im Energiesystem auf. Mittels aussagekräftiger Kennzahlen, wie z.B. der Deckungsrate = Stromerzeugung / Stromverbrauch, lassen sich lokal vorhandene Defizite bzw. noch ungenutzte Potenziale mit hoher räumlicher Auflösung analysieren.

► Abbildung 2

Matrix der Konfliktbewertung von Szenarien

anhand ausgewählter Indikatoren (Ausschnitt). Das Konfliktpotenzial steigt von gelb über orange zu rot an.

(Quelle: SyKonaS)

¹ Forschungsprojekt SyKonaS - Systemische Konfliktanalyse mittels Szenariotechnik, <https://www.enargus.de/search/?q=01226362%2F1>

Weiterentwicklung von Technologien

Für die Entwicklung resilienter Transformationspfade ist zu beachten, dass zukünftige Technologieentwicklungen und -sprünge die optimale Auslegung eines Energiesystems stark beeinflussen können. Damit einhergehende Kostensenkungen haben in der Regel keinen offenkundigen negativen Einfluss auf die Resilienz des Gesamtsystems. Unterschiedliche Kostenentwicklungen verschiedener, miteinander in Konkurrenz stehender Technologien können jedoch dazu führen, dass sich die Konkurrenzfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit einzelner Technologien, Standorte und Infrastruktursysteme verändern.

Ein einfaches Beispiel für diesen Effekt ist die Veränderung des optimalen Verhältnisses von Wind- zu Solarenergie der H₂-Produktion, das sich mit sinkenden Kosten für die Elektrolysetechnologie hin zu mehr Solarenergie verschiebt (Niepelt et al. 2023). Während die Technologieentwicklung überall in Europa zu sinkenden H₂-Gestehungskosten führt, rücken die Regionen jedoch preislich enger zusammen. Dies könnte zu einer konkurrenzfähigeren Vor-Ort-Produktion von H₂ führen, da die Transportkosten unberührt bleiben und auch Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von H₂-Transportinfrastruktur mit sich bringen. Bei der Ableitung resilienter Transformationspfade sollten Möglichkeiten zur Weiterentwicklung von Technologien daher mitbetrachtet werden.

Jede planerische Maßnahme zur Steigerung der Resilienz muss sich im übergeordneten Konzept der Nachhaltigkeit messen lassen und sich dabei in einem Entscheidungsprozess behaupten. Auch wenn die Entscheidung für oder gegen eine Resilienzmaßnahme auf den ersten Blick trivial erscheint, werden beim genaueren Hinschauen verschiedene Zielkonflikte deutlich. Diese Zielkonflikte betreffen insbesondere die Effizienz (z.B. führt eine höhere ökonomische Effizienz zu weniger Resilienz aufgrund geringerer Redundanz) und/oder Suffizienz technologischer Optionen, die bei der Wahl potenzieller Resilienzmaßnahmen eine Rolle spielen können.

Im Kontext der Energiesystemtransformation hat das Projekt ReMoDigital² untersucht, inwieweit sich verschiedene Konstellationen von PV-Batteriespeichern in Heimsystemen (PVBS) und private Ladepunkte für Batteriefahrzeuge, sowie stationäre Großbatteriespeicher auf die Resilienz und Nachhaltigkeit am Beispiels eines MONA 44 Referenznetzwerkes auswir-

ken (Netz et al. 2023). Es konnte gezeigt werden, dass die zusätzliche PVBS in Verbindung mit einem Großbatteriespeicher die Resilienz gegenüber externen disruptiven Ereignissen erhöhen. Dabei hatte der Großbatteriespeicher den höchsten Resilienzbeitrag mit bis zu 20% weniger Ausfällen im Vergleich zu einem Verteilnetz ohne zusätzliche Resilienzmaßnahmen. Aus ökonomischer und ökologischer Perspektive stellt der Großspeicher jedoch in diesem Beispiel wesentlich höhere „Speicher-/Stromgestehungskosten“ sowie höhere Umweltwirkungen im Bereich Klimawandel sowie Ressourcenverbrauch (Mineralien und Metalle) im Vergleich zu den PVBS-Maßnahmen dar. Dies unterstreicht die Relevanz des multikriteriellen Entscheidungsproblems, das durch die zusätzliche Dimension der Resilienz nochmals komplexer wird. Daher werden in Zukunft Methoden benötigt, die Resilienz und Nachhaltigkeitsperspektiven gleichzeitig in den Blick nehmen können.

Städtische Resilienz wird in großem Maße von der Funktionsfähigkeit kritischer Dienste wie Kommunikation und Gesundheitsversorgung bestimmt, die in zunehmendem Maße von einer zuverlässigen Stromversorgung abhängen (Ottenburger et al. 2023). Vor dem Hintergrund zunehmender Risiken müssen vor allem kritische Lasten stärker in der Energiesystemplanung berücksichtigt werden.

Allerdings ist die Energiewende in städtischen Verteilnetzen aufgrund begrenzter räumlicher Kapazitäten und zahlreicher Randbedingungen nicht trivial. Dennoch eröffnet dieser Prozess eine einzigartige Gelegenheit, über die Auswirkungen von Design-Entscheidungen auf Resilienz, Nachhaltigkeit und soziale Gerechtigkeit nachzudenken.

Lokale intelligente Stromnetze, sog. Microgrids, welche unabhängig vom Verteilnetz (off-grid) betrieben werden können, um eine lokale und dezentrale Stromversorgung aufrechtzuerhalten, stellen aus Sicht der Resilienzforschung ein vielversprechendes Konzept dar, das in vielen Teilen der Welt erfolgreich angewandt wird. Microgrids haben das Potenzial, systemische Risiken zu minimieren und kritische Dienste gezielt zu schützen. Allerdings sollte bei der Planung von Microgrids ein bisher wenig beachteter Aspekt stärker berücksichtigt werden, nämlich die Schaffung neuer räumlicher Grenzen. Die Festlegung von Grenzen ist ein subtiler Planungsparameter, da Grenzen stets mit sozialen Implikationen verbunden sind und Fragen zur Gerechtigkeit und Fairness provozieren. Außerdem kann eine ungünstige Microgrid-Planung unter Umständen die städtische Resilienz auf ein

² Projekt ReMoDigital – Resilienzmonitoring für die Digitalisierung der Energiewende. Gefördert aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, BMWK FKZ: 03E11020C

niedrigeres Niveau drücken, als möglich gewesen wäre, ohne dass notwendigerweise mehr Geld investiert worden wäre.

Fazit

Zusammengefasst unterstreichen die Forschungsarbeiten der Institute im FVEE die Notwendigkeit der Entwicklung und Anwendung neuer Instrumente und Methoden für die Resilienzbewertung nachhaltiger Energiesysteme. Diese muss begleitet werden durch die Ermittlung belastbarer Daten zur zukünftigen Entwicklung von Technologien und Systemen. Für die modellgestützte Ermittlung von resilienten Transformationspfaden für das Energiesystem müssen gleichermaßen die Wirkung von disruptiven Ereignissen und von Stressfällen in den Blick genommen werden. Dabei ist es erforderlich, neben techno-ökonomischen und ökologischen Aspekten auch das sozio-ökonomische System in Betracht zu ziehen. Zudem gilt es, auch sich überlagernde Ereignisse in Betracht zu ziehen, da ein resilientes System auch gegen solche gewappnet sein muss.

Referenzen

- Merten, F., Doré, L., Pastowski, A. (2023) Grüner Wasserstoff und Wasserstoffderivate – Kernelemente einer nachhaltigen und sicheren Energieversorgung Deutschlands, Forschungsbericht.
- Sasanpour, S., Cao, K.-K., Gils, H.C., Jochem, P. (2021) Strategic policy targets and the contribution of hydrogen in a 100% renewable European power system. *Energy Reports*, pp. 4595-4608. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.005>
- Gils, H.C., Yeligeti, M., Sasanpour, S. (2023) Resilienzbewertung zukünftiger integrierter Energiesysteme mit einem optimierenden Infrastrukturplanungsmodell, 13. Internationale Energiewirtschaftstagung
- Härtel, P., Frischmuth, F. (unveröffentlicht) EMPRICE – Multistage stochastic programming with progressive hedging for planning integrated energy system transformations under uncertainty, under Review.
- Lehneis, R., Manske, D., Schinkel, B., Thrän, D. (2022) Spatiotemporal Modeling of the Electricity Production from Variable Renewable Energies in Germany. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 11, 90. <https://doi.org/10.3390/ijgi11020090>
- Niepelt, R., Schlemminger, M., Bredemeier, D. et al. (2023) The influence of falling costs for electrolyzers on the location factors for green hydrogen production. *Sol. RRL*, 7, 2300317. <https://doi.org/10.1002/solr.202300317>
- Netz, H., Schönwandt, I., Wigger, H.; et al. (2023) Integrating sustainability and resilience aspects into power system technology assessments. IEEE PES ISGT Europe 2023, Grenoble, France, accepted for presentation
- Ottenburger, S.S., Ufer, U. (2023) Smart cities at risk: Systemic risk drivers in the blind spot of long term governance, *Risk Analysis*; pp. 1-11, <https://doi.org/10.1111/risa.14102>
- Wallace (2000) Decision Making Under Uncertainty: Is Sensitivity Analysis of Any Use? In *Operations Research* 48 (1), pp. 20-25. DOI: 10.1287/opre.48.1.20.12441

Technologiespektrum und Strategien für resilientere Energiesysteme



CAE
Prof. Dr. Fabian Scheller
fabian.scheller@cae-zeroarbon.de

DBFZ
Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

Dr. Franziska Müller-Langer
franziska.mueller-langer@dbfz.de

DLR
Dr. Martin Henke
martin.henke@dlr.de

Dr. Martin Vehse
martin.vehse@dlr.de

Fraunhofer IEE
Norman Gerhardt
norman.gerhardt@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Dr. Peter Schossig
peter.schossig@ise.fraunhofer.de
Dr. Jakob Ungerland
jakob.ungerland@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich
Dr. Theresa Groß
t.gross@fz-juelich.de

KIT
Prof. Dr. Jörg Matthes
joerg.matthes@kit.edu
Dr. Volker Stelzer
volker.stelzer@kit.edu
Dr. Markus Vogelbacher
markus.vogelbacher@kit.edu

Max Kollmer
max.kollmer@kit.edu

ZAE
Dr. Manuel Riepl
manuel.riepl@zae-bayern.de

Herausforderungen in erneuerbaren Energiesystemen

Die Umstellung auf erneuerbare Energien im Kontext zunehmender Elektrifizierung bewirkt einen wesentlichen Wandel in der Systemstabilität und Versorgungssicherheit (Möst et al. 2023). Obwohl dieser Schritt in Richtung Dezentralisierung mehr Unabhängigkeit und Nachhaltigkeit verspricht, bringt er auch neue Herausforderungen mit sich. Insbesondere werfen diese Veränderungen wichtige Fragen bezüglich der Resilienz von Energiesystemen auf.

Die Wetterabhängigkeit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen führt zu volatilen Strommarktpreisen, was sowohl für Unternehmen als auch für private Haushalte eine Herausforderung darstellt. Beispielsweise könnten mittelfristig Haushalte mit Elektroautos aufgrund des erhöhten Strombedarfs für das Laden der Fahrzeuge von Preisschwankungen betroffen sein. Zusätzlich können neue sektorenübergreifende Technologien, wie Wärmepumpen, in den Wintermonaten zu einer erhöhten Belastung des Stromnetzes und einem Anstieg der Spitzenlast führen (Gunkel et al, 2022).

In diesem Zusammenhang ist auch eine zunehmende Abhängigkeit der Heizsysteme von Strom absehbar. So könnten beispielsweise Wärmepumpen, die zunehmend als Heizlösung eingesetzt werden, bei Stromausfällen ebenso ausfallen, was die Notwendigkeit von neuen Strategien zur Aufrechterhaltung der sektorenübergreifenden Energiesysteme unterstreicht. Die für Industrieprozesse wichtige Hochtemperaturwärme war auf Basis fossiler Energieträger zum gewünschten Bedarfszeitpunkt generierbar. Die jetzt notwendige Speicherung von Hochtemperaturwärme stellt eine Herausforderung dar, da sie kostspielig und technisch anspruchsvoll ist.

Fossile Energiesysteme auf Basis von Öl, Kohle und Gas hingegen, die zusammen das Rückgrat der Energieversorgung in Deutschland bildeten und noch heute bilden, bieten aufgrund ihrer Charakteristiken eine gewisse Systemstabilität und Systemresilienz mit geringem Aufwand. Aufgrund der geringen Zusatzkosten bzw. relativ geringen

Anschaffungskosten nutzen Unternehmen oder Haushalte in traditionellen Systemen oftmals Überkapazitäten und setzen unter anderem auf Backup-Kessel. Im gleichen Stil bieten unter anderem Heizöllager für Gemeinden oder Unternehmen eine Langzeitspeicherung, die sogar eine Kontinuität für 1-2 Jahre sicherstellen kann. In der Literatur ist auch das Beispiel des Kohlebergs zu finden, welcher mehr oder weniger als Speichermedium gesehen werden kann (Möst et al. 2023). Auch Heizsysteme, die auf fossilen Brennstoffen basieren, können Wärme ohne Strom für einige Stunden speichern.

Allerdings führt eine mangelnde Diversifizierungsstrategie im Gasbereich zu einer Abhängigkeit von Brennstoffen, was das System anfällig für politische Instabilitäten und Preisschwankungen macht. Zudem bedeutet die Tendenz zur Zentralisierung fossiler Energiesysteme, dass ein Ausfall zentraler Kraftwerke das gesamte Netz beeinträchtigen kann und diese Systeme anfällig für geopolitische Unsicherheiten sind.

Innovative Technologien für gesteigerte Resilienz

Der Übergang weg von fossilen Brennstoffen erfordert innovative Strategien und Technologien, um die Funktionsfähigkeit des Energiesystems auch unter verschiedenen Risiken sicherzustellen. Wir möchten Ihnen Einblicke in Strategieansätze und Technologien geben, die dazu beitragen können, die Widerstandsfähigkeit des Energiesystems gegenüber Schocks und Risiken auf nationaler und lokaler Ebene zu stärken. Außerdem beleuchten wir praxisnahe Beispiele für den Einsatz solcher Technologien zur Erhöhung der Systemresilienz und identifizieren Schlüsselfaktoren für ihren Erfolg.

Diese Beispiele basieren auf einer Vielzahl von Forschungsprojekten, die von Instituten des Forschungsverbands Erneuerbare Energien (FVEE) durchgeführt werden.

Sicherung der Funktionalität des transformierten Energiesystems

Im Kontext der fortschreitenden Transformation der Energieversorgung hin zu erneuerbaren Energien sind an diversen Schritten der Wertschöpfungskette innovative Strategien und Technologien erforderlich, um die Funktionalität der Systeme kontinuierlich zu gewährleisten. Resiliente Energiesysteme haben die Fähigkeit ihre Funktionalität auch unter verschiedenen „negativen (Schock)Ereignissen“ beizubehalten (Sauer 2019). Dies umfasst nicht nur die Widerstandsfähigkeit gegenüber Störungen, sondern auch das Regenerationsvermögen nach solchen Ereignissen und die Fähigkeit, aus Erfahrungen zu lernen und sich an zukünftige Herausforderungen anzupassen. Aufgrund der Vielfalt und Komplexität von Energiesystemen existiert keine universelle Definition für solche Ereignisse, die diese Systeme beeinträchtigen könnten. Deshalb ist ein proaktiver Ansatz zur Systemoptimierung entscheidend, um optimale Resilienzstrategien zu entwickeln. Eine Illustration von resilienten Systemen ist in ► Abbildung 1 gegeben.

Bei der Umsetzung von innovativen Strategien und Technologien zur Resilienzsteigerung geht es nicht nur darum, den bekannten Herausforderungen, die mit erneuerbaren Energien einhergehen, zu begegnen, sondern auch um die Integration von Lernfähigkeit und proaktiver Systemoptimierung für die eher zukünftigen und unbekannteren Herausforderungen. In diesem Sinne verstehen wir

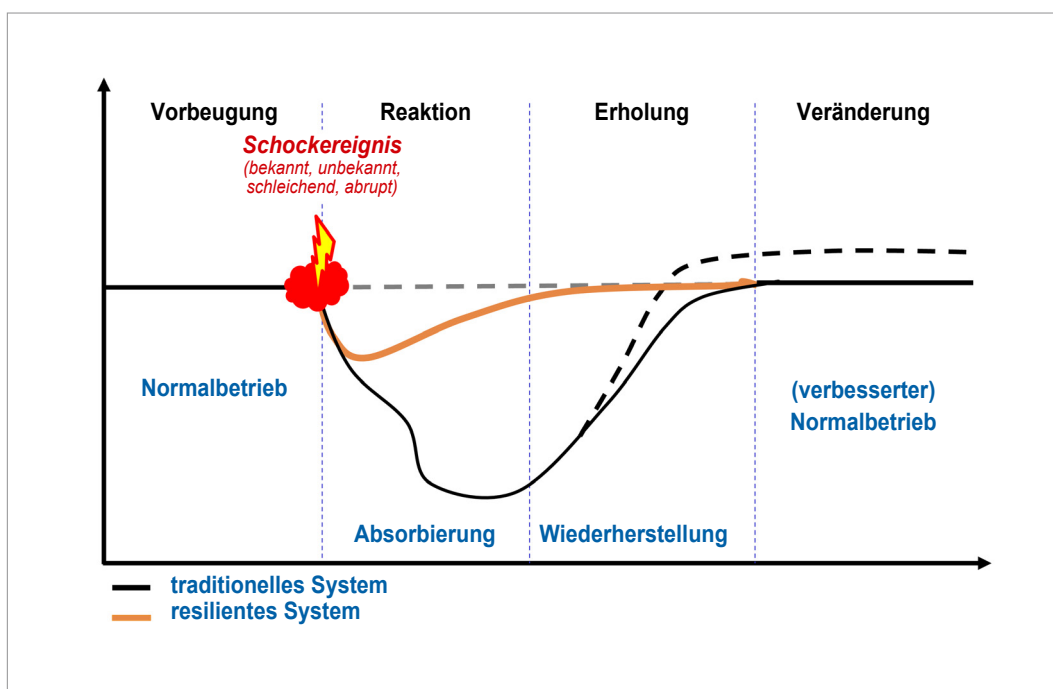
die Definition von resilienten Energiesystemen in einem breiten Kontext. Alle Strategien und Technologien, die zur Stärkung der Resilienz erneuerbarer Energiesysteme beitragen – und dies nicht nur in Zeiten von Schockereignissen – stehen im Fokus der nachfolgenden Betrachtungen.

Entwicklung von Strategien für resilientere Energiesysteme

Die Entwicklung von Strategien für resiliente Energiesysteme lässt sich in drei Hauptphasen gliedern:

1. Zuerst ist es entscheidend, ein umfassendes Verständnis der Risiken zu entwickeln und diese im Hinblick auf mögliche Systemausfälle zu klassifizieren. Dabei sollte analysiert werden, wie verschiedene Risiken das System beeinflussen und ob sie ähnliche oder unterschiedliche Auswirkungen auf die Technologie haben.
2. Als Nächstes ist es wichtig, die Resilienz quantifizierbar zu machen. Es gilt zu bewerten, inwiefern spezifische Verbesserungen dem System zugutekommen und zur Stabilisierung beitragen, selbst bei ähnlichen Risikoereignissen.
3. In der dritten Phase sollten diese Maßnahmen mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis umgesetzt werden, um die Resilienz des Systems aktiv zu stärken.

Um die Komplexität vernetzter Energiesysteme angemessen zu adressieren, ist es unerlässlich, eine Vielfalt von Perspektiven in der Resilienzbewertung zu berücksichtigen. Dies kann unter anderem



► Abbildung 1

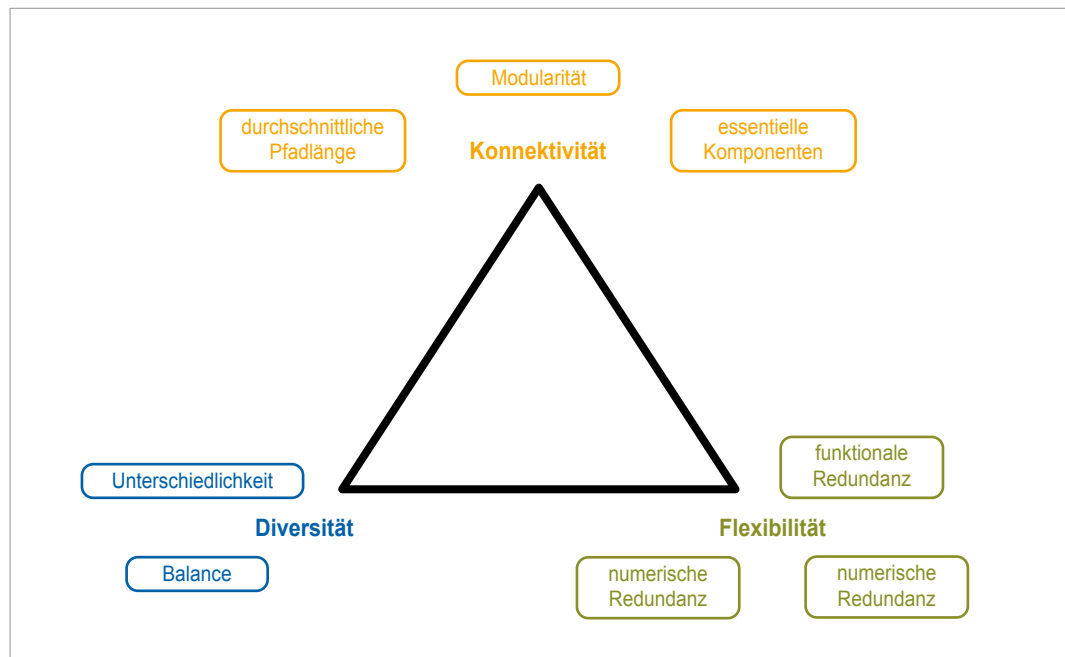
Illustrative Darstellung von resilienten Energiesystemen

(Quelle: eigene Abbildung, in Anlehnung an Mishra et al. (2022))

► Abbildung 2

Klassifikation von Kriterien zur Resilienzbewertung

(Quelle: eigene Abbildung, basierend auf Sauer 2019)



Analysen aus technischer, sozialer und ökologischer Sicht beinhalten. Zudem ist eine detaillierte Einteilung in verschiedene Dimensionen wie räumlich (national, regional, lokal), zeitlich (langfristig, kurzfristig) oder systemisch (erzeugend, übertragend, verbrauchend) hilfreich.

Bei der Bestimmung der Kriterien für Resilienz ist es wichtig, dass diese für vorhersehbare als auch unvorhersehbare Ereignisse gelten, um die Systemfunktionalität nachhaltig zu unterstützen. Angesichts der Schwierigkeit, seltene oder unvorhersehbare Schäden genau zu bewerten, sollten die Kriterien allgemein zur Aufrechterhaltung der Systemfunktionalität beitragen und gleichzeitig realisierbar und bewertbar sein. Eine breite Klassifikation von Bewertungskriterien, basierend auf einer Vielzahl von Literaturstudien zeigt ► Abbildung 2 (Sauer, 2019).

Die Funktionalität des Systems wird durch Verbesserungen in den Kriterien Konnektivität, Diversität und Flexibilität erreicht. Während sich Konnektivität auf die interne und externe Vernetzung einzelner Systemkomponenten konzentriert, fokussiert das Kriterium Diversität auf die Verschiedenartigkeit der Komponenten, die das Gesamtsystem bilden. Schlussendlich betont Flexibilität die Anpassungs- und Handlungsfähigkeit bei ungeplanten Ereignissen.

Unter Berücksichtigung unserer Definition von Resilienz existieren verschiedene technische Strategien zur Steigerung der Resilienz in erneuer-

baren Energiesystemen. Eine erste Übersicht dazu bietet ► Tabelle 1. Im Folgenden werden einzelne Beispiele für diese Strategien erörtert, die aktuell in Forschungsprojekten von verschiedenen Instituten des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien (FVEE) bearbeitet werden.

Zukünftiges Technologiespektrum für gesteigerte Energiesystemresilienz

Erneuerbare Raffinerien spielen eine Schlüsselrolle für resilientere Energiesysteme, da sie eine Diversität in der Erzeugung und Flexibilität hinsichtlich der Nutzung verschiedener Ressourcen bieten. Diese Anlagen sind nicht nur in der Lage, eine Vielzahl von Produkten wie Kraftstoffe, Nahrungs- und Futtermittel sowie multifunktionale Produkte zu erzeugen, sondern fördern auch regionale Wertschöpfungsketten. Gerade in volatilen Marktsituationen erweisen sich diese regionalen Wertschöpfungsketten als besonders widerstandsfähig und flexibel, was einen wesentlichen Beitrag zur Stärkung der Resilienz des Gesamtsystems leistet.

Wasserstoffspeicher wiederum sind entscheidend für die Überbrückung von Zeiten geringer Erzeugung erneuerbarer Energien, wie etwa bei Windstille oder geringer Sonneneinstrahlung, den sogenannten Dunkelflauten (Stolten et al., 2022). Diese Langzeitspeicher ermöglichen es, erzeugte Energie effizient zu speichern und bei Bedarf wieder ins Netz einzuspeisen, wodurch die Versorgungssicherheit auch in Zeiten schwankender Energieerzeugung

► Tabelle 1

Potenzielle technische Strategien zur Steigerung der Systemresilienz

(Quelle: eigene Abbildung)

	national	lokal
Konnektivität	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherung und Überwachung der Energie-Netzwerke • Echtzeitsteuerung von Systemkomponenten • Nutzung von Synergien durch vernetzte Wertschöpfung 	<ul style="list-style-type: none"> • Synchronisation von Energieerzeugung und -verbrauch • Unterstützung des Netzes durch bestehende Anlagen • Einführung der Inselfunktionalität für autonome Energieversorgung
Diversität	<ul style="list-style-type: none"> • Vielfalt von Brennstoffen und Energiequellen • Multiproduktanlagen für erneuerbare Produkte • diverse Technologiewege und Produktarten • Förderung eines vielseitigen Technologie-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere Wärmeversorgungsoptionen • Flexibilität in Brennstoffauswahl • Hochtemperatur-Lösungen für spezielle Anwendungen • Kombination diverser Energiequellen und Technologien
Flexibilität	<ul style="list-style-type: none"> • Verdopplung von Hauptstromkabel • überbrücken von Dunkelflauten/Versorgungslücken • netzdienliche Industrieprozesse • Anpassung an schwankende Energiepreise und Angebote 	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung an Schwankungen erneuerbarer Energien • redundante Gestaltung lokaler Stromnetzverbindungen • flexible Produktionsstrategien • Reaktion auf Fluktuationen bei erneuerbarer Erzeugung

gewährleistet wird. Diese Technologien sind somit wichtig, um die Herausforderungen der Energiewende zu bewältigen und ein stabiles, nachhaltiges Energieversorgungssystem aufzubauen.

Monitoring

Ein Echtzeit-Monitoring der Systemresilienz in einem Resilienz-Monitor ist zudem der Fokus aktueller Forschung. Zur Überwachung und Bewertung der Resilienz werden Key Performance Indicators (KPIs) berechnet. Diese Berechnungen berücksichtigen verschiedene Aspekte wie Wetterwarnungen, Grenzwertverletzungen, Inselnetzfähigkeit eines Verteilnetzabschnittes, die potenzielle Dauer einer solchen Netzinsel oder die Anzahl versorgter Kunden. Durch die Echtzeit-Berechnung der KPIs können potenzielle Risiken frühzeitig erkannt und entsprechende Handlungsanweisungen an Netzkomponenten kommuniziert werden. Ein Beispiel für eine solche Steuerung kann das präventive Laden von Energiespeichern als Reaktion auf eine Unwetterwarnung sein, um auf einen Inselnetzbetrieb vorbereitet zu sein (Ungerland et al., 2023). Dadurch wird eine proaktive und effektive Reaktion auf mögliche Störungen oder Ausfälle ermöglicht. Der Einsatz des Resilienz-Monitors ist durch das Echtzeit-Monitoring und die Echtzeit-Steuerung sowie die Einführung der Inselnetzfunktionalität eine nationale und lokale Konnektivität-Strategie zur Resilienzsteigerung.

Quartierenergiespeicher

Zukünftig wird es eine verstärkte Stromproduktion im Quartier geben, vor allem durch PV auf Dach- und Fassadenflächen, bei steigender Stromnachfrage durch Elektromobilität und Elektrowärmepumpen, die nur teilweise gleichzeitig verlaufen. Das legt nahe, dass es lokale Bemühungen gibt, die zeitliche

Ungleichheit zu überbrücken. Hierfür ist das Konzept der Quartierenergiespeicher eine Option, die an verschiedenen Orten ausprobiert wird. Neben Batteriespeichern vor allem für den kurzzeitigen Ausgleich von wenigen Stunden (vor allem Tag-Nacht) oder Tagen kann hierbei ein Hydrolyseur und eine Brennstoffzelle integriert werden. Die längerfristige Speicherung erfolgt dann in Form von Wasserstoff oder dessen Umwandlungsprodukten (Ammoniak, Methanol, grünes Methan). Durch dieses Vorgehen kann zum einen die Schaffung von Wertschöpfung lokal erhalten werden, eine relative Unabhängigkeit gegenüber Versorgungsunterbrechungen und extremen Preissprüngen erfolgen und die Notwendigkeit zum Leitungsausbau reduziert werden. In Kombination mit der Stromspeicherung können Wärmespeicher errichtet werden. Hierin kann zum einen Überschusswärme aus dem Quartier und zum anderen auch Prozesswärme aus den Stromwandelprozessen genutzt werden. Außerdem kann hier ein Shift von Wärme zu Strom und umgekehrt - je nach Rahmenbedingungen - erfolgen. Als Standorte bieten sich oft Energieinfrastrukturen an, die in der neuen Energiewelt nicht mehr benötigt werden, wie z.B. alte Kohle- und Gaskraftwerke. Je nach Ausgestaltung unterstützen somit Quartierszentralen sowohl Flexibilität als auch Konnektivität auf lokaler Ebene.

Wärmepumpen

In weiteren Forschungsarbeiten wurde eine Kopplung von Fernwärme und lokalen Wärmepumpen im urbanen Raum für die Steigerung der Resilienz von Energiesystemen aufgezeigt. Der Einsatz von Wärmepumpen mit Erdsonden in urbanen Gebieten ermöglicht die Nutzung städtischer Umweltwärme, ohne Immissionsprobleme zu verursachen. Diese Technologie

unterstützt sowohl die Kühlung im Sommer als auch die Beheizung im Winter, was zur Entlastung des Fernwärmenetzes und zur Förderung klimaneutraler Fernwärme beiträgt. Zusätzlich reduziert sie den Bedarf an herkömmlichen Energiequellen und ermöglicht durch Heiz- und Kühldecken eine effizientere Nutzung städtischer Raumressourcen. Die vollständige Regeneration des Erdreichs durch den ausgeglichenen Wärmeaustausch hilft, den Urban Heat Island-Effekt zu reduzieren. Insgesamt unterstützt diese Methode die Transformation der Fernwärmeversorgung hin zu mehr Effizienz und Nachhaltigkeit und trägt so zur Steigerung der Resilienz in städtischen Gebieten bei. Für Wohnobjekte in weniger dicht besiedelten Regionen ohne Wärmenetze bieten sich zur Resilienzsteigerung hybride Wärmelösungen z.B. aus Luft-Wasser-Wärmepumpe und Biomassefeuerung an.

Flexibilisierung

Die Integration energieintensiver Industrieprozesse in zukünftige Energiesysteme zielt auf deren Flexibilisierung ab, um einen netzdienlichen Betrieb zu ermöglichen. Dies kann durch Demand Response Management, bei dem Industrieprozessbetreiber auf flexible Strompreise reagieren, oder durch Demand Side Management, das ein direktes Abschalten von Prozesskomponenten zur Netzstabilisierung vorsieht, erreicht werden. Beide Ansätze erfordern den Aufbau neuer Speicher und automatisierungstechnische Anpassungen sowie ggf. die Ausweitung von Produktionskapazitäten und den Aufbau von Zwischenproduktspeichern. Als Beispiel kann hier unter anderem die Zementproduktion dienen. Zementwerke nutzen Lagermöglichkeiten für Überkapazitäten, um Mühlenlaufzeiten an Strompreisprognosen anzupassen, wobei Lieferzeiten und andere Randbedingungen berücksichtigt werden. Diese flexible Produktionsplanung, die täglich an Strompreise und Lieferbedingungen angepasst werden kann, ermöglicht bei Bedarf auch eine Abschaltung der Mühlen auf Anforderung des Netzbetreibers. Solche Anpassungen erhöhen die Resilienz des Energiesystems, indem sie zur Stabilisierung des Netzes beitragen und Energieangebot sowie -nachfrage ausgleichen. Dieser Ansatz ist auch für neue Bereiche wie Power-to-Fuel-Prozesse relevant, was heute auch schon bei Chlor-Alkali-Elektrolysen zu beobachten ist (Lerch et al., 2023).

Mikrogasturbinen

Eine weitere Entwicklung zur Resilienzsteigerung durch dezentrale Energiespeicherung und Sektorkopplung stellen hochtemperaturspeichergestützte Mikrogasturbinen (MGT) dar. In diesem Konzept, das aktuell am DLR entwickelt wird, kommen keramische

Speicher zum Einsatz, die strombeheizt auf bis zu 1000 °C erwärmt werden (Agelidou et al., 2022). In Zeiten hohen lokalen Wärme- und Strombedarfs wird die gespeicherte Wärme durch eine MGT im Kraft-Wärme-Kopplung-Betrieb (KWK-Betrieb) zurückverstromt. Neben dieser Betriebsweise, die effizient Tagesschwankungen zwischen Bedarf und Nachfrage ausgleicht, kann die MGT bei entleertem Wärmespeicher weiterhin brennstoffflexibel betrieben werden. So kann einerseits Wasserstoff als längerfristiges Speichermedium genutzt werden oder in Zeiten von Schockereignissen auch eine Bandbreite von anderen, besser lagerbaren Brennstoffen wie bspw. Methanol oder Biodiesel genutzt werden. Aufgrund der hohen Abwärmtemperatur von ca. 200 °C eignet sich die Lösung über die Quartiersebene hinaus auch für einige Industrieanwendungen.

Wege zu einem resilienteren Energiesystem

Die vorgestellten Strategien und das angerissene Technologiespektrum, welches auf Konnektivität, Diversität und Flexibilität abzielt, ermöglicht eine Stärkung der Resilienz von Energiesystemen. Im Wesentlichen lassen sich die folgenden Strategieoptionen zusammenfassen:

- Diversifizierung der Energiequellen: Integration einer Vielzahl von Energiequellen zur Verringerung des Risikos von Versorgungsunterbrechungen;
- Integrierte Technologie-Kopplung: Kombination und Synchronisation verschiedener Technologien und Energiequellen zur Maximierung der Effizienz und Flexibilität;
- Adaptive Steuerung und Regelung: Dynamische Anpassung und Optimierung des Systems basierend auf Echtzeitdaten und zukünftigen Prognosen, um den Betrieb in verschiedenen Szenarien zu gewährleisten;
- Multilevel-Speichersysteme: Verwendung von Speichertechnologien auf verschiedenen Ebenen, von kurz- bis langfristigen Lösungen, um die Verfügbarkeit und Reaktionsfähigkeit zu erhöhen.

Literatur

- Agelidou E., Seliger-Ost H., Henke M., Dreißigacker V., Krummrein T. & Kutne P. (2022). The Heat-Storing Micro Gas Turbine—Process Analysis and Experimental Investigation of Effects on Combustion. *Energies*, 2022, 15. Jg., Nr. 17, S. 6289
- Gunkel, P. A., Jacobsen, H. K., Bergaentzlé, C. M., Scheller, F., & Andersen, F. M. (2023). Variability in electricity consumption by category of consumer: The impact on electricity load profiles. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 147, 108852.
- Lerch, P., Scheller, F., & Bruckner, T. (2023). Potential of demand response for chlor-alkali electrolysis processes. In 2023 19th International Conference on the European Energy Market (EEM) (pp. 1-7). IEEE.
- Mishra, D. K., Ghadi, M. J., Li, L., Zhang, J., & Hossain, M. J. (2022). Active distribution system resilience quantification and enhancement through multi-microgrid and mobile energy storage. *Applied Energy*, 311, 118665.
- Möst, D., Lorenz, L., & Glynos, D. (2023). Versorgungssicherheit braucht Diversifizierung. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 47(3), 20-25.
- Sauer, E. J. (2019). Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Resilienz von elektrischen Energiesystemen.
- Stolten, D., Markewitz, P., Kraus, S., Franzmann, D., Schöb, T., Grube, T., ... & Triesch, T. (2022). Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045 (No. FZJ-2022-02577). *Technoökonomische Systemanalyse*.
- Ungerland, J., Denninger, R., Werner, D., Schroven, K., Lickert, B., Köpke, C., & Stolz, A. (2023). Improving Power System Resilience Based on Grid-Forming Converter Control and Real-Time Monitoring. In 8th IEEE Electronic Power Grid (eGrid), Karlsruhe, Germany.

Resilienz durch Energiespeicher



ZAE

Anna Kümmer
anna.kuemmer@zae-bayern.de

DBFZ

Tino Barchmann
tino.barchmann@dbfz.de

Karin Naumann
karin.naumann@dbfz.de

DLR

Dr. Martin Henke
martin.henke@dlr.de

Prof. Dr. Annelies Vandersickel
annelies.vandersickel@dlr.de

Dr. Stefan Zunft
stefan.zunft@dlr.de

Fraunhofer IEG

Dr. Peter Achtziger-Zupaničič
peter.achtziger-zupanicic@ieg.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE

Dr. Peter Nitz
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

Dr. Thomas Fluri
thomas.fluri@ise.fraunhofer.de

Oliver Fitz
oliver.fitz@ise.fraunhofer.de

Lea Eisele
lea.eisele@ise.fraunhofer.de

KIT

Prof. Dr. Eva Schill
eva.schill@kit.edu

Energiespeicher im Kontext eines resilienten Energiesystems

Das Ziel der Bundesregierung, bis 2050 die Stromversorgung nach Möglichkeit ausschließlich auf Basis erneuerbarer Energiequellen bereitzustellen, bringt große Herausforderungen im Hinblick auf die Integration fluktuierender Energiequellen mit sich [1].

Gleichzeitig bedingen verschiedene Faktoren steigende Anforderungen an die Versorgungssicherheit und Betriebssicherheit von Energiesystemen. Dazu gehören zunehmende Digitalisierung, höherer Technologisierungsgrad, die begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen oder auch politische Rahmenbedingungen.

„Resilienz“ (Widerstandsfähigkeit) wird in einem Energiesystem relevant, wenn es äußeren oder inneren Einflüssen ausgesetzt ist, die sich sowohl auf Seite der Energiebereitstellung als auch auf Seite des Energiebedarfs auswirken können. Entsprechend entstehende Schwankungen auf beiden Seiten können mittels Energiespeichern ausgeglichen oder gemindert werden, da diese Energie zeitlich und räumlich flexibel aufnehmen und abgeben können (► Abbildung 1).

Zentrale Ziele einer resilienten Energieversorgung sind dabei die Versorgungs- und Betriebssicherheit bei gleichzeitiger fortlaufender Integration erneuerbarer Energien.

Energiespeichertechnologien können je nach gespeicherter Energieform in drei Klassen unterschieden werden (► Abbildung 2):

Elektrische Speicher

speichern Energie

- elektro-statisch in Kondensatoren,
- elektro-magnetisch durch supraleitende-magnetische Energiespeicher (SMES),
- elektro-chemisch mittels Batterien,
- mechanisch (z. B. in Form von Schwungrad speichern oder Pumpspeicherkraftwerken).

Chemische Speicher

auch stoffliche Speicher genannt, speichern Energie

durch Umwandlung von elektrischer Energie in chemische Energie in Form von

- synthetischem Wasserstoff,
- Methan, Ammoniak oder
- synthetischen Kraftstoffen.

Je nach Endprodukt wird so die Speicherung und der Transport im Gasnetz, in Tanklagern oder Schiffen ermöglicht.

Thermische Speicher

speichern Energie in Form von

- fühlbarer Wärme (sensible Speicher mit flüssigem oder festem Speichermedium),
- latenter Wärme (PCM-Speicher („Phase Change Materials“) mit Phasenübergang fest-flüssig oder fest-fest) oder
- thermo-chemischer Energie (der Reaktionsenthalpie von chemischen Reaktionen oder von Ad-/Absorptionsreaktionen).

Beiträge von Energiespeichern für eine resiliente Energieversorgung

Energiespeicher können in vielerlei Hinsicht zu einer resilienten Energieversorgung beitragen:

Redundanz

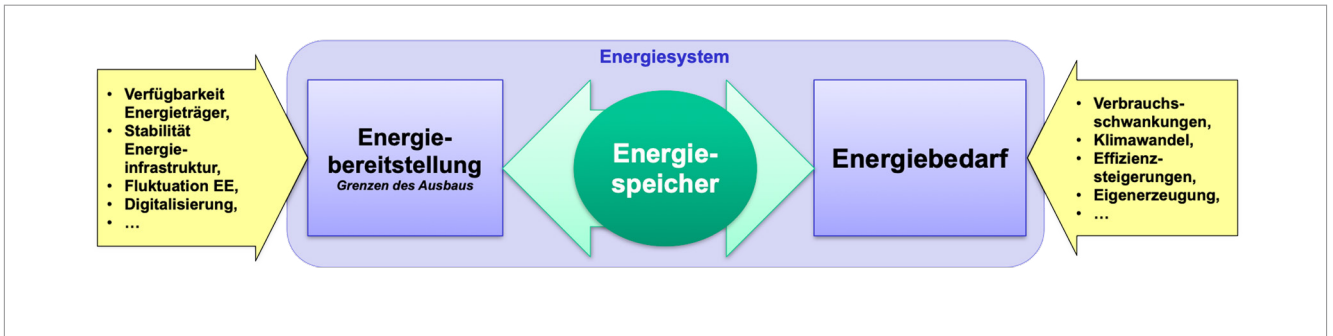
ist unter anderem erforderlich, um die Versorgungs- und Betriebssicherheit sicherzustellen. Energiespeicher aller Art können zusätzliche Kapazitäten bereithalten, die im Falle eines Versorgungsengpasses abgerufen werden können.

Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)

von energiesensiblen Einrichtungen können elektrische Speicher sicherstellen, so dass kritische Verbraucher kontrolliert abgeschaltet werden können oder eine Notstromversorgung gestartet werden kann.

Schwarzstartfähigkeit

ist erforderlich, wenn das Stromnetz ausgefallen ist. Elektrische Energiespeicher und Pumpspeicherkraftwerke können ein (Teil-)Netz ohne externe Versor-



► Abbildung 1
Rolle von Energiespeichern
 im Kontext einer resilienten Energieversorgung
 (Quelle: ZAE)

gung anfahren und für eine gewisse Zeit die netzgebundene Versorgung ersetzen.

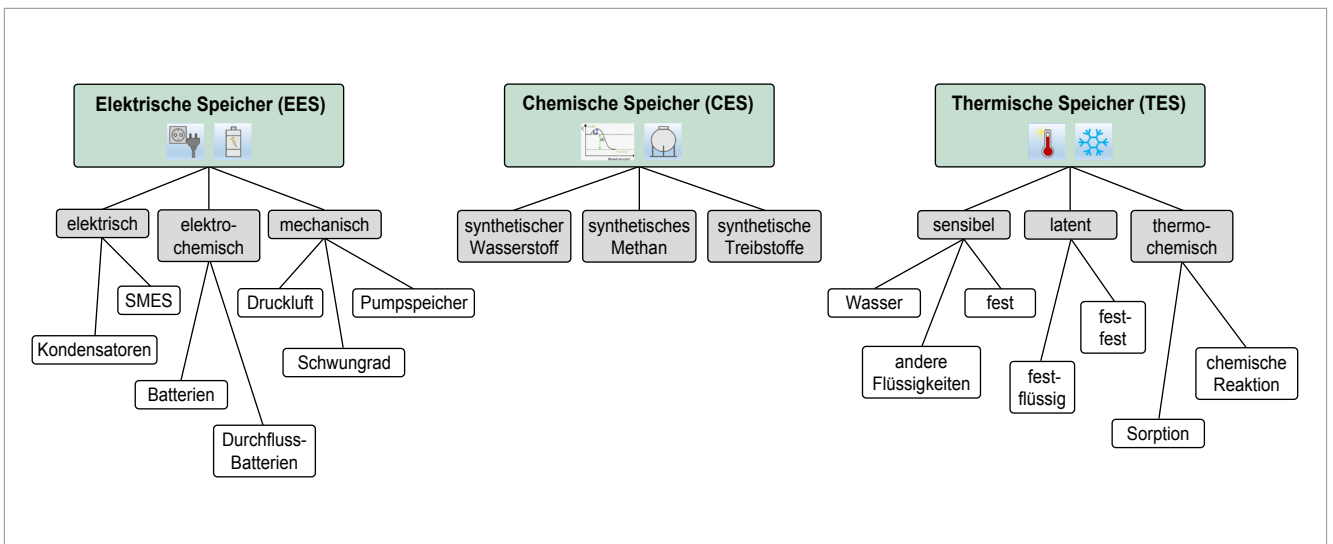
Stabilität und Regelung des Stromnetzes
 können insbesondere elektrische Speicher, aber in Kombination mit Power-to-X auch thermische und chemische Speicher unterstützen, z. B. beim Netzengpassmanagement (Redispatch), Frequenzregelung oder Spannungshaltung. Weiterhin können Energiespeicher zum schnellen Ausregeln von Residuallastgradienten in Folge der Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien eingesetzt werden und so das Stromnetz entlasten. [2]

Dezentrale Lösungen
 bei der Netzgestaltung, die die Ausbreitung von Störungen reduzieren, werden durch Energiespeicher unterstützt, ebenso die *Integration der Anwenderseite*, durch gezieltes Lastmanagement, Peak-Shaving oder durch die Einbindung und höhere Ausnutzung von Eigenerzeugungsanlagen. Dafür können Energiespeicher aller Klassen eingesetzt werden.

Erneuerbare Energien
 werden die Basis der zukünftigen Energieversorgung sein. Ihr fluktuierendes Angebot kann durch Lastverschiebung nicht vollständig an den Bedarf angepasst werden (Dunkel-Flaute). Eine resiliente Energieversorgung erfordert daher erhebliche Energiespeicherkapazitäten sowie die flexible Kopplung der Verbrauchssektoren Strom, Wärme und Mobilität.

Im Jahr 2021 setzte sich der Endenergiebedarf in Deutschland zu 58,9% aus thermischer Energie und zu 35,9% aus mechanischer Energie zusammen; bei letzterer betrug der Verkehrsanteil rd. 76% [3]. Prognosen legen nahe, dass die Wärme- und Mobilitätssektoren in Summe auch in Zukunft einen Großteil des Energiebedarfs von über 70% ausmachen werden (siehe z. B. [4], [5]). Preiswerte thermische Speicher können daher voraussichtlich einen bedeutenden Anteil der erforderlichen Speicherkapazität übernehmen. Erneuerbare Energien werden zu einem großen Teil als Strom aus Sonne und Wind geliefert [6]. Die effiziente Verteilung, Speicherung und Nutzbarmachung des erneuerbaren Stroms im Wärme- und

► Abbildung 2
Übersicht Energiespeichertechnologien
 Einteilung nach gespeicherter Energieform.
 (Quelle: ZAE)



Mobilitätssektor ist daher von entscheidender Bedeutung.

Im Rahmen einer internationalen Forschungs-kooperation der International Energy Agency (IEA) wurde in einem Task zur flexiblen Sektorenkopplung durch Energiespeicher (Task 35 „seccoflex“) unter Leitung des ZAE Bayern über Definition, Nutzen und Anwendungsmöglichkeiten flexibler Sektorenkopplung durch Energiespeicher diskutiert. Definiert man Sektoren als Verbrauchssektoren (Strom, Wärme, Mobilität), so ist über die Integration verschiedener Energiespeichertechnologien (thermisch, elektrisch und chemisch) die bedarfsgerechte Versorgung eines jeden Verbrauchssektors möglich, was die zeitliche und räumliche Flexibilität des Gesamtsystems erhöht.

Ausgehend vom Stromsektor als zentraler Einspeisequelle erneuerbarer Energien ergeben sich fünf Pfade für mögliche Sektorenkopplung wie ► Abbildung 3 zeigt:

- Strom ► Wärme:
 1. Power-to-Heat
 2. Power-to-Gas
 3. PV + Batterie für Wärmebereitstellung
- Strom ► Mobilität:
 4. Power-to-Gas/Fuel
 5. E-Mobility

Der vorläufige Stand der Auswertungen zu einer Vielzahl von Fallbeispielen auf lokaler und nationaler Ebene innerhalb des Tasks ergibt, dass durch die flexible Sektorenkopplung mit Energiespeichern in nahezu allen Fällen der Anteil erneuerbarer Energien erhöht und die Ökonomie der Gesamtsystemkosten verbessert wird.

Systemansätze und Projektbeispiele mit Energiespeichern zur Steigerung der Resilienz

Elektrische Speicher

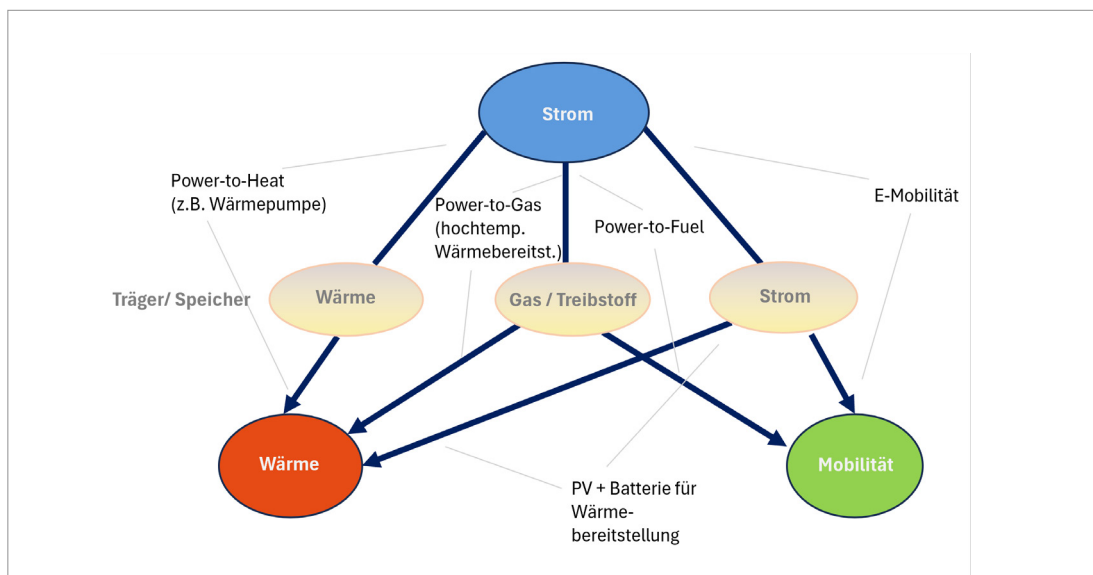
Für elektrische Speicher untersucht das Fraunhofer IEG im Projekt UPSP mit seinen Partnern, wie die Integration von Pumpspeicherwerken im Altbergbau die Bereitstellung zusätzlicher Speicherkapazitäten vor allem für Solar- und Windenergie ermöglichen kann. Der Speicher bietet dabei alle Vorteile und Nutzungsmöglichkeiten eines obertägigen Pumpspeicherkraftwerks (z. B. Netzstabilisierung, Bereitstellung hoher Backup-Kapazitäten und variabler Lastzyklen). Außerdem erfordert der Speicher nur geringen zusätzlichen Platz und geringe Zusatzkosten (aufgrund hoher Gefälle zwischen bestehenden Hohlräume und zumeist vorhandener Anbindung ans Stromnetz). Weiterhin besteht ein Resilienzbeitrag in der Dezentralisierung der Speicherinfrastruktur, welche allerdings meist auf die deutschen Mittelgebirge beschränkt ist.

Insbesondere bei elektro-chemischen Speichern ist die Verfügbarkeit von Rohstoffen ein zentrales Thema, welches die Zukunftsfähigkeit verschiedener Technologien mitentscheidet. In zwei Projekten mit Beteiligung des Fraunhofer ISE wird an Alternativen zu Lithium-Ionen-Batterien geforscht. Im Projekt INFAB (FKZ 03EI3040C) wird an Zink-Ionen-Batterien für die stationäre Energiespeicherung geforscht, welche als Heimspeicher z. B. in Kombination mit PV die Autarkie erhöhen, als Industriespeicher die Anschlussleistung/Netzbelastung reduzieren oder theoretisch als Großspeicher auch zur Netzpufferung eingesetzt werden können. Im Projekt PRONTO (FKZ WM34-42-57/19) wird an der Produktion von

► Abbildung 3

Konzept der flexiblen Sektorenkopplung:
mögliche Pfade zur Kopplung von Verbrauchssektoren mittels Energiespeichern

(Quelle: ZAE)



Natrium-Ionen-Batterien gearbeitet, die zukünftig ebenfalls als Heim- oder Industriespeicher zur Netzpufferung genutzt werden könnten oder auch für mobile Anwendungen im Stromnetz denkbar sind.

Thermische Speicher

Bei thermischen Speichern zeigt das Fraunhofer ISE im Projekt LuftBlock (FZK 03EN403A-C) mit verschiedenen Partnern, wie ein Hochtemperaturwärmespeicher, der potenziell auch elektrisch beheizbar ist, mit innovativer Füllkörpertechnologie und Luft als Wärmeträger in der Keramikindustrie zur Abwärmenutzung eingesetzt werden kann. Die Forschungsaktivitäten umfassen dabei die Weiterentwicklung der Speichertechnologie, Untersuchung der thermo-mechanischen Stabilität und der Demonstration bei hohen Temperaturen bis 900 °C. Durch den Speicher als Back-up-Wärmequelle wird zum einen die Redundanz erhöht, zum anderen ist flexible Sektorenkopplung in Form von Power-to-Heat möglich.

Weitere Beiträge zur Resilienz sind, dass durch die Eigenerzeugung die dezentrale Energiebereitstellung gefördert und die Ressourcenabhängigkeit durch ein lokal verfügbares Speichermaterial reduziert wird.

Anhand der Integration eines Hochtemperatur-speichers in ein brennstoffflexibles Mikrogas-turbinen-BHKW liefert das DLR einen Ansatz, wie eine bedarfsgerechte Strom- und Wärmeerzeugung mittels verschiedener Energiequellen (Strom, gespeicherte Wärme, Erdgas, H₂ etc.) die Flexibilität und Effizienz des Gesamtsystems erhöhen kann. Bei dem Speicher handelt es sich um einen elektrisch beheizbaren Wärmespeicher aus Keramikwaben, der Temperaturen bis ca. 1000 °C erreicht. Die gespeicherte Wärme kann entweder die benötigte Brennstoffmenge reduzieren oder diese gänzlich ersetzen. Beispielsweise kann so mit einer Speicher-Kerngröße von ca. 30 m³ bis 57 m³ ohne zusätzlichen Brennstoffeinsatz für ca. 15 Stunden eine elektrische Leistung von 100 kW_{el} und eine thermische Leistung von 167 kW_{th} bereitgestellt werden. Im Jahr 2025 ist eine experimentelle Erprobung mit virtueller Kopplung geplant. [7]

Im Projekt Bio2Geo (FKZ 03ET1593A-F) entwickelte das DBFZ mit Partnern ein integratives Hybridkraftwerk für die Kopplung von Bioenergie und Geothermie für verschiedene Abnehmerstrukturen. Bei dem Wärmespeicher handelt es sich um ein Erdwärmesondenfeld, in das die Überschusswärme einer bestehenden Biogasanlage saisonal eingespeichert werden kann. Der Speicher hat einen Durchmesser von ca. 22 m und besteht aus 30 Sonden à 30 m. Als Versorgungsoption sind

sowohl die Direktabnahme als auch die Einspeisung in ein Nah- und Fernwärmenetz (z. B. mithilfe einer Wärmepumpe) möglich. Beiträge zur Systemresilienz werden hier durch eine hohe Anpassungs- und Reaktionsfähigkeit auf saisonale Wärmebedarfe, gute Skalierbarkeit, sehr lange Lebensdauer (über 50 Jahre) und flexible Betriebsweise (Betrieb auch ohne Überschusswärme einer BGA möglich) erreicht. Weiterhin kann durch die Zusatzoption „passives Kühlen“ im Sommer die Vielseitigkeit und Wirtschaftlichkeit erhöht werden.

Alternativ zu „klassischen“ sensiblen Wärmespeichertechnologien mit Wasser forscht das KIT in dem Projekt Geoenergiecampus an der Speicherung von Wärme im tiefen Untergrund am KIT Campus Nord. Untersucht wird hier die Kopplung einer Wärmeversorgung aus Tiefengeothermie mit einem Hochtemperatur-Aquiferspeicher in den wasserführenden Randbereichen eines nicht mehr genutzten Erdölfeldes zur verlustfreien, dezentralen Versorgung. Die Kapazitätserhöhung durch den Speicher betrage 33,6 GWh bei einer Leistungserhöhung von 10-11 MW. Durch die Integration des Speichers könnte der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung von 25 auf über 65 % gesteigert werden.

Chemische Speicher

Ein Beispiel zur chemischen Speicherung zeigt das DBFZ in dem Projekt Pilot-SBG, bei dem Bioressourcen und Wasserstoff zu Methan als Kraftstoff verarbeitet werden. Hierfür wurde in Leipzig eine Pilotanlage zur Demonstration eines integrativen Konzeptes, von den erneuerbaren Ressourcen bis hin zum Methan, in Kraftstoffqualität entwickelt (► Abbildung 4). Sie soll die Skalierung des Gesamtkonzeptes in bis zum kommerziellen Maßstab unterstützen.

In der Pilotanlage erfolgt eine katalytische Methanisierung von Biogas aus biogenen Rest- und Abfallstoffen (20 kg/d) mit Wasserstoff (7,3 m³/d) zu Methan (2,5 m³/d). Der Resilienz-Beitrag besteht hier vor allem in der Bereitstellung eines alternativen, auch aus fluktuierenden erneuerbaren Energien gewonnenen speicher- und transportfähigen Kraftstoffs sowie einem optimierten „Demand Side Management“ zur Steigerung der Energieeffizienz sowie Reduktion und Flexibilisierung des prozessbedingten Wärme- und Strombedarfs.

► Abbildung 4

**Projekt Pilot-SBG:
Herstellung von
Methan als Kraftstoff
aus Bioressourcen und
Wasserstoff**

 Ansicht vom Aufbau der
Pilotanlage 03/2023

(Quelle: DBFZ)



Herausforderungen, Hemmnisse und Forschungsbedarf bei der Integration von Energiespeichern

Die Integration von Energiespeichern in Energieversorgungssysteme steht vor einigen Herausforderungen und Hemmnissen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden einige mögliche Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsaktivitäten dargestellt.

Juristische und politische bzw. regulatorische Hemmnisse

liegen z. B. in der Abgaben- und Umlagensystematik, die auch in aktuellen Gesetzentwürfen noch nicht geregelt ist [8]. Weiterhin fehlen Anreize für einen netzdienlichen Betrieb von Energiespeichern, z. B. in Form von flexiblen Stromtarifen.

Technische Hemmnisse

ergeben sich z. B. durch komplexe regelungstechnische Einbindung bei der Systemintegration oder durch unzureichende Standardisierung von Schnittstellen. Eine aussagekräftige Bewertung oder ein Vergleich konkurrierender Technologien wird oftmals behindert, weil detaillierte Speicherkenn- daten (z. B. Kosten oder Wirkungsgrade) nur eingeschränkt verfügbar sind. Mitunter besteht noch Entwicklungsbedarf sowohl bei Speichertechnologien als auch bei Produktionsprozessen. Weiterhin können technische Anforderungen, wie z. B. die neue Batteriespeicherverordnung, welche sich auf die Batteriefertigung auswirkt, ein limitierender Faktor sein.

Ökologische Hemmnisse

bestehen in der Herkunft, Verfügbarkeit, Sicherheit und nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen zur

Speicherherstellung. Vor allem für elektrische Energiespeicher sind die sehr begrenzt verfügbare Materialien wie z. B. Lithium oder Kobalt limitierend. Bei thermischen Energiespeichern ist beispielsweise die Paraffin-Gewinnung als Nebenprodukt der Erdölproduktion als Phasenwechselmaterial problematisch.

Ökonomische Hemmnisse

liegen u. a. darin, dass der Wert einer resilienten Energieversorgung in der Regel nicht beziffert wird und auch nicht leicht bezifferbar ist, während die Kosten für eine erhöhte System-Sicherheit und Flexibilität in die Bewertung der Wirtschaftlichkeit eingehen. Eine Systemintegration von Energiespeichern erfordert weiterhin u. U. die Zusammenführung unterschiedlichster Stakeholder, die in unterschiedlichen Amortisationszeiten denken. Besonders komplex wird die ökonomische Bewertung, wenn Energiespeicher mehr als nur einen Nutzen bereitstellen („Revenue Stacking“), und wenn daran verschiedene Stakeholder interessiert sind.

Fazit

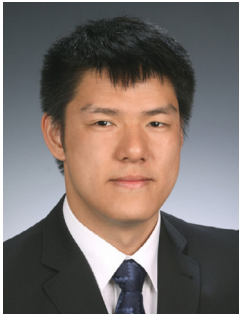
Energiespeicher können Energie bedarfsgerecht ein- und ausspeichern und dadurch einen entscheidenden Beitrag zur Systemresilienz leisten. Verschiedene Speichertechnologien für sämtliche Energieformen und Anwendungsfälle sind verfügbar. Energiespeicher haben insbesondere hinsichtlich der Integration erneuerbarer Energien eine zentrale Rolle für die flexible Sektorenkopplung. Für nachhaltig resiliente Lösungen ist allerdings auch die Ressourceneffizienz und -verfügbarkeit der Speichertechnologien entscheidend. Für eine

schnellere Verbreitung und Systemintegration müssen regulatorische, technische und ökonomische Hürden abgebaut werden. Forschungsbedarf besteht z. B. hinsichtlich ressourceneffizienter Speichertechnologien oder Methoden und Ansätzen zur vergleichenden Bewertung verschiedener Speichertechnologien.

Referenzen

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016), „Klimaschutzplan 2050 Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“ [Online].
Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf>
- [2] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2016), „Bereitstellung von (System-) Dienstleistungen im Stromversorgungssystem: Beitrag von Energiespeichern“ [Online].
Available: https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20160725_SDL-Energiespeicher.pdf
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023), „Energieeffizienz in Zahlen“ [Online].
Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2022.pdf>
- [4] Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2009), „Energiezukunft 2050“ [Online].
Available: <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/energiezukunft-2050/>
- [5] H.-M. Henning, A. Palzer, „Energiesystem Deutschland 2050“ [Online].
Available: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf
- [6] P. Sterchele, J. Brandes, J. Heilig, D. Wrede, C. Kost, T. Schlegl, A. Bett, H.-M. Henning (2020), „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“ [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>
- [7] E. Agelidou, H. Seliger-Ost, M. Henke, V. Dreißigacker, T. Krummrein, P. Kutne (2022), „The Heat-Storing Micro Gas Turbine—Process Analysis and Experimental Investigation of Effects on Combustion“, *Energies* 2022, 15, 6289. Available: <https://doi.org/10.3390/en15176289>
- [8] BVES Bundesverband für Energiespeicher Systeme e.V. (2023), „Von der Speicherdefinition zur Speicherstrategie“ [Online].
Available: https://www.bves.de/wp-content/uploads/2023/07/BVES_Speicherstrategie_20230620.pdf

Effiziente Cyber-Resilienz



KIT
Dr. Kaibin Bao
kaibin.bao@kit.edu
Dr. Ghada Elbez
ghada.elbez@kit.edu

Notwendigkeit von Cyber-Resilienz

Mit der Energiewende entwickelt sich das Energieversorgungsnetz von einer hierarchischen Infrastrukturarchitektur zu einem dezentralen, zellulären Energienetz. Dieser Wandel erhöht die Komplexität des gesamten Systems, bestehend aus Netz- und Anschlusspunkten sowie den zugehörigen Komponenten. Die zuvor geltenden statistischen Annahmen über den Energiefluss treffen nicht mehr zu. Das Netz muss nun flexibel und dynamisch auf veränderte Bedingungen reagieren können, beispielsweise auf Spannungsspitzen durch hohe Leistungsbereitstellung dezentraler erneuerbarer Energiequellen oder auf Engpässe, die entstehen, wenn Energie für das gleichzeitige Laden mehrerer Elektrofahrzeuge benötigt wird. Dies erfordert den Ausbau von anpassungsfähigen Netzkomponenten. Die damit einhergehende dynamische Beanspruchung macht eine digitale Überwachung der Betriebsmittel in der Primärtechnik notwendig. Die Sekundärtechnik wird durch Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)-Komponenten ergänzt, um Funktionen wie Fernüberwachung, Fernwartung und Fernsteuerung zu ermöglichen.

Diese Digitalisierung des Energienetzes stellt insbesondere auf der Verteilnetzebene aufgrund der großen Anzahl von Netzkomponenten und oft mangelnder Konnektivität eine Herausforderung dar. Gleichzeitig erhöht die Integration der Netzbetriebsmittel in ein IKT-Netzwerk die Angriffsfläche für Cyberangriffe, was besondere Aufmerksamkeit in Bezug auf Cyber-Sicherheit erfordert.

Zielstellung für Cyber-Resilienz

Laut NIST SP 800-160 (Sonderpublikation der U.S.-Behörde NIST, National Institute of Standards and Technology) bezeichnet die Cyber-Resilienz die Fähigkeit einer Organisation, den operativen Betrieb trotz Cyberbedrohungen aufrechtzuerhalten und sich von diesen Bedrohungen zu erholen [NIST SP 800-160]. Das Themenfeld ist eng verwandt mit der Cyber-Sicherheit, deren Hauptziel es ist, die Ausnutzung von Sicherheitslücken zu verhindern

bzw. die Auswirkungen einer solchen Ausnutzung zu verringern.

Sowohl in der Cyber-Sicherheit als auch in der Cyber-Resilienz ist es wichtig, die Anforderungen und den Kontext des Systems genau zu spezifizieren: Vor welchen Akteuren soll das System geschützt werden und gegen welche Angriffe? Dies folgt dem Zitat von Bruce Schneier: „The first questions to ask are: ‚Secure from whom?‘ and ‚Secure against what?‘ [...] Like any adjective, ‚secure‘ is meaningless out of context.“ [Schneier15].

Im Gegensatz zur Cyber-Sicherheit, die sich auf Prävention konzentriert, beschäftigt sich die Cyber-Resilienz mit der Frage, wie auf einen Sicherheitsvorfall reagiert wird. Angesichts der Tatsache, dass Sicherheitslücken auf absehbare Zeit nicht vollständig vermieden werden können, erweist sich die Cyber-Resilienz als das entscheidende Themenfeld, mit dem sich die Sicherheit von Organisationen konkret und wirksam stärken lässt.

Beispiel eines Cyber-Angriffs

Als illustratives Beispiel, wie ein gezielter Cyber-Angriff gegen ein Energiesystem ablaufen kann, wird im Folgenden skizziert, wie der Cyber-Angriff Ende 2016 gegen das ukrainische Stromnetz abgelaufen ist. Bei diesem Angriff wurden an fünf Umspannwerken im Gebiet Kyiv die Schutzeinrichtungen ausgelöst. Die Wiederherstellung benötigte etwa eine Stunde. Als Bedrohungsakteur wurde die staatlich finanzierte Gruppe Sandworm identifiziert, die einen auf Energiesysteme spezialisierte Malware Industroyer, auch bekannt als CrashOverride verwendet hatte.

Zu Beginn des Ukraine-Kriegs 2022 wurde die Weiterentwicklung Industroyer2 gesichtet. Da zum Vorgehen im Jahr 2016 mehr bekannt ist, wird dieser Fall diskutiert.

Ein realer Cyber-Angriff erfolgt in mehreren Schritten. In der Sicherheitsbranche wird das MITRE ATT&CK-Framework verwendet, um diese Schritte zu klassifizieren [MITRE].

Informationen über Angriffsziel erlangen	Reconnaissance
Entwicklung der Malware Industroyer	Resource Development
Phishing Kampagne	Initial Access
Nutzung von gültigen Zugangsdaten	
Weitere Zugangsdaten stehlen	Credential Access
MS-SQL-Konto um Zugriff weitere Daten erweitern	Persistence
Ersetzen des Texteditors mit einer Hintertür	Persistence
Durchsuchen des Active Directory / des Netzwerks	Discovery
Windows Management Instrumentation für Fernzugriff	Execution
Zugang zum Automationsnetzwerk erlangt	Lateral Movement
Anlagen von lokalen Konten	Persistence
Ziel-spezifische Module übertragen (IEC 104, 61850, OPC)	Lateral Movement
Löschen von Projektdateien für die Schutztechnik	Inhibit Response
Auslösen der Leistungstrennschalter im Umschaltwerk	Impact

► Abbildung 1

Verlauf eines Cyberangriffs auf Energiesysteme

Das Beispiel zeigt den Angriff auf das ukrainische Energienetz 2016 mit Hilfe von Industroyer.

(rechte Spalte: Klassifizierung der einzelnen Schritte nach dem MITRE ATT&CK-Framework)

Die darin beschriebenen Taktiken werden im Folgenden verwendet, um die Angriffsschritte darzustellen (► Abbildung 1):

- **Reconnaissance**
Der Angriff beginnt mit einer gründlichen Recherche des Angriffsziels. Es werden Informationen über Organisationsstrukturen, Lieferketten, Adressen, eingesetzte Hard- und Software ermittelt.
- **Resource Development**
Um eine maßgeschneiderte Malware zu entwickeln, die effektiv in der spezifischen Umgebung des angegriffenen Unternehmens funktioniert, sind all diese Informationen von entscheidender Bedeutung. Im vorliegenden Fall wurden spezielle Module der Malware Industroyer entwickelt. Diese Module sind auf die weit verbreiteten Kommunikations- und Steuerungsprotokolle von Netzbetriebsmitteln sowohl im europäischen als auch im asiatischen Raum abgestimmt.
- **Initial Access**
Wenn ausreichend Informationen vorhanden sind, etwa darüber, welche Person in welchem Kontext angeschrieben werden muss, um glaubwürdig zu wirken, kann die Phishing-Kampagne gestartet werden. Genau das ist im Januar 2016 passiert als durch eine Phishing-Kampagne die Daten der ersten Benutzerkonten ermittelt werden konnte, mit denen die Angreifer den ersten Fuß im Unternehmen hatten.
- **Credential Access**
Durch den Zugriff auf die ersten Rechner konnten die Angreifer dann Software wie ScreenGrabber

und Keylogger zur Überwachung der Nutzereingaben installieren. Damit konnten sie weitere Konten erspähen, um mehr Zugriffsrechte zu erlangen und tiefer ins Netz einzudringen.

- **Persistence**
Die Angreifer haben daraufhin herausgefunden, dass ein Datenbankserver auf MS-SQL-Basis betrieben wird. Dieser war mit weiteren Netzen verbunden, so dass man über diesen Hebel zwischen Januar und Dezember 2016 immer tiefer in die verschiedenen Unternehmensnetzwerke eindringen konnte.
In einem weiteren Schritt wurde der Texteditor von Windows durch einen manipulierten Texteditor ersetzt, der eine integrierte „Hintertür“ besaß, um noch einen zusätzlichen Zugriffsweg in das Unternehmen zu sichern, für den Fall, dass die bisher genutzten Zugriffswegen in das Unternehmen entdeckt und versperrt werden sollte.
- **Lateral Movement**
Der Prozess, bei dem Angreifer fortlaufend neue Computer und Netzwerke entdecken, die ihnen Zugang zu weiteren Systemen und Netzwerken gewähren, wird als "Lateral Movement" bezeichnet. Dieses schrittweise Vordringen durch ein Netzwerk mit dem Ziel, an Schlüsseldaten zu gelangen, wiederholt sich dabei mehrfach.
In unserem Beispiel entdeckten die Angreifer im Dezember 2016 ein System, das Zugriff auf das Automationsnetz (Operational Technology, OT) des Energieversorgers hatte, so dass sie sich dort lokale Konten anlegen und den Zugriff sichern

konnten. Danach haben sie spezifische Module entwickelt, die gezielt auf die Automations- und Steuerprotokolle des Energiesystems fokussiert waren.

- **Inhibit Response**
Um die Wiederherstellung nach dem Angriff zu erschweren, besaß die Malware zusätzliche Module mit der Funktion, die Projektdateien und die Konfiguration der Schutzgeräte zu löschen.
- **Impact**
Die spezifisch für das Energiesystem entwickelten Module wurden in das Automationsnetz eingespeist. Mithilfe des Aufgabenplaners (Task Scheduler) lösten sie zu einem festgelegten Zeitpunkt zahlreiche Schutzgeräte aus, um eine Trennung von mehreren Stromnetzabschnitten zu erreichen. Dies führte am 17. Dezember 2016 zu einem Stromausfall, der ein Fünftel von Kiew betraf.

Tatsächlich gab es noch wesentlich mehr Zwischenschritte, aber schon die Aufzählung der Schlüsselereignisse zeigt, dass ein Angriff nicht über Nacht erfolgt ist. Es funktioniert nicht wie in Filmen, wo innerhalb weniger Stunden praktisch jedes Ziel erreicht werden kann. In der Realität nimmt ein Cyberangriff viel Zeit in Anspruch, erfordert zahlreiche Zwischenschritte und gründliche Vorbereitung. In unserem Beispiel dauerte es von Januar bis Dezember 2016 – also ein ganzes Jahr – vom ersten Eindringen bis zum eigentlichen Angriff. Während dieses Zeitraums bestehen fortwährend Möglichkeiten, das System zu überwachen und Angreifer gegebenenfalls zu identifizieren und zu isolieren.

Im Jahr 2022 fand ein weiterer Angriff auf die ukrainische Energiewirtschaft statt mit der Weiterentwicklung Industroyer2. Dieser Angriff war weniger erfolgreich, da schon die Phishing-Kampagnen schnell genug erkannt wurden und nur wenig Schaden bewirken konnten.

Wie konnte diesmal ein großflächiger Stromausfall verhindert werden? Cyber-Resilienz verhinderte

nicht, dass überhaupt der erste Fuß ins Unternehmen gesetzt wurde. Sie sorgte aber für die Widerstandsfähigkeit der Organisation, trotz Angriffen und Sicherheitslücken den operativen Betrieb aufrecht zu erhalten. Und falls doch mehr passiert, sorgt Cyber-Resilienz dafür, dass sich das System von diesen Angriffen erholt und der ursprüngliche Zustand schneller wiederhergestellt werden kann.

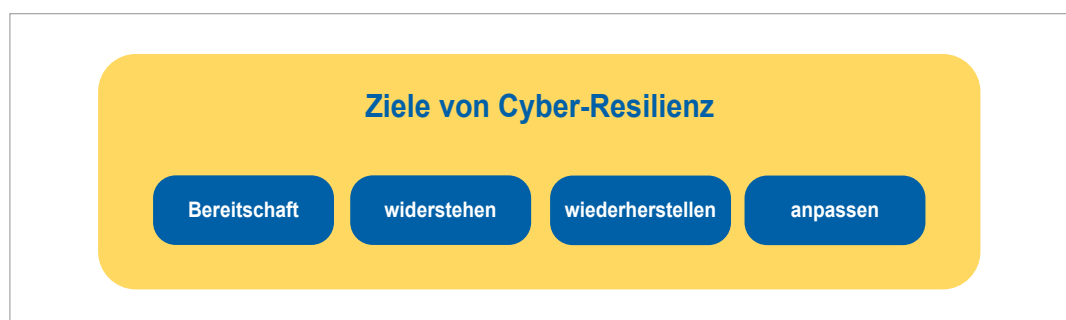
Ziele von Cyber-Resilienz

Entsprechend dem Standard der U.S.-Behörde NIST (National Institute of Standards and Technology) gibt es für Cyber-Resilienz vier große Ziele (► Abbildung 2) [NIST SP 800-160]:

1. **Bereitschaft**
Zunächst braucht es die informierte Bereitschaft gegenüber möglichen Cyberangriffen und den internen und externen Umständen, die zu einem Angriff führen können. Wo sind mögliche Sicherheitslücken im eigenen System? Wie agieren Hacker-Gruppen (Advanced Persistent Threat, APT), wie sehen deren aktuelle Taktiken aus? Dieses Wissen heißt „Cyber Threat Intelligence (CTI)“. Basierend auf diesem Wissen erhöhen Schulungen und die Implementierung von präventiven Maßnahmen die Widerstandsfähigkeit gegenüber Angriffen.
2. **Widerstehen**
Als weiteres Ziel gilt es, Angriffen möglichst standzuhalten. Trotz Sicherheitsvorfällen sollen die wesentlichen Geschäftsfunktionen bzw. die Funktion der kritischen Infrastruktur aufrechterhalten werden („Business Continuity“).
3. **Wiederherstellung**
Im Falle eines erfolgreichen Angriffs ist es entscheidend, umgehend zu identifizieren, welche Bereiche der Unternehmensinfrastruktur und der cyber-physikalischen Systeme betroffen sind. Anschließend muss der Angriff in diesen Bereichen isoliert werden, um eine weitere Ausbreitung zu verhindern. Für eine effektive Wiederherstellung ist es essenziell, genau zu verstehen, welche Systemkomponenten beeinträchtigt wurden.

► Abbildung 2

Ziele von Cyber-Resilienz



Dies ermöglicht es, gezielt nur die tatsächlich betroffenen Systeme wiederherzustellen, anstatt eine vollständige Ersetzung aller Unternehmenssysteme vornehmen zu müssen. Diese zielgerichtete Herangehensweise minimiert die Ausfallzeit und stellt die betrieblichen Funktionen schneller wieder her, ohne unnötige Ressourcen zu beanspruchen.

4. Anpassung

Als letztes Ziel gilt es, aus realen oder simulierten Angriffen zu lernen. Managementstrukturen und IT-Systeme werden angepasst, um künftigen Angriffen besser zu widerstehen bzw. um das System nach einem Angriff schneller und effizienter wiederherstellen zu können.

Cyber-Resilienz in der Gesetzgebung

Cyber-Resilienz ist nicht nur ein technisches Ziel, sondern auch ein gesetzliches Erfordernis. Jüngst mussten sich die Energieversorger und Energienetzbetreiber in Deutschland mit dem IT-Sicherheitsgesetz 2.0 [BSI IT-SIG 2.0] auseinandersetzen, weil im Mai 2023 die Übergangsfrist endete, um Systeme zur Angriffserkennung (SzA) zu implementieren. Das IT-Sicherheitsgesetz 2.0 ist ein Änderungsgesetz, das das BSI-Sicherheitsgesetz und die BSI-Kritisverordnung [BSI KritisV] betrifft und letztendlich die EU-Sicherheitsrichtlinie NIS 1 (Network and Information Security) [EU NIS] umsetzt.

Die EU-Sicherheitsrichtlinie NIS 2 [EU NIS2] zur Stärkung der Cyber-Sicherheit wurde Ende 2022 beschlossen und muss bis Oktober 2024 in nationales Recht umgesetzt werden, woran schon gearbeitet wird.

Eine weitere wichtige Initiative ist die EU-Richtlinie zur Resilienz kritischer Einrichtungen [EU RCE], die zusätzliche Anforderungen stellt.

Diese Gesetze und Richtlinien verpflichten Betreiber kritischer Infrastrukturen und größere, systemrelevante Unternehmen, ihre Anstrengungen zur Gewährleistung der Cyber-Resilienz zu verstärken. Die Webseite www.openkritis.de bietet einen umfassenden Überblick über die geltenden Vorschriften.

Die Gesetzgebung fordert also Mindeststandards in technischen und organisatorischen Bereichen, um die Ziele der Cyber-Resilienz zu erreichen. Dazu gehört eine verpflichtende Risikobewertung, die Unternehmen durchführen müssen, um potenziell gefährdete Bereiche zu identifizieren. Zudem ist eine zentrale Sicherheitsüberwachung erforderlich, um Angriffe frühzeitig zu erkennen und Schäden zu verhindern.

Für deutsche Unternehmen sind auch internationale Normen relevant, die einige Bausteine beschreiben, wie Cyber-Resilienz gestärkt werden kann:

- Die ISO 27000-Familie beschreibt ein Managementsystem für Informationssicherheit (ISMS) und wie dieses dann auch zertifiziert werden kann.
- Speziell für das Energiesystem ist IEC 62443 mit Fokus auf Automationssysteme relevant. IEC 62351 adressiert die Cyber-Sicherheit für digitale Komponenten in Energiesystemen.
- In der ISO 22301 werden Anforderungen an Managementsysteme für betriebliche Kontinuität beschrieben.

Bausteine für Cyber-Resilienz

Einige Beispiele für technische und organisatorische Maßnahmen zur Steigerung der Cyber-Resilienz sind:

- Die gesetzlich geforderten Systeme zur Angriffserkennung beziehen sich wahrscheinlich auf Lösungen für Security Information and Event Management (SIEM) oder Extended Detection and Response (XDR) in Kombination mit einem Angriffserkennungssystem (Intrusion Detection System, IDS).

Trotz unterschiedlicher Bezeichnungen ist das Grundprinzip solcher Systeme ist vergleichbar und wird in nächsten Abschnitt unter dem Begriff Sicherheitsüberwachung ausführlicher beschrieben.

- Netzwerksegmentierung ist ein Prinzip für die Architektur der Netzwerkinfrastruktur. Sie beschreibt die Trennung des Netzwerks in möglichst kleine, fachlich zusammenhängende Teile. Dies schränkt die Bewegungsfreiheit eines potenziellen Angreifers ein. Mindestens das cyberphysikalische System sollte von dem betriebswirtschaftlichen Unternehmensnetzwerk getrennt sein. Netzwerksegmentierung lässt sich durch „Zero Trust“ ergänzen: Die Kommunikation zwischen Netzwerkteilnehmern muss stets verifiziert werden. Selbst wenn die Teilnehmer im selben Netzwerksegment sind, gibt es kein implizites Vertrauen.
- Notfallpläne sind wichtig, um im Falle eines Angriffs vorab festgelegte Reaktionen effektiv umsetzen und die Systeme wiederherstellen zu können.
- Prävention betrifft mehrere Aspekte, das Unternehmen gegenüber Angriffen zu härten: Beispielsweise Risikomanagement unter Berücksichtigung aktueller Cyber Threat Intelligence, Mitarbeiterschulungen und Bewusstseins-

bildung gegenüber auf menschliche Faktoren zielende Angriffsschritte, feingranulare Zugriffskontrolle, Management von Schwachstellen, Asset- und Patchmanagement, und Antiviren- und Malware-Schutz.

- Für die eigentliche Wiederherstellung nach einem Angriff ist ein effektives Backup- und Wiederherstellungskonzept notwendig.

können. Wird zu einem späteren Zeitpunkt bekannt, wie neuartige Angriffe stattfinden, kann nach diesen Mustern nachträglich in der Ereignisdatenbank gesucht werden.

Diese Abläufe sind sehr personalintensiv. An dieser Stelle kann die Forschung mithelfen, die Prozesse effizienter zu gestalten.

Sicherheitsüberwachungssysteme

Sicherheitsüberwachungssysteme funktionieren vereinfacht wie in ► Abbildung 3 dargestellt: Die IT/OT-Infrastruktur eines Unternehmens besteht aus Endpunkten und Netzwerken (linke Seite der Abbildung). Endpunkte sind PCs, Server, mobile Geräte, sowie Automation- und Steuersysteme. Zum Zweck der Angriffsüberwachung wird das hier vereinfacht dargestellt. In der Realität sollten sich die Geräte nicht in getrennten Netzwerken befinden.

Um Angriffe aufzudecken, werden Informationen über Benutzer- und Systemaktivitäten sowie System- und Anwendungsereignisse von Endpunkten gesammelt. Auf der anderen Seite wird der Netzwerkverkehr überwacht. Während die Daten von einem Endpunkt feingranulare Informationen über die Systemaktivität liefern, enthalten Netzwerkdaten auch Informationen von Geräten, bei denen keine Endpunktüberwachung installiert werden kann.

Alle Informationen werden zentral in einem Überwachungssystem gesammelt und in ein einheitliches Format langfristig in einer Datenbank gespeichert. Auffälliges Verhalten wird automatisiert über ein Alarmsystem gemeldet. Diese Meldungen bearbeiten dann Mitarbeitende vom Security Operating Center (SOC), indem sie sie mit anderen Ereignissen in Bezug gesetzt und bewertet werden

Herausforderungen bei der Umsetzung von Sicherheitsüberwachungssystemen

Automatisierung der Angriffserkennung

Bei Automatisierungen stellt sich die prinzipiell die Frage, welches Ausmaß zielführend ist. Denn je stärker die Automatisierung, umso wahrscheinlicher wird es auch, dass man reale, neuartige Angriffe übersehen werden.

Sichtbarkeit

Das Sammeln der Informationen aus allen Netzsegmenten und Endpunkten in der gesamten Infrastruktur ist aufwendig. Werden Teile nicht in die Sicherheitsüberwachung integriert, besteht die Gefahr, dass Angriffsschritte nicht erkannt oder nachvollzogen werden können.

Überwachungsintensität / Bandbreite / Performance

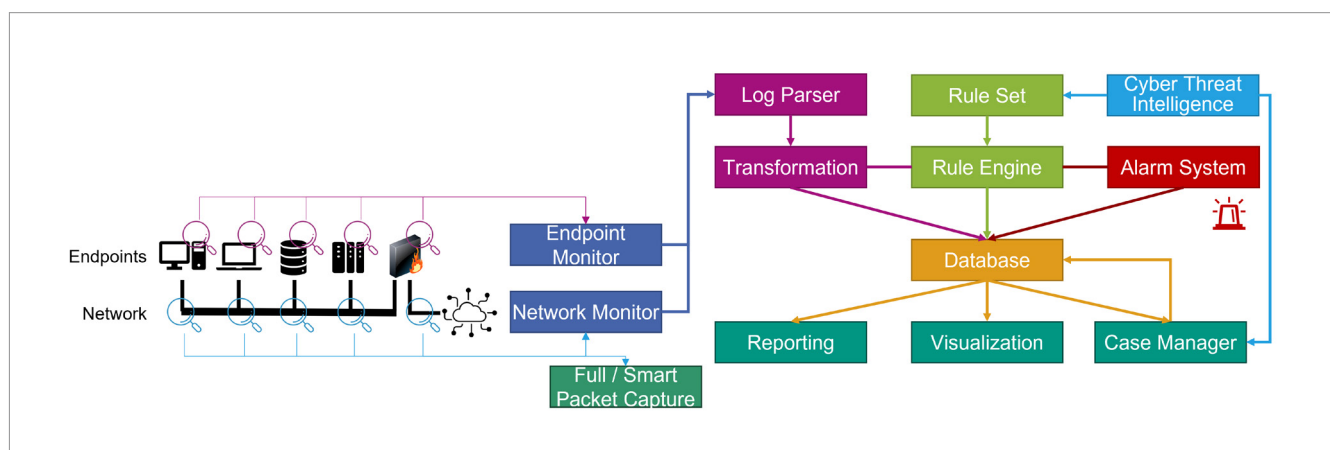
Bei der Implementierung eines Überwachungssystems ist eine Abwägung zu treffen, wie feingranular System- und Netzwerkaktivität aufgezeichnet werden soll. Eine feingranulare Aufzeichnung ermöglicht eine Aufzeichnung von unbekanntem Angriffsmustern, erfordert allerdings mehr Speicherplatz und geht ggf. mit Performanceeinbußen auf den überwachten Systemen einher.

Der Einsatz von Überwachung in einem geografisch verteilten System stellt zudem höhere Anforderungen an die Kommunikationsbandbreite.

► Abbildung 1

Sicherheitsüberwachungssystem

(Quelle: eigene Grafik basierend auf Seminararbeit über Sicherheitsüberwachungssysteme (Quelle: [RR23])



In der Realität ist die Sichtbarkeit kein größeres Problem, doch nicht jeder Punkt im Energienetz ist kommunikationstechnisch gut erreichbar. Aktuell stehen die Übertragungsnetzbetreiber diesbezüglich gut da, weil sie schon jetzt viel Kommunikationstechnologie einsetzen. Aber bei den Verteilnetzbetreibern ist problematisch, dass vieles noch nicht digitalisiert oder zumindest kommunikationstechnisch angebunden ist.

Security by Design

Schon in der Entwurfsphase sollte das System darauf optimiert werden, dass ein Angreifer es möglichst schwer hat, indem Angriffswege versperrt werden.

Adaption auf Zielsysteme erforderlich

Sicherheitslösungen müssen stets aufwendig konfiguriert werden, um zunächst alle Informationsquellen verarbeiten zu können und schließlich zwischen normales Verhalten und potenziellen Angriffen unterscheiden zu können.

Faktor Mensch

Die rechtmäßigen Nutzer der IT-Infrastruktur sind potenziell gegenüber Social Engineering verwundbar und halten für eine durch technische Mittel kaum zu stopfende Sicherheitslücke in einem Unternehmen offen. Zudem ist menschliches Verhalten schwer zu modellieren und beeinträchtigt eine Unterscheidung zwischen Angriff und normales Verhalten.

Forschungsprojekte

Die folgenden Forschungsprojekte entwickeln einige Bausteine, um Cyber-Resilienz zu unterstützen:

Security Lab Energy im Energy Lab 2.0 (KIT)

Diese Forschungsanlage dient der Emulation von Cyber-Angriffen auf Energiesystemen und der Erforschung von neuen Erkennungsansätzen. Zunächst wird ein repräsentatives Energiesystem nachgeahmt. Die Physik für Wechselstrom, Spannungen und Ströme wird simuliert. Die Steuergeräte (Operational Technology) für Generatoren, Transformatoren und Schutzgeräte existieren real und sind an die Physiksimulation angebunden. Ein weiterer Bestandteil der Forschungsanlage ist die virtuelle Unternehmens-IT-Infrastruktur. Somit können komplexe Cyberangriffe wie das einführende Beispiel vollständig emuliert (nachgeahmt) werden. Mit der simulierten Physik haben Angriffe keine dauerhaften Konsequenzen und sind beliebig reproduzierbar.

KASTEL Security Lab Energy

Das KASTEL Security Lab Energy enthält zunächst

einen vergleichbaren Aufbau wie das oben beschriebene Security Lab Energy. Zusätzlich existiert eine weitere Forschungsanlage, die eine Umspannstation nachbildet mit Komponenten unterschiedlicher Hersteller. Ein dritter Forschungsaufbau fokussiert sich auf die Kommunikation über Software Defined Networking (SDN).

Zielsetzung ist ebenfalls die Nachahmung von komplexen Cyberangriffen auf Energiesysteme in einem realitätsnahen Umfeld.

Angriffserkennung basierend auf Ereignisprovenienz

Bei diesem Forschungsprojekt geht es um eine bessere Nachverfolgbarkeit, wie einzelne Schritte in einem Cyberangriff tatsächlich stattfinden. Da einzelne Systemereignisse nur begrenzte Aussagekraft über die Angriffsmethoden haben, werden die Systemereignisse aufgezeichnet und in einem „Provenienz-Graph“ miteinander in Bezug gesetzt. So sind Rückschlüsse auf die Angriffsschritte möglich und die vollständige Angriffskette kann basierend darauf automatisiert rekonstruiert werden.

Anomalie-basierte Angriffserkennung

Mit der automatisierten, Anomalie-basierten Angriffserkennung ist man in der Lage, unbekannte und neuartige Angriffe zu erkennen. In der Arbeit von Dr. Elbez [Elbez23] wurden unterschiedliche Angriffe betrachtet, die zu verfälschten Meldungen zwischen Schutzsystemen in einem Umspannwerk führten. Mit einem autoregressiven Modell konnten solche Angriffe mit einer hohen Trefferquote erkannt werden.

Forschungsbedarf

Es gibt mehrere Punkte, für die Forschungsbedarf besteht. Unterschiedliche Forschungslabore für Cyber-angriffsemulationen sind wünschenswert, um Angriffserkennungsansätze in unterschiedlichen Umgebungen prüfen zu können.

Leider besteht immer noch eine große Lücke zwischen Wissenschaft und Praxis, da es für die Forschung sehr aufwendig ist, die Komplexität realer Angriffe nachzubilden. Dementsprechend ist die Qualität von wissenschaftlichen Datensätzen beschränkt. Daten von realen Angriffen in Firmen sind nicht öffentlich verfügbar.

Für Cyber-Resilienz ist es auch wichtig, dass verschiedene Forschungsdisziplinen zusammenarbeiten. Konkret in unserem Forschungsfeld mangelt es Informatiker*innen an Wissen über Energiesysteme und umgekehrt haben Elektrotechniker*innen begrenztes Wissen über IT und Cyberangriffe.

Zusammenfassung

Energiewende und Digitalisierung erfordern zwingend Cyber-Resilienz, damit das Energiesystem auch künftig zuverlässig funktionieren kann. Cyber-Resilienz beschäftigt sich mit dem Umgang mit unvermeidlichen Angriffen und wie ein Unternehmen sich davon möglichst schnell erholen kann, um seinen Betrieb effizient wiederaufzunehmen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass das gesamte cyberphysikalische System aus technischen, organisatorischen und menschlichen Elementen besteht. Forschung kann durch die Nachbildung von repräsentativen cyberphysikalischen Systemen und durch die Nachbildung von komplexen Cyberangriffen Lösungen für die Ertüchtigung von Cyber-Resilienz finden. Für diese Aufgabe braucht es interdisziplinäre Forschung.

Referenzen

Veröffentlichungen und Internet-Quellen

- [Schneier15] Schneier, Bruce. (2015). Secrets and lies: digital security in a networked world. John Wiley & Sons.
- [Elbez23] Elbez, Ghada, Klara Nahrstedt, and Veit Hagenmeyer. "Early Attack Detection for Securing GOOSE Network Traffic." IEEE Transactions on Smart Grid (2023). <https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3272749>
- [GM23] Google, & Mandiant. (2023). Fog of War: How the Ukraine Conflict Transformed the Cyber Threat Landscape. https://services.google.com/fh/files/blogs/google_fog_of_war_research_report.pdf
- [EX22] Exabeam. SIEM Architecture: Technology, Process and Data. <https://www.exabeam.com/explainers/siem/siem-architecture/>. abgerufen am 2022-05-23
- [RR23] Richard Rudolph. Cyber Incident Detection and Response. Februar 2023.
- [MITRE] MITRE ATT&CK Framework. <https://attack.mitre.org>. abgerufen am 2022-05-23
- Gesetze, Richtlinien und Verordnungen
- [BSI KritisV] Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung-BSI-KritisV) <https://www.gesetze-im-internet.de/bsi-kritisv/index.html>
- [BSI IT-SIG 2.0] Zweites Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme (IT-Sicherheitsgesetz 2.0) https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&jumpTo=bgbl121s1122.pdf

- [EU NIS] Richtlinie (EU) 2016/1148 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Juli 2016 über Maßnahmen zur Gewährleistung eines hohen gemeinsamen Sicherheitsniveaus von Netz- und Informationssystemen in der Union <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32016L1148>
- [EU NIS2] Richtlinie (EU) 2022/2555 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der Union, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 910/2014 und der Richtlinie (EU) 2018/1972 sowie zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2016/1148 (NIS-2-Richtlinie) (Text von Bedeutung für den EWR) <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2555>
- [EU RCE] Richtlinie (EU) 2022/2557 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 über die Resilienz kritischer Einrichtungen und zur Aufhebung der Richtlinie 2008/114/EG des Rates (Text von Bedeutung für den EWR) <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj>

Normen

- [NIST SP 800-160] National Institute of Standards and Technology (2021), Developing Cyber-Resilient Systems: A Systems Security Engineering Approach, NIST Special Publication 800-160, Volume 2, Revision 1, <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-160v2r1>
- [ISO 27001] ISO/IEC 27001: Information security management systems. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/27001>
- [IEC 62443] IEC 62443: Industrial communication networks - Network and system security. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland. <https://webstore.iec.ch/searchform&q=IEC%2062443>
- [IEC 62351] IEC 62351: Power systems management and associated information exchange - Data and communications security. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland. <https://webstore.iec.ch/publication/6912>
- [ISO 22301] ISO/IEC 22391: Security and resilience — Business continuity management systems. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/75106.html>

Systemstabilität durch Leistungselektronik

Einleitung

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien geht eine Transformation des Stromnetzes einher. Auf der Erzeugerseite werden dezentral Windenergie- und PV-Anlagen größtenteils im Verteilnetz angeschlossen. Die Lastseite wird durch den Ausbau der Elektromobilität, dem Zuwachs an Wärmepumpen und neuen Akteuren, wie Elektrolyseuren, elektrifiziert. All diese Akteure haben gemeinsam, dass sie über Leistungselektronik an das Stromnetz gekoppelt werden.

Da der Betrieb des heutigen Netzes aber auf dem physikalischen Verhalten von Synchrongeneratoren basiert, fallen durch das Ausscheiden konventioneller Kraftwerke und deren rotierender Massen inhärent stabilisierende Eigenschaften weg.

Die Folge ist, dass die Maßnahmen zur Sicherstellung der Systemstabilität im Normalbetrieb als auch im Fehlerfall, wie beispielsweise dem System-Split, anderweitig übernommen werden müssen, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Relevante Stabilitätsaspekte sind die Spannungs- und Frequenzhaltung, sowie die Resonanzstabilität und die Bereitstellung von Kurzschlussströmen zum Auslösen von Komponenten des Netzschutzes im Fehlerfall und zur thermischen Auslegung der elektrischen Betriebsmittel. Die Schwarzstartfähigkeit und die Betriebsführung des Netzes sind ebenfalls Kategorien der Systemstabilität.

Diese Eigenschaften müssen zukünftig durch die neuen Akteure übernommen werden, was zur Folge hat, dass das Aufgabenspektrum der erneuerbaren Energien, Speichersysteme und weiteren Anlagen sowie Netzbetriebsmittel weiterentwickelt werden müssen.

Im Folgenden wird innerhalb der technischen Grundlagen erläutert, welche Möglichkeiten die Leistungselektronik dabei bietet und was genau unter Frequenzhaltung und Resonanzstabilität innerhalb der Systemstabilität verstanden wird.

Anschließend werden einzelne Forschungsprojekte vorgestellt, welche mit ihren Ergebnissen einen Beitrag zur Zielsetzung, die Systemstabilität durch

Leistungselektronik bereitzustellen, leisten. Auch der weitere Forschungsbedarf innerhalb dieses Themenfeldes wird aufgezeigt.

Technischer Hintergrund

Für den stabilen Betrieb des Stromnetzes muss jederzeit ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch herrschen. Gemäß dem physikalischen Verhalten von Synchrongeneratoren sinkt die Netzfrequenz bei fehlender Wirkleistung, während sie bei einem Überschuss an Wirkleistung steigt. Um Frequenzänderungen mit geeigneten Maßnahmen zu begegnen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im Zeitbereich von Millisekunden bis wenigen Sekunden wird die Momentanreserve durch die anlageninhärente Trägheit der Synchrongeneratoren der konventionellen Kraftwerke bereitgestellt. Dabei wirken die drehenden Bestandteile aufgrund ihrer Rotationsenergie wie Puffer.

Derzeit werden erneuerbare Energieanlagen fast ausschließlich über netzfolgende Stromrichter an das Stromnetz angebunden. Diese Systeme folgen mit ihrer Wirkleistungseinspeisung dem Spannungsverlauf am Netzanschlusspunkt. Die Stromrichterregelung folgt dem Netz hinsichtlich der Spannung, Frequenz und Phasenlage. Ein Betrieb ohne bereits vorhandenes Stromnetz ist für diese Anlagen nicht möglich.

Anlagen mit netzbildenden Stromrichtern verhalten sich hingegen wie Spannungsquellen am Stromnetz und sind aktiv in der Lage die Netzspannung und -frequenz zu regeln [1, 2]. Das Ziel letzterer Regelungsstrategie ist es, virtuell die physikalischen Eigenschaften und Funktionen von Synchrongeneratoren nachzuahmen und das Netz zu stabilisieren. Netzbildende Stromrichter kommen derzeit in Micro-Grids und Off-Grid Anwendungen zum Einsatz [3].

Zwischen induktiv und kapazitiv wirkenden Netzelementen, wie Übertragungskabeln, Filtern oder Kompensationseinheiten und Anlagenreglern bilden sich in einem Stromnetz Schwingkreise aus, welche dazu führen, dass der Strom zwischen



Fraunhofer IWES

*Gesa Quistorf
gesa.quistorf@iwes.fraunhofer.de*

DLR

*Nauman Beg
nauman.beg@dlr.de*

*Frank Scholdt
frank.scholdt@dlr.de*

Fraunhofer ISE

*Rebeka Denninger
rebeka.denninger@ise.fraunhofer.de*

Fraunhofer IEE

*Dr. Philipp Strauß
philipp.strauss@iee.fraunhofer.de*

Fraunhofer IEG

*Dr. Anton Plietzsch
anton.plietzsch@ieg.fraunhofer.de*

*Christoph Nolden
christoph.nolden@ieg.fraunhofer.de*

*Prof. Dr. Johannes Schiffer
johannes.schiffer@ieg.fraunhofer.de*

den unterschiedlichen Netzkomponenten pendelt. Wird der pendelnde Strom bei einer bestimmten Frequenz angeregt, verstärkt sich die Schwingung, das System schwingt auf. Bei einer Verstärkung der Schwingungen des Stroms kann es zu Beschädigungen von Betriebsmitteln kommen. In einem stromrichterbasierten Netz nehmen aufgrund der schaltenden Betriebsweise von leistungselektronischen Komponenten die elektrischen Wechselwirkungen zwischen den stromrichterbasierten Anlagen zu. Spannungen und Ströme gegenüber diesen Verstärkungen stabil zu halten, ist eine Herausforderung innerhalb der Resonanzstabilität, welche genaue Kenntnisse des Oberschwingungsverhaltens der einzelnen Anlagen und Netzkomponenten voraussetzt und darauf abzielt, Schwingungen in bestimmten Frequenzbereichen zu dämpfen.

Forschungsprojekte

Im Folgenden werden Forschungsprojekte vorgestellt, welche sich zum einem mit der Frage beschäftigen, ob ein resilientes Energiesystem bei einer vollständigen Durchdringung mit stromrichtergekoppelten Anlagen überhaupt möglich ist und welchen Beitrag beispielsweise die Elektromobilität leisten könnte.

Zum anderen werden Forschungsprojekte vorgestellt, welche Prüfinfrastruktur und Demonstratoren aufbauen, und Messverfahren entwickeln, um die elektrischen Eigenschaften während des

Entwicklungsprozesses der Anlagen zu validieren und genaue Modelle der Anlagen in diesem frühen Entwicklungsstadium bereitzustellen und damit die Markteinführung von netzbildenden Stromrichtersystemen zu unterstützen und zu beschleunigen.

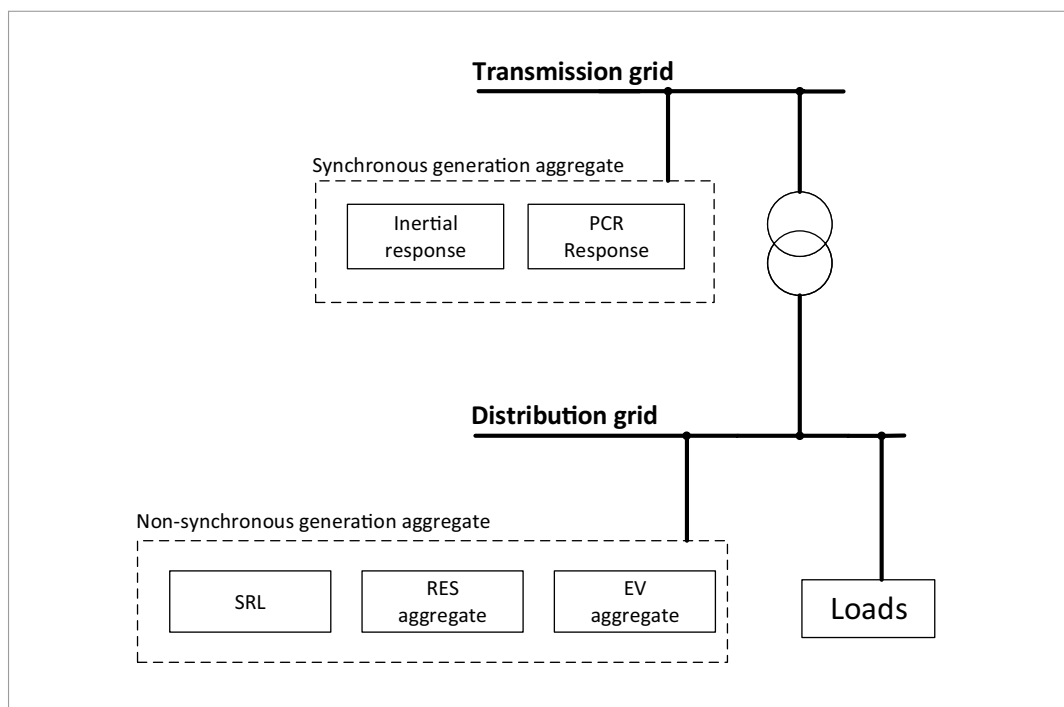
„**ROLLEN** – Rollende Ladestationen liefern Entlastung fürs Netz“ (09/2020 – 08/2023)
Innerhalb des Projektes „ROLLEN“ werden vom DLR die Auswirkungen und Anforderungen des stromnetzgekoppelten Energietransportes durch Batteriefahrzeuge auf der Verteilnetzebene analysiert [4].

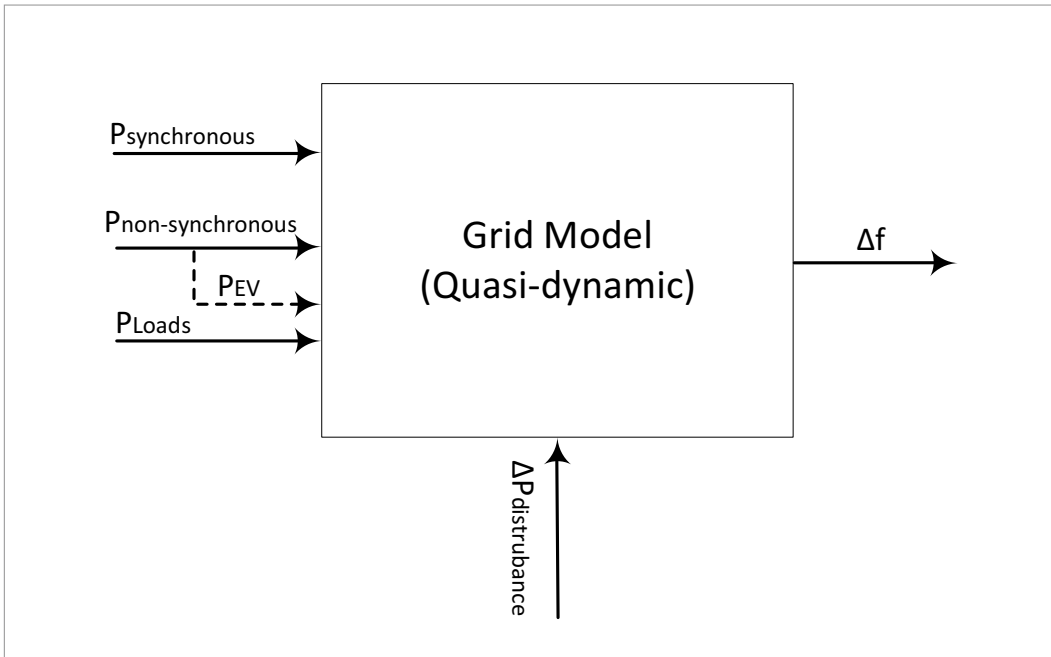
Ein Teilaspekt des Projektes fokussiert sich auf eine erste Abschätzung, ob die Elektromobilität neben den erneuerbaren Energien einen Beitrag zur Frequenzhaltung leisten kann. Dazu wird auf Grundlage der in NEP2035 beschriebenen Szenarien zur installierten synchronen und erneuerbaren Energieerzeugung in Deutschland ein aggregiertes Netzmodell vorgestellt, das die individuellen Leistungsänderungen gemäß den RfG-Richtlinien in jedem Aggregat (► Abbildung 1 und ► Abbildung 2) zur Frequenzstörung integriert. Das gekoppelte Batteriefahrzeuge-Aggregat (EV aggregat) kann als Netz-Einspeisung oder als aggregierte Last im Netzmodell konfiguriert werden. Die Last wurde in Abhängigkeit von zuvor definierten use cases für unterschiedliche Simulationsszenarien parametrisiert. Innerhalb der unterschiedlichen Simulationsfälle wurde der beschränkt frequenzabhängige Modus bei Über- und Unterfrequenz (limited frequency

► Abbildung 1

Übersicht des Netzmodells mit aggregiertem Übertragungs- (Transmission grid) und Verteilnetz (Distribution grid)

(Quelle: DLR)





► *Abbildung 2*

Implementierung des Netzmodells

(Quelle: DLR)

sensitive mode, LFSM) bei den erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen und der E-Fahrzeuge zu- oder abgeschaltet.

Die Simulationsstudie zeigt, dass neben den erneuerbaren Energien prinzipiell die Elektromobilität einen Beitrag zu Reduzierung der Frequenzabweichung liefern kann. Als nächstes muss die Frequenzunterstützung vom Verbundnetz in das Modell aufgenommen werden, um eine realistische Schätzung der Auswirkungen auf Frequenzstörungen zu ermöglichen.

„VerbundnetzStabil – Stabiles Verbundsystemverhalten bei umrichterbasierter Erzeugung“ (08/2017 – 07/2021)

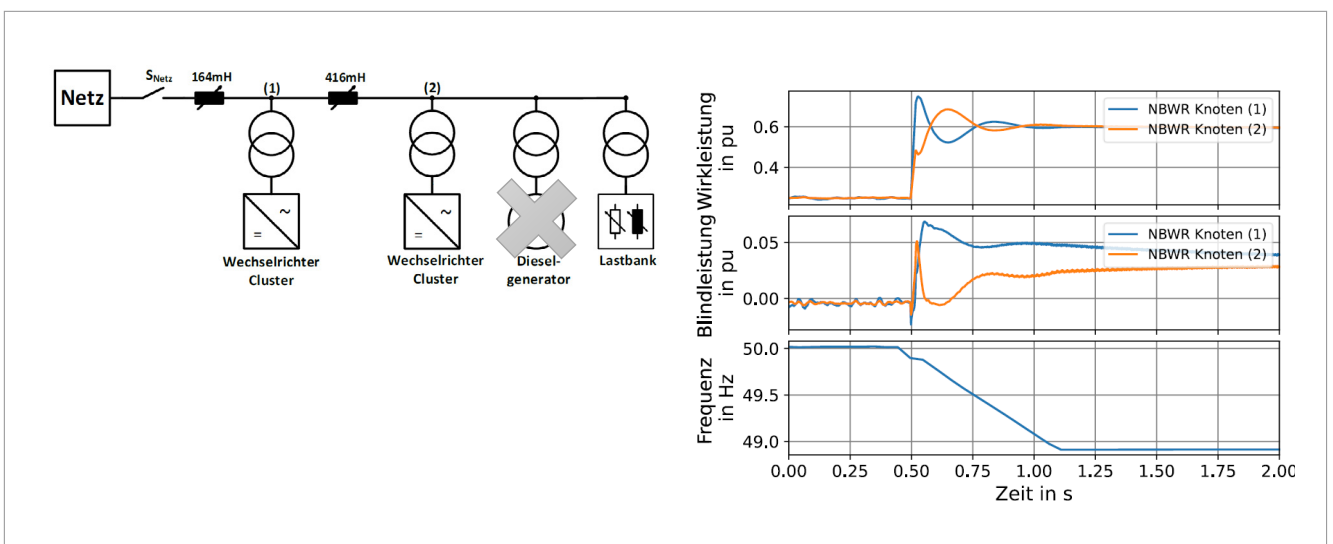
Das Konsortium des Projekts „VerbundnetzStabil“ befasst sich mit der Erhaltung eines stabilen Verbundsystems bei einer hohen Durchdringung mit Erzeugungsanlagen, welche über Leistungselektronik an das Stromnetz gekoppelt sind [3]. Das Fraunhofer ISE untersuchte u.a. das elektrische Verhalten von netzbildenden Wechselrichtern im Verbundsystem mit bis zu 100% erneuerbarer Energieerzeugung. Dazu wurde im Multi-MW Labor des Fraunhofer ISE in Freiburg ein Testszenario bestehend aus zwei Wechselrichter-Clustern mit jeweils 5 Umrichtern mit netzbildender Regelung und einer Lastbank

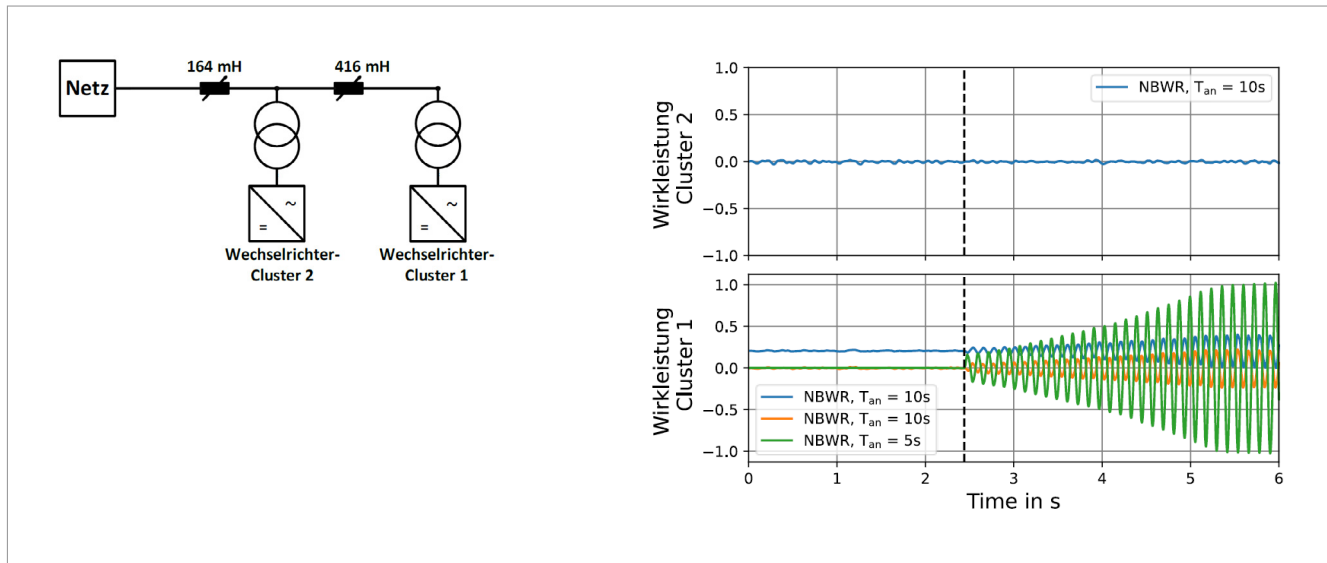
► *Abbildung 3*

Testaufbau im MW-Labor des Fraunhofer ISE in Freiburg (links).

Ergebnis der Testdurchführung eines System-Splits mit Erzeugern, welche zu 100% über netz-bildende Wechselrichter (NBWR) angeschlossen sind (rechts).

(Quelle: Fraunhofer ISE)





► Abbildung 4

Instabilitäten im Netzbetrieb – Testaufbau im MW-Labor des Fraunhofer ISE in Freiburg (links).

Testergebnis bei unterschiedlicher Parametrierung der Anlaufzeitkonstante innerhalb der Stromrichter (rechts).

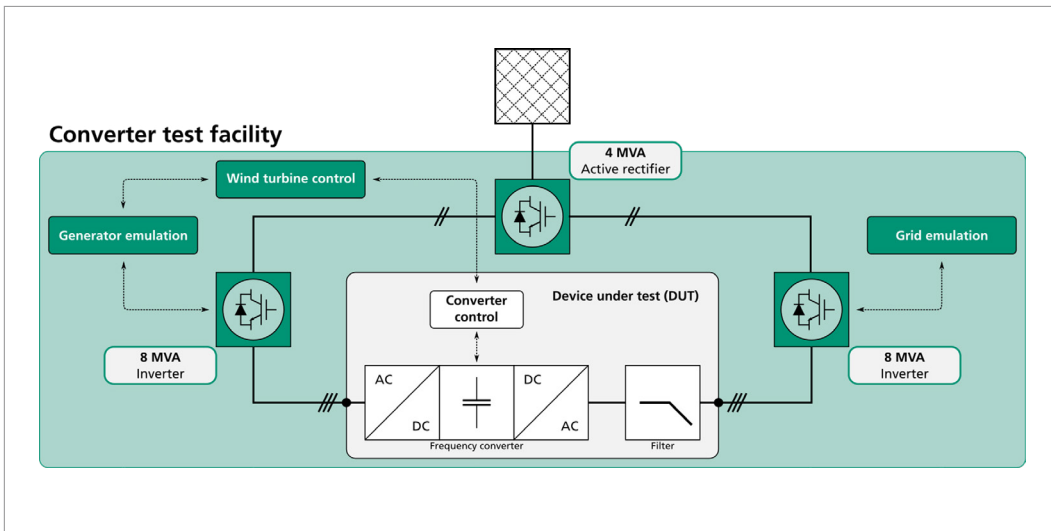
(Quelle: Fraunhofer ISE)

aufgebaut, wie in ► Abbildung 3 dargestellt. Innerhalb des Betriebs wurde ein System-Split durch Trennen des Labornetzes vom übergeordneten öffentlichen Netz erzeugt. Nach der impedanzbasierten instantanen Leistungsaufteilung erreicht die Wirkleistung innerhalb von rund 0,6s nach dem Event eine gleichmäßige Aufteilung der Wirkleistung, welche sich durch die identische Parametrierung der Umrichter ergibt. Durch das erzeugte Ereignis fällt die Frequenz auf 49 Hz ab und die Umrichter sind im Stande, das Netz bei 49 Hz stabil zu betreiben (► Abbildung 3).

In einem zweiten Versuch wurden die Stromrichter in den Umrichter-Clustern, bestehend aus insgesamt sieben Systemen, unterschiedlich parametrierung. Davon wurden sechs Stromrichter mit einer Anlaufzeitkonstante von 10s betrieben. Nach einer definierten Zeit wurde ein siebter Stromrichter mit einer Anlaufzeitkonstante von 5s dazugeschaltet. Bei der Zuschaltung kam es zu Instabilitäten im Labornetz, wie in ► Abbildung 4 zu erkennen ist. Dieser Versuch zeigt, dass für eine sichere Integration von netzbildenden Wechselrichtern die Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften elementar ist und diese in Regelwerken standardisiert sein muss. Hierzu werden Projekte, wie das GFM Benchmark Projekt des Fraunhofer ISE benötigt, um die Vermessung netzbildender Wechselrichter mit verschiedenen Herstellern zu entwickeln, zu testen und zu optimieren.

„PQ4Wind – Power-Quality-Test und Impedanz-Modell-Validierung für Hauptumrichter von Windenergieanlagen“ (12/2019 – 12/2024)

Innerhalb des Projektes „PQ4Wind“ wird vom Fraunhofer IWES u.a. ein hochpräziser Umrichterprüfstand mit einer Leistung von 8 MVA für die Charakterisierung des Oberschwingungsverhaltens von Umrichtern und zur Validierung von entsprechenden Modellen gebaut, sowie Messverfahren zur Bestimmung des Oberschwingungsverhaltens bis zur 200. Ordnung entwickelt und erprobt [5]. Die späteren Vermessungsergebnisse, sowie die validen Modelle der Umrichtersysteme können zukünftig bei den Untersuchungen innerhalb der Resonanzstabilität eingesetzt werden. Wie in der ► Abbildung 5 dargestellt, werden auf dem Prüfstand beispielsweise der Generator einer Windenergieanlage und das Stromnetz durch leistungselektronische Emulatoren mit Einsatz des Hardware-in-the-loop Prinzips ersetzt. Durch die Fähigkeit Oberschwingungen bis zu 10 kHz durch die Emulatoren einprägen zu lassen, können detaillierte Modelle des Oberschwingungsspektrums der Prüflinge bei genauer Kenntnis über das elektrische Verhalten der Emulatoren generiert werden. Gerade im Windbereich befindet sich der Einsatz von netzbildenden Stromrichtern in der Entwicklungs- und Validierungsphase. Hier werden kurzfristig Projekte benötigt, um prüfstands-basierte Validierungsprozesse für die elektrischen Eigenschaften auf Komponentenebene aber auch für das Turbinendesign zu entwickeln und zu testen.



► Abbildung 5

Übersicht des Umrichterprüfstands PQ4Wind.

Der Umrichter (DUT) wird an die 8 MVA Umrichtersysteme (Inverter) gekoppelt, welche das Generatorverhalten (Generator emulation) und das Stromnetzverhalten (Grid emulation) emulieren.

(Quelle: IWES)

„Netzregelung 2.0 – Regelung und Stabilität im stromrichterdominierten Verbundnetz“ (12/2017 – 08/2022)

Im Projekt „Netzregelung 2.0“ [6] hat das Fraunhofer IEE u.a. auf Systemebene einen Nachweis erbracht, dass das elektrische Verbundnetz mit sehr hohen Stromrichteranteilen durch geeignete netzbildende Regelungsverfahren nicht nur im Normalbetrieb des Netzes, sondern auch in worst-case Szenarien, wie dem System-Split, stabil betrieben werden kann. Neben dem Fazit, dass Momentanreserve im Übertrags- und Verteilnetz von Batteriesystemen, Windenergieanlagen, PV, rotierenden Phasenschieber und Lasten sowie Statcoms bereitgestellt werden kann und eine räumliche Verteilung dieser Akteure dafür wichtig ist, wurde an Methoden zur Detektion von Teilnetzen sowie die darauffolgende

Koordination mit dem Netzschutz auf Verteilnetzebene gearbeitet. Diese ersten Schritte werden vom Fraunhofer IEE im Projekt Verteilnetz 2030+ weitergeführt. Die Ergebnisse des Projektes Netzregelung 2.0 sind auch in die „Roadmap Systemstabilität“ der Bundesregierung (siehe BMWi - Roadmap Systemstabilität) eingeflossen. Um Erfahrungen zu sammeln, ist ein wichtiger nächster Schritt die Einführung der netzbildenden Wechselrichter in die Verteilnetze beispielsweise durch Demonstratoren und Ausschreibungen.

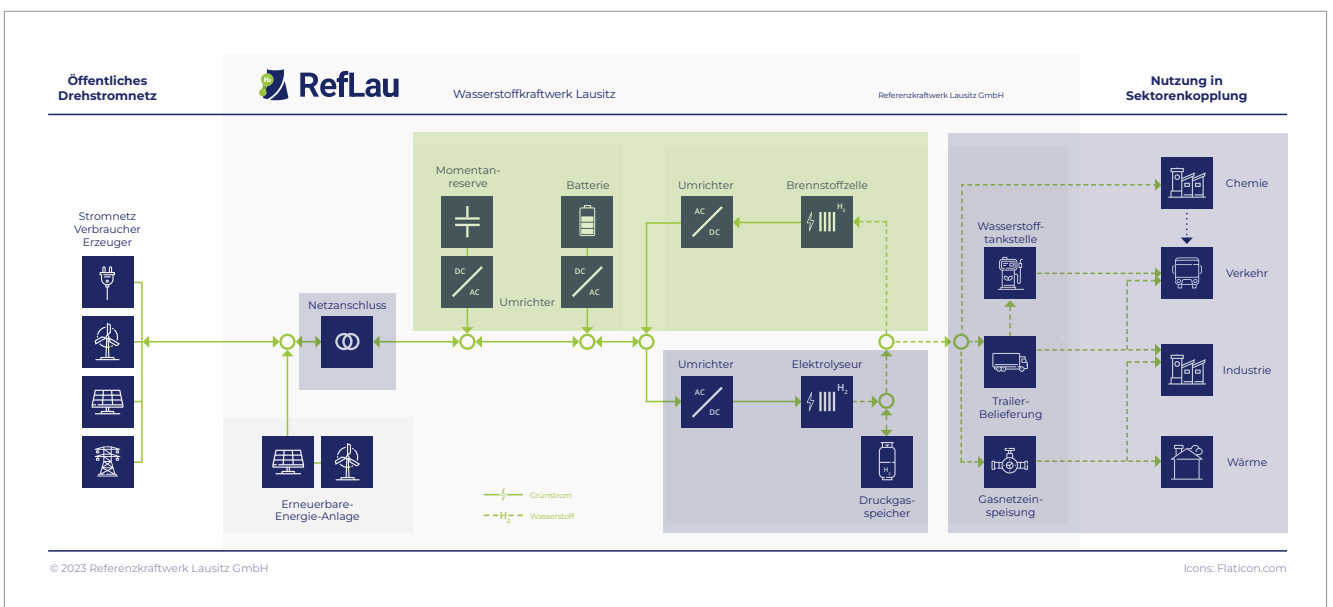
„RefLau – Referenzkraftwerk Lausitz“ (01/2023 – 12/2027)

Ein erster Schritt in die Richtung von Demonstratoren stellt beispielsweise das Projekt „RefLau“ des Fraunhofer IEG dar. In diesem Projekt wird ein

► Abbildung 6

Übersicht des Referenzkraftwerks Lausitz.

(Quelle: IEG)



© 2023 Referenzkraftwerk Lausitz GmbH

Icons: Flaticon.com

hybrides Speicherkraftwerk im Industriepark Schwarze Pumpe in Spremberg aufgebaut [7]. Der Aufbau des Kraftwerks ist in ► Abbildung 6 dargestellt.

Das hybride Speicherkraftwerk ist an das öffentliche Stromnetz gekoppelt und wird aus PV- und Windenergieanlagen gespeist. Die überschüssige Energie wird durch Elektrolyse in Wasserstoff gespeichert und über Wasserstofftanks zum einen dem Mobilitätssektor und der Industrie zur Verfügung gestellt und zum anderen in Zeiten geringer PV- und Windenergieerzeugung mithilfe einer Brennstoffzelle rückverstromt. Um auch Regenergie und Momentanreserve zur Verfügung stellen zu können, wird die Brennstoffzelle zusätzlich durch einen Momentanreservespeicher (z.B. Superkondensator) und eine Batterie ergänzt. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen geeignete netzbildende Regelungsstrategien für die Stromrichter und die Gesamtanlage entwickelt und getestet werden, mit denen am Netzkopplungspunkt alle relevanten Systemdienstleistungen eines konventionellen Kraftwerkes nachgebildet werden können. Das Kraftwerk befindet sich derzeit in Planung und soll voraussichtlich 2026 in den Forschungsbetrieb gehen.

Referenzen

1. Ph. Strauss and A. Engler, "AC coupled PV hybrid systems and microgrids-state of the art and future trends," 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of, Osaka, Japan, 2003, pp. 2129-2134 Vol.3. [www.academia.edu/18412776]
2. Unruh, Peter; Nuschke, Maria; Strauß, Philipp; Welck, Friedrich (2020): Overview on Grid-Forming Inverter Control Methods. In: Energies 13 (10), S. 2589. DOI: 10.3390/en13102589.
3. Ph. Ernst et al., „VERBUNDNETZSTABIL – Stabiles Verbundsystemverhalten bei umrichterbasierter Erzeugung“ öffentlicher Schlussbericht, TIB Hannover, Förderkennzeichnung 0350015A-D
4. Forschungsprojekt ROLLEN, DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme, FKZ 03ETE029D
5. Ph. Borowski et al. „PQ4Wind – Novel test bench for component level wind turbine converter testing“, 21st Wind & Solar Integration Workshop, 2022, Niederlande.
6. Ph. Strauss et. al., „Netzregelung 2.0 – Regelung und Stabilität im stromrichterdominierten Verbundnetz öffentlicher Schlussbericht, TIB Hannover, Förderkennzeichen: 0350023A-F
7. Referenzkraftwerk Lausitz GmbH, RefLau, 2022, FKZ 03EWR018A, <https://www.reflau.com/projekt>

Resiliente Stromnetze

Einleitung

Stromnetze sind das Rückgrat der modernen Gesellschaft und spielen eine entscheidende Rolle in der weltweiten Energiewende. Sie bilden das essenzielle Bindeglied zwischen Erzeugern und Verbrauchern elektrischer Energie und tragen so zur räumlichen Übertragung und Verteilung bei. Als kritische Infrastrukturen sind diese Netze unerlässlich. Sollten sie ausfallen, wären die Folgen gravierend: Verbraucher blieben ohne Strom, und systemkritische Bereiche wie das Gesundheitswesen, der Verkehr und öffentliche Behörden könnten nicht mehr funktionieren. Daher hat ein sicherer, stabiler und resilienter Betrieb dieser Netze innerhalb des europäischen Netzverbands höchste Priorität.

Die Energienetze stehen aktuell vor diversen Herausforderungen, darunter die Dekarbonisierung mittels Wind- und Photovoltaikanlagen und die sektorenübergreifenden Veränderungen wie Wärmepumpen und Elektromobilität.

Mit der Energiewende geht ein Wandel in der Stromerzeugung einher: Ein höherer Anteil verteilter Erzeugung in Verteilnetzen mit variabler Produktion wird erwartet. Informations- und Kommunikationstechnologien gewinnen somit an Bedeutung, wodurch Automatisierung ermöglicht wird. Für die Resilienz des Gesamtsystems ergeben sich hierdurch neue Möglichkeiten, aber auch Risiken und potenzielle Angriffspunkte.

In diesem Artikel definieren wir zunächst den Begriff Resilienz für die Stromnetze. Dann thematisieren wir die zunehmende Relevanz von Digitalisierung und Automatisierung in Stromnetzen. Anschließend fokussieren wir uns auf den Einsatz von Prognosen und kurativer Systemführung für einen vorausschauenden Netzbetrieb an den Systemgrenzen. Dann betrachten wir den Einsatz netzbildender Stromrichter für eine inhärente Systemstabilität und Strategien zur Stärkung der Resilienz durch optimierte Netzplanung und Schutztechnik. Den Abschluss bildet die Darstellung des Netz- und Versorgungswiederaufbaus.

Definition von Resilienz im Stromnetz

Resilienz beschreibt die Fähigkeit eines Systems, sich gegenüber extremen Ereignissen zu behaupten, sich anzupassen, sie zu überstehen und sich von ihnen zu erholen. Im Kontext von Stromnetzen umfasst dies das Aufrechterhalten der Versorgung, schnelle Anpassungen zur Notversorgung, den Wiederaufbau nach Störungen und die stetige Verbesserung des Systems basierend auf gemachten Erfahrungen, wie in der Quelle [1] beschrieben (► Abbildung 1).

Es ist entscheidend, zwischen den direkten Auswirkungen solcher Ereignisse auf die Verbraucher*innen und den Einflüssen auf die Infrastruktur selbst zu unterscheiden. Viele Störungen können durch vorhandene Redundanzen und betriebliche Flexibilität abgedeckt werden. Doch wenn diese Maßnahmen nicht ausreichen, können Versorgungsunterbrechungen auftreten, welche das tägliche Leben erheblich beeinträchtigen. Extremereignisse, die selten auftreten, aber schwerwiegende Folgen haben können – bekannt als "High Impact, Low Probability"-Ereignisse – können durch Naturkatastrophen, Angriffe oder menschliches bzw. technisches Versagen ausgelöst werden. Sie könnten direkt zu einer Zerstörung von Betriebsmitteln führen oder indirekt durch eine eingeschränkte Verfügbarkeit von Primärenergie, Personal oder Datennetzen beeinflussen. Das Zusammenspiel verschiedener negativer Faktoren kann zu besonders langanhaltenden Ausfällen führen.

Chancen und Risiken aus Digitalisierung und Automatisierung für die Resilienz

Die Energiewelt steht durch die Digitalisierung vor einem Wandel, der eine immer stärkere Vernetzung und Automatisierung mit sich bringt. Bei Übertragungsnetzen, die hohe Anforderungen an die Versorgungszuverlässigkeit stellen, ist dieser Wandel bereits stark fortgeschritten. Doch je niedriger die Spannungsebene im Verteilnetz, desto weniger wurde bisher digitalisiert. In Niederspannungsnetzen fehlt es beispielsweise



Fraunhofer IEE

& Universität Kassel

Prof. Dr. Martin Braun
martin.braun@iee.fraunhofer.de

Dr. Denis Mende
denis.mende@iee.fraunhofer.de

Christian Hachmann
christian.hachmann@iee.fraunhofer.de

Holger Becker
holger.becker@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer IEE

Dr. Malte Siefert
malte.siefert@iee.fraunhofer.de

DLR

Karen Derendorf
karen.derendorf@dlr.de

Dr. Karsten von Maydell
karsten.maydell@dlr.de

Fraunhofer ISE

Philipp Ernst
philipp.ernst@ise.fraunhofer.de

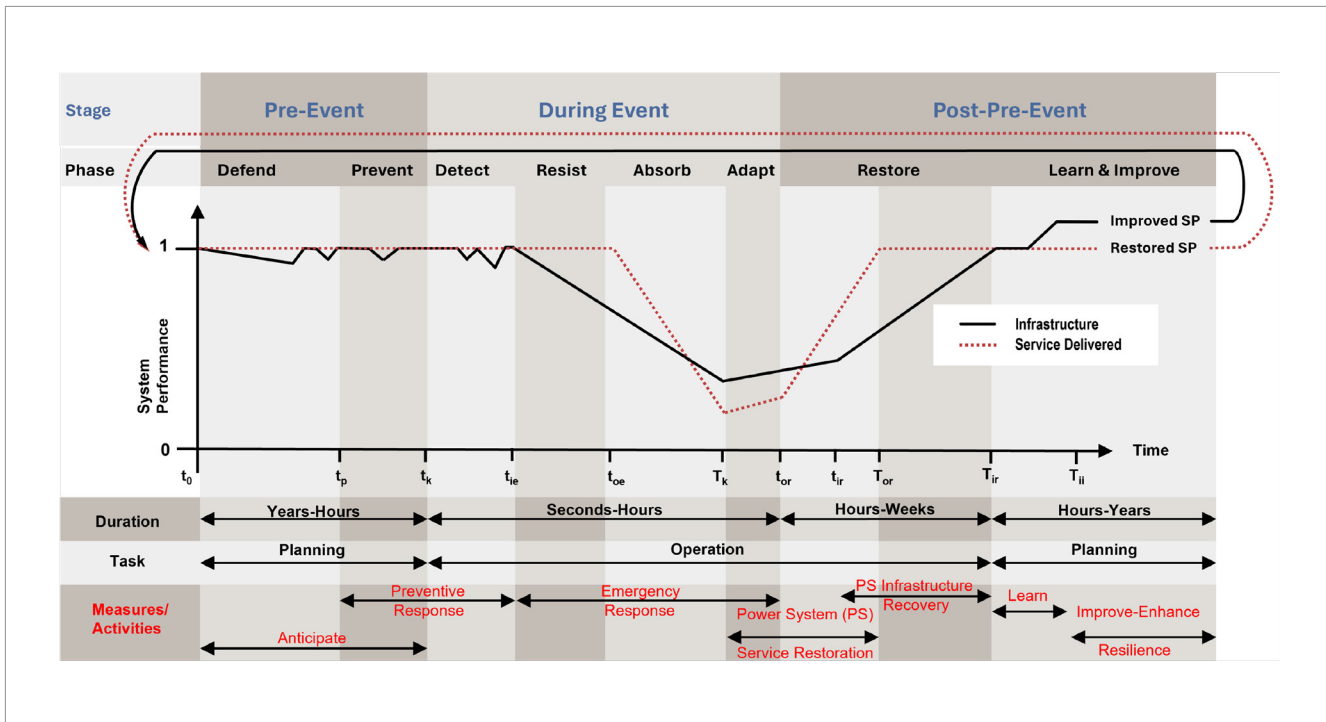
Dr. Robert Kohrs
robert.kohrs@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer IWES

Dr. Georg Pangalos
georg.pangalos@iwes.fraunhofer.de

ZSW

Christian Tomschitz
christian.tomschitz@zsw-bw.de



► **Abbildung 1**
Verlauf eines systemkritischen Ereignisses auf die Stromversorgung

(Quelle: [1])

häufig an Monitoring, wodurch zentrale Steuerungs- und Automatisierungsmöglichkeiten begrenzt sind. Dennoch sind diese Netze so dimensioniert, dass sie alle bisherigen Energieflüsse bewältigen können. Die zunehmende Dezentralisierung der Stromerzeugung und der Einsatz steuerbarer Speicher- und Verbraucheranlagen könnten durch intelligente Steuerungssysteme den Bedarf nach Netzausbau reduzieren. Doch diese Technologien bringen auch neue Gefahren. Die steigende Abhängigkeit von Informations- und Kommunikationstechnologien eröffnet potenzielle Angriffspunkte für Cyberangriffe. Daher müssen im Netzbetrieb Resilienz-Maßnahmen ergriffen werden [2], bis hin zu speziellen Betriebsmodi für erkannte Störungen.

Das DLR hat z.B. im vom BMWK geförderten Projekt IKT-FREE untersucht, wie Fallback-Lösungen (z.B. mit spannungsabhängiger Wirkleistungsreduktion) im Falle eines IKT-Ausfalls kritische Netzbelastungen auffangen können. Automatisierung birgt zudem Chancen: Der Mikronetzbetrieb ermöglicht beispielsweise bei ausreichender Erzeugungs- und Speicherkapazität einen Inselbetrieb in Notfällen.

Prognosen und Zustandsschätzung für vorausschauenden Netzbetrieb

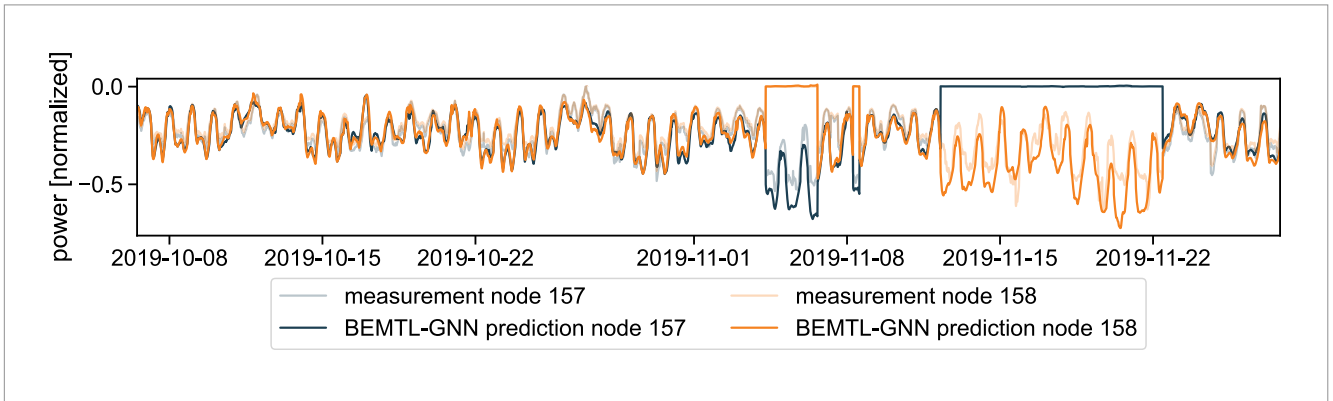
Prognosen sind für resiliente Energiesysteme unentbehrlich. Mit einer wachsenden Anzahl an Energieerzeugern und -verbrauchern wird es immer wichtiger, zuverlässige Prognosen für viele

unterschiedliche Einheiten zu erstellen. Photovoltaikanlagen, Windkraftwerke, Elektroautos und Wärmepumpen stellen hier nur eine Auswahl dar. Die Qualität dieser Vorhersagen ist essentiell. Maschinelles Lernen, insbesondere Transferlernen, kontinuierliches Lernen und Graph Neural Networks sind hierbei von zentraler Bedeutung. Sie helfen, Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Einheiten vorherzusagen, wie beispielsweise das Einflussverhalten von Netzschaltungen auf benachbarte Transformatoren (► Abbildung 2). Transparenz in der Niederspannungsebene ist oft eingeschränkt, weshalb die genaue Erfassung von Erzeugung und Verbrauch eine Herausforderung darstellt.

Der Informationsaustausch zwischen den Netzebenen, insbesondere für Prognosen, ist ebenso komplex. Um die Versorgungssicherheit ganzjährig sicherzustellen sind darüber hinaus saisonale Vorhersagen von großer Relevanz.

Kurative Systemführung zur Höherauslastung der Netze

Resilienz in der Energieversorgung und optimale Nutzung vorhandener Netzkapazitäten gehen Hand in Hand. Das Forschungsprojekt "InnoSys 2030" (www.innosys2030.de) zielte darauf ab, mehr Leistung durch das bestehende Transportnetz zu transportieren, ohne die Systemsicherheit zu beeinträchtigen. Dies würde eine erhöhte



Einspeisung erneuerbarer Energien ermöglichen. Die "kurative Systemführung" stellt eine Lösung für die effizientere Nutzung der Netzinfrastruktur dar. Sie beruht auf einer vordefinierten kurativen Arbeitspunktänderung, die bei einem unerwarteten Netzereignis innerhalb von Sekunden bis Minuten aktiviert wird. Für die optimale Dimensionierung der kurativen Maßnahme werden Temperaturreerven im Normalbetrieb genutzt, um eine temporäre Höherauslastung zu erzielen (► Abbildung 3). Allerdings begrenzt die Dauer bis zur Wirksamkeit der kurativen Maßnahme die zulässige Höherauslastung.

Das Fraunhofer IEE hat ein Framework entwickelt, das den präventiven und kurativen Einsatz im operativen Engpassmanagement optimiert und wird dieses für den Einsatz im Verteilnetz weiterentwickeln.

Netzbildende Stromrichter liefern inhärente Systemstabilität

Die Sicherstellung von Frequenz- und Spannungsstabilität in elektrischen Netzen wird durch neue Komponenten und Interaktionen komplexer. Leistungselektronik ermöglicht neue Regelungsmöglichkeiten, die auch als eine Form der Digitalisierung angesehen werden können. Netzbildende Stromrichter können beispielsweise Momentanreserveleistung, insbesondere für kritische Systemsituationen wie Netzauftrennungen, instantan bereitstellen und den Frequenzgradienten abflachen. Projekte wie "Netzregelung 2.0" und "VerbundnetzStabil" haben diese Regelungsmöglichkeiten ausführlich untersucht.

Im Rahmen des Projekts "VerbundnetzStabil" wurden die Stabilitätsanforderungen von Verbundnetzen bei hohen Anteilen umrichterbasierter Erzeugung simulativ analysiert.

► Abbildung 2

Verbesserung der Prognose von Leistungsflüssen nach Netzschaltungen durch Einsatz graphischer neuronaler Netze

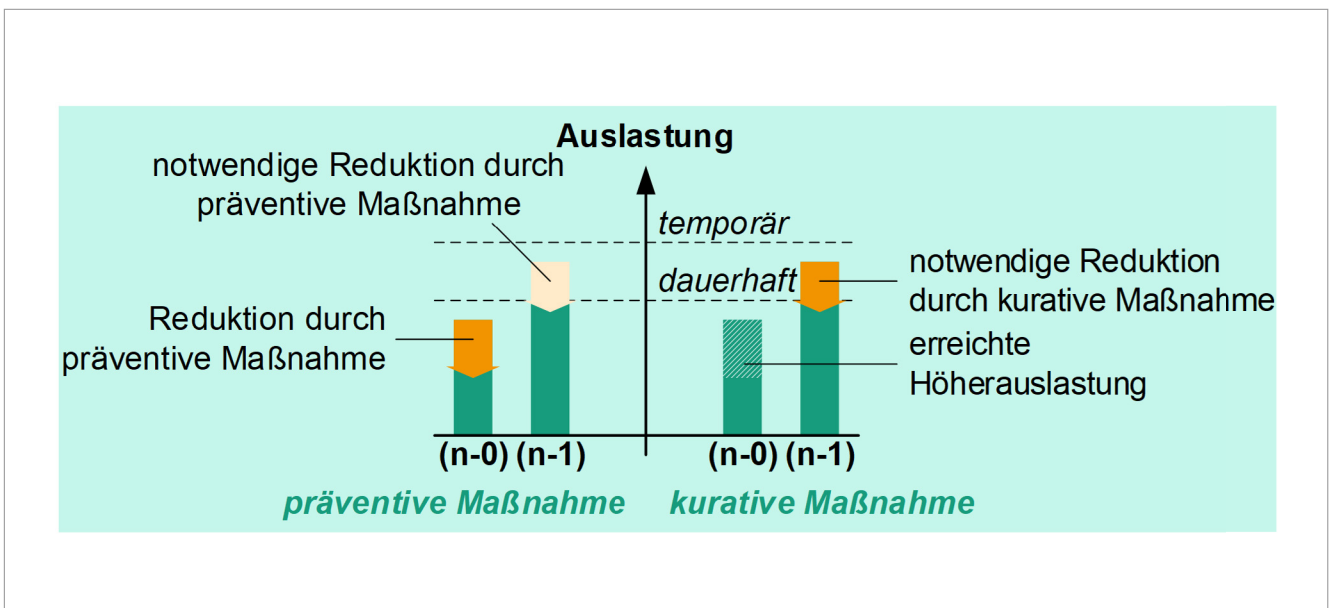
(Quelle: Fraunhofer IEE [6])

► Abbildung 3

Vergleich von präventiver und kurativer Maßnahme:

Durch kurative Maßnahmen kann das Netz im Normalbetrieb (n-0) stärker ausgelastet werden und bei Netzfehlern (n-1) kann kurativ ausreichend schnell reagiert werden.

(Quelle: Fraunhofer IEE [7])



Diese Erkenntnisse führten zur Entwicklung eines spannungseinprägenden Regelungskonzepts, das in marktbasierter Wechselrichter-Hardware umgesetzt und im Labor im Megawattmaßstab getestet wurde. Ein Feldtest zeigte, dass Frequenz- und Spannungseinbrüche durch die entwickelten netzbildenden Stromrichter in akzeptablen Grenzen gehalten werden konnten. Das Fraunhofer ISE-Bürogebäude wurde in der Insel stabil und ohne Unterbrechungen versorgt (► Abbildung 4) [4].

sicherzustellen.

Doch wenn man den Fokus auf Resilienz legt – also auf die Fähigkeit des Systems, sich von Extremereignissen zu erholen, die den simultanen Ausfall mehrerer Betriebsmittel mit sich bringen könnten – muss diese Planung entsprechend erweitert werden. Es ist wirtschaftlich nicht tragbar, ständige Redundanzen und Reserven vorzuhalten, die eine lückenlose Bewältigung selbst massiver Mehrfach-Ausfälle garantieren würden. Daher ist eine differenziertere Herangehensweise unerlässlich.

Optimierte Netzplanung und angepasste Schutztechnik verbessern die Widerstandskraft

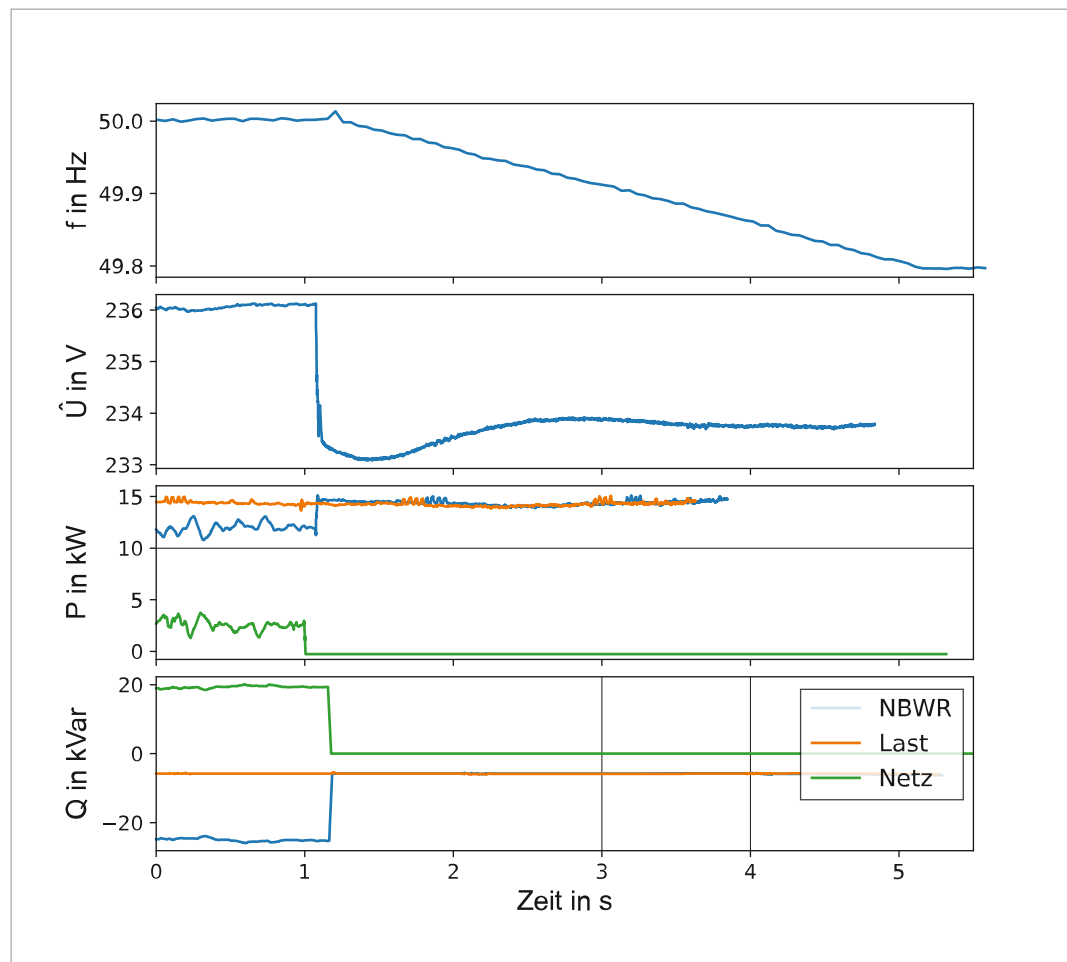
Die traditionelle Netzplanung legt Wert auf die Berücksichtigung der Auswirkungen, die durch den Ausfall eines einzelnen Betriebsmittels entstehen könnten. Dementsprechend wird durch gezielte Planung und Auslegung sichergestellt, dass sich aus solchen Ausfällen resultierende Versorgungsunterbrechungen minimal halten. Auf höheren Spannungsebenen ist die (n-1)-Sicherheit gängige Praxis, um eine hohe Netz-Zuverlässigkeit

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts RESIST werden verschiedene Methoden zur Optimierung von Netzen und Schutzeinrichtungen erforscht. Die ersten Analysen deuten darauf hin, dass ein verhältnismäßig geringer Prozentsatz der Leitungen einen erheblichen Anteil des gesamten Schadens bei Mehrfach-Fehlern verursacht. Um diese Schwachstellen zu adressieren, könnten Maßnahmen wie die gezielte Verstärkung von Betriebsmitteln, die Anpassung von Wartungszyklen, intensives Vegetationsmanagement und weitere ergriffen werden.

► Abbildung 4

Netzbildende Wechselrichter (NBWR) übernehmen die Versorgung eines Bürotrakts aus dem Netz bei akzeptablen Frequenz- und Spannungseinbrüchen.

(Quelle: Fraunhofer ISE [4])



Das Hauptziel dieser Bemühungen ist die Minimierung des Ausfallrisikos für besonders kritische Betriebsmittel.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die räumliche Anordnung kritischer Infrastrukturelemente. Die Bündelung vieler solcher Elemente – wie beispielsweise das Verlegen entlang einer gemeinsamen Trasse – sollte kritisch überprüft und möglichst vermieden werden, um das Risiko kaskadierender Ausfälle zu minimieren. Zudem können durch Optimierung der Schutzeinstellungen Versorgungsunterbrechungen bei Mehrfach-Fehlern reduziert werden (► Abbildung 5) [5].

Die Witterungsabhängigkeit erneuerbarer Energiequellen und die ständig wechselnden Lastflüsse verlangen nach einer raschen Wiederherstellung eines Rumpfnetzes, das sich über ganz Deutschland erstreckt, um den Energiefluss wiederherzustellen. Auch Verteilnetzbetreiber können Netzinseln errichten. Dies erfordert sowohl genaue Prognosen als auch gebündelte Steuerungsmöglichkeiten. Zusätzliche Inselnetze könnten den Wiederaufbauprozess im Übertragungsnetz erheblich beschleunigen. Hierbei ist eine intensivere Koordination zwischen den Betreibern der Übertragungs- und Verteilnetze von großer Bedeutung.

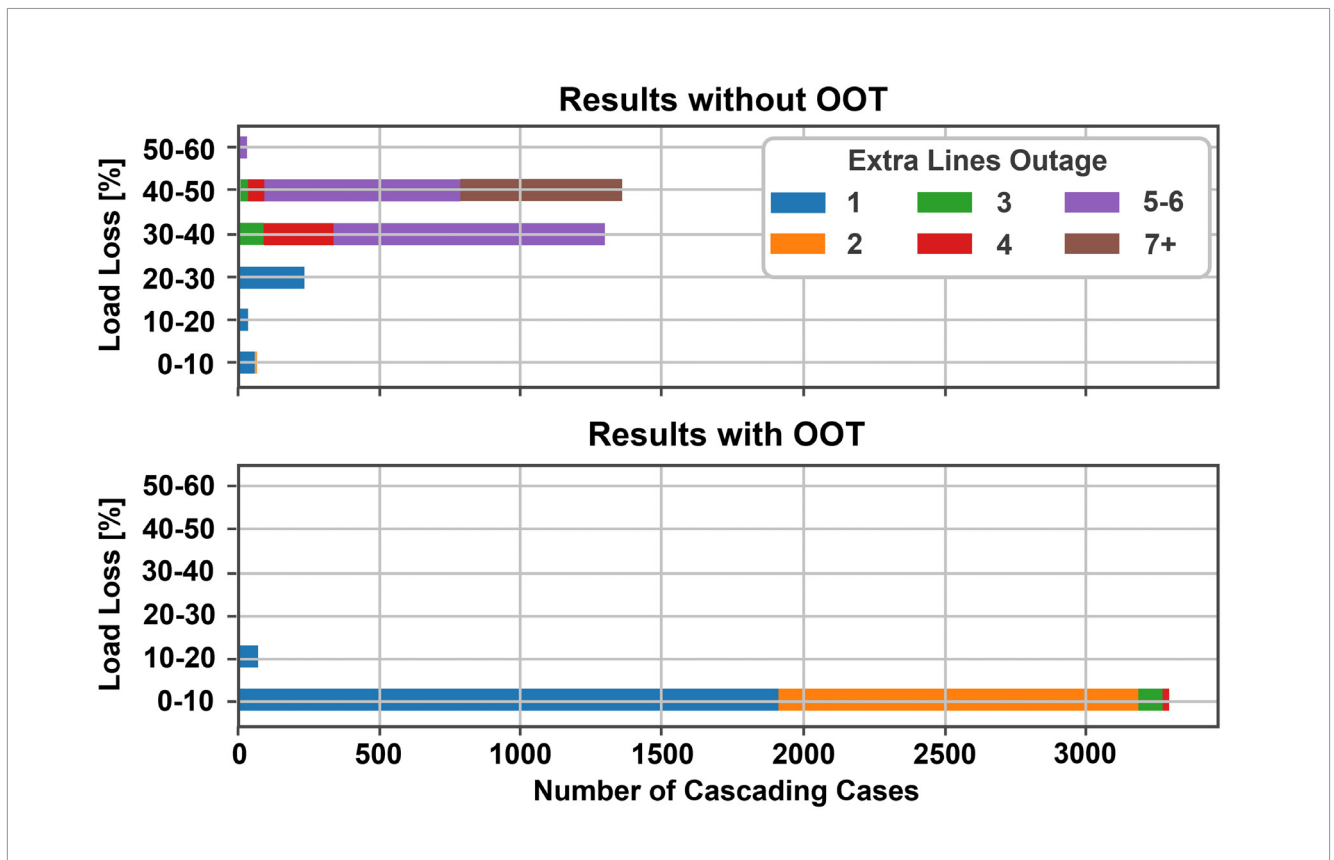
Netz- und Versorgungswiederaufbau

Moderne Strategien zum Netz- und Wiederaufbau beruhen auf dem sogenannten Schwarzstart im Übertragungsnetz. Bei dieser Methode stellt eine Schwarzstarteinheit die Energie bereit, die benötigt wird, um Kohlekraftwerke im Übertragungsnetz wieder in Betrieb zu nehmen. Jedoch mit der kontinuierlichen Abkehr von der Kohle und dem erhöhten Fokus auf erneuerbare Energien findet eine signifikante Verlagerung der Erzeugungsleistung und der Bereitstellung von Systemdienstleistungen von der Übertragungs- zur Verteilungsebene statt.

Im Projekt SysAnDuk, gefördert vom BMWK, wurde ein spezieller Netzwiederaufbaumodus in einem Windpark eingeführt. Über eine zentrale Leitstelle kann dieser Modus aktiviert werden, wodurch der Windpark seine Einspeiseprognosen direkt übermittelt. Daraufhin können gezielte Systemdienstleistungen angefordert und bereitgestellt werden. Diese innovative Herangehensweise wurde in einem Feldtest erfolgreich erprobt. Für PV-Kleinstanlagen und Batteriespeicher ist ein eigenständiges Managementsystem erforderlich. Im Rahmen des Projekts wurde das sogenannte Flächenkraftwerk (FLKW) entwickelt, das eine

► Abbildung 5

Die Optimierung der schutztechnischen Auslegung (OOT-Algorithmus) übernehmen die Versorgung eines Bürotrakts aus dem Netz bei akzeptablen Frequenz- und Spannungseinbrüchen.
(Quelle: Fraunhofer IEE [5])



funktionale Aggregation zahlreicher Anlagen ermöglicht. Mit diesem Tool können Leistungsflüsse zwischen verschiedenen Netzbetreibern präzise vorhergesagt und gesteuert werden.

Zusammenfassung

Die Elektrizitätsnetze sind essenziell für unsere kritischen Infrastrukturen und daher sind Sicherheit, Stabilität und insbesondere Resilienz von größter Bedeutung. Durch den Vormarsch der Digitalisierung und der Automatisierung in allen Netzsegmenten steigt die Bedeutung robuster IKT-Resilienz. Transparenz, unterstützt durch Zustandserkennung und Prognosetools, ist unerlässlich für einen sicheren und effizienten Netzbetrieb.

In dieser Landschaft spielen netzbildende Stromrichter eine Schlüsselrolle bei der Sicherung der Systemstabilität. Spezialisierte Schutzmechanismen und Strategien für den Netz- und Versorgungswiederaufbau, einschließlich des Einsatzes von Verteilnetzinseln, sind entscheidend.

Die Roadmap Systemstabilität des BMWK, die durch Einbindung zahlreicher Stakeholder und Experten erarbeitet wurde, zeigt hierfür wichtige nächste Umsetzungsschritte auf, um einen sicheren und robusten Systembetrieb bei 100% erneuerbaren Energien zu gewährleisten. Resilienz der Stromnetze ist ein fundamentaler Eckpfeiler für das Gelingen der Energiewende.

Referenzen

- [1] IEEE PES Task Force: et al., "Methods for Analysis and Quantification of Power System Resilience," in IEEE Transactions on Power Systems, 2022, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3212688>
- [2] M. Braun, C. Hachmann and J. Haack, "Blackouts, Restoration, and Islanding: A System Resilience Perspective", in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 18, no. 4, pp. 54-63, July-Aug. 2020. <https://doi.org/10.1109/MPE.2020.2986659>
- [3] M. Braun et al., "The Future of Power System Restoration: Using Distributed Energy Resources as a Force to Get Back Online", in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 16, no. 6, pp. 30-41, Nov.-Dec. 2018. <https://doi.org/10.1109/MPE.2018.2864227>
- [4] Philipp Ernst, Roland Singer, Andreas Greulich, Heiko Oberascher: „Feldtest von netzbildenden Umrichtern am Fraunhofer“, 38. PV-SYMPOSIUM, 28.02.2023
- [5] G. Banerjee, J. Dolichon, C. Hachmann, D. Mende, J. Lipphardt und M. Braun, "Resilience-Driven Strategic Grid Planning with an Overload Protection Scheme Reducing Cascading Outages," ETG Congress 2023, Kassel, Germany, 2023, S. 1-8
- [6] Beinert, Dominik, et al. "Power flow forecasts at transmission grid nodes using graph neural networks." Energy and AI 14, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100262>
- [7] D. Mende: „Modellierung von Maßnahmen der Leistungsflusssteuerung in einer Nichtlinearen Mathematischen Optimierung zur Anwendung im Operativen Engpassmanagement Elektrischer Energieversorgungssysteme“ Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, 2022. Zugleich: Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover, 2021. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-416660>

Energiewende ermöglichen durch Niederspannungsbetriebsführung

Einleitung/Motivation

In Zeiten des sich wandelnden Energiesystems mit volatiler und dezentraler Erzeugung und steigender Anzahl an steuerbaren Verbrauchern gewinnt die Niederspannungsbetriebsführung zunehmend an Bedeutung, um den sicheren Netzbetrieb zu gewährleisten. Die Fähigkeit, schnell auf Veränderungen bei Energieangebot und -nachfrage zu reagieren, ist entscheidend für die Stabilität und Effizienz und damit den sicheren Betrieb des Systems. Die Zunahme an flexiblen Verbrauchern und Erzeugern auf der Niederspannungsebene birgt somit Herausforderungen, aber auch Chancen für den Netzbetrieb.

In diesem Beitrag werden einige Forschungsprojekte vorgestellt, die darauf eingehen, wie intelligente Netzbetriebsführung zum sicheren Netzbetrieb beitragen kann und somit eine Voraussetzung für ein resilientes Energiesystem ist. Dabei wird auf den Effekt der Niederspannungsbetriebsführung, auf das Nutzarmachen von Kleinstflexibilitäten auf der Niederspannungsebene und die Wichtigkeit der Digitalisierung zur Umsetzung dieser Konzepte eingegangen:

1. Zunächst wird dabei das Projekt „Ladeinfrastruktur 2.0“ vorgestellt, an dem das Fraunhofer IEE beteiligt ist, in dem unter anderem die Auswirkung verschiedener Ansätze von gesteuertem Laden auf das Stromnetz untersucht wird.
2. Ein weiterer Betriebsführungsansatz ist die Schaltzustandsoptimierung, auf die nachfolgend im Beitrag des KIT IEH eingegangen wird.
3. Mit der Zunahme dezentraler Erzeugung und steuerbarer Verbraucher in Niederspannungsnetzen, gewinnt die Nutzarmachung der damit zur Verfügung stehenden Flexibilitäten an Bedeutung, um beispielsweise Systemdienstleistungen für höhere Spannungsebenen bereitzustellen. Darauf gehen die Beiträge zur Quartiersflexibilität des DLR und die zum Energy Hub des KIT IAI ein.
4. Die Digitalisierung der Niederspannungsnetze und hohe Datenverfügbarkeit sind wichtige Voraussetzungen für die Umsetzung der

Niederspannungsbetriebsführung. Damit befasst sich das Projekt „EnEff:Stadt InEs“, welches vom ZAE Bayern vorgestellt wird.

5. Vor der praktischen Umsetzung der Betriebsführungsmechanismen ist es zudem essenziell diese sorgfältig, z.B. in einer Laborumgebung, zu testen. Dies kann beispielsweise im abschließend beschriebenen Digital Grid Lab des Fraunhofer ISE umgesetzt werden.

1. Auswirkung von Niederspannungsbetriebsführung auf das Stromnetz – Fraunhofer IEE

Das Ziel des Projekts Ladeinfrastruktur 2.0 besteht darin, die Energie- und Netzoptimierung im Zusammenhang mit der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zu erreichen. Im Rahmen des Projekts wird das erwartete Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen anhand realer Fahrprofile detailliert analysiert, um Ladevorgänge je nach Region, Fahrzeugtyp und Haushaltstyp zu planen. Die Modellierung und Untersuchung von verschiedenen Betriebsführungsstrategien für die Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen sind ein wesentlicher Bestandteil des Projekts. Hierfür wird in dem Projekt ein Simulations- und Analyseframework entwickelt, mit dem verschiedene Aspekte dieser Strategien betrachtet werden können. Dazu zählt die Netzplanung, der Netzbetrieb, die praktische Umsetzbarkeit (Verfügbarkeit von Messdaten und IKT-Infrastruktur) und die Miteinbeziehung von Feedback und Verhalten von Nutzer:innen. Bei den Netzplanungsaspekten ist der Einfluss der Strategien auf den notwendigen Netzausbaubedarf von Interesse. Der Netzausbaubedarf wird bestimmt, in dem die Netzausbaumaßnahmen (z.B. parallele Leitungen oder zusätzliche Transformatoren) ermittelt, die notwendig sind um die kritischsten Netzsituationen (Worst Cases) zu beheben. Im Projekt werden verschiedene Ansätze entwickelt, um zeitabhängige Worst Cases zu bestimmen, bei denen das Verhalten der Betriebsführungsstrategien berücksichtigt wird. ► Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse einer Case Study mit über 100 Niederspannungsnetzen für ein zukünftiges Szenariojahr



Fraunhofer IEE
Andrea Schön
andrea.schoen@iee.fraunhofer.de

DLR
Nailya Maitanova
nailya.maitanova@dlr.de
Kristina Nienhaus
kristina.nienhaus@dlr.de
Seyedfarzad Sarfarazi
seyedfarzad.sarfarazi@dlr.de

Henning Schlachter
h.schlachter@dlr.de
Dr. Sunke Schlüters
sunke.schlueters@dlr.de

KIT
Dr. Kevin Förderer
kevin.foerderer@kit.edu
Frederik Gielnik
frederik.gielnik@kit.edu
Prof. Dr. Thomas Leibfried
thomas.leibfried@kit.edu

Rafael Poppenborg
rafael.poppenborg@kit.edu

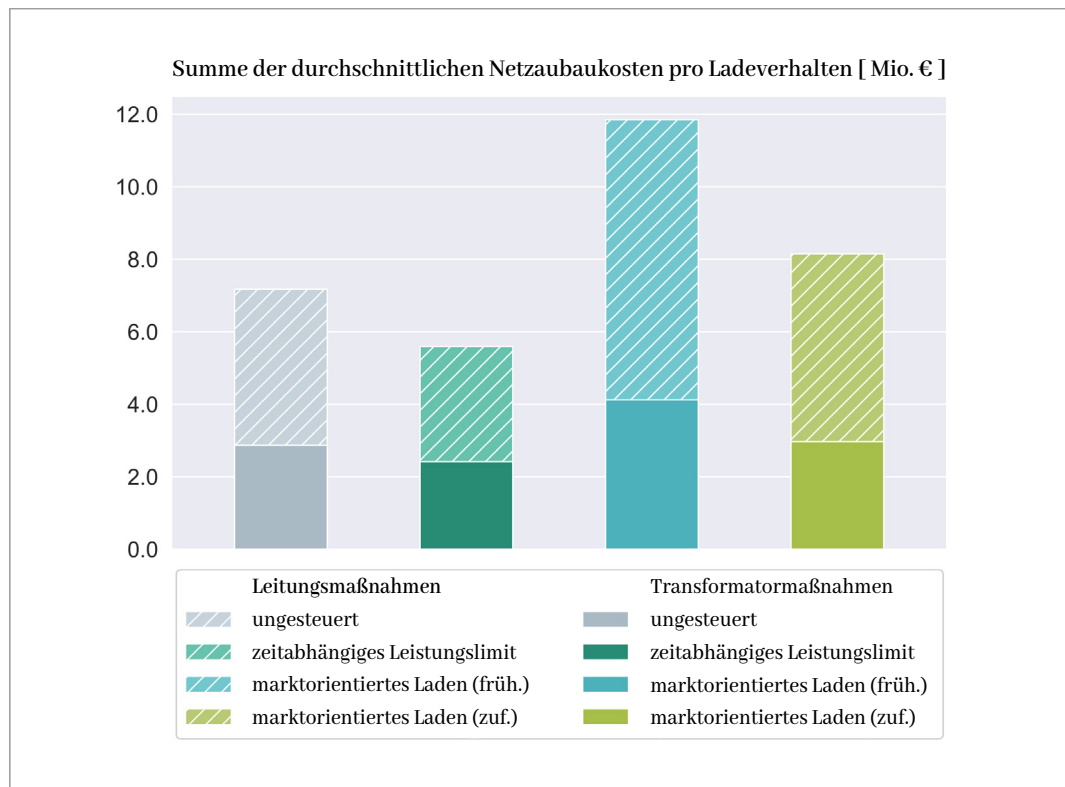
Fraunhofer ISE
Wolfgang Biener
wolfgang.biener@ise.fraunhofer.de
Dr. Bernhard Wille-Haußmann
bernhard.wille-haussmann@ise.fraunhofer.de

ZAE Bayern
Christoph Stegner
christoph.stegner@zae-bayern.de

► Abbildung 1

Netzausbaukosten pro Ladeverhalten ohne und mit Betriebsführungen

(Quelle:[2])



mit hoher Durchdringung von Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen und Ladestationen [2]. Dies zeigt zum einen, wie wichtig die Analyse von Betriebsführungsstrategien ist, um unerwünschte Effekte zu vermeiden und hebt zudem den positiven Effekt der netzdienlichen Ladevorgangsteuerung hervor.

2. Schaltzustandsoptimierung – KIT IEH

Leistungsschwankungen im Verteilnetz, begleitet von temporären hohen Auslastungen gewisser Betriebsmittel und umkehrende Leistungsflüsse stellen die Netzbetreiber vor neue Herausforderungen. In der klassischen Planung sind Verteilnetze häufig als offene Ringstrukturen ausgelegt. Im Normalzustand weist das Netz eine meist strahlenförmig verlaufende Topologie auf, die durch Änderung der Schaltzustände in den offenen Kuppelstellen verändert werden kann. Damit kann die Versorgungssicherheit ohne Inselnetzbildung zum Beispiel bei Fehlerfällen oder Netzinstandhaltungsmaßnahmen wiederhergestellt werden. Ein Ansatz für die bessere Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur stellt eine Schaltzustandsoptimierung und damit die dynamische Anpassung der Netztopologie in Abhängigkeit der lokalen Einspeise- und Lastverläufe dar. Der auf Grundlage metaheuristischer Verfahren entwickelte Optimierungsalgorithmus sorgt unter Berücksichtigung normativer

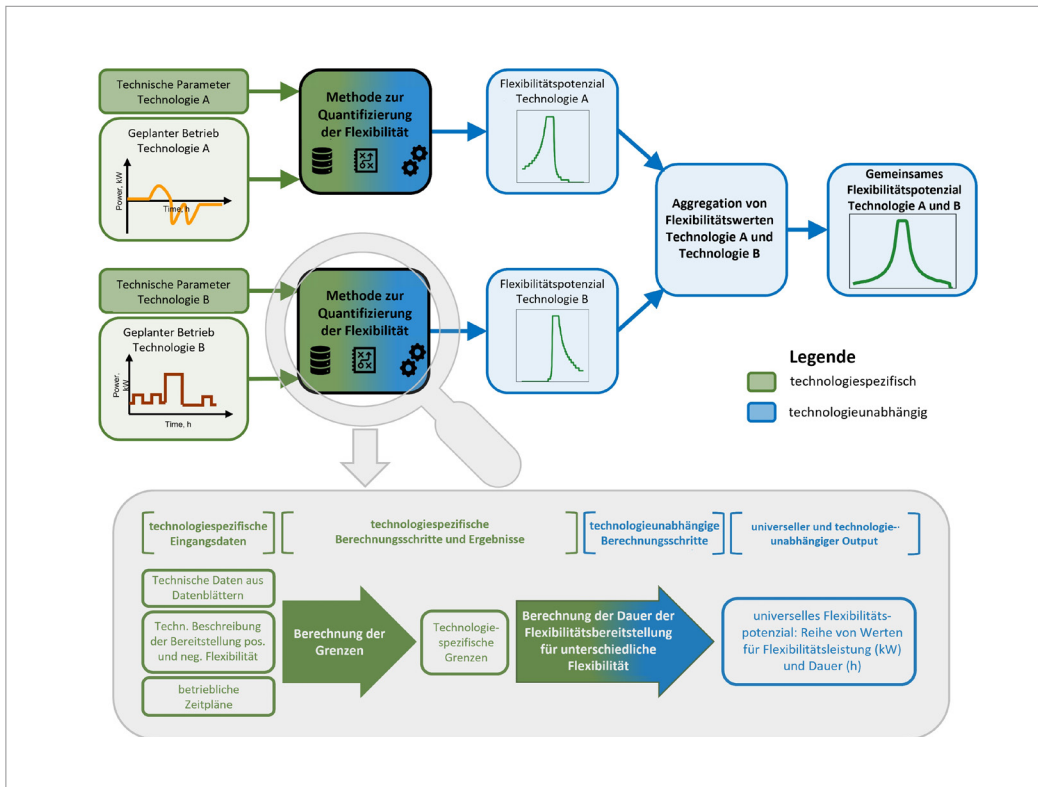
Vorgaben wie der Einhaltung des zulässigen Spannungsbandes und der Betriebsmittelgrenzen für einen optimierten Netzzustand.

Die multikriterielle Zielfunktion lässt unterschiedliche Optimierungsziele zu. Ein Schwerpunkt liegt in der Minimierung der Austauschleistung zwischen Mittel- und Hochspannungsebene und folgt der Idee, erneuerbare Energiepotenziale möglichst dezentral zu nutzen. Auf Basis realer Daten eines Netzgebietes aus dem süddeutschen Raum konnte über den Zeitraum von einem Jahr das Potenzial der Optimierung gezeigt werden. Insbesondere bei lokalen Leistungsüberschüssen können durch Schaltmaßnahmen und der damit verbundenen Umgruppierung von Lasten und Erzeugungsanlagen sowohl Netzverluste als auch die Austauschenergiemenge mit dem übergeordneten Netz verringert werden.

Als Fazit lässt sich die Netzentlastung durch die Schaltzustandsoptimierung bei Vorhandensein ausreichender erneuerbarer Einspeisung festhalten und somit als weiteres unterstützendes Element in der Verteilnetzbetriebsführung in Betracht ziehen.

3. Quartiersflexibilität – DLR

Eine Flexibilisierung des Energieverbrauchs stellt eine Möglichkeit dar, mit der volatilen Verfügbarkeit erneuerbarer Energien umzugehen.



► Abbildung 2

Schematische Darstellung der Methode zur dynamischen Quantifizierung von Flexibilität

(Quelle: [3])

Im Gebäudesektor vorhandene steuerbare Lasten, Speichersysteme und Energieerzeugungsanlagen haben über ihren primären Einsatzzweck hinaus das Potenzial Flexibilität bereitzustellen.

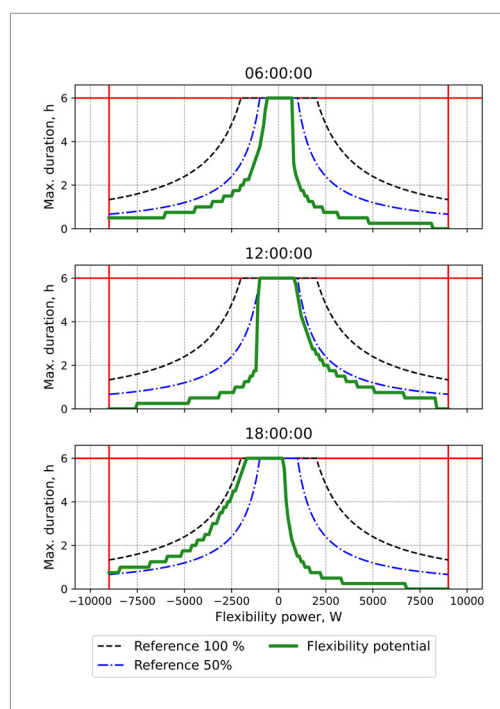
Damit Flexibilität über Systemgrenzen hinweg bereitgestellt werden kann, wurde am DLR eine Methode zur Quantifizierung von Flexibilitätspotenzialen entwickelt, welche in ► Abbildung 2 dargestellt ist. Um den primären Einsatzzweck nicht zu gefährden, wird hierbei der geplante Betrieb der Anlage berücksichtigt.

In ► Abbildung 3 ist die Flexibilität einer Anlage zu drei Zeiten dargestellt. Diese technologieagnostische Beschreibung ermöglicht es darüber hinaus Flexibilität verschiedener Technologien zu aggregieren, um das Potenzial eines Gebäudes oder gar Quartiers zu bündeln [3].

Um die technisch realisierbaren Potenziale heben zu können, müssen Einheiten wie Energiequartiere Anreize zur Flexibilisierung setzen. Gleichzeitig erhöhen dezentrale Erzeugungsanlagen und Speichersysteme die Herausforderungen für den effizienten technischen und wirtschaftlichen Betrieb der Stromsysteme.

Der Betrieb von Energiequartieren sollte daher auf die Marktpreissignale der übergeordneten Ebene abgestimmt sein und gleichzeitig auch den Bedürfnissen des physischen Stromsystems entsprechen [4].

Zur Bewertung der Systemvorteile eines optimal aggregierten Energiequartiers wurde ein Modell zur Simulation von Energiequartieren, wie in ► Abbildung 4 dargestellt, entwickelt und mit Strommarkt- sowie Niederspannungsnetzmodellen kombiniert [5].



► Abbildung 3

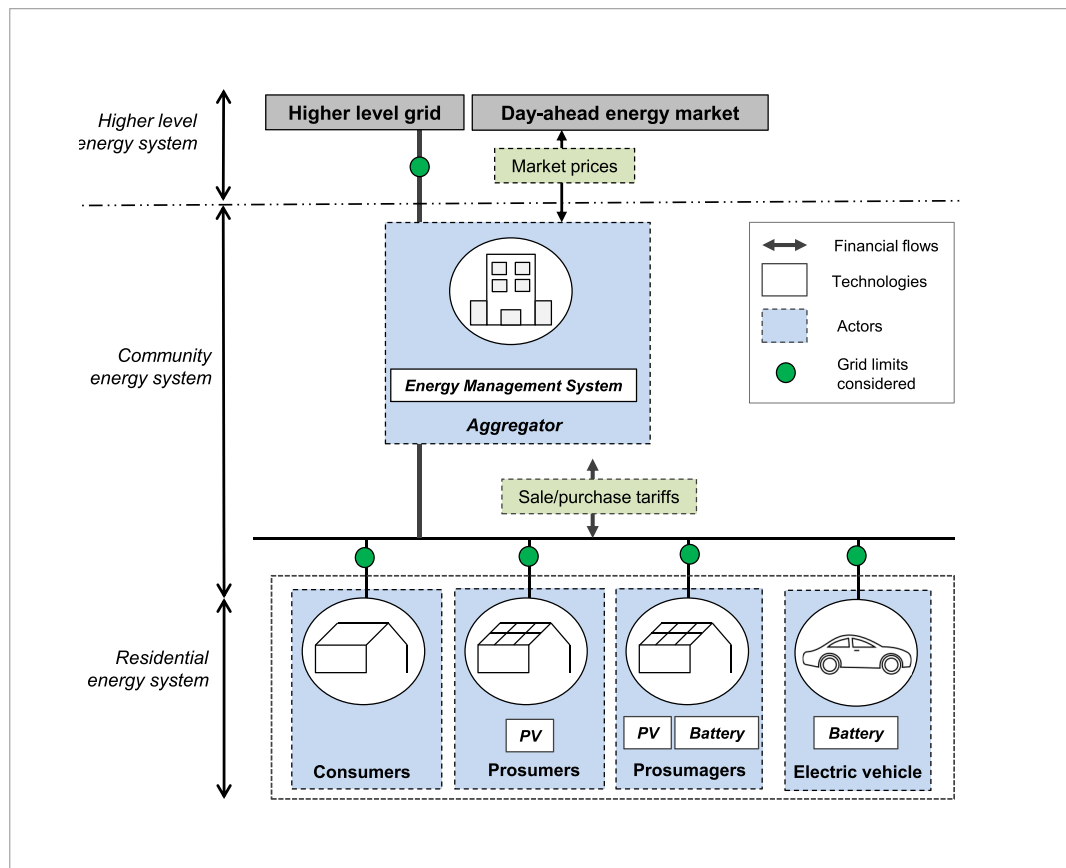
Flexibilitätspotenzial einer Anlage zu drei verschiedenen Zeiten

(Quelle: [3])

► Abbildung 4

Modell zur Simulation von Energiequartieren
Zusammenspiel von Haushalts-, Energiequartiers-, Stromgroßhandels- und Niederspannungsebene

(Quelle: [5])

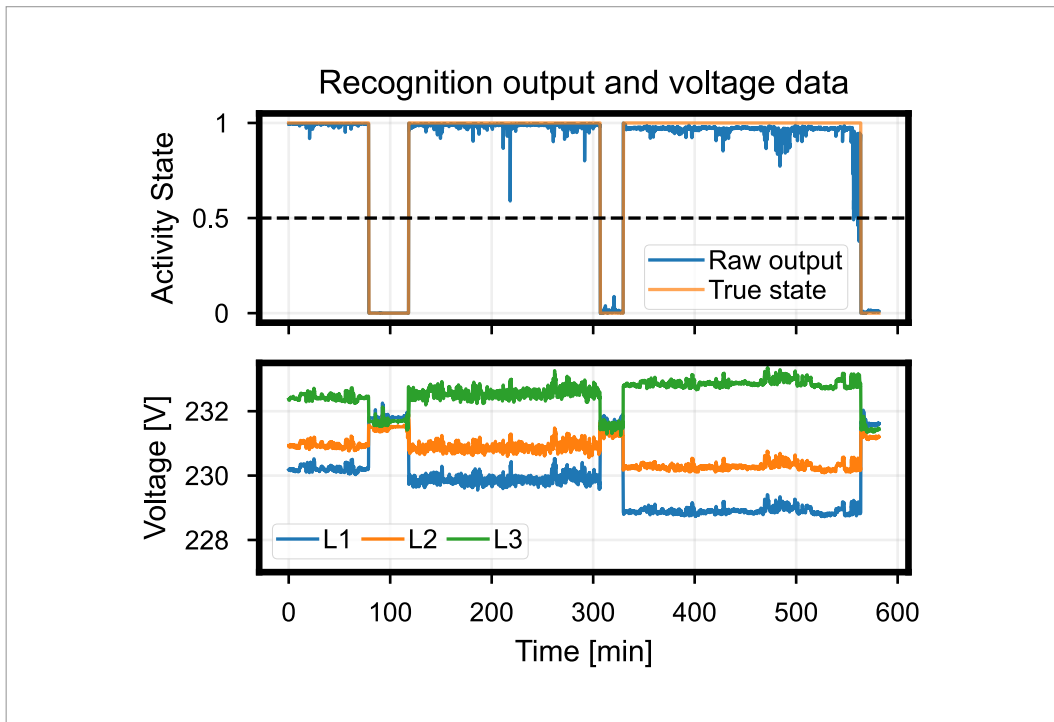


Ladestationen und andere große Lasten führen zu Spannungsabfällen und Photovoltaikanlagen zu Spannungsanhebungen in Niederspannungsnetzen, was zusätzliche Anforderungen an deren Betriebsführung stellt. Intelligente Wechselrichter, welche ihre Regelparameter dynamisch an den jeweiligen Netzzustand anpassen, können diese Effekte minimieren. Hierfür werden am DLR Methoden basierend auf neuronalen Netzen entwickelt, um Anhand von Mustern im Spannungsverlauf am Netzanschlusspunkt den Zustand der benachbarten Netzteilnehmer zu bestimmen. [6] Dazu gehört beispielsweise auch die Erkennung eines Elektrofahrzeugs durch einen intelligenten Wechselrichter.

Hierbei wird die Tatsache ausgenutzt, dass Anlagen typischerweise einem charakteristischen Profil, wie in ► Abbildung 5 gezeigt, folgen. Basierend auf der Zustandsermittlung werden dann die Regelparameter geeignet angepasst. Im Labor konnte die Methode erfolgreich validiert werden. [7]

4. Energy Hub und TrafoKommune – KIT IAI

Der Energy Hub-Ansatz ist ein generischer Verbund verschiedener verteilter Energieressourcen, der verschiedene Formen von Energie speichern und ineinander umwandeln kann. Er wurde an der ETH Zürich erarbeitet und im Rahmen der Phase 2 des Kopernikus ENSURE Projektes weiterentwickelt und in einem modularen und hochanpassbaren Co-Simulationsmodell umgesetzt. So lässt sich dieser Ansatz an eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Herausforderungen und Größenordnungen anpassen und untersuchen. Hierbei sind sowohl Anlagen in der Größenordnung von Haushaltsgeräten wie z.B. Wärmepumpen, Heimspeicher (Batterien) oder Ladesäulen denkbar, als auch Anlagen im industriellen Maßstab. Hervorzuheben ist der Mehrwert, den der Energy Hub in seiner jeweiligen Umgebung erzielen kann, durch die intelligente Kombination marktreifer Technologien [8,9]. Durch die ganzheitliche Sektorenkopplung und die Betrachtung der jeweiligen Rahmenbedingungen hinsichtlich der lokalen Erzeugungs- und Nachfragestruktur bietet der Energy Hub die Möglichkeit auch schwer zu



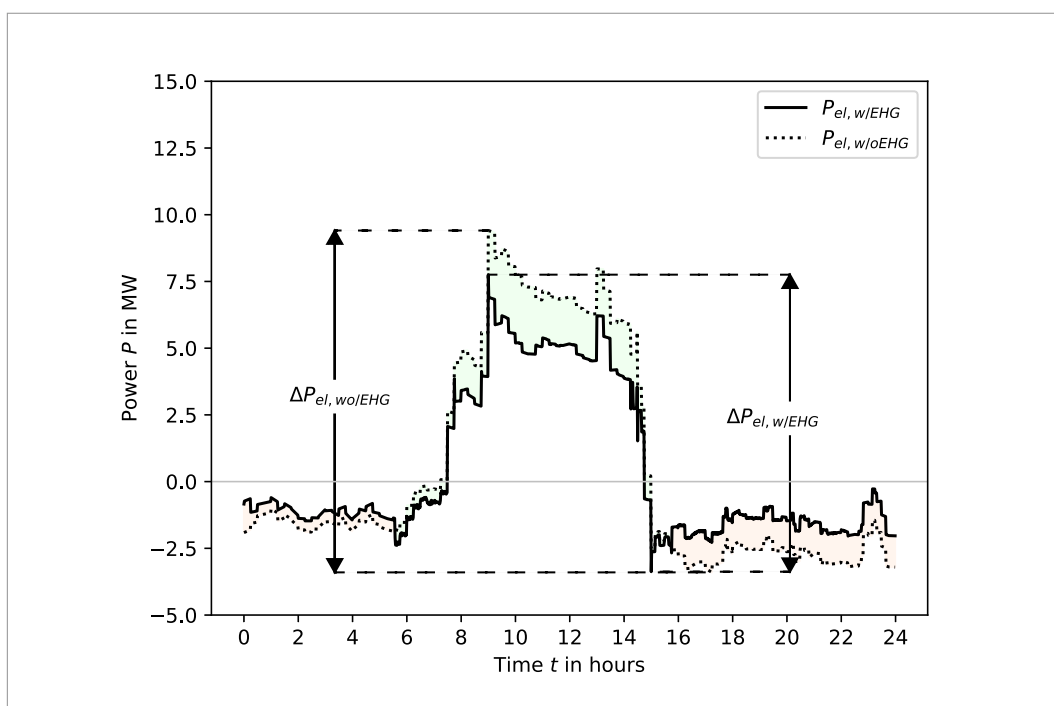
► *Abbildung 5*

Spannungsverlauf am Anschlusspunkt eines intelligenten Wechselrichters (unten) und Erkennung der Last (oben)

(Quelle: [7])

defossilisierende Sektoren hin zur Klimaneutralität zu unterstützen. Hierbei steht der netzdienliche Betrieb der einzelnen Komponenten immer im Vordergrund. So kann mit Hilfe des Energy Hubs, wie in ► *Abbildung 6* dargestellt, eine Reduzierung der Leistungsvariation an einem beispielhaften Tag (25.02.2019) um 13% erreicht werden bei gleichzeitiger Verringerung der ausgetauschten

Energie um 30%. Durch die Bündelung der einzelnen Teilkomponenten, die für sich genommen nur einen minimalen Beitrag zur Gesamtstabilität des elektrischen Netzes liefern können, kann in der Summe ein nennenswerter Beitrag zur Flexibilitätsbereitstellung erbracht werden. Die optimierte Zielfunktion setzt sich aus den gewichteten Einzelzielen zusammen, beispielsweise eine



► *Abbildung 6*

Energy Hub:
geglätteter Leistungsfluss am Trafo nach Steuerung

(Quelle: [9])

konkrete Lastvorgabe, die Volatilität der Last an einem Referenzpunkt oder die Betriebskosten. Durch Glättung der Last am Transformator, kann beispielsweise neuer Freiraum für Nachfrageschwankungen und weitere erneuerbare Energien geschaffen werden, was insgesamt die Robustheit erhöht. Bei konkretem Bedarf kann aber auch eine Lastvorgabe vorrangig Anwendung finden.

Zur gezielten Beeinflussung und Planung von Anlagen und Anlageverbänden werden ausreichend Informationen über historische und aktuelle Netzzustände benötigt. Im Projekt TrafoKommune wurden Smart Plugs als möglichst einfache und kostengünstige Datenquelle im Ortsnetz identifiziert. Mit einer angepassten Firmware bespielte Smart Plugs können im Takt einiger Sekunden Spannungswerte mit einem Fehler von < 1 V zuverlässig erfassen und kommunizieren.

Herausforderungen sind bei dem Vorgehen unter anderem der Einfluss der gewählten Steckdose im Gebäude (möglicher Spannungsabfall), der bewusste Umgang mit der vorhandenen Messgenauigkeit und der Abtransport der Daten. Darüber hinaus wurden eichrechtliche Fragestellungen ausgeblendet. Simulationen in einem teilweise per Smart Plugs beobachteten Verteilnetz ergaben, dass bereits einige wenige der (fehlerbehafteten) Messpunkte, genügen, um den durchschnittlichen Schätzfehler im simulierten Netz auf etwa 1 V zu senken.

5. EnEff:Stadt InEs – ZAE

Im Forschungsprojekt InEs soll ein innovatives Energieversorgungssystem für ein gewerbliches Quartier im nordbayerischen Oberfranken geplant werden. Am Standort der früheren Porzellanfabrik Winterling in Schwarzenbach a.d. Saale wird für das

gKU Winterling Immobilien in Zusammenarbeit mit den angrenzenden Firmen STELLA KERAMIK und Lallemand-DHW ein vernetztes Konzept durch gemeinsame Wärme- und Speichernutzung erstellt. In der aktuell laufenden Planungsphase widmen sich mehrere Arbeitsschritte der Schaffung einer Datenbasis. Gerade was die mehrmonatigen, elektrischen Messungen betrifft, wurde mit einer zeitlichen Auflösung von 1 s eine sehr hohe Granularität und Qualität erreicht. Dabei wurde die Erfahrung gemacht, dass die vorausgehende Plausibilisierung einen ähnlich hohen Zeitaufwand wie die eigentliche Auswertung von Messdaten erreichen kann. Häufig ergeben sich zeitliche Versätze zwischen Zeitreihen. Um diese zu identifizieren und zu korrigieren haben sich mathematische Ähnlichkeitsmerkmale wie Kovarianz, Korrelation und RMSE (Root Mean Square Error) angewandt auf die Frequenz oder Spannung als geeignet erwiesen.

Ein weiteres Feld mit hohem Digitalisierungsbedarf sind Netzpläne. Selbst wenn diese bei den Betreibern digital vorliegen, fehlen z. B. häufig die Zuordnungen der Niederspannungsleitungen und Hausanschlüsse zu den verschiedenen Ortsnetzstationen. Hier wurde in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Münchberg und Schwarzenbach ein Algorithmus entwickelt, der Niederspannungsnetze erfasst, abgrenzt, wie in ► Abbildung 7 dargestellt, und dadurch automatisiert Kennwerte für Ortsnetzstationen ermittelt; darunter die Anzahl der Hausanschlüsse, die Summe der angeschlossenen Gebäudegrundflächen oder Anzahl und Länge der Niederspannungsstränge. Von diesen lässt sich z. B. das PV-Potenzial, der Wärmebedarf oder zukünftige Ladeinfrastruktur ableiten. So können Stationen identifiziert werden, die in Zukunft gerade unter dem Aspekt der zunehmenden Sektorenkopplung an ihre Grenzen stoßen.

In beiden Beispielen hat sich gezeigt, dass zeitlich und oder räumlich hochaufgelöste Informationen robuster, automatisierter Ansätze bedürfen, vor allem wenn sie bei den Netzbetreibern eingesetzt werden sollen. Dabei ist ein hoher Visualisierungsgrad essenziell, um auf „einen Blick“ Ergebnisse mit hoher Informationsdichte prüfen zu können.

6. Digital Grid Lab – ISE

Im Digital Grid Lab wird mithilfe des neuen Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Simulators die Abbildung von Verteilnetzen im Leistungsbereich bis 800 kVA in der Niederspannung realisiert (► Abbildung 8). Dabei erfolgen die simulative Nachbildung des Netzzustands und die Abbildung

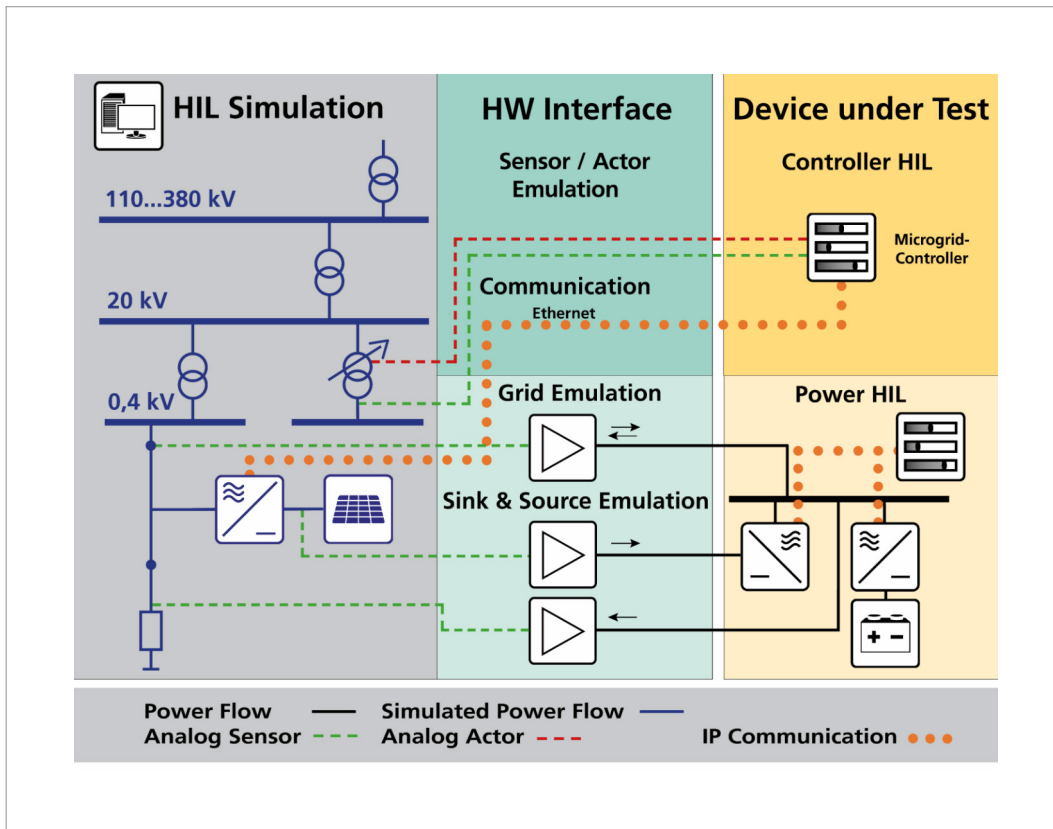
► Abbildung 7

Modell zur Simulation von Energiequartieren
Zusammenspiel von Haushalts-, Energiequartiers-, Stromgroßhandels- und Niederspannungsebene. Ergebnis der automatisierten Netztopologie-Erkennung

Voneinander abgegrenzte Niederspannungsnetze sind farblich gekennzeichnet

(Quelle: EnEff: Stadt InEs Abschlussbericht)





► Abbildung 8

Architektur des Digital Grid Lab:

- links: HIL Simulation = Hardware-in-the-Loop Simulation
- Mitte: HW Interface = Hardware Schnittstelle
- rechts: PHIL = Power-Hardware-in-the-Loop = digitaler Netz-Zwilling

(Quelle: [11])

des digitalen Kommunikationssystems im HIL-System. Dies ermöglicht die Bewertung von Betriebsentscheidungen oder Systemänderungen im Vorfeld. In der Entwicklungsumgebung des Labors ist es möglich, fortschrittliche Steuerungskomponenten, beispielsweise auf Grundlage von künstlicher Intelligenz, zu entwerfen.

Die Leitwarte fungiert als zentrale Kommunikationszentrale und gestattet das Monitoring und die Visualisierung des Netzbetriebs sowie die Verknüpfung mit einem digitalen Netz-Zwilling (PHIL). Mithilfe der leistungsstarken Hardware-in-the-Loop (HIL)-Simulatoren können dezentrale Energiesysteme oder Stromnetze in detaillierter Form modelliert werden. Je nach Bedarf erfolgt die Emulation von Teilen davon im Labor mit der Power-HIL Umgebung oder die Einbindung externer Signale über die Leitwarte. Dies ermöglicht die Vorab-Bewertung von Betriebsentscheidungen, wie beispielsweise Schalthandlungen, oder Systemänderungen. Die Power-HIL Tests ermöglichen die Nachbildung beliebiger Netzanschlusspunkte mit Leistungsverstärkern im Labor. Sie erlauben eine detaillierte Untersuchung von Vorgängen wie Einschaltvorgängen oder Netzsynchrisation mithilfe von Netzsimulatoren mit einer Leistung von bis zu 800 kVA. Die Leitwarte bietet die bidirektionale Anbindung von externen Systemen über alle gängigen Leittechnikprotokolle.

Zusammenfassung/Schlussfolgerung

Die vorgestellten Einblicke in aktuelle Forschungsprojekte zeigen, dass es verschiedene Lösungsansätze gibt, um den sicheren Netzbetrieb auf der Niederspannungsebene trotz wandelnder Umstände gewährleisten zu können. Die Projekte zeigen auch, dass vielfältige Weiterentwicklungen im Niederspannungsnetz notwendig sind, um diese Ansätze in der Praxis umzusetzen. Dazu gehören insbesondere die Automatisierung und Digitalisierung, inklusive sicherer Verfügbarkeit von Messdaten. Diese Aspekte sind zudem auch die zwingende Voraussetzung für Lösungsansätze, die neben dem sicheren Netzbetrieb auch die Resilienz auf der Niederspannungsebene sicherstellen.

Referenzen

- [1] <https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/ladeinfrastruktur2-0.html>
- [2] A. Schoen, J. Ulfers, H. Maschke, L. Mueller, M. Braun: „Integrating Control Strategies for Electric Vehicle Charging into a Simultaneity-Factor-Based Grid Planning Approach“; ETG Kongress 2023; Kassel, Deutschland; 25.-26. Mai 2023
- [3] N. Maitanova, S. Schlüters, B. Hanke, K. von Maydell, An Analytical Method for Quantifying the Flexibility Potential of Decentralised Energy Systems. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924005336>
DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123150
- [4] S. Sarfarazi, S. Mohammadi, D. Khastieva, M. Reza Hesamzadeh, V. Bertsch, D. Bunn, An optimal real-time pricing strategy for aggregating distributed generation and battery storage systems in energy communities: A stochastic bilevel optimization approach, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 147, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108770>.
- [5] S. Sarfarazi, E. Memmel, S. Mohammadi, V. Bertsch, System-friendly operation of smart energy communities, 13. Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT) 15.-17. Februar 2023, Wien
- [6] H. Schlachter, S. Geißendörfer, K. von Maydell, and C. Agert, "Voltage-Based Load Recognition in Low Voltage Distribution Grids with Deep Learning," *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 104, Dec. 2021, doi: 10.3390/en15010104
- [7] H. Schlachter, S. Geißendörfer, K. von Maydell, and C. Agert, "Load Recognition in Hardware-Based Low Voltage Distribution Grids using Convolutional Neural Networks," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, doi: 10.1109/TSG.2023.3280326
- [8] Energy Hub Gas : A Multi-Domain System Modelling and Co-Simulation Approach. Poppenborg, R.; Ruf, J.; Chlosta, M.; Liu, J.; Hotz, C.; Döpmeier, C.; Kolb, T.; Hagenmeyer, V. 2021. Proceedings of the 9th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES '21), Art.Nr. 12, Association for Computing Machinery (ACM). doi:10.1145/3470481.3472712
- [9] Energy Hub Gas: A Modular Setup for the Evaluation of Local Flexibility and Renewable Energy Carriers Provision. Poppenborg, R.; Chlosta, M.; Ruf, J.; Hotz, C.; Döpmeier, C.; Kolb, T.; Hagenmeyer, V. 2022. 2022 IEEE 10th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), 33–41, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). doi:10.1109/SEGE55279.2022.9889751, <https://doi.org/10.3390/en16062720>
- [10] <https://ines-winterlingareal.de/>
- [11] <https://www.ise.fraunhofer.de/de/fue-infrastruktur/center/zentrum-fuer-leistungselektronik-und-nachhaltige-netze/digital-grid-lab.html>

Ressourcen für die Energiewende – Status quo der Energiesystemmodellierung

Transformationsszenarien und Ressourcen

Deutschland hat sich mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 gesetzt. Techno-ökonomische Energiesystemmodelle können hierfür normative Zielszenarien quantifizieren. Diese liefern Mengengerüste hinsichtlich des Ausbaus der benötigten Technologien.

Aber die Frage der hierfür benötigten Ressourcen werden bislang in aktuellen techno-ökonomischen Energiesystemmodellen nicht oder wenn überhaupt nur untergeordnet betrachtet. Es gibt zwar Forschungsarbeiten wie die Projekte RESCUE, REFINE, InteRessE, SubSkrit oder Trans-DE, die die Limitierung der aus Energiesystemen vorgegebenen Technologieausbaupfade hinsichtlich der Ressourcenbedarfe (Material, Energie und CO₂) feststellen.

Die Analysen beruhen jedoch meist auf einer Analyse vorgegebener Transformationspfade, anstatt die Ressourcenverfügbarkeit inhärent in der Energiesystemmodellierung zu betrachten. Dies verhindert derzeit die Modellierung ressourcenoptimierter Energieausbaupfade z.B. unter Betrachtung verschiedener Energietechnologiemixe, Materialeffizienzmaßnahmen, Konsummuster und resilienter Lieferketten, sodass sich hier ein Forschungsbedarf aufzeigt.

Die Rolle der Materialeffizienz

Effizienzmaßnahmen können in der Praxis verschiedene Formen annehmen. Produktionsprozesse können zur Abfallvermeidung optimiert werden, das Produktdesign kann angepasst werden, um Reparaturen zu ermöglichen und die Produktlebensdauer zu verlängern, und es können recycelte Materialien für die Herstellung verwendet werden. Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz sind ein ständiger Prozess in der Energietechnik. So wurde in den letzten Jahren sehr aktiv an der Steigerung des Wirkungsgrads von PV-Modulen, der Verbesserung des Recyclings und der Senkung des

Bedarfs an Materialien wie Silber und Silizium durch Anpassung des Designs geforscht.

Die Energiewende stellt hinsichtlich des Materialbedarfs eine gewaltige Herausforderung dar: Kurzfristig werden große Mengen an Rohstoffen benötigt, was die Materiallieferketten belastet. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, die Nachfrage durch die Umsetzung des gesamten Spektrums an Materialeffizienzmaßnahmen zu senken.

Photovoltaik

Die Photovoltaik wird aufgrund ihrer geringen Kosten und ihrer technischen Reife zunehmend als eine wichtige Technologie für die Energiewende anerkannt. Die Prognosen für die bis 2050 installierte PV-Kapazität reichen in den Energieszenarien von 14 TW bis über 70 TW (Haegel, 2023).

Dieser erwartete groß angelegte und schnelle Einsatz ist jedoch mit einem erheblichen Materialbedarf verbunden. Für mehrere Materialien wurde das Risiko eines Missverhältnisses zwischen dem Materialbedarf für die Photovoltaik und dem derzeitigen Produktionsniveau festgestellt (Gervais, 2021).

- Bei kristallinen Silizium-PV-Zellen wie PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) und HJT (Heterojunction Solar Cell) wurden Bedenken hinsichtlich des Bedarfs an Silber und Indium geäußert.
- Auch Kupfer für das Stromnetz ist ein zentrales Element, das 2023 in die EU-Liste der strategischen Rohstoffe aufgenommen wurde (EC, 2023).
- Bei den Dünnschichttechnologien sind Cadmium, Tellurid, Gallium, Indium und Selenid ebenfalls mit hohen Versorgungsrisiken behaftet. Es ist jedoch anzumerken, dass Dünnschichten eher ein Nischenmarkt sind, da sie weniger als 5% des PV-Marktes ausmachen.

Insgesamt ist die PV-Lieferkette bekanntermaßen stark in China konzentriert (IEA, 2022). Abgesehen von Fragen des Materialbedarfs ist dies ein unmittelbarer kritischer Faktor für die PV.



Fraunhofer ISE
Dr. Charlotte Senkpiel,
charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de

Estelle Gervais
estelle.gervais@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich
Dr. Petra Zapp
p.zapp@fz-juelich.de

Wasserstofftechnologien

Elektrochemische Wasserstofferzeugung ist eine viel diskutierte Option zum Erreichen nationaler und internationaler CO₂-Minderungsziele. Wasserelektrolyse-Technologien bieten die Möglichkeit, Strom aus erneuerbaren Energiequellen in grünen Wasserstoff umzuwandeln, der direkt oder als Grundlage für Folgeprodukte in verschiedenen Sektoren verwendet werden kann. Eine sich aus dem Ausbau dieser Technologien ergebende Sorge ist die Verfügbarkeit kritischer Ressourcen zum Bau neuer Anlagen. Die Europäische Kommission veröffentlicht daher seit 2011 alle drei Jahre eine Liste mit Materialien, die für die Ökonomie der EU wichtig sind (EC, 2023). Sie basiert auf der Konzentration des Primärangebots aus rohstoffproduzierenden Ländern, unter Berücksichtigung ihrer Governance und Handelsaspekte. Substitution und Recycling werden als risikomindernde Maßnahmen betrachtet.

Das Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission hat verschiedene Ansätze geprüft, um die Kritikalität mit einem Life Cycle Assessment (LCA)-Ansatz zu verbinden (Manchini et al., 2018). Sie empfehlen das Versorgungsrisiko (Supplyrisk, SR) ins Verhältnis zur weltweiten Produktion (P) der Materialien zu setzen (SR/P). Der so erhaltene Wert kann als Charakterisierungsfaktor im Sinn einer LCA genutzt werden, um die Kritikalität zu bestimmen. Die unterschiedlichen Wasserelektrolyse-Technologien setzen verschiedene kritische Materialien ein.

► Abbildung 1 zeigt die jeweiligen Beiträge verschiedener Materialien aus der EU CRM Liste zur Kritikalität (Schreiber und Zapp, 2023) für die drei Elektrolyseur-Techniken:

- alkalische Wasserelektrolyse (AWE)
- Protonenmembranelektrolyse (PEMWE)
- Festkörperelektrolyse (SOEC)

Während für die AWE maßgeblich Nickel und Molybdän bestimmend sind, sind bei der PEMWE Wolfram und zu einem großen Anteil Iridium kritisch einzustufen. Bei der SOEC tragen Yttrium, Gadolinium, Cer und Lanthan maßgeblich zur Kritikalität bei.

Ex-post Berücksichtigung von Ressourcenbedarfen

In Forschungsprojekten wie InteREsse oder Trans-DE (Tercero Espinoza, 2023; Brandes, 2023) wurden nachgelagert an die Energiesystemanalyse Bewertungen der mit den Technologieausbaupfaden verbundenen Ressourcenbedarfen durchgeführt. Hierbei kommen LCA-Ansätze oder eine Kombination von LCA mit System Dynamics zum Einsatz.

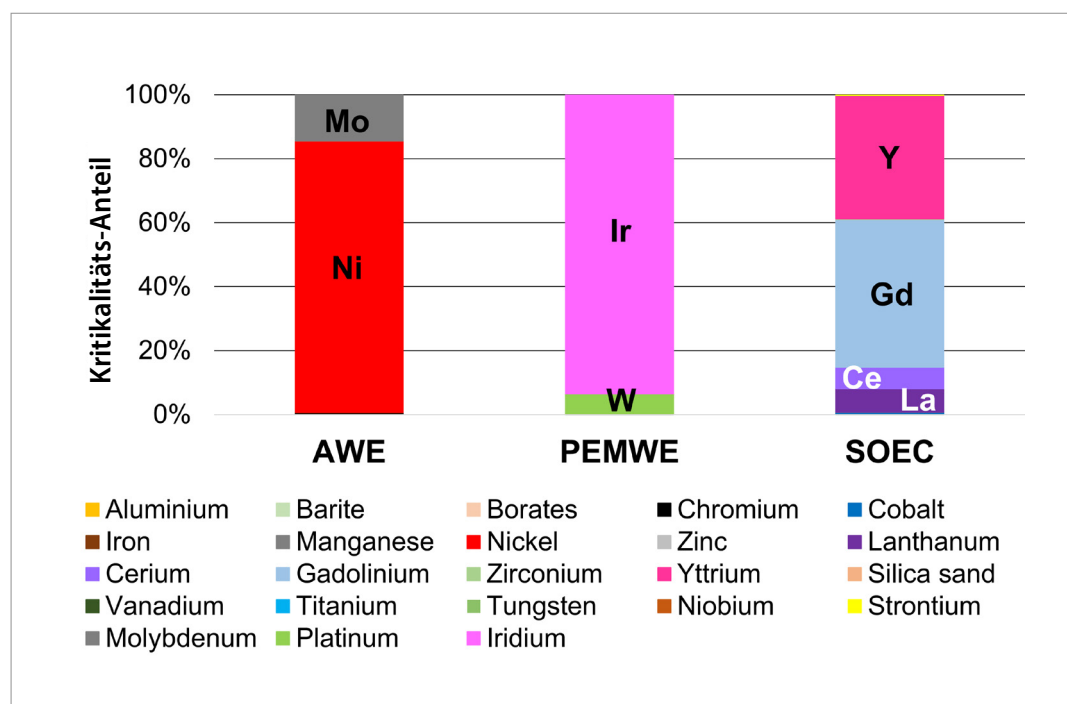
► Abbildung 2 zeigt beispielsweise die Bewertung eines Szenarios, in dem die direkten Emissionen in Deutschland im Jahr 2050 Netto-Null entsprechen. Bei Betrachtung der Herstellung und Entsorgung der berücksichtigten Technologien zeigt sich jedoch, dass erhebliche Treibhausgasemissionen verbleiben,

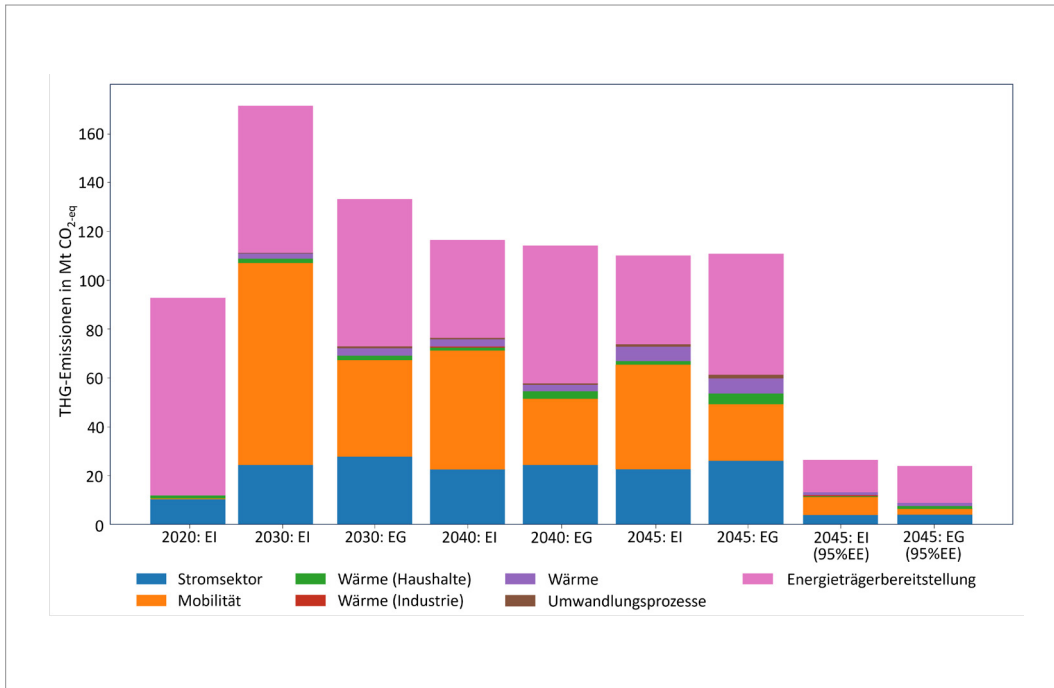
► Abbildung 1

Kritische Materialien für unterschiedliche Elektrolyseure

AWE:
alkalische Wasserelektrolyse
PEMWE:
Protonenmembranelektrolyse
SOEC:
Festkörperelektrolyse

(Quelle: nach Manchini et al. (2018))





► Abbildung 2

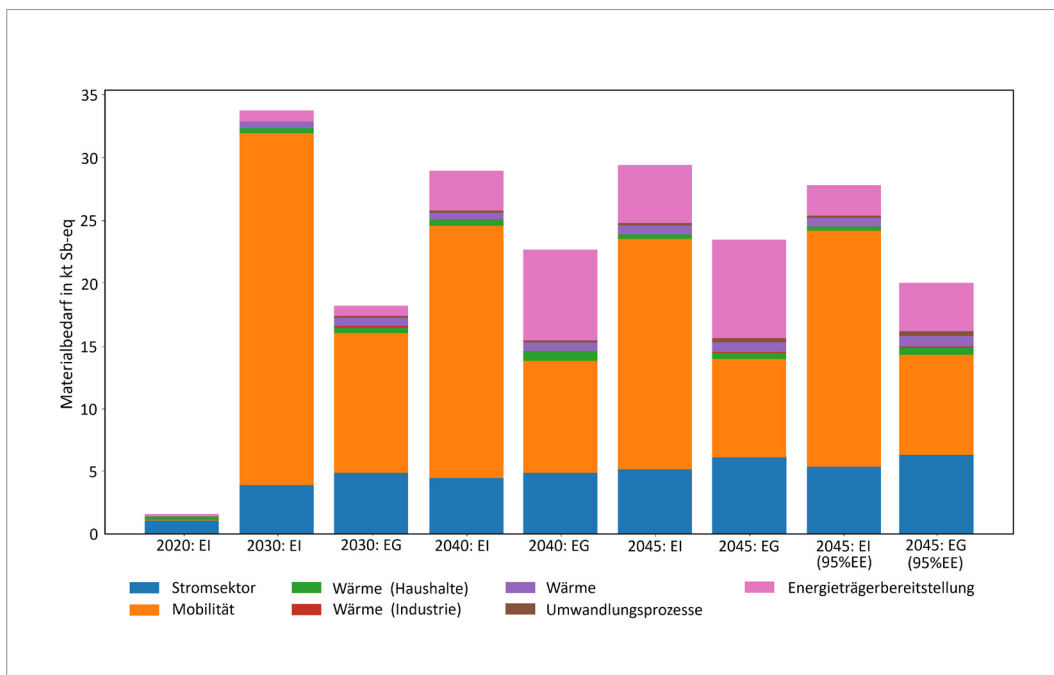
THG-Emissionen bei Herstellung und Entsorgung der Transformationstechnologien

(Quelle: Brandes, 2023)

die nach Quellprinzip zum Großteil nicht in Deutschland bilanziert werden, sondern in den Ländern, in denen die Emissionen für Herstellung und Entsorgung entstehen. Die entstehenden Emissionen sind naturgemäß damit verbunden, wie weit die Transformation des Energiesystems in den jeweiligen Ländern vorangeschritten ist. Im Gegensatz dazu werden in der Energiesystemmodellierung rein die THG-Emissionen betrachtet, die beim Betrieb der Technologien in Deutschland

anfallen. ► Abbildung 2 zeigt, dass der Großteil der THG-Emissionen der Herstellung und Entsorgung der Transformationstechnologien auf die Energieträgerbereitstellung, den Mobilitätssektor sowie den Stromsektor entfallen.

Bei Betrachtung der Materialbedarfe zeigt das Forschungsprojekt Trans-DE (Brandes, 2023), dass der höchste Materialbedarf in der Transformation des Mobilitätssektors entsteht (► Abbildung 3).



► Abbildung 3

Materialbedarfe der Transformationstechnologien im Forschungsprojekt Trans-DE

(Quelle: Brandes, 2023)

Fazit und Ausblick

Die Einzelanalyse der Technologien hinsichtlich der Ressourcenbedarfe zeigt deutlich, dass Versorgungsrisiken hinsichtlich der benötigten Materialien bestehen. Hierdurch entsteht ein zwingender Bedarf der Berücksichtigung dieser in der Erstellung normativer Zielszenarien, da sie den Lösungsraum für Klimaneutralitätsszenarien verändern können. Hierbei sollten die Aspekte der Materialbedarfe und deren Kritikalität, indirekte Emissionen, Material-effizienz- und Substitutionsmöglichkeiten sowie Kreislaufwirtschaftspotenziale betrachtet werden. Ein erster Schritt wäre die Integration von Materialbedarfen in die Energiesystemmodelle sowie das Setzen von Limits zur Verwendung dieser. Eine entstehende Herausforderung ist hierbei zweifelsohne die Frage der Ressourcenverteilung auf einzelne Länder unter Berücksichtigung von Gerechtigkeitsprinzipien. Eine Möglichkeit wäre die Verwendung des JRC-Indikators zur Bestimmung von Kritikalität.

Das Ziel für eine umfassende Energiesystemmodellierung ist jedoch eine integrierte Betrachtung aller oben genannten Aspekte, um normative Szenarien zu erhalten, die Ressourcen inhärent berücksichtigen. Eine Option hierfür bieten Modellkopplungen. Naheliegend ist neben Konsistenzstrategien die Möglichkeiten von Effizienz- und Suffizienzpotenzialen integriert zu betrachten, um den zunehmenden Druck auf Ressourcen und eine starke Beschleunigung der Transformationsaktivitäten durch eine reduzierte Nachfrage nach Ressourcen zu mindern.

Literatur

- Brandes et al. (2023). TransDE Transformation der Infrastruktur Deutschlands bis zum Jahr 2050 im Einklang mit der Energiewende aller Verbrauchssektoren - Abschlussbericht https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/20230704_Abschlussbericht_TransDE_Final_Webseite_v3.pdf
- European Commission. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU - Final report
- Gervais, E., Shammugam, S., Friedrich, L., Schlegl, T. (2021). Raw material needs for the large-scale deployment of photovoltaics – Effects of innovation-driven roadmaps on material constraints until 2050. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110589>
- Haegel, N. et al. (2023). Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option. <https://doi.org/10.1126/science.adf6957>
- IEA (2022). Solar PV Global Supply Chains. <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- Mancini, L., Benini, L., & Sala, S. (2018). Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(3), 726-738. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1137-2>
- Tercero Espinoza, L.A., Loibl, A., Gervais, E. (2023). Schlussbericht zum Projekt „Ressourcenbedarf für die Energiewende: Interdisziplinäre Bewertung von Szenarien für die Bereitstellung von Strom und Wärme“. <https://doi.org/10.24406/publica-1720>
- Schreiber, A., Zapp, P. (2023). Assessing methodological approaches for evaluating the criticality of materials in life cycle sustainability assessments (LCSA). Eingereicht in *Journal of Resources, Conservation & Recycling*.

Circular Economy als Basis für resiliente und erneuerbare Rohstoffkreisläufe

Der ungebremste Ressourcenverbrauch und die Nutzung fossiler Energien sind die Hauptverursacher der globalen Klimakrise. Etwa die Hälfte der globalen Treibhausgas-Emissionen entstehen bereits vor der eigentlichen Nutzung: während der Bereitstellungsphase von Materialien, Energie und Nahrung [1]. Neben einem erneuerbaren Energiesystem bedarf es einer raschen Abkehr vom derzeit noch vorherrschenden, linearen Wirtschaftsmodell „Produzieren-Nutzen-Wegwerfen“ hin zu einer Kreislaufwirtschaft mit nachhaltigen Rohstoffkreisläufen. Eine leistungsfähige und verlustarme Circular Economy mit hoher Materialeffizienz ist von entscheidender Bedeutung, soll die Energie- und Ressourcenwende gelingen. Um eine hohe Resilienz mit geringstmöglichem Energiebedarf zu erreichen, sollten bis auf Weiteres möglichst nachhaltig gewonnene Rohstoffe und Nachnutzungsoptionen bestehen bleiben (► Abbildung 1).

Die aktuellen geopolitischen Spannungen unterstreichen die Notwendigkeit für diesen grundlegenden Strukturwandel. Die Konkurrenz um knappe Rohstoffe, die auch zur Herstellung Erneuerbarer-Energietechnologien und für Effizienzverbesserungen benötigt werden, nimmt zu (► Abbildung 2). Dabei handelt es sich bei einer Vielzahl der zukünftig in noch größerem Umfang benötigten Materialien bereits heute um kritische Rohstoffe für die Europäische Union [2], wie bspw. seltene Erden, Lithium, Graphit oder auch Phosphor.

Um die vielseitigen und komplexen Herausforderungen der anstehenden Transformation zu meistern, müssen zentrale Fragen untersucht und diskutiert werden, wie beispielsweise:

- Zukunftsbild Kreislaufwirtschaft: Welche Methoden, Einsichten und Innovationen braucht es für die Transformation?
- Wie können regenerative Kreisläufe Resilienz und Wachstum fördern?
- Wie kann der Weg von der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft gelingen?

Mit dem hier vorgestellten Tagungsbeitrag werden nachfolgend ausgewählte Lösungs- und Innovationsansätze für die Transformation zu einer

kreislauforientierten und nachhaltigen Industriegesellschaft der Zukunft zusammengefasst.

Transformation der chemischen Industrie

Damit die Transformation der chemischen Industrie weg von fossilen Quellen gelingt, müssen benötigte Rohstoffe und Energie sowie der Wasserstoff- und Kohlenstoffbedarf auf eine nachhaltige Weise gedeckt werden. Als alternative Kohlenstoffressourcen kommen CO₂ (via Direct Air Capture), Biomasse oder insbesondere Kunststoffabfälle in Frage.

Um den zukünftigen Bedarf an Wasserstoff – und somit auch an Strom für den Wandel – erheblich zu reduzieren, kann sowohl eine Kaskadennutzung von Biomassen mit hoher Priorität auf einer Bindung des enthaltenen Kohlenstoffs als auch eine Fokussierung auf bisher nicht im Markt etablierte, neue chemische und rohstoffliche Kunststoff-Recyclingverfahren ins Auge gefasst werden [3]. In Kombination mit neuen Sammel- und Sortierungsverfahren können über das rohstoffliche Recycling von Kunststoffen mittels Pyrolyseverfahren Kohlenstoff und Wasserstoff für die Erzeugung chemischer Grundstoffe bereitgestellt werden. Sowohl am Institut für technische Chemie des Karlsruher Instituts für Technologie als auch am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg werden verschiedene Pyrolyse-Technologien auf Basis von Schnecken- und Drehrohrreaktoren sowie Vor- und Nachbehandlungsschritte untersucht [4]. Übergeordnetes Ziel hierbei ist die Effizienz des rohstofflichen Recyclings durch die Optimierung von Energie- und Stoffflüssen zu steigern, um leistungsfähige Technologiebausteine für eine Bereitstellung chemischer Grundstoffe zu ermöglichen [5].

Rolle der Biomasse

Ein wichtiger Baustein für eine resiliente Circular Economy ist die effiziente Nutzung von Biomasse in Stoffkreisläufen. Dazu zählt die Kaskadennutzung von biogenen Rohstoffen (z.B. als Kohlenstoff-



ZSW

Dr. Jochen Brellochs
jochen.brellochs@zsw-bw.de

Julia Goy
julia.goy@zsw-bw.de

CAE

Dr. Christian Scherdel
christian.scherdel@cae-zeroarbon.de

DBFZ

Dr. Romy Brödner
romy.broedner@dbfz.de

Prof. Dr. Michael Nelles
michael.nelles@dbfz.de

DLR

Tom Lorenz
tom.lorenz@dlr.de

Fraunhofer ISE

Dr. Karl-Anders Weiß
karl-anders.weiss@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich

Dr. Felix Kullmann
f.kullmann@fz-juelich.de

IZES

Bernhard Wern
wern@izes.de

KIT

Dr. Salar Tavakkol
salar.tavakkol@kit.edu

UFZ

Dr. Malorzata Borchers
malorzata.borchers@ufz.de

Dr. Danny Otto
danny.otto@ufz.de

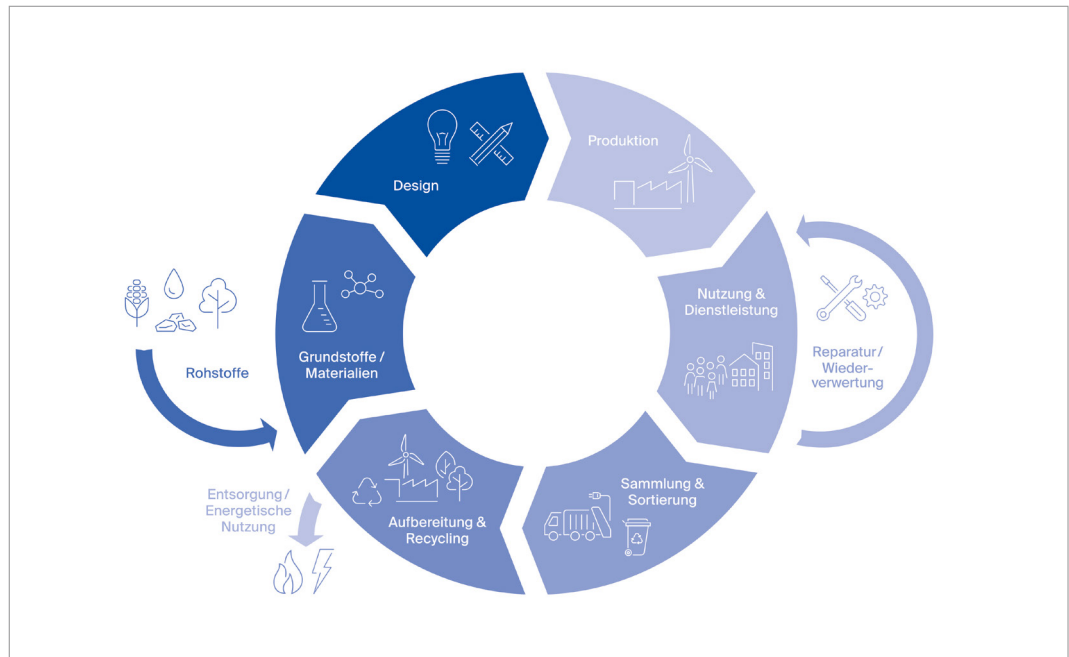
Wuppertal Institut

Dr. Holger Berg I
holger.berg@wupperinst.org

► **Abbildung 1**

Konzeptionelle Darstellung einer Circular Economy mit nachhaltigen Rohstoffkreisläufen.

(Quelle: ZSW)

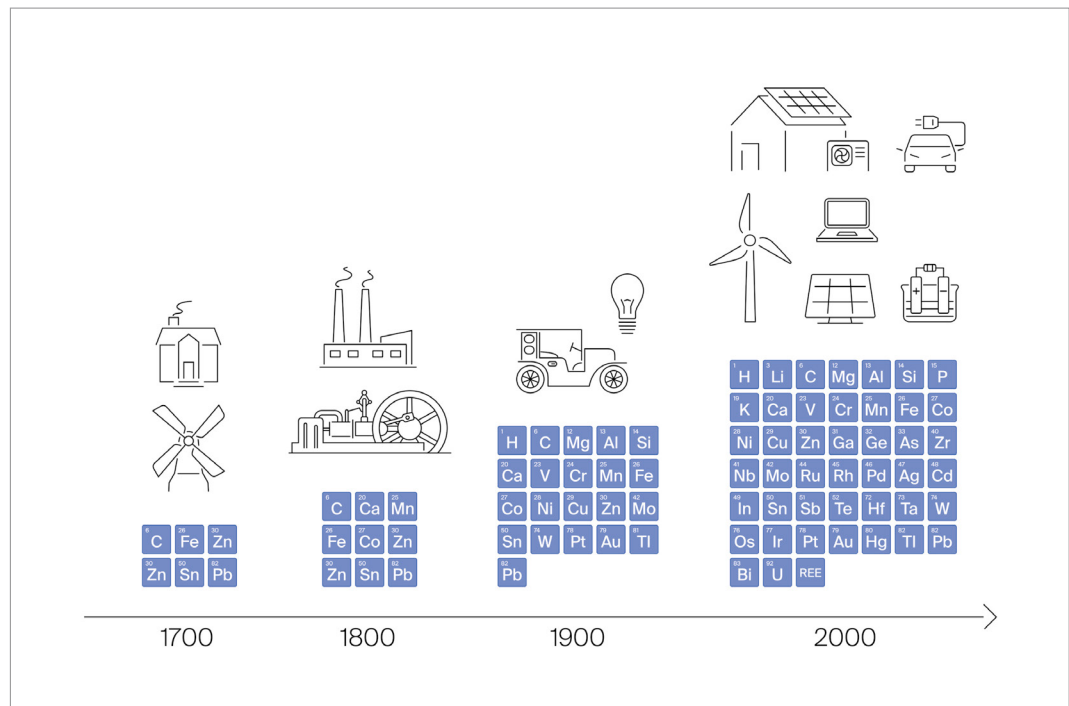


► **Abbildung 2**

Steigender Rohstoffbedarf:

Zunahme der genutzten Elemente im Periodensystem für u.a. die Energieerzeugung und -wandlung (auf Basis von [15]).

(Quelle: ZSW)



ressource für die chemische Industrie) genauso wie die Wiederaufbereitung gebrauchter Produkte. Da die Biomasseproduktion auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen begrenzt ist, können Stoffkreisläufe und neue Verwendungszwecke für biogene Nebenprodukte zur Minderung des Ressourcenbedarfs und zur Substitution fossiler Rohstoffe beitragen. In Deutschland beläuft sich das technische Biomassepotenzial von Nebenprodukten aus der Land- und Forstwirtschaft, Siedlungsabfällen,

Klärschlamm, industriellen Reststoffen sowie Reststoffen von sonstigen Flächen auf 86,6 bis 139,6 Mio. Tonnen Trockenmasse pro Jahr gemäß Ressourcendatenbank des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ). Davon befinden sich rund drei Viertel bereits in einer stofflichen und/oder energetischen Nutzung. Neben der Optimierung der bestehenden Nutzung könnten noch 12,8 bis 45,5 Mio. Tonnen Trockenmasse pro Jahr für weitere Anwendungen mobilisiert werden.

Verbesserungspotenziale bisheriger Nutzungspfade ergeben sich in Hinblick auf die Verwertung von Nährstoffressourcen wie beispielsweise Phosphor oder auch die CO₂-Speicherung im Boden als Beitrag zur Abmilderung des menschen-gemachten Treibhauseffekts.

Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm

Ohne Phosphor, einen endlichen und nicht substituierbaren Schlüsselnährstoff, gäbe es auf der Erde kein Leben. Phosphor wird als Rohstoff in vielen Industriebereichen wie zur Herstellung von Dünge- und Reinigungsmitteln benötigt, dabei ist Europa stark abhängig von Importen u.a. ausgepolitisch instabilen Regionen. Es werden rund 80.000 Tonnen Phosphor pro Jahr als fossiler Mineraldünger importiert [6]. Je Tonne Phosphor-Mineraldünger entstehen herstellungsbedingt derzeit ca. 2,5 Tonnen CO₂ [7]. Menschen und Tiere nehmen Phosphor über die Nahrung auf. Der vom Menschen wieder ausgeschiedene Phosphor gelangt schließlich in das Abwassernetz und somit in den Klärschlamm. In Deutschland könnten rund 60% des Phosphor-Mineraldüngerbedarfs durch die Phosphor-Rückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm gedeckt werden [8]. Um eine nachhaltige Kreislaufführung mit hochwertigen Phosphor-Rezyklaten zu erreichen, hat das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) gemeinsam mit Partnern einen innovativen Prozess mit in-situ Alkali-Additivzugabe entwickelt. Der Prozess wird aktuell bereits im 1-Megawatt-Pilotmaßstab realisiert ▶ Abbildung 3). Hierbei wird Klärschlamm in einer Wirbelschichtenanlage verbrannt. Durch die Additivzugabe wird die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors deutlich erhöht. Die Verbrennungsbedingungen können so eingestellt werden, dass es zusätzlich zu einer Mobilisierung von Schwermetallen während der Verbrennung kommt. Die phosphorhaltige Asche wird im Rauchgas als Flugasche ausgetragen und anschließend bei hohen Temperaturen von > 700°C abgeschieden. Mit dieser Technologie kann ein phosphorhaltiger Wertstoff mit reduzierten Schwermetallgehalten und hoher Pflanzenverfügbarkeit gewonnen werden.

Design nachhaltiger und kreislauffähiger Produkte

Die heutige Wegwerf-Gesellschaft bietet bisher kaum Anreize, Produkte und Konsumgüter nachhaltiger und kreislauffähiger zu gestalten, obwohl bis zu



▶ Abbildung 3
Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm:

Baustelle der 1 Megawatt-Pilotanlage im Juli 2023 .

(Quelle: Abwasserzweckverband Stauffener Bucht, <https://azv-stauffener-bucht.de/p-xtract/>)

80% der Umweltauswirkungen durch das Produktdesign beeinflussbar wären [9]. Das Institut für CO₂-arme Industrieprozesse des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt eine einheitliche Methodik, wie zukünftige Produktdesigns den End-of-Life (Demontage, Sortierung, Recycling) berücksichtigen können. Durch bessere Trennbarkeit der Materialien lassen sich reinere Abfallfraktionen für ein höherwertigeres Recycling erreichen, was insbesondere die Recyclingquote für kritischen Legierungs- und Technologiemetalle verbessert. Zu diesem Zweck wird ein digitales Tool entwickelt, das Produktentwickler an den entscheidenden Punkten im Designprozess durch Hervorheben problematischer Baugruppen und mit Alternativvorschlägen unterstützt.

Digitalisierung: Ein wichtiger Hebel für die Kreislaufwirtschaft

Die Digitalisierung stellt einen wichtigen Hebel zur Etablierung einer resilienten und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft dar. Zahlreiche zirkuläre Instrumente und Prozesse bedürfen digitaler Unterstützung, um für komplexe Produkte und Wertschöpfungsketten umsetzbar zu sein. Die Schaffung von Transparenz und Zuverlässigkeit hinsichtlich der Beschaffenheit und Verfügbarkeit von Sekundärmaterialien sind hier z.B. von hoher Relevanz für ein hochwertiges Recycling. [10] Ebenso die Möglichkeit, durch geeignete Informationen prädiktive Wartung und ein effizientes Refurbishment durchzuführen. Zentrale Bausteine sind unter anderem der digitale Produktpass und Datenräume für die Circular Economy. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen dann zur Verbesserung und Erhöhung der Kreislaufwirtschaftsfähigkeit bei. Da Materialien und Komponenten in die Kreisläufe verschiedener Industrien eingebracht werden können, entsteht ein digital-ermöglichtes Wertschöpfungsnetz. Das Wuppertal Institut für

Klima, Umwelt, Energie fokussiert beispielsweise die Entwicklung geeigneter digitaler Zwillinge, die Umsetzung im Engineering sowie die Erforschung und Verbreitung relevanter Datenkompetenzen.

Übergeordnete und einheitliche Datenbasis

Für eine leistungsfähige Circular Economy sind neue Formate der Zusammenarbeit und ein zuverlässiger Datenraum entscheidend. Mit dem am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystem (ISE) verfolgten Konzept der Circonomy® Hubs sollen Netzwerke aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft aufgebaut werden und darüber hinaus sollen auch Instrumente zur interdisziplinären Zusammenarbeit und eine gemeinsame transparente Datenbasis zur Bewertung von zirkulären Wertschöpfungsketten geschaffen werden.

Die Komplexität der internationalen Lieferketten – und folglich auch der entsprechenden Daten – wurde beispielhaft für die Photovoltaik aufgezeigt. Die global installierte Photovoltaik-Kapazität lag im Jahr 2022 erstmals bei über 1 TW_{dc}. Bis 2050 wird je nach Studie ein exponentieller Zubau von insgesamt bis zu 80 TW_{dc} erforderlich, wenn die Klimaziele eingehalten werden sollen [11]. Die Herstellung von Solarzellen benötigt ein breites Portfolio mineralischer Rohstoffe [12]. Bisher wird Silber als

Metallkontakt von Solarzellen eingesetzt. Gervais et al. zeigten zuletzt, dass bereits 2021 mehr als 10% des geförderten Silbers für die globale Photovoltaik-Produktion genutzt wurde. Gemessen am weltweit erwarteten Zubau wird perspektivisch das für die Produktion benötigte Silber knapp. Als größter Produzent verarbeitet China am meisten Silber zu Solarmodulen (► Abbildung 4). Derartige Rohstoffdaten und Zusammenhänge könnten in einem Circonomy® Hub zur Photovoltaik-Industrie genutzt werden, um Stoffströme in Kreisläufe zu überführen und somit die Nachhaltigkeit zu erhöhen und auch Lieferketten resilienter zu gestalten.

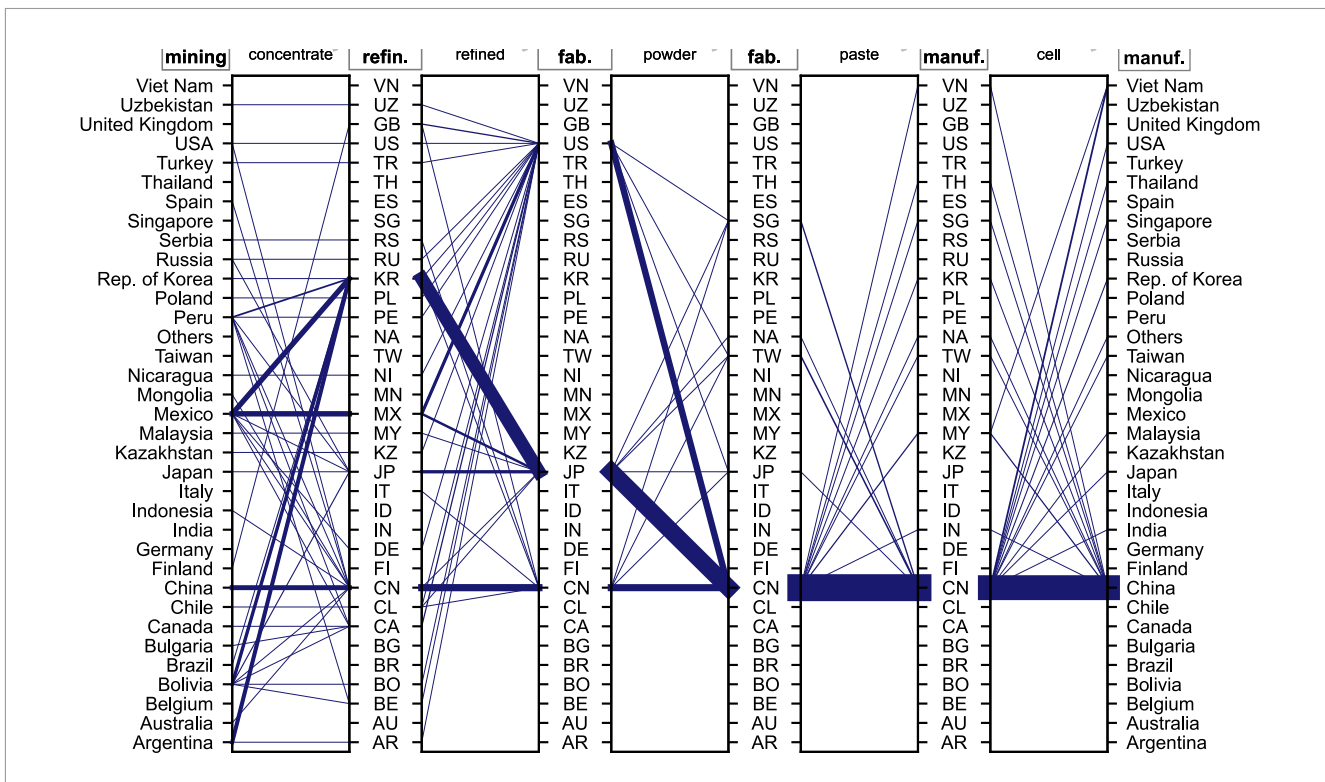
Einsatz Künstlicher Intelligenz

Der Künstlichen Intelligenz (KI) wird zukünftig ein großes Potenzial für den Erhalt der industriellen Wertschöpfung zugeschrieben [14]. Somit wird KI auch im Zuge des Strukturwandels zu einer Circular Economy zur Anwendung kommen, wie die nachfolgenden Forschungsarbeiten am Center of Applied Energy Research (CAE) zeigen.

Durch die Abkehr von der Kohleverstromung in Deutschland wird in absehbarer Zeit kein Gips (CaSO₄) mehr aus den Rauchgasentschwefelungsanlagen der Kohlekraftwerke gewonnen werden können. Es stellt sich die Frage inwiefern dieser Baustoff substituiert oder nachhaltige Gips-Herstellverfahren genutzt werden können.

► Abbildung 4
Silber in der Photovoltaik-Industrie:
Übersicht zu Bergbau, Aufbereitung und Verarbeitung.

(Quelle: [13])



Der Gebäudebestand stellt zukünftig einen wichtigen Lieferanten für Recycling-Gips dar, der jedoch aufgrund der etablierten Bauweisen oft in Mischung mit weiteren Baustoffen beim Rückbau anfallen wird. Insofern gilt es, neue Methoden zu entwickeln und zu etablieren, die zuverlässig und hochempfindlich Fremd-/ Schad-/ Gefahrstoffen (z.B. lungengängige Mineralfasern) in Recycling-Gips erkennen können. Hierfür bietet sich der Einsatz von KI an, die nach einem gewissen Lerneffekt, eine automatisierbare Charakterisierung mit hochpräziser Erkennungsmethodik ermöglichen wird.

Fazit

Zirkuläre Wertschöpfungsketten mit einer Bereitstellung von Sekundärrohstoffen fördern die Ressourcenautonomie. Bisher genutzte Primärressourcen können substituiert werden.

Mit Blick auf die aktuellen geopolitischen Schocks sollten für eine hohe Resilienz hierzulande weiterhin Grundstoffe für die weitere Verarbeitung produziert werden. Ein wesentlicher Schlüssel zur Begegnung der Klimakrise liegt in einer raschen Abkehr vom linearen Wirtschaftsmodell hin zu einer leistungsfähigen Circular Economy. Systemische und technologische Innovationen, wie in diesem Beitrag beschrieben, können zudem die Material- und Energieeffizienz steigern.

Referenzen

- [1] Oberle et al.: „Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want.“; A Report of the International Resource Panel, United Nations Environment Programme, Nairobi (Kenia), 2019
- [2] Europäische Kommission: „Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken“; Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen; Brüssel, den 3.9.2020
- [3] Bierau-Delpont et al.: „Chemistry4Climate – Wie die Transformation der Chemie gelingen kann“ (Kurzfassung); Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) & Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI); 2023
- [4] Netsch et al.: „Chemical Recycling of Polyolefinic Waste to Light Olefins by Catalytic Pyrolysis“; Chemie Ingenieur Technik 95, No. 8, 2023
- [5] Stallkamp et al.: „Economic and environmental assessment of automotive plastic waste end-of-life options“; Journal of Industrial Ecology, 2023
- [6] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/206779/umfrage/inlandsabsatz-von-duengemitteln-nach-naehrstoffarten-in-deutschland/>; Abrufdatum 03.11.2023 (Kalkulation auf Basis der letzten drei Jahre)
- [7] Ouikhalfan et al.: „Toward Net-Zero Emission Fertilizers Industry: Greenhouse Gas Emission Analyses and Decarbonization Solutions“; Energy & Fuels, Vol. 36, 2022 (Kalkulation nach Tabelle 9)
- [8] Roskosch et al.: „Klärschlamm-Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland“; Umweltbundesamt, 2018 (Kalkulation nach Tabelle 13)
- [9] Europäische Kommission: „Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa“; Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen; Brüssel, den 11.3.2020
- [10] Berg, H., Bendix, P., Jansen, M., Le Blévenec, K., Bottermann, P., Magnus-Melgar, M., ... & Wahlström, M. (2021). Unlocking the potential of Industry 4.0 to reduce the environmental impact of production. European Environment Agency, European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/unlocking-the-potential-of-industry-4-0-to-reduce-the-environmental-impact-of-production>
- [11] Haegel et al.: „Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option“; Science, Vol. 380, Issue 6640, pp. 39-42, 2023; <https://doi.org/10.1126/science.adf6957>
- [12] Dörner, Liedtke: „Mineralische Rohstoffe für die Energiewende“; Commodity TopNews, Bd. 50, 2016; https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/50_rohstoffe-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [13] Gervais et al.: „Risk-based due diligence in supply chains: The case of silver for photovoltaics“; Resources, Conservation & Recycling, Vol. 198, Issue 107148, 2023; <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107148>
- [14] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Technologieszenario „Künstliche Intelligenz in der Industrie 4.0““; Working Paper, 2019
- [15] Faulstich: „Circular Economy – Herausforderungen und Perspektiven“; Nachhaltige Industrie, No. 1, 2020

Stärkung der Resilienz sozialer Systeme – welchen Beitrag kann die sozialwissenschaftliche Forschung leisten?



IZES

Jan Hildebrand
hildebrand@izes.de

FZ Jülich

Dr. Hawal Shamon
h.shamon@fz-juelich.de

KIT

Prof. Dr. Dr. Rafaela Hillerbrand
rafaela.hillerbrand@kit.edu

PD. Dr. Dirk Scheer
dirk.scheer@kit.edu

ZSW

Dr. Tobias Buchmann
tobias.buchmann@zsw-bw.de

Forschung zu resilienten sozialen Systemen

Das Funktionieren des Energiesystems im Sinne des energiepolitischen Zieldreiecks für eine sichere, saubere und bezahlbare Energieversorgung, wird neben der Justierung der einzelnen internen Systemkomponenten auch von externen Faktoren beeinflusst. Im Bedarfsfall muss über verschiedene Maßnahmen das Funktionieren des Systems aufrechterhalten bzw. schnellstmöglich wieder hergestellt werden. Die Fähigkeit von Systemen, Störungen zu widerstehen, negative Impulse auszugleichen bzw. sich an veränderte Bedingungen anzupassen, kann mit dem Konzept der Resilienz beschrieben werden. Resilienz umfasst in diesem Zusammenhang sowohl die Wiederorganisation des Systems nach einer Störung in den Ursprungszustand („bounce back“), als auch die grundlegende Veränderung und Transformation der Systemeigenschaften („bounce forward“) im Sinne einer „adaptive-capacity“. Dementsprechend ist die Transformationsfähigkeit ein zentrales Merkmal systemischer Resilienz.

Die Resilienzeigenschaften gelten dabei nicht nur für die technische Dimension des Energiesystems, also z.B. Energieerzeugungs- oder Netzinfrastrukturen, sondern im Sinne eines soziotechnischen Systemverständnisses auch für die soziale und gesellschaftliche Dimension. Im Folgenden werden relevante Aspekte der Forschung zur Resilienz sozialer Systeme skizziert und aktuelle Projekte der FVEE-Institute dargestellt. Es existieren verschiedene Modelle zur Resilienz, welche unterschiedliche Dimensionen und Prinzipien formulieren, allen gemein sind die wesentlichen Betrachtungsdimensionen Strukturen, Prozesse und Akteure (► Abbildung 1).

Auf Ebene der Strukturen ist eine systemische Perspektive, d.h. die Integration von verschiedenen Betrachtungsebenen, daraus resultierende Synergien und vernetztes Denken ein zentrales Prinzip. Prozesse in resilienten sozialen Systemen zeichnen sich durch eine proaktive Offenheit gegenüber Veränderungen und kontinuierliches systemisches

Lernen als Reaktion auf Störungen oder sich verändernde Kontextbedingungen aus. Hinsichtlich der Akteurkonstellationen sind gemeinschaftliche Netzwerke, Vielfalt und institutionalisierte Partizipationsmöglichkeiten wichtige Charakteristika resilienter sozialer Systeme.

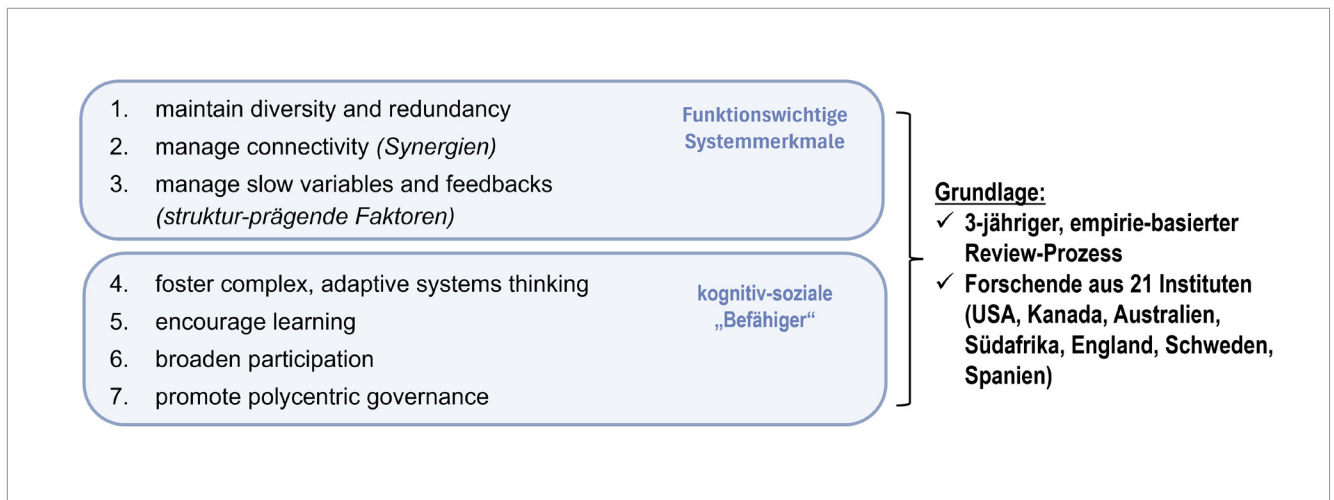
Die Betrachtung sozial-ökologischer Resilienz muss dabei immer gemeinsam mit technischen und wirtschaftlichen Systembetrachtungen erfolgen, da substantielle Wechselwirkungen der Systemebenen durch Informationswahrnehmungen, Entscheidungen und Verhalten über Systemzustände und korrespondierende Maßnahmen auf individueller und kollektiver Ebene bestehen.

Beispielhafte Forschungsprojekte der FVEE-Institute

Resilienzbezogene Forschungsfragen zu verschiedenen Betrachtungsebenen und fördernden Faktoren für die Resilienz sozialer Systeme werden aktuell in unterschiedlichen Forschungsprojekten mit jeweils spezifischen inhaltlichen Schwerpunkten und Anwendungsbereichen adressiert. Im Folgenden werden ausgewählte Projekte kurz vorgestellt.

Projekte KIT-ITAS

- Resilienz im Kontext von Nachhaltigkeit und Transformation:
Grundlegende Überlegungen zur Rolle von Resilienz, Nachhaltigkeit und Transformation wurden in einem Buch zusammengetragen, das Organisationen als Transformationsbeschleuniger in den Mittelpunkt stellt (Kinne et al. 2022). Dabei werden wichtige Facetten in ihrem Zusammenspiel dargelegt: „Nachhaltigkeit bezeichnet Zustände von Dauer, Resilienz macht sie dauerhaft. Systems Thinking klärt Zusammenhänge, und Design Thinking macht sowohl Resilienz als auch Nachhaltigkeit realisierbar“ (ebd., S. 1). Resilienz als Widerstandskraft und -fähigkeit wird hier verortet in zielgerichteten Veränderungs- und Gestaltungsprozessen. Es zeigt sich, dass sozial-ökologische Resilienz als Bestandsfähigkeit essentiell für den Wandel ist.



- **Resilienz und Nachhaltigkeitsbewertung:**
Die methodische Entwicklung valider und reliabler Nachhaltigkeitsbewertungen ist eine Schlüsselkomponenten wissenschaftlicher Nachhaltigkeitsforschung. Mit der Erweiterung von Umweltbewertung auf mehrdimensionale Nachhaltigkeitsbewertung stellt sich auch die Frage von Resilienz betrachtungen. Wie kann Resilienz als wichtige Ressource in Transformationsprozessen methodisch handhabbar gemacht werden? Damit beschäftigt sich das Projekt „Tool zur multi-kriteriellen Nachhaltigkeitsbewertung von Energietechnologien der Energiewende“. Hier werden methodische Ansätze zur Integration von Resilienz und Responsible Research and Innovation (RRI) entwickelt.
- **Nukleare Entsorgung und Zukunftspfade:**
Die Wege für eine sichere Entsorgung hochradioaktiver Abfälle sind vielfältig und bleiben eine zentrale politisch-gesellschaftliche Herausforderung. Vor diesem Hintergrund ist es eine zentrale Aufgabe, zieladäquate Zukunftspfade der nuklearen Entsorgung hochradioaktiver Abfälle zu identifizieren, zu analysieren und zu bewerten. Im Rahmen des Forschungsprojektes TRANSENS wurden insgesamt sieben Zukunftspfade identifiziert und hinsichtlich ihrer Plausibilität und Umsetzungswahrscheinlichkeit eingeordnet (Scheer et al. 2024). Daraus abgeleitete, übergeordnete Strategien der Unsicherheitsbewältigung thematisieren auch die Frage von Resilienz zwischen Bestand und Wandel. Strategien der inkrementellen Status-Quo-Orientierung, der starken Verankerung von Partizipation und Beteiligung, sowie der Aufrechterhaltung von zukünftiger Handlungsfähigkeit versuchen Transformationsprozesse über Unsicherheitsreduktion handhabbar zu machen.

Projekt ZSW: V4InnovatE

Die Einführung von Innovationen (Technologien und Geschäftsmodelle) für die Energiewende ist eine wichtige Komponente bei der Transformation zu einem nachhaltigen Energiesystem. Das Projekt 4VInnovatE widmet sich dabei der Herausforderung, die Diffusion von technologischen Energiewendeinnovationen voranzutreiben, während gleichzeitig potenzielle negative Auswirkungen auf die individuelle und gesellschaftliche Akzeptanz berücksichtigt und gemildert werden sollen. Die Integration verantwortungsbewusster Forschung und Innovation (Responsible Research and Innovation, RRI) ist dabei ein vielversprechender Ansatz für den erfolgreichen Umgang mit unerwünschten Folgen von Innovationen.

Technologische Energiewendeinnovationen bergen das Potenzial, insbesondere durch Skalierung unerwünschte Auswirkungen zu verursachen, die die Akzeptanz beeinträchtigen können. Ein exemplarisches Beispiel ist die Rohstoffgewinnung für Batterien, bei der Menschenrechtsverletzungen und Konflikte um Ressourcen, wie bei der Kobalt- und Lithiumgewinnung, auftreten können. Die Auswirkungen solcher Innovationen werden oft erst rückblickend erkannt und dementsprechend erst reguliert, wenn Produktion und Verbreitung bereits im Gange sind.

Hingegen steht beim RRI-Ansatz die proaktive Integration von Kriterien bereits in der Phase der Technologieentwicklung im Mittelpunkt. Dieser Ansatz ermöglicht es dann, potenzielle negative Auswirkungen frühzeitig zu erkennen und entsprechend zu reagieren.

Die Operationalisierung von RRI erfolgt durch ein umfassendes Indikatoriksystem, das die Gestaltung von Innovationsprozessen unterstützt. Ein Online-Tool, verfügbar unter <https://www.v4innovate.de/>, bietet partizipative Schritte, die in den Forschungs-

► *Abbildung 1
Resilienz-Prinzipien
für sozial-ökologische
oder andere Systeme*

(Quelle: Biggs et al. (eds) (2015))

und Entwicklungsprozess eingebettet sind. Durch Reflexion und Antizipation von unvorhergesehenen Effekten wird eine Anpassung der Technologien auf Basis neuer Erkenntnisse ermöglicht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die transparente Kommunikation über den gesamten Innovationsprozess hinweg. Die Integration von Reflexivität und Responsivität schafft eine Grundlage für eine kontinuierliche Anpassung der Technologien im Einklang mit den sich entwickelnden gesellschaftlichen Erwartungen und Anforderungen. Die vorgestellten Schritte dienen als Modell für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich der Energiewende und darüber hinaus.

Projekt FZ Jülich: RESUR

Der Einmarsch Russlands in die Ukraine stellt eine Zäsur in der jüngeren Geschichte Europas dar. Er hat die Abhängigkeit Deutschlands im Energiesektor von Rohstoffimporten, insbesondere aus Russland, bis zum Beginn des Krieges offenbart. Die in diesem Zusammenhang erfolgten bis dahin beispiellosen Energiepreiserhöhungen stellten Haushalte und Unternehmen in Deutschland vor eine enorme Herausforderung. Das Gesamtprojekt RESUR beabsichtigt, Entscheidungsträgern in Deutschland aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft eine kurzfristige proaktive und reaktive Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen auf Basis hochgradig modellgestützter und systemisch verbundener Analysen zu bieten.

Im Rahmen des RESUR-Projekts hat IEK-STE auf Basis einer eigens durchgeführten umfragebasierten Wiederholungsstudie zur haushaltsnahen Wärmeversorgung untersucht, inwieweit die Energiekrise die Energiekonsum- und Nutzungsgewohnheiten von Haushalten beeinflusst sowie ihre Risiko- und Gefährdungswahrnehmung hinsichtlich der Energieversorgung verändert hat. Die teilnehmenden Haushalte (Januar 2022: n=1500, Dezember 2022: n=1509) wurden von einem Befragungsinstitut mittels Quotenverfahren (Quoten: Besitzstand, Haushaltgröße, Haushaltseinkommen) rekrutiert. Unter anderem zeigt sich, dass ein Großteil der befragten Haushalte den Strom- und Wärmeverbrauch nach Kriegsbeginn reduziert hat. Gleichzeitig passte ein Teil der Befragten das Raumlüftungsverhalten an. Dies erfolgte aber in geringerem Ausmaß als man zuvor vielleicht vermutet hätte. Trotz der Anpassungen im Energiekonsum hat die Angst vor einer drohenden Energiearmut, unabhängig von der Haushaltgröße und trotz beschlossener politischer Maßnahmen wie Steuererleichterungen, Energiepreisdeckel und Soforthilfen, zwischen Januar und Dezember 2022 deutlich zugenommen.

Die hier skizzierten Ergebnisse decken nur einen Teil der Ergebnisse der Vorher-Nachher-Studie ab und fließen mitunter in das Extra-Projekt am IEK-STE ein. Das Extra-Projekt untersucht, inwieweit Extremereignisse sich auf die gesellschaftliche Akzeptanz verschiedener Wärmeversorgungsmöglichkeiten auswirken.

Projekt IZES: ReWA und Crowdthermal

Die Energiewende und der damit einhergehende Ausbau erneuerbarer Energien ist zwar auf der einen Seite von einer großen gesellschaftlichen Akzeptanz getragen, auf der anderen Seite existieren durchaus manifeste Proteste und Konflikte, welche als Spannungen für die soziale Systemebene verstanden werden können. Die Energiewende wird von Gegnern gewissermaßen als „Störung“ wahrgenommen, gegen die es resilient zu sein gilt. Die Projekte ReWA (Förderung durch das BMWK) und Crowdthermal (EU H2020) beschäftigten sich mit der Analyse und Bewertung unterschiedlicher Beteiligungsstrategien beim Ausbau erneuerbarer Energien als einer Möglichkeit, soziale Spannungen und Konflikte zu reduzieren, und akzeptable Prozesse vor Ort zu gestalten. Die Konflikte zeichnen sich zudem oftmals durch Unsicherheit und Angst aus, dementsprechend ist ein weiteres Ziel der Beteiligung, auch Raum für positive Emotionen zu ermöglichen und Unsicherheiten abzubauen.

Ein Grundprinzip von Beteiligung ist, die Vielfalt an involvieren Akteuren zu erhöhen und auf diese Weise auch die Last und den Nutzen auf mehrere Schultern zu verteilen. Die Ergebnisse der in den Projekten durchgeführten empirischen Analysen zeigen, dass insbesondere die Faktoren Verfahrensgerechtigkeit, d.h. die faire Gestaltung von Entscheidungsprozessen mit Möglichkeiten zur Mitgestaltung, als auch die gerechte Verteilung von Kosten und Nutzen, z.B. über regionale Wertschöpfung, sich positiv auf die Akzeptanz auswirken und zu einer Konfliktreduktion beitragen. Zudem werden durch die Teilnahme an Beteiligungsverfahren sowohl auf der individuellen Ebene als auch auf der kollektiven Ebene der lokalen Gemeinschaft die Faktoren Verhaltenskontrolle und Selbstwirksamkeit gestärkt, es werden lokales Wissen und Kompetenzen aufgebaut, und die Kohäsion lokaler Netzwerke sowie das Vertrauen in die Prozesse und Akteure erhöht. Auf diese Weise können Beteiligungsmöglichkeiten zu einer höheren Resilienz des sozialen Systems beitragen.

Ausblick

Für die zukünftige Forschung sind neben dem weiteren Verständnis über die Bedingungsfaktoren resilienter sozialer Systeme, d.h. der Wirkungen und des Zusammenspiels der einzelnen Ebenen und Komponenten, insbesondere diejenigen Fragen von Belang, welche sich mit der Verstärkung und Förderung dieser relevanten Eigenschaften beschäftigen, um den Transformationsprozess der Energiewende zu unterstützen.

Dabei besteht eine große Herausforderung hinsichtlich des Ausgleichs zwischen verschiedenen Systemebenen und -grenzen (regional, national, Europa & global), hier stehen insbesondere Gerechtigkeitsfragen im Mittelpunkt, beispielsweise beim Import von Wasserstoff als Baustein für die deutsche Energiewende. In diesem Zusammenhang betreffen relevante Fragen aus Resilienz-sicht dabei einerseits die Aspekte der Diversifizierung und Reduktion geopolitischer Abhängigkeiten, andererseits aber auch, inwiefern die „eigene“ Energiewende die Energiewende in möglichen Exportländern behindert und die europäische Resilienz auf diese Weise zu Lasten der Resilienz potenzieller Exportstaaten geht und dort u.a. auch zu sozialen Spannungen führt. Dementsprechend müssen hier die Perspektiven unterschiedlicher Resilienzobjekte, -subjekte und -kontexte in die Analyse und Bewertung einbezogen werden.

Nicht zuletzt ist die Frage, inwieweit sich unterschiedliche Resilienz-Stadien auf ganz konkrete Entscheidungs-, Planungs- und Genehmigungsprozesse in der Transformation auswirken bzw. sich diese dadurch auszeichnen.

Die sozialwissenschaftliche Forschung liefert hierzu wichtige Impulse für ein besseres und ganzheitliches Verständnis der sozial-ökologischen Systemtransformation.

Literatur

- Biggs, R., Schlüter, M. & Schoon, M. (2015). Principles for Building Resilience: Sustaining Ecosystem Services in Social-Ecological Systems. 10.1017/CBO9781316014240.
- Kinne, P., Kopfmüller, J., Reisener, J., & Strikwerda, H. (2022). Organisationen als Transformationsbeschleuniger: Die produktive Allianz von Nachhaltigkeit, Resilienz, Systems-und Design-Thinking. Springer Berlin/Heidelberg.
- Scheer, D.; Becker, F.; Hassel, T.; Hocke, P.; Leusmann, T.; Metz, V. (2024): Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, in: Eckhardt, A.; Becker, F.; Mintzloff, V.; Scheer, D.; Seidl, R. (Hrsg.) (2024): Entscheidungen in die weite Zukunft, Springer Nature VS, Wiesbaden. S. 113-140.

Dezentralisierung der Daseinsvorsorge durch blau-grün-rote Infrastrukturen

Überlegungen aus dem BMBF-Vorhaben Leipziger BlauGrün II



UFZ

Dr. Frank Hüesker
frank.huesker@ufz.de

Stadt Leipzig
Sophie Wehmeier
sophie.wehmeier@leipzig.de

Tilia
Stefan Böttger
stefan.boettger@tilia.info

Die kommunale Daseinsvorsorge in Deutschland ist ein jahrzehntealtes Politikmodell, welches die Grundversorgung der Bevölkerung mit Dienstleistungen und Infrastrukturen gewährleisten soll. Zu den Infrastrukturen der Ver- und Entsorgung zählen u.a. Energie, Wasser- und Abfallinfrastrukturen. Diese Infrastrukturen sind gemäß der traditionellen Daseinsvorsorge-Paradigmen allgemein zugänglich, erschwinglich, flächendeckend verfügbar, effektiv und legitim gemanagt, gerecht und nachhaltig finanziert.

Blaue Infrastrukturen stehen in Bezug zum Wasser, bei grünen Infrastrukturen wie Grünanlagen oder Gründächern liegt das Hauptaugenmerk auf der Bepflanzung und bei roten Infrastrukturen geht es um energetische Fragestellungen.

Gebietsmonopole vs. Dezentralität

Insbesondere im Wasser- und Abwassersektor aber auch bei Energienetzen sicherte das Prinzip der Gebietsmonopole die Zentralität der Infrastrukturen auf einem Territorium. Diese zentrale Bereitstellung durch nur einen Betreiber auf dem Gebiet einer Kommune förderte auch die Resilienz dieser Infrastrukturen, denn über ihre Zentralität wurde auch Akzeptanz hergestellt und Gemeinwohlfähigkeit sozial konstruiert.

Technische Innovationen (Stichwort Digitalisierung) und gewandelte politische Zielstellungen (z.B. Versorgungssicherheit und Ressourceneffizienz) stellen Paradigmen kommunaler Daseinsvorsorge wie die Zentralität von Infrastruktursystemen nun in Frage. Ganz grundsätzlich ist aus Sicht der Politikwissenschaft die Frage zu stellen, wie dezentrale und kleinteilige Infrastrukturen genauso geeignet sein könnten, gemeinwohlfähige Resilienz zu sichern.

Ein Beispiel für die urbane Implementierung blau-grün-roter Infrastrukturen findet sich in der forschungsbegleiteten Planung des Neubauviertels L416 im Leipziger Stadtzentrum. Hier sollen blau-grüne Infrastrukturen (BGI) erheblich zur

Kühlung und zur Energieeinsparung beitragen können. Blau-grüne Infrastrukturen bestehen idealerweise aus mehreren kleinteiligen Elementen wie Gründächern, Grünfassaden, Baumrigolen, Zisternen oder Mulden, die in ihrer Summe und Kombination volle Wirkung im Sinne von regenwasser-abflussfreien Quartieren erzeugen.

Sowohl die blauen als auch die grünen Infrastrukturelemente beeinflussen die Energiebilanz des Neubauquartiers L416, insbesondere über die Kühlungseffekte im Sommer, die im BMBF-Vorhaben Leipziger BlauGrün auch systematisch untersucht werden. Nennenswerte Effekte blau-grüner Infrastrukturen für die Energiewende ergeben sich, wenn diese dezentrale Infrastrukturtransformation flächendeckend implementiert wird. Hingegen könnte es zur "Grünen Gentrifizierung" kommen, wenn blau-grüne Infrastrukturen zu sinkenden Wassergebühren in hochpreisigen Neubauquartieren führen, und die im zentralen Netz verbleibenden, sozial schwächeren Akteure dies anteilig finanzieren müssen. Durch unsere Forschungen soll gezeigt werden, wie dezentrale Infrastrukturen gemeinwohlfähig errichtet und betrieben werden können.

Wassersensible Stadtentwicklung in Leipzig

Die Stadtverwaltung Leipzig nimmt seit einiger Zeit die wassersensible Stadtentwicklung stärker in den Fokus. Wassersensible Stadtentwicklung beschreibt die interdisziplinäre Kooperation von Wasserwirtschaft, Stadtplanung und Freiraumgestaltung (Hoyer et al. 2011, S. 18). Ziel der wassersensiblen Stadtentwicklung ist es, die Bedarfe des Regenwassermanagements mit denen der Stadtplanung und Freiraumgestaltung zu verknüpfen, um somit den städtischen Wasserkreislauf dem örtlich natürlichen (unbebauten) Wasserkreislauf bestmöglich anzugleichen und hierbei lebenswerte Stadt- und Freiraumstrukturen zu entwickeln.

In den derzeitigen Bemühungen zur wassersensiblen Stadtentwicklung wird der Fokus stark auf ein nachhaltiges und weitestgehend dezentrales

Regenwassermanagement gelegt. Eine wesentliche Maßnahme der wassersensiblen Stadtentwicklung ist die Etablierung von blau-grünen Infrastrukturen. Diese Infrastrukturen werden dezentral betrieben und ahmen die Natur und den natürlichen Wasserkreislauf nach, um ökologische Störungen so gering wie möglich zu halten. Blau-grüne Infrastrukturen bieten Möglichkeiten zur Erholung und eine verbesserte Lebensqualität durch mehr Grünflächen (Salvisberg 2019, S. 4). Da die Flächenverfügbarkeit innerstädtisch gering ist, gewinnen blau-grüne Infrastrukturen, die eine multifunktionale Nutzung ermöglichen, zunehmend an Bedeutung.

Die flächendeckende Implementierung von blau-grünen Infrastrukturen stößt auf Hindernisse in den Verwaltungsabläufen, den Finanzierungsinstrumenten und den rechtlichen Vorgaben. Für diese Rahmenbedingungen bedarf es einer Anpassung, um eine Implementierung der blau-grünen Maßnahmen für eine Vielzahl von Projekten zu ermöglichen und sicherzustellen, dass die Berücksichtigung blau-grüner Themen, auch in Verbindung mit energetischen (roten) Fragestellungen bei Gebäuden und Quartieren, nicht nur auf Modellprojekte beschränkt bleibt.

Die wassersensible Stadtentwicklung wird in Leipzig durch das „Lenkungsnetzwerk wassersensible Stadtentwicklung“ koordiniert. Es wird innerhalb der Leipziger Stadtverwaltung, der Kommunalen Wasserwerke Leipzig GmbH, und des Zweckverband für Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung Leipzig-Land ZV WALL ein integrativer, ämterübergreifender Prozess gefördert, bei dem sich verschiedenen Arbeitsbereiche vernetzen und zusammenarbeiten.

Das Netzwerk bietet eine Plattform auf Bearbeitenden-Ebene, um Lösungen für konkrete Fragestellungen zu finden und parallel grundlegende Arbeitsprozesse anzupassen, damit das nachhaltige Wassermanagement von Beginn an in verwaltungsinternen Planungsprozessen mitgedacht wird. Zudem hat es sich u. a. zum Auftrag gemacht, die kommunale Rahmensetzung weiterzuentwickeln und Ziele und Maßnahmen der wassersensiblen Stadtentwicklung sowohl nach innen als auch nach außen zu kommunizieren.

Neben den kommunalen Rahmensetzungen und der Kommunikation der Ziele der wassersensiblen Stadtentwicklung, ist in Planungsprozessen eine valide Datengrundlage unabdingbar. Durch sie können Handlungsbedarfe für die wassersensible Stadtentwicklung als Teil von Klimaanpassungsmaßnahmen ermittelt und begründet werden.

Zu den wichtigen Datengrundlagen zählen die Starkregengefahrenkarte und die Stadtklimaanalyse. Letztere bildet auch die Schnittstelle zu Frage-

stellungen einer nachhaltigen Energieversorgung („blau-grün-rot“) der Stadt Leipzig, da sich die Notwendigkeit und Priorisierung von energetischen (roten) Sanierungs- und blau-grünen Anpassungsmaßnahmen einzelner Gebäude mit Bezug auf die Stadtklimaanalyse ergibt.

Die Datengrundlagen werden auf Datenplattformen bereitgestellt. Um ein unkompliziertes interdisziplinäres Arbeiten zu ermöglichen, werden die bestehenden Datenplattformen kontinuierlich weiterentwickelt.

Das Lenkungsnetzwerk wird durch das BMBF-geförderte Projekt Leipziger BlauGrün II unterstützt. Durch das Projekt besteht ein direkter Zugang zu Forschungsergebnissen, die als Grundlage für die Anpassung der täglichen Arbeitspraxis dienen. Der größte Einfluss der Stadtverwaltung für die wassersensible Stadtentwicklung liegt derzeit im öffentlichen Raum. Durch das Projekt sollen im Leipziger Kontext u. a. Anreizsysteme identifiziert werden, um Eigentümer*innen für ein Mitwirken auf privaten Flächen zu begeistern, da auf ihren Flächen ein großes Potenzial für die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung liegt.

Energiebilanz des blau-grünen Neubauquartieres

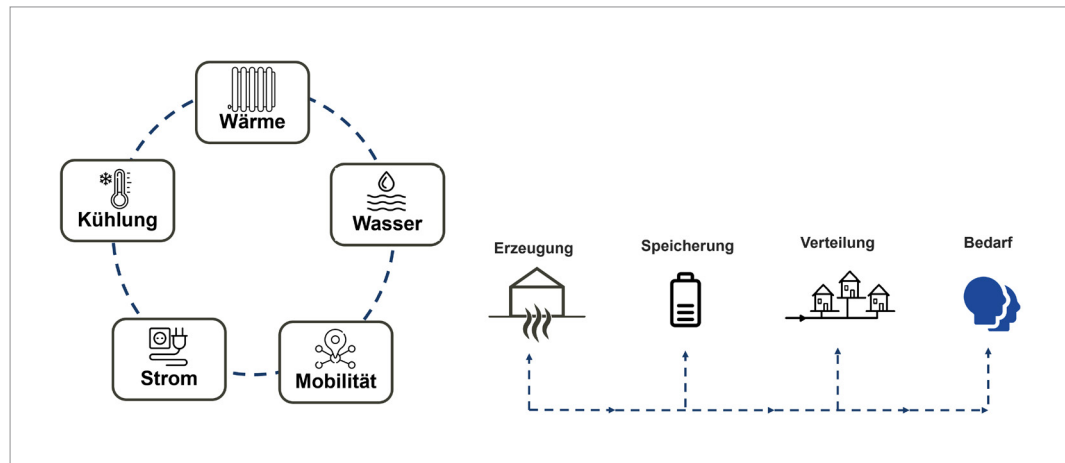
Moderne Stadt-, Quartiers- als auch Gebäudeentwicklung umfasst nicht nur, wie im voran gegangenen Kapitel beschrieben, die Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch blau-grüne Maßnahmen im Regenwasserbereich, sondern auch die Konzeptionierung im Sinne des Klima- und Umweltschutzes. Das heißt, dass Planungen so umzusetzen sind, dass die damit verbundenen Maßnahmen möglichst geringe Treibhausgasemission verursachen. Für Stadtquartiere bedeutet dies im Kern die Reduktion des Energie- als auch des Ressourcenbedarfs für alle Infrastrukturen. Die frühzeitige Abstimmung und Einbindung über alle relevanten Infrastrukturen sowie alle relevanten Teilaspekte der jeweiligen Medien (► Abbildung 1) ist dabei essenziell.

Energiesystem

Besondere Relevanz im Neubauquartier L416 hat das Energiesystem, da in diesem Bereich ein großes Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasen (THG), insbesondere CO₂, vorliegt. Das präferierte Energiesystem wurde bewusst dezentral ausgestaltet, um ein größtmögliches Potenzial an erneuerbaren Energie nutzen zu können.

► **Abbildung 1**
Ein dezentralisiertes
(Energie-) System im
Leipziger Neubauquartier
L416

(Quelle: Tilia GmbH)



Auf der Wärmeseite wird neben der Fernwärme (sowohl aus Vor- als auch aus dem Rücklauf) des städtischen Versorgers Leipziger Stadtwerke (LSW) in großem Maßstab auf innovative Abwasserwärme aus einem naheliegenden Hauptsammler gesetzt. Weiterhin werden dezentrale Solarthermie und Erdwärme (Geothermie) in kleinerem Umfang für einzelne Gebäude eingesetzt. Die Abwärme aus einem benachbarten Server-Rückkühler stellt sich ebenfalls als potenziell nutzbar dar. Die genannten Quellen von Umweltwärme werden mittels strombetriebenen Wärmepumpen auf ein nutzbares Temperaturniveau gehoben.

Der dafür benötigte Strom wird zu einem Großteil dezentral durch den flächigen Einsatz von PV-Systemen bereitgestellt, sowohl auf den einzelnen Gebäuden des Quartiers als auch auf dem benachbarten Gelände des städtischen Energieversorgers LSW. Überschüssiger PV-Strom soll innerhalb der Gebäude den Mietern zur Verfügung gestellt werden, auch in Kombination mit dezentralen Stromspeichern.

Betriebsführung

Eine integrierte Konzeptionierung und Planung eines dezentralisierten Ver- und Entsorgungssystems mit Schnittstellen verschiedener Medien wirft zwangsläufig Fragestellungen zur Betriebsführung der einzelnen Bestandteile auf. Ist eine gebündelte Betriebsführung verschiedenartiger Infrastrukturen in einem Quartier denkbar und sinnvoll? Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die einzelnen Aspekte der Betriebsführung von Energie (Strom, Wärme), Regenwassermanagement und Bewässerung detailliert betrachtet¹. Dazu gehören: Eigentümerschaft der Infrastrukturanlagen (öffentlich

oder privat), Zuständigkeit Ersatzinvestitionen von Anlagen, Unterscheidung Systembestandteil bei Wartung und Betrieb.

In der Betrachtung ergab sich, dass die Bündelung aller Aspekte in einer öffentlich oder privat organisierten Betriebsführungsgesellschaft aufgrund der Diversität keine Effizienzvorteile bringt. Eine gemeinsame Betriebsführung in einzelnen Aspekten für „Energie“ (Strom und Wärme) als auch „Wasser“ (Regenwasserentsorgung und Bewässerung) kann jedoch durchaus sinnvoll sein.

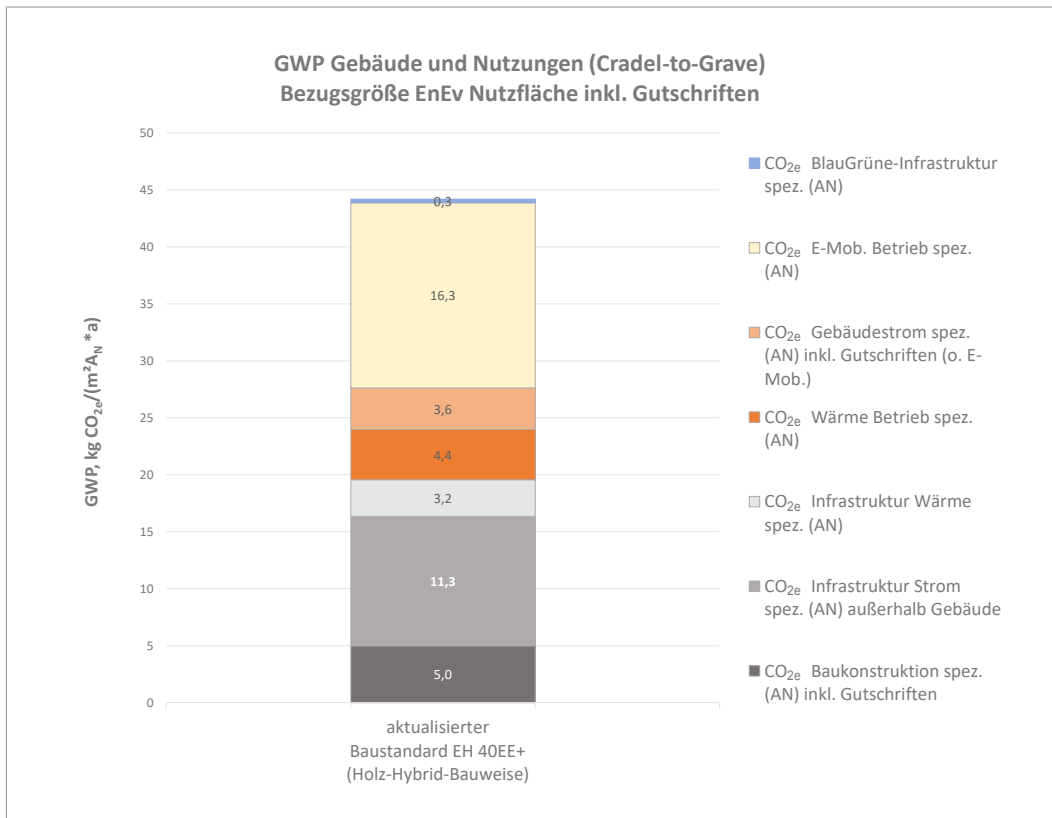
CO₂-Bilanz

Die Bilanzierung der CO₂-Äquivalente (CO_{2e}) dient als Grundlage für die Bewertung der Nachhaltigkeit des gesamten Quartiers und seinen Bestandteilen.

Fokus bei der vorliegenden Bewertung wurde auf die folgenden Systembestandteile gelegt (Scope 3 gemäß GHG-Protokoll Module A-C): Gebäudekonstruktion (KfW Effizienzhaus 40 EE+ in Holz-Hybrid-Bauweise), Infrastruktur Strombereitstellung, Infrastruktur E-Mobilität, Infrastruktur Wärmebereitstellung sowie blau-grüne Infrastruktur (Regenwassermanagement).

Ebenfalls wurden für die Nutzungsphase die CO_{2e} („rote“ Energie) für die folgenden Medien betrachtet (Scope 1 und 2 gemäß GHG-Protokoll): Strombereitstellung, E-Mobilität, Wärmebereitstellung. Berücksichtigt bei der Bilanzierung wurden ebenfalls Gutschriften die bspw. durch die Einspeisung von überschüssigem PV-Strom oder durch das Recycling von Baustoffen (Modul D) entstehen. Der Betrachtungsrahmen liegt bei 50 Jahren.

¹ Abwasserentsorgung und Trinkwasserversorgung als hoheitliche Aufgaben im Sinne der Daseinsfürsorge waren nicht Bestandteil der integrierten Konzeptionierung und daher auch nicht Bestandteil der Überlegungen zur gemeinsamen Betriebsführung.



► Abbildung 2

Vergleich CO_{2e} Gesamtquartier L416
GWP = Global Warming Potential,
also das jeweilige Treibhauspotenzial (CO₂-Äquivalent)

(Quelle: Tilia GmbH)

Im Ergebnis wurde ein umfassender Vergleich der CO_{2e} des gesamten Neubauquartiers L416 aufgestellt (► Abbildung 2). Wesentliche Erkenntnisse des Vergleichs sind:

- Baukonstruktion der Gebäude ist nicht der größte Verursacher von CO_{2e}
- blau-grüne Infrastruktur mit vergleichsweise sehr geringen CO_{2e}
- CO_{2e} der Energieinfrastruktur (Strom & Wärme) mindestens genauso bedeutsam wie die Emissionen während der Betriebsphase
- großes Potenzial zur Reduzierung von CO_{2e} in der Betriebsphase der E-Mobilität (bspw. Nutzung von Überschussstrom aus PV-Anlagen)

Schlussfolgerungen

In Bezug auf die einleitend gestellten Fragen zum Spannungsfeld Zentralität und Daseinsvorsorge kann hier als ein Zwischenfazit resümiert werden, dass sektorübergreifende Dezentralisierung mit einer Institution wie dem Lenkungsnetzwerk potenziell gesamtstädtisch adressiert werden kann. Wichtig ist, die Inklusion der einzelnen Sektoren über die diesbezüglichen Ämter und Entscheidungsträger der Stadtverwaltung und der Kommunalwirtschaft.

Zudem ist die Rolle eines potenten Antreibers mit finanziellem Eigeninteresse, wie es die Wasserwerke darstellen, förderlich, um die Verantwortung für kleinteilige Infrastrukturen zu übernehmen oder zielführend zu übertragen. Eine gemeinsame Betriebsführung im Quartier der blau-grün-roten Infrastrukturen scheint unter den gegebenen Rahmenbedingungen für ausgewählte Medien effizient zu sein.

Quellen

- Hoyer, Jacqueline; Dickhaut, Wolfgang; Kronawitter, Lukas; Weber, Björn (2011): Water Sensitive Urban Design. Principles and Inspiration for Sustainable Stormwater Management in the City of the Future. Berlin: jovis Verlag GmbH; HafenCity Universität Hamburg
- Salvisberg, Emily (2019): The potential of local planning instruments to unlock blue-green solutions for decentralised stormwater management. Driving practice towards a Water Sensitive City. Masterarbeit. HafenCity Universität Hamburg, Hamburg. Online verfügbar unter <https://repos.hcu-hamburg.de/handle/hcu/199>, zuletzt geprüft am 11.10.2023

2 Entspricht dem GRI Disclosure 305-3 Standard

3 Entspricht dem GRI Disclosure 305-01 und 305-02 Standard

Resilienz im Quartier



CAE
Dr. Michaela Reim
michaela.reim@cae-zeroarbon.de

DLR
Dr. Michael Kröner
michael.kroener@dlr.de

Dr. Jan Zanger
jan.zanger@dlr.de

Fraunhofer IEE
Dr. Bernd Krautkremer
bernd.krautkremer@iee.fraunhofer.de

Michael Beil
michael.beil@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Dr. Matthias Kühnbach
matthias.kuehnbach@ise.fraunhofer.de

KIT
Marius Albiez
marius.albiez1@kit.edu
Johannes Galenzowski
johannes.galenzowski@kit.edu

Dr. Volker Stelzer
volker.stelzer@kit.edu

Helena Trenks
helena.trenks@kit.edu

Dr. Simon Waczowicz
simon.waczowicz@kit.edu

ZAE Bayern
Gloria Streib
gloria.streib@zae-bayern.de

Wuppertal Institut
Dr. Steven März
steven.maerz@wupperinst.org

Einleitung

Resilienz im Quartier bedeutet, dass das Quartier widerstandsfähig auf Krisen oder Katastrophen reagieren muss und gleichzeitig nachhaltig sein soll. Um dies zu gewährleisten, muss das Quartier sowohl robust als auch anpassungsfähig sein. Dafür braucht es gewisse Qualitäten wie Multifunktionalität, Agilität, Nähe, Öffentlichkeit und Redundanz sowie bestimmte Fähigkeiten wie Innovationsfähigkeit, Reaktionsfähigkeit, Umsetzungsfähigkeit und Erholungsfähigkeit.

Diese Qualitäten und Fähigkeiten resultieren in den verschiedensten Eigenschaften des Quartiers: nachhaltige Mobilität, funktionierender Katastrophenschutz, ausgebaute Digitalisierung, Retention (Zurückbehaltung) von Starkregen, Vermeidung von urbanen Hitzeinseln sowie Versorgungssicherheit hinsichtlich Energie, Ernährung und Gesundheit als auch Herstellung von innerstädtischer Biodiversität und innerstädtischem Artenschutz und für die soziale Resilienz sowohl Inklusion als auch Integration.

Wie Forschung konkret zur Erreichung dieser Eigenschaften eines Quartiers beitragen kann, soll anhand von vier Leitfragen im Folgenden dargestellt werden. Dabei werden aktuelle Forschungsvorhaben der FVEE-Institute im Einzelnen vorgestellt.

Wie wirkt sich die Klimaerwärmung auf das Leben im Quartier aus?

Das Leben in Innenstädten wird zusehends schwieriger durch Überhitzung der Innenstädte und Starkregenereignisse, die in der Stadt aufgefangen werden müssen (Schwammstadt). Urbanes Grün kann hier einen maßgeblichen Beitrag leisten. Um mehr Gebäudebegrünung in die Städte zu bringen, führt das CAE im BMWK-geförderten Forschungsvorhaben U-green (FKZ: 03EN1045A) die bauphysikalische Bewertung von Dach- und Fassadenbegrünungen durch.

Ziel des Projektes ist die thermische Charakterisierung von Begrünungssystemen, sowohl

hinsichtlich des winterlichen Wärmeschutzes als auch hinsichtlich des sommerlichen Überhitzungsschutzes. Es werden sowohl Labormessungen an Einzelkomponenten (Substraten, Pflanzen) und den verschiedenen Systemen als auch Freilandmessungen an Fassaden- und Dachbegrünungen (► Abbildung 1) durchgeführt.

In einem Gremium, dem unter anderem die Bayerische Architektenkammer, der BBSR, der BuGG, der Bund Deutscher Architektinnen und Architekten (BDA), die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben, das CAE, der FLL, die LWG, der Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN und die TU Berlin angehören, werden entsprechende Messgrößen zur Integration von Begrünungssystemen in Normen zur energetischen Gebäudebilanzierung erarbeitet. Ein frei zugänglicher Datenkatalog für Begrünungssysteme wird erstellt. Weiterhin erfolgt die Programmierung eines Berechnungstools zur energetischen Bewertung von Begrünungssystemen (<https://cae-zeroarbon.de/Projekte.html>).

rain2energy (CAE)

Im Rahmen des vom BMWK geförderten Verbundprojekts rain2energy (FKZ: 03EN3045A) wird am CAE Nachhaltigkeit, Ökologie und Innovation im städtischen Quartier umgesetzt. Es wird ein gemischtes Quartier betrachtet, in dem sich sowohl Wohn- als auch Bürogebäude und gewerbliche Flächen befinden. Durch die unterschiedliche Nutzung der Gebäude fallen zu unterschiedlichen Zeiten an unterschiedlichen Orten Wärme- oder Kältebedarfe an. Der Lösungsansatz ist ein Anergie-Ring. Anergie bezeichnet hier Energie, deren Temperatur zu gering ist, um damit direkt ein Haus zu heizen oder Warmwasser zu erzeugen, allerdings warm genug ist, um über eine Wärmepumpe nutzbare Heizwärme oder Warmwasser zu erzeugen. Ein Anergie-Netz ist also ein kaltes Wärmenetz, das mit tiefen Temperaturen betrieben wird.

Der Anergie-Ring des Projekts verbindet drei Energiezentralen miteinander. Über Wärmepumpen wird je nach Bedarf Wärme in den Anergie-Ring eingespeist oder entzogen. Weiterhin sind drei große Regenwasserzisternen mit neu entwickeltem Regenwassermanagement als thermische Speicher an den Anergie-Ring angekopfelt. Die thermische

Nutzung der drei Regenwasserzisternen wird intelligent gesteuert. Zusätzlich wird das Regenwasser vor Einleitung in die Zisternen aufbereitet. Teilbereiche der Dächer sind ein begrüntes Retentionsdach mit PV, um auch hier Regenwasser speichern zu können und durch die Temperaturabsenkung den Wirkungsgrad der PV zu erhöhen. Ziel des Regenwassermanagements ist, dass keinerlei Regenwasser in die Kanalisation eingeleitet werden muss.

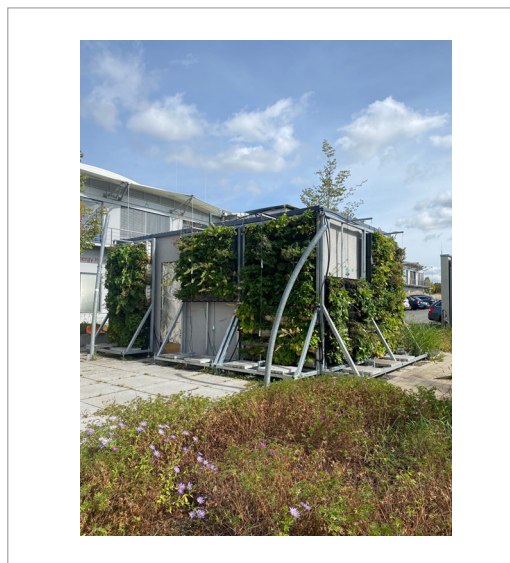
InEs (ZAE)

Einen anderen Ansatz, um die Energiebereitstellung im Quartier durch erneuerbare Energien sicher zu stellen, hat das ZAE Bayern im Rahmen des Projektes InEs (FKZ: 03EN3037A), Innovatives Energieversorgungssystem für ein gewerbliches Quartier im Wandel, erarbeitet. Hierzu hat es ein Energieversorgungssystem für ein sich in der Sanierung befindendes gewerbliches Quartier geplant.

Ziel des Projekts ist eine Energieversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien bei Strom und Wärme. Die ehemalige Porzellanfabrik Winterling soll dafür die Abwärme zweier BHKW und einer ORC-Anlage nutzen, die über Biogas einer nahegelegenen Hefefabrik betrieben werden. Die Abwärme dient der Gebäudebeheizung und der Prozesswärmeversorgung der Gewerbemieten. Weiterhin soll der Keller der ehemaligen Porzellanfabrik Winterling abgedichtet, gedämmt und mit 1.240 m³ Wasser geflutet werden. So kann der Raum als Wärmespeicher die Entkoppelung von Wärmezeugung und -verbrauch ermöglichen. Zusätzlich sollen Dächer mit PV ausgestattet werden und organische Photovoltaik als innovative Komponente für eine Fahrradgarage, Imbissüberdachung und Straßenlaternen installiert werden. Der Windstrom eines nahegelegenen Windparks soll über ein Power Purchase Agreement direkt im Quartier genutzt werden. Zusätzlich wird eine Kleinwindkraftanlage auf dem ehemaligen Schornstein der Fabrik errichtet. Abschließend ist auch ein Batteriespeicher für das Quartier geplant.

Smart East (KIT)

Eine bereits realisierte Quartiersentwicklung mit erneuerbaren Energien hat das KIT im Rahmen des Forschungsprojektes Smart East (<https://smart-east-ka.de>; FKZ L75 21113 und des Helmholtz-Programmes Energiesystemdesign (ESD)) in der Karlsruher Oststadt mit zahlreichen Partnern wie dem FZI Forschungszentrum Informatik, dem IT-Unternehmen SevenZone sowie den Stadtwerken Karlsruhe umgesetzt. Hier handelt es sich um ein Mischquartier mit räumlich und zeitlich heterogenen Lastkurven, da sich sowohl Einzelhäuser, ein Mehrgenerationenhaus mit KiTa, Bäckerei und



► Abbildung 1

Freilandmessungen an Fassadenbegrünungen:

Freilandversuchsstand (Klimahaus Süd) zur thermischen Charakterisierung von Fassadenbegrünungen unter realen Bedingungen am CAE in Würzburg.

(Quelle: CAE)

Seniorenwohnheim, als auch ein Existenzgründerzentrum mit einer Vielzahl an Start-ups in dem Quartier befinden.

Die Umsetzung der Smart East Projektziele erfolgte in vier entscheidenden Aktionsfelder: Klimaschutz, Geschäftsmodelle, Digitalisierung und Partizipation. In drei Jahren wurden im Smart East Quartier die Sektoren Strom, Wärme, Kälte und Verkehr digitalisiert und energetisch vernetzt. Die Sektorenkopplung ist, zusammen mit einem Ausbau von Photovoltaik, das Ziel des Aktionsfeldes Klimaschutz. Mit der Digitalisierung als zweitem Aktionsfeld wurden insbesondere intelligente Messsysteme in den Gebäuden installiert und deren Daten in einer Quartiersplattform zusammengeführt. Das dritte Aktionsfeld bezieht sich auf die Identifikation von Geschäftsmodellen und deren Bewertung. Das vierte Aktionsfeld ist die aktive Teilhabe aller wesentlichen Stakeholder, wie Eigentümer, Mieter, Vermieter, Anlagenbetreiber und Energieversorger.

Dein BalkonNetz (KIT)

Besonderen Fokus auf das Thema Partizipation von Menschen mit geringem Einkommen und von Frauen an der Energiewende hat das KIT, das ITAS – Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (Arbeitsgruppe KAT) mit dem Projekt „Dein BalkonNetz“ gelegt. Das ITAS ist u.a. der Frage nachgegangen: Wie können Menschen, die sich in der Regel seltener an der Energiewende beteiligen, wie z.B. Menschen mit geringem Einkommen, Mietende oder Frauen hierzu aktiviert werden? (Albiez et al 2022). Hierzu wurde 22 Haushalten eine Balkonsolaranlage kostenlos zur Verfügung gestellt. Es gab rund 100 Bewerbungen, darunter wurden bewusst auch Mietende, Menschen

mit geringem Einkommen und Frauen ausgewählt. Bereits beim Aufbau der Balkonkraftwerke kam es zu sehr positiven Effekten, Menschen, die sich vorher nicht kannten, haben sich gegenseitig Hilfe beim Aufbau der Anlagen angeboten, dies entsprach ganz dem Motto des Projektes „Energie schafft Gemeinschaft“. Im ersten Jahr wurden fast 4.000 kWh Strom erzeugt. 21 Haushalte sind kontinuierlich dabei geblieben, die meisten haben zusätzlich ihren Stromverbrauch gesenkt und es kam zu Verbreitungseffekten durch Nachahmung.

Im Rahmen des Realexperiments wurde in einem Mehrparteienhaus ein Modul installiert, 15 Monate später haben sich drei Nachbarn auch ein Balkonkraftwerk angeschafft obwohl nicht explizit für Balkonkraftwerke geworben wurde. Im sozialen Bereich sieht man hier positive Nachmacheffekte (Bögel et al 2023, Trenks et al.).

SInBa (Wuppertal)

Besonderen Fokus auf das Thema soziale Akzeptanz hat das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie mit dem Projekt SInBa – Soziale Innovationen im Bauen, Wohnen und der Stadtentwicklung gelegt. Technische Lösungen für die Energiewende im Bereich des Gebäudesektors sind seit Jahren bekannt und dennoch bleibt die Sanierungsrate konstant niedrig und der Gebäudesektor verfehlt seine Klimaschutzziele.

Hier setzt das Projekt an und will soziale Innovationen initiieren und begleiten, die die Verbreitung technischer Lösungen unterstützen oder andere soziale Praktiken erproben. Das Spektrum reicht hierbei z.B. von One-Stop-Shop-Ansatz, sozusagen eine Koordinierungsstelle, die alles regelt und übernimmt, wie beispielsweise Fördermittel beantragen, Bauunternehmen kontaktieren und koordinieren, Baugenehmigungen einholen bis hin zu Wohnungstauschbörsen. Aktuell befindet sich das Projekt noch in der Sondierungsphase für die Städte Mannheim und Wuppertal. Ziel ist es in den nächsten Jahren beispielhafte soziale Innovationen vor Ort zu initiieren, um den Weg hin zu einem klimaneutralen und klimagerechten Bauen und Wohnen zu befördern.

Energiegemeinschaft (Fraunhofer ISE)

Mit dem Voranbringen der Energiewende auf Quartiersebene hat sich das Fraunhofer ISE beschäftigt. Das ISE ist der Frage nachgegangen „Wie könnte eine Energiegemeinschaft nach österreichischem Vorbild in Deutschland aussehen? Um die Frage zu beantworten, hat das ISE für das Reallabor Pfaff auf dem ehemaligen Industriegelände der Firma Pfaff in Kaiserlautern einen energie-wirtschaftlichen Ansatz für die Umsetzung einer

Energiegemeinschaft erarbeitet. Die fehlende Umsetzung ist leider ein deutsches Problem, in Österreich ist Energy Sharing in Energiegemeinschaften durch reduzierte Netzentgelte und Umlagen finanziell attraktiv. Für das Reallabor Pfaff wurden daher drei unterschiedliche Szenarien durchgerechnet und miteinander verglichen: die Volleinspeisung, Eigenverbrauch und Energy Sharing.

Das Ergebnis zeigte, dass Energy Sharing die Bilanz aller Gebäude verbessert, die Eigenversorgung verschlechtert sich nicht und es entstehen zusätzliche Vermarktungsoptionen für Eigenversorger. Durch Energiegemeinschaften könnte der lokal genutzte PV-Strom um 10% gegenüber einer Beschränkung auf das Gebäude gesteigert werden.

Um dies in Deutschland endlich umsetzen zu können, müsste die Renewable Energy Directive (RED) endlich in nationale Gesetze implementiert werden, innerhalb der Energiegemeinschaft müsste ein reduziertes Netzentgelt möglich sein und der Handel für Kleinstmengen muss ermöglicht werden.

Wie sieht die urbane Mobilität im klimaneutralen Quartier der Zukunft aus?

LesSON (Wuppertal)

Das Wuppertal Institut trägt mit dem Projekt LesSON, Lebenswerte Straßen, Orte und Nachbarschaften (FKZ 17-08.02.01-09/22) zur Beantwortung dieser Frage bei. Die Transformationsherausforderung der innerstädtischen Mobilität liegt daran begründet, dass Straßen über Jahrzehnte ausschließlich als Verkehrswege betrachtet wurden und nicht als multifunktionale öffentliche Räume, die Platz für Interaktion, für kulturelle Ereignisse, Straßencafés, Bäume etc. bieten und dadurch die Gemeinschaft im Quartier fördern und gleichzeitig resilient gegen Klimaveränderungen sind. Das WI sieht Straßen als einen wichtigen Bestandteil für den Übergang von einer autogerechten Stadt hin zu einer zukunftsfähigen Stadt.

Straßen müssen hierfür drei wichtige Kernpunkte erfüllen: Straßen müssen auf die Klimaanpassung reagieren, in dem sie blau-grüne Infrastrukturen bieten. Weiterhin müssen Straßen die innerstädtische Aufenthaltsqualität verbessern und zu guter Letzt müssen Straßen die Verkehrswende fördern.

Das Projekt sieht drei Phasen vor: Zu Beginn steht die Bestands- und Bedarfsanalyse, in Phase zwei werden Zukunftsbilder entworfen und dann in der letzten Phase geht es ins Straßenexperiment. Durch die Phasen sollten ambitionierte, aber auch gesellschaftlich tragfähige Planungen entstehen. In

den Phasen wurde sowohl die Stadtverwaltung als auch die Kommunalpolitik und die Zivilgesellschaft eingebunden, um den notwendigen Paradigmenwechsel auf ein breites gesellschaftliches Fundament zu stellen.

Im Ergebnis wurden in den beiden Pilotstraßen in Dortmund und Gelsenkirchen (► Abbildung 2), jeweils rund 50-75% des ruhenden Verkehrs (geparkte, haltende und nicht fahrbereite Fahrzeuge) reduziert. Im Gegenzug entstanden breitere Gehwege, neue Baumstandorte, Beete sowie Aufenthaltsräume für verschiedene Bevölkerungsgruppen. Die Entwürfe wurden in zwischen politische beschlossen, sodass in einigen Jahren neue lebenswerte und resiliente Stadträume entstehen werden.

Welche Synergieeffekte können sich zwischen Resilienz und Energiebereitstellung ergeben?

Einsatz von EE bei Blackout (IEE)

Das IEE betrachtet die Möglichkeiten des Einsatzes von erneuerbare Energien, wenn es doch einmal zu einem langanhaltenden, flächendeckenden Stromausfall (Blackout) gekommen sein sollte, und entwickelt Lösungsansätze für den Schutz verschiedener kritischer Infrastrukturen und vulnerabler Gruppen sowie die Aufrechterhaltung der Handlungsfähigkeit der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben. Außerdem gilt es Kaskadeneffekte auf Wärme und Kraftstoffe zu dämpfen sowie Anlaufstellen für die Zivilbevölkerung zu schaffen. Beispielhaft zeigt das IEE Lösungen für den Landkreis Hersfeld-Rotenburg in Hessen durch Bildung lokaler und regionaler Versorgungsinseln auf Basis erneuerbarer Energien auf. Vorhandene erneuerbare Energien werden hierzu in die potenziellen Netzinseln mit eingebunden. Wie dies in der Umsetzung ganz konkret aussehen kann, zeigen zwei Beispiele. Das ist zum einen eine Verteilnetzinsel im Landwirtschaftszentrum Eichhof

in Bad Hersfeld. Hier stehen als erneuerbare Energien Biogas, Holzhackschnitzelheizung, Wärmenetz, PV und Batteriespeicher zur Verfügung. Die Lebensmittelversorgung ist durch den landwirtschaftlichen Betrieb sichergestellt, das Internatsgebäude bietet Aufnahmekapazität für vulnerable Gruppen, wie beispielsweise beatmungspflichtige Heimpflegepatienten. Zu guter Letzt stehen den Katastrophenschutz-Einheiten Kraftstoffe und Büros zur Verfügung.

Zum anderen zeigt das IEE das Potential eines Tanklagers auf. Hier lassen sich PV und Batteriespeicher ergänzen und eine Netzersatzanlage mit Flüssigkraftstoff betreiben, die durch die Einbindung von PV und Batteriespeicher deutlich kleiner und kostengünstiger wird. Damit wird der Kraftstoffumschlag für Schwerpunkttankstellen mit besonderer Bezugsberechtigung sowie die Versorgung von Netzersatzanlagen in Krankenhäusern sichergestellt. Im Normalbetrieb refinanzieren sich PV und Batteriespeicher weitestgehend durch die Eigenstromnutzung. Erneuerbare Energien machen Notversorgungs-lösungen kostengünstiger und flächendeckend verfügbar.

Energieversorgungsausfälle auf Quartiersebene (DLR)

Von einem vergleichbaren Szenario wie das IEE geht das DLR Institut für Verbrennungstechnik (DLR-VT) in Stuttgart aus. DLR-VT betrachtet hier Energieversorgungsausfälle auf Quartiersebene. Eine der Fragen lautet, welche Möglichkeit besteht, ein Wohnquartier im Winter mit Strom und Wärme zu versorgen, wenn ein mittelfristiger Ausfall des Stromnetzes und/oder eines H₂-Backbone-Netzes auftritt? Gibt es Synergien der Energiebereitstellung zu nahen Gewerbequartieren?

Der Ansatz des DLR-VTs ist ein entsprechend dimensioniertes Mikrogasturbinen-BHKW (FKZ: 03ET7094 (BMW)), welches im Normalbetrieb über einen zukünftigen H₂-Backbone betrieben wird. Dieses Mikrogasturbinen-BHKW versorgt das Wohnquartier zusätzlich zu Wärmepumpen,



► Abbildung 2

Transformation von Straßen zu resilienten Stadträumen

links: Darstellung des heutigen Zustands der Lothringer Straße

rechts: Planungen für den Straßenumbau)

(Quelle: Bildrechte MUST Städtebau GmbH)

Photovoltaikanlagen und dem Stromnetz mit Strom und Wärme. Der Vorteil bei diesem Ansatz ist, dass der Anlagenwirkungsgrad im kompletten Jahresgang sehr hoch ist, da auch im Sommer die Abwärme durch eine Anbindung an ein nahes Industriequartier genutzt werden kann. Das Mikrogasturbinen-BHKW kann sowohl über gasförmiges H₂ als auch über einen zusätzlichen Power-to-Liquid (PTL)-Tank, welches aus erneuerbaren Stromquellen erzeugt wurde, versorgt werden. Im Fall eines mittelfristigen Ausfalls des Stromnetzes (z.B. mehrere Tage/Wochen) können die Wärmepumpen nicht mehr aus dem Netz betrieben werden. In diesem Fall kann das Mikrogasturbinen-BHKW, bei entsprechender Dimensionierung, die komplette Wärme und den Strom für das Wohnquartier bereitstellen und somit diesen Ausfall kompensieren. Andererseits besteht auch die Möglichkeit, die Wärmepumpen durch die elektrische Energie aus dem BHKW zu betreiben und somit weiterlaufen zu lassen. Im Fall eines zusätzlichen mittelfristigen Ausfalls des H₂-Backbones wird das Mikrogasturbinen-BHKW auf den Power-to-Liquid-Backup-Brennstoff umgeschaltet und kann mit diesem klimaneutral betrieben werden. Diese hohe Brennstoffflexibilität bei gleichzeitig geringen Abgasemissionen ergibt sich durch die eingesetzte jet-stabilisierte Brennkammer in Kombination mit einer variablen Geometrie zur Anpassung der Luftaufteilung in der Brennkammer. Diese beiden Technologien sind bei DLR-VT in der Entwicklung und zum Teil bereits in der Felderprobung.

KI für resilientes Quartiersenergiemanagement (DLR)

Einen smarten und KI-basierten Ansatz für ein resilientes Quartiersenergiemanagement baut das DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme in Oldenburg auf mit Förderung vom BMWK. Hierzu werden rückspeisende batterieelektrische und Brennstoffzellen-Fahrzeuge als mobile Backup-Kraftwerke in die Betrachtung mit einbezogen. Der technische Nachweis zum Einsatz solcher mobilen Versorgungseinheiten für eine dynamische Stabilisierung des Netzes konnte gezeigt werden. Im Idealfall kann Abwärme der Fahrzeugsysteme zusätzlich durch Einspeisung in Niedertemperatur-Wasserspeicher für die Bereitstellung von Warmwasser und Raumwärme genutzt werden. Ein zukünftiges Quartier ausschließlich mit erneuerbaren Energien zu versorgen, führt auf Grund der sowohl im Tagesverlauf als auch saisonal fluktuierenden Erzeugung zu einem großen Bedarf an sowohl Energiespeichermöglichkeiten, als auch an Last-Flexibilitäten in allen Bereichen von Strom über Wärme bis hin zum Verkehr. Zusätzlich kommen neben der Resilienz auch noch ökonomische und

technische Betriebsaspekte hinzu, wofür es eine Vielzahl an Informationen von Gebäuden, Verkehr, Strom- und Wärmelastprofilen, Wetterprognosen bis hin zum einzelnen Nutzerverhalten benötigt und welche es zu optimieren gilt. Die Komplexität der Datenverarbeitung und Optimierung in Echtzeit stellt hier eine immense Herausforderung dar. Das DLR löst diese Problematik durch eine Verknüpfung von Quartiers-, Gebäude und Mobilitätssimulationen, Verbrauchsprognosen und energierelevanten Wettervorhersagen sowie der Verbindung mit rückspeisenden Fahrzeugen als mobile Backup-Kraftwerke. Parallel zur Modellierung werden Echtzeitdaten von Fahrzeugen und Gebäuden kombiniert um eine höhere Validität der Modelle zu erreichen. Fallen diese Echtzeitdaten aus, wird das zugrundeliegende Modell durch das KI-basierte Energiemanagement dennoch einen stabilen Betrieb gewährleisten und trägt damit zur Resilienz des Quartiers bei.

Quellen

- Albiez, M.; Stelzer, V.; Parodi, O.; Bögel, P. M.; Trenks, H. (2022) Energiewende nah an Mensch und Alltag, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, (6), 31 -33
- Bögel, M.P., Trenks, H., Upham, P., Sauter, H., Albiez, M., Stelzer, V., Laborgne, P. (2023): *Diversifying power in action: A socio-psychological approach to inclusive energy transition experiments*, *Energy Research & Social Science*, Volume 100
- Galenzowski, J., Waczowicz, S., Meisenbacher, S., Mikut, R., & Hagenmeyer, V. (2023) A real-world district community platform as a cyber-physical-social infrastructure systems in the energy domain. In *Proceedings of the 10th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation* (pp. 434-441).
- Trenks, H., Bögel, P.M. Empowering citizens for the energy transition: facilitating role change through real-world experiments. *Sustain Sci* (2024). <https://doi.org/10.1007/s11625-023-01453-7>

Shorten up!

Mit regionalen Kreisläufen zum resilienten Wirtschaftssystem

1. Einleitung

Die Wirtschaftssysteme der modernen Welt basieren auf dem globalen Handel, getrieben von der Nachfrage nach Rohstoffen, Lebensmitteln und Konsumgütern. Hieraus resultiert eine globale Verlagerung von Rohstoffen und Gütern aus dem produzierenden Gewerbe in erheblichen Mengen.

Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass es sich, im Gegensatz zur Kreislaufwirtschaft, um lineare Wirtschaftssysteme handelt, die zu einem Ungleichgewicht durch Abreicherung und Anreicherung führen. So führt der Export von Agrargütern zur Verlagerung von Nährstoffen, die nicht rückgeführt, sondern durch Dünger aus fossilen Quellen ausgeglichen werden.

Konsumgüter werden am Ende ihres Lebenszyklus oft nicht in einen Kreislauf rückgeführt. Und somit werden die Rohstoffe oft nicht aus diesen Gütern recycelt.

Dieser Mechanismus ist vor allem durch Gewinnungskosten von Rohstoffen und Transportkosten getrieben, die sich in der Regel günstiger darstellen als die Etablierung einer tatsächlichen zirkulären Wirtschaftsform. Grundsätzlich können hierzu folgende Thesen formuliert werden:

- Die globalisierte Welt führt zu einem Ungleichgewicht der globalen Stoffhaushalte mit Folgen für Natur, Umwelt, den menschlichen Lebensraum und das soziale Gefüge des menschlichen Zusammenlebens.
- Die globalisierte Welt ist abhängig von globalen Stofftransporten und somit krisenanfällig. Rohstoffe sind oft nicht im eigenen Land vorhanden oder können nicht ökonomisch tragfähig erschlossen werden.
- Kurze, regional gestaltete Stoffkreisläufe können diesem Ungleichgewicht entgegenwirken, den menschlichen Lebensraum schützen, und zu mehr sozialer Gerechtigkeit führen.
- Kurze, regionale Stoffkreisläufe stärken die Resilienz durch Verminderung globaler Abhängigkeit.

Im Folgenden soll exemplarisch gezeigt werden, wie das aktuelle globale Wirtschaftssystem aufgebaut ist und welche Ansätze auf regionaler Ebene zu einer echten Kreislaufwirtschaft führen können.

2. Das aktuelle globale Wirtschaftssystem aus Sicht der Kreislaufwirtschaft und der Resilienz

Im Folgenden wird an zwei Beispielen die Situation im globalen Welthandel dargelegt, wobei der Schwerpunkt auf die Allokation von pflanzenbaulich bedeutsamen Nährstoffen gelegt wird. Hierdurch werden die Aspekte der globalen Stoffverlagerung deutlich. Diese Aspekte sind natürlich produktspezifisch und können nicht grundsätzlich verallgemeinert werden, jedoch zeigen sich die grundsätzlichen Mechanismen.

2.1 Globaler Handel von Mineraldünger

Mineraldünger stellt für die Landwirtschaft einen wichtigen Produktionsfaktor dar. Mineraldünger stammen dabei aus vorwiegend fossilen Quellen. Phosphor und Kalidünger werden direkt aus Lagerstätten gewonnen, während Stickstoffdünger in heutiger Zeit mittels Haber-Boschverfahren unter Einsatz von Erdgas erzeugt werden, wurden sie bis Anfang des 20. Jahrhunderts ebenfalls in großem Maßstab aus Lagerstätten (Guano) gewonnen.

► Abbildung 1 zeigt die Herkünfte und Mengen des globalen Mineraldüngerhandels. Kalidünger stammen dabei vorwiegend aus Kanada und Osteuropa, während Phosphatdünger vorwiegend aus Lagerstätte in Afrika stammen (größtenteils aus Marokko mit 75% der globalen Phosphatreserven). Hauptimporteure sind vor allem Asien, Amerika und Europa, wobei Stickstoffdünger mengenmäßig überwiegen.

Es wird deutlich, dass die global verlagerten Nährstoffmengen einen erheblichen Umfang aufweisen. Da es sich besonders bei Phosphat um einen kritischen nicht substituierbaren Rohstoff handelt, sind die importierenden Länder vom Weltmarkt abhängig.



DBFZ

Dr. Peter Kornatz
peter.kornatz@dbfz.de

Karin Naumann
karin.Naumann@dbfz.de

Dr. Walter Stinner
walter.stinner@dbfz.de

FZ Jülich

Dr. Sascha Stark
sa.stark@fz-juelich.de

IZES

Dr. Joachim Pertagnol
pertagnol@izes.de

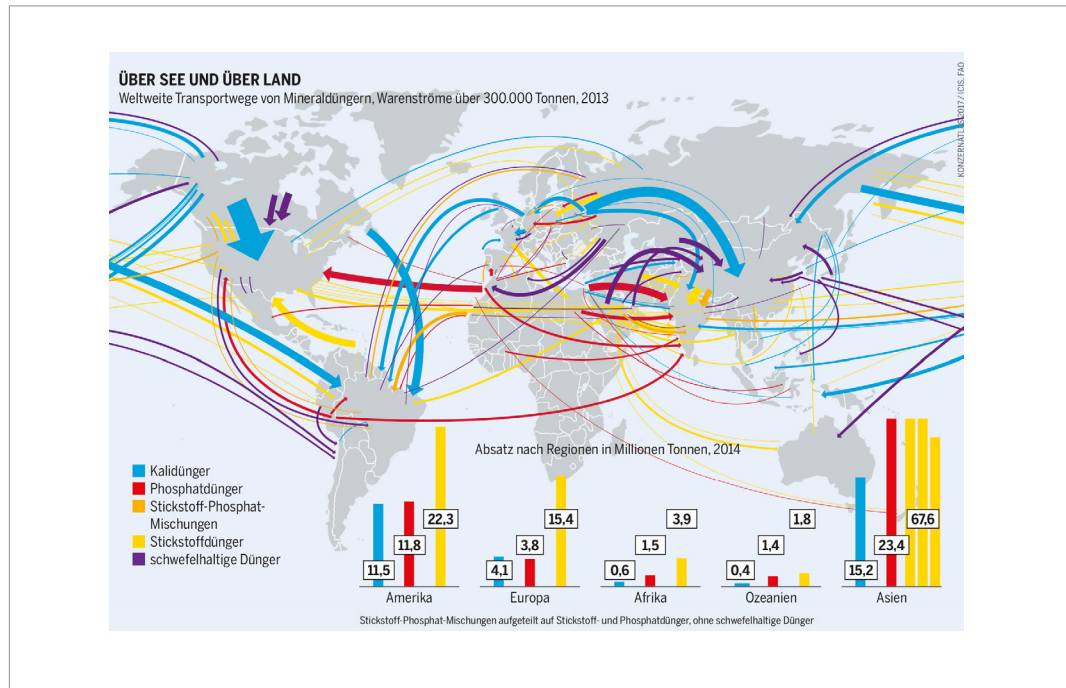
KIT

Prof. Dr. Dieter Stapf
dieter.stapf@kit.edu

► Abbildung 1

Mineraldüngerhandel 2013 (Warenströme über 300.000 Tonnen)

(Quelle: Konzernatlas, Daten und Fakten über Agrar- und Lebensmittelindustrie 2017, 3. Auflage 2017, Seite 19, Bartz/Stockmar (https://www.boell.de/sites/default/files/konzernatlas2017_iii_web.pdf))



2.2 Globaler Handel von Soja

► Abbildung 2 zeigt den globalen Nettoim- und -export von Soja. Soja stellt ein wichtiges Nahrungs- und Futtermittel für die weltweite Agrarproduktion dar. Vor allem Brasilien, Argentinien, USA und Indien sind wichtige Nettoexporteure, während Europa, Asien und Afrika hauptsächlich importieren. Aufgrund der Soja-Mengen kommt es hier zu einer massiven Verlagerung von Nährstoffen.

Hinweise auf den Abfluss und Zufluss von Nährstoffen, gleichwohl sie ihn nicht in Gänze abbilden.

3. Möglichkeiten zur Regionalisierung von Wirtschaftssystemen

Das globalisierte Wirtschaftssystem mit seinen vielfältigen Handelsströmen mit hohen Massenbewegungen führt in seiner zumeist linearen Struktur zu einem Ungleichgewicht des globalen Stoffhaushalts. Grundsätzlich müssen hierfür globale Ansätze gefunden werden, die jedoch eine

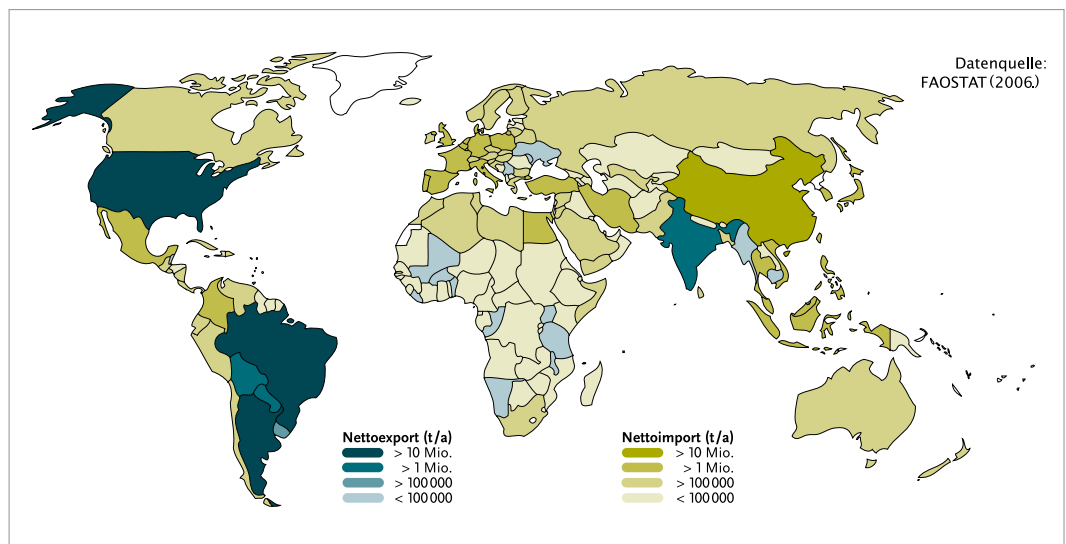
► Abbildung 3 zeigt die Nährstoffbilanzen des Sojaanbaus an den Beispielen Brasilien und Argentinien. Die Nährstoffbilanzen geben deutliche

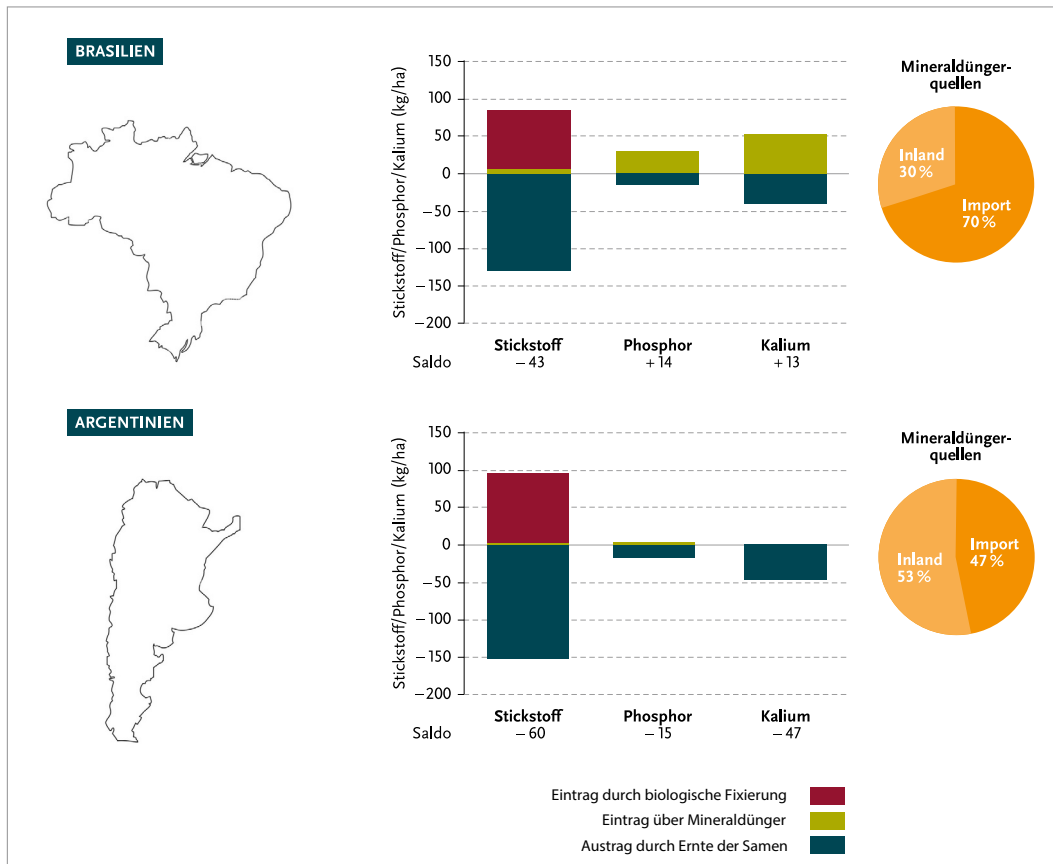
► Abbildung 2

Verlagerung von Nährstoffen:

Nettoexporteure und -importeure von Sojabohnen, -mehl und -öl im Jahr 2005.

(Quelle: Grenz et al. 2007, GAIA 16/3 (2007): 208–214)





► Abbildung 3

Nährstoffbilanzen:
 Nährstoffeinträge und -austräge sowie Quellen der Mineraldüngerversorgung im Sojaanbau Brasiliens und Argentiniens.

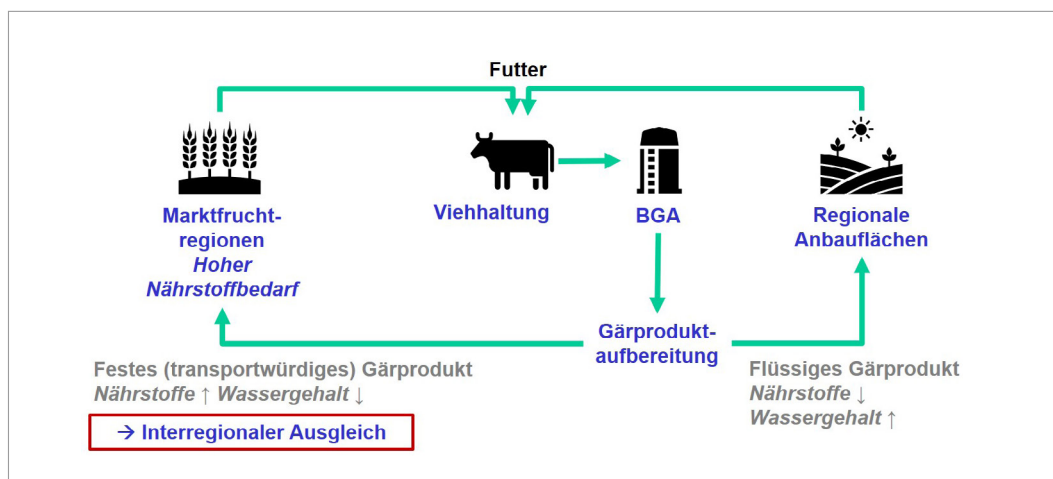
(Quelle: Grenz et al. 2007, GAIA 16/3 (2007): 208–214)

konsistente Interaktion aller Wirtschaftspartner unter fairen Bedingungen erfordert.

Regionale Ansätze innerhalb eines definierten Wirtschaftsraums zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft sind im ersten Ansatz einfacher zu realisieren und erfolgversprechend. Im Folgenden wird eine Auswahl an Ansätzen aufgezeigt, die sich vor allem mit landwirtschaftlichen Kreisläufen, aber auch mit neuen Materialien beschäftigen.

3.1 Nährstoffmanagement in Land und Abfallwirtschaft zur Etablierung geschlossener Kreisläufe

Vor allem die Produktströme in der Landwirtschaft können zu einem Ungleichgewicht in den Nährstoffbilanzen führen. Ein Beispiel hierfür ist der deutliche Unterschied zwischen Veredlungs- und Ackerbauregionen. Hierfür entwickelt das Projekt „Nährwert“¹ Lösungen zur umweltgerechten und kostengünstigen Verbesserung des Gärprodukt-

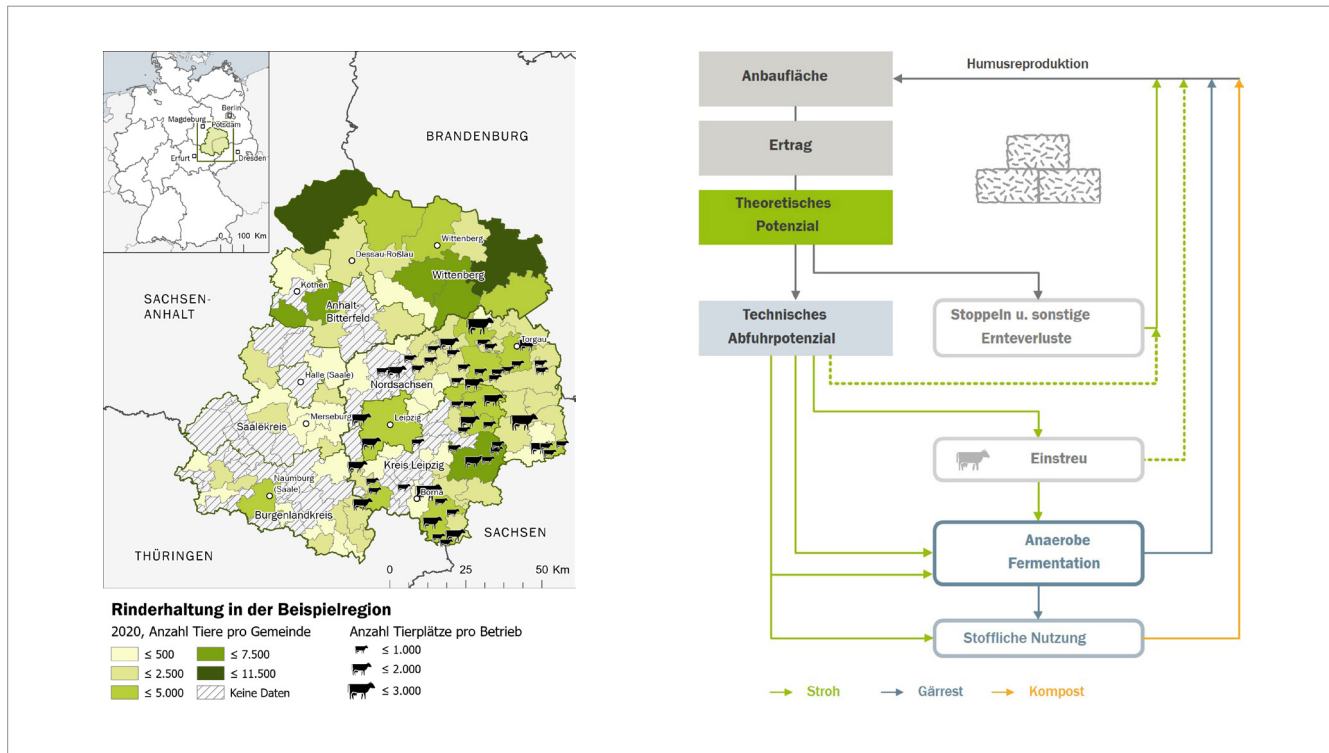


► Abbildung 4

Technisch unterstütztes Nährstoffmanagement im Verbund mit Biogasanlagen und Anbauregion durch interregionalen Austausch.

(Quelle: DBFZ 2023, Walter Stinner)

¹ <https://naehrwert.org/ueber-das-projekt/> (Beitrag von W. Stinner)



► Abbildung 5

Beispielhafte Darstellungen zur Analyse der Beispielregion und einem potenziellen Strohkreislauf.

(Quelle: Naumann, K.; Naegeli de Torres, F. (2024): Standortanalyse und Ressourcenverteilung für erneuerbares LNG im Verkehr. Fokusheft im Projekt Pilot-SBG. Leipzig: DBFZ. (in Vorbereitung))

managements als gesamtheitlichen Ansatz über managementseitige und technische Optionen. Hierbei werden vor allem die regionalen Nährstoffüberschüsse durch Biogasanlagen (BGA) kanalisiert, im Wert durch Aufbereitung gesteigert und interregional ausgeglichen (► Abbildung 4).

Gleichzeitig ist es von Bedeutung die Nutzung von recyceltem Dünger (RDF) zu forcieren um Nährstoffkreisläufe regional zu schließen. Hierfür müssen RDF besser an die landwirtschaftliche Praxis angepasst werden, damit Mineraldünger substituiert werden kann.

Im Projekt ReNu2Farm² wurde festgestellt, dass RDF keine negativen Auswirkungen haben und bei den Landwirten eine hohe Akzeptanz finden. Im Folgeprojekt ReNu2Cycle³ ist es Ziel, die Nachhaltigkeitsbewertung durchzuführen und den rechtlichen Rahmen zu evaluieren. Grundsätzlich wurden politische Regelungen zu RDF schon angepasst, jedoch muss ein verlässlicher Rahmen für ihren Einsatz gefunden werden. Hierzu sind auch Demonstrationsflächen als Vorzeigebjekte zur Schaffung von gesellschaftlicher und politischer Akzeptanz mit Dialogforen geplant.

Ein weiterer Ansatz zur ganzheitlichen Betrachtung der Nutzung von Bio-Ressourcen und grünem

Wasserstoff zur Bereitstellung von Methan als Kraftstoff und die stoffliche Verwertung von Gärresten, ist das Pilot-SBG⁴ Vorhaben (► Abbildung 5). Zentraler Bestandteil des Forschungs- und Demonstrationsvorhabens sind die Planung und Errichtung sowie der erfolgreiche Versuchsbetrieb einer Pilotanlage im Technikumsmaßstab. Das Konzept verbindet sowohl etablierte als auch innovative Technologien und verarbeitet biogene Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle sowie grünen Wasserstoff für die Bereitstellung von erneuerbarem Methan als Hauptprodukt und wertigen Nebenprodukten wie Gärresten und chemischen Grundstoffen. Die begleitende Machbarkeits- und Standortanalyse für die Kommerzialisierung beinhaltet u.a. die Quantifizierung und Lokalisierung der Ressourcen, resultierender Methanpotenziale, vorhandener Infrastruktur sowie bestehender Marktmechanismen für die beispielhafte Betrachtungsebene Mitteldeutschland.

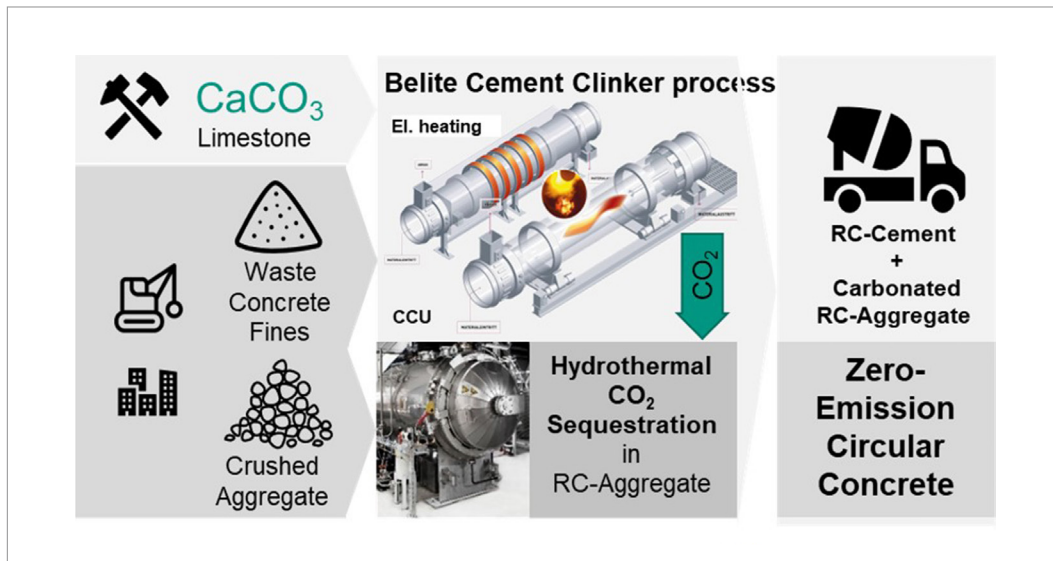
3.2 Regionale Bioökonomie als strategisches Ziel

Konkrete Umsetzungsmaßnahmen müssen in eine übergeordnete Strategie eingebettet werden, um die bestmögliche Lösung, bei limitierten Ressourcen und für eine höchstmögliche gesellschaftliche Akzeptanz, zu finden. Hierfür hat das Land Nordrhein-Westfalen

² <https://www.renu2farm.eu/de/home/> (Beitrag von J. Pertagnol)

³ <https://renu2cycle.nweurope.eu/> (Beitrag von J. Pertagnol)

⁴ <https://www.dbfz.de/projektseiten/pilot-sbg/start>



► Abbildung 6

Klimaneutraler Recycling-Zement (RC) durch neues Belit-Zementklinkerverfahren

(Quelle: KIT)

eine Neuausrichtung seiner Bioökonomiestrategie auf den Weg gebracht. Ziel ist es vor allem, regionale bioökonomische Potenziale darzustellen sowie Visionen, Projekte und Cluster zu identifizieren. Dabei sind die regionalen, strukturellen und wirtschaftlichen Gegebenheiten in besonderem Fokus, um gezielt Bioökonomiecluster zu etablieren. Hierfür ist ein ausgeprägtes Netzwerk über die Kreis- und Landesgrenzen hinaus unabdingbar. Perspektivisch soll sich Nordrhein-Westfalen als Vorreiter für einen global nachhaltigen Konsum etablieren. Hierfür ist eine Bioökonomie-Taskforce empfehlenswert um alle Akteure einzubinden.

3.3 Ansätze zur Kreislaufwirtschaft in der Industrie

Sieben Prozent der globalen CO_2 -Emissionen stammen aus der Zementindustrie. Die Emissionen sind dabei überwiegend durch die Entsäuerung des Primärrohstoffs Kalkstein bedingt und nur zu geringerem Anteil auf die Verwendung fossiler Brennstoffe zurückzuführen. Hierdurch ist es unabdingbar, neue Verfahren zur Erzeugung von Zement zu entwickeln, die den Einsatz von Primärressourcen vermeiden.

Das Projekt Zero-Emission Circular Concrete⁵ hat hierfür einen Recycling-Zement durch ein neues Belit-Zementklinkerverfahren entwickelt (► Abbildung 6).

Durch den Einsatz regionaler Betonabfälle können die Prozessemissionen um 55 % reduziert werden. Gleichzeitig wird Kohlenstoff in den rezyklierten Zuschlagsstoffen festgelegt. Mit dem Verfahren werden Primärrohstoffe geschont und gleichzeitig klimawirksamer Kohlenstoff aus dem Kreislauf entzogen.

4. Fazit und Ausblick

Globale Lösungen sind das Langzeitziel, um die Problematik der globalen Stoffströme zu lösen. Regionale Konzepte stellen hierfür einen wichtigen Baustein dar. Grundsätzlich ist eine Umstellung der Wirtschaftssysteme auf kurze geschlossene Kreisläufe möglich. Die Umstellung auf regionale Kreisläufe wird in Zukunft die Resilienz stärken, da globale Kreisläufe wesentlich abhängiger von globalen Handelsrouten und Transportwegen sind, die leicht gestört werden können, sei es durch Naturereignisse, technische Zwischenfälle oder politisch getriebene Konflikte.

Für die Zukunft ist es unabdingbar, ein System des nachhaltigen Konsums und der Produktion zu etablieren. Dabei müssen sich Konsum und das menschliche Handeln generell an den Grenzen der natürlichen Ressourcen und nachhaltigen Kreisläufen orientieren. Technologien können dabei nicht die alleinige Lösung sein, doch in Verbindung mit der Änderung des menschlichen Handelns können sie einen wichtigen Beitrag leisten.

⁵ Stemmermann et al. 2023, V International Conference Progress of Recycling in the Built Environment, e-ISBN: 978-2-35158-238-1 <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000165533>

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien Standorte der FVEE-Mitgliedseinrichtungen



FVEE-Geschäftsstelle

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE) • Renewable Energy Research Association

Büro Berlin-Mitte: Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 • 10178 Berlin • Tel.: 030 288-7565-71

Büro Berlin-Adlershof: Kekuléstr. 7 • 12489 Berlin

E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de

Mitgliedseinrichtungen und Ansprechpartner



CAE Center for Applied Energy Research e.V.
www.cae-zero-carbon.de
Magdalene-Schoch-Straße 3 • 97074 Würzburg
Martina Vornberger • 0931 70564-444
martina.vornberger@cae-zero-carbon.de



DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
www.dbfz.de
Torgauer Str. 116 • 04347 Leipzig
Paul Trainer: Tel. 0341/2434-437
paul.trainer@dbfz.de



DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
www.dlr.de
Linder Höhe • 51170 Köln
Denise Nüssle: Tel. 0711/6862-8086
denise.nuessle@dlr.de



Forschungszentrum Jülich
www.fz-juelich.de
52425 Jülich
Dr. Michael Czyperk: Tel. 02461/61-5450
info@fz-juelich.de



Fraunhofer IEE
Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik
www.iee.fraunhofer.de
Joseph-Beuys-Straße 8 • 34117 Kassel
Uwe Krengel: Tel. 0561/7294-319
uwe.krengel@iee.fraunhofer.de



Fraunhofer IEG
Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG
www.ieg.fraunhofer.de
Gulbener Straße 23 • 03046 Cottbus
Am Hochschulcampus 1 • 44801 Bochum
Kosta Schinarakis: Tel. 0170/8878886
konstantinos.schinarakis@ieg.fraunhofer.de



Fraunhofer ISE
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
www.ise.fraunhofer.de
Heidenhofstraße 2 • 79110 Freiburg
Christina Lotz: Tel. 0761/4588-5820
christina.lotz@ise.fraunhofer.de



Fraunhofer IWES
Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES
www.iwes.fraunhofer.de
Am Seedeich 45 • 27572 Bremerhaven
Inna Eck: Tel. 0471/14290-100
info@iwes.fraunhofer.de



GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungszentrum
www.gfz-potsdam.de
Telegrafenberg • 14473 Potsdam
Josef Zens: Tel. 0331/2880-1049
josef.zens@gfz-potsdam.de



HZB Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
www.helmholtz-berlin.de
Dr. Ina Helms: Tel. 030/8062-42034
info@helmholtz-berlin.de

Lise-Meitner-Campus
Hahn-Meitner-Platz 1 • 14109 Berlin-Wannsee

HySPRINT Photovoltaics Lab
Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin-Adlershof

PVcomB (PV-Kompetenzzentrum Berlin)
Schwarzschildstraße 3 • 12489 Berlin-Adlershof

HIPOLE Jena
Lessingstrasse 12-14 • 07743 Jena

ISFH Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal
www.isfh.de
Am Ohrberg 1 • 31860 Emmerthal
Dr. Stefan Bordihn / Dr. Bianca Lim:
Tel. 05151/999-403
info@isfh.de



IZES gGmbH
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme
www.izes.de/
Altenkesseler Straße 17 • 66115 Saarbrücken
Michaela Schlichter: Tel. 0681/844 972-73
schlichter@izes.de



KIT.Karlsruher Institut für Technologie
www.kit.edu
Kaiserstraße 12 • 76131 Karlsruhe
Martin Heidelberger: Tel. 0721/608-41169
martin.heidelberger@kit.edu



UFZ – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
www.ufz.de
Permoserstraße 15 • 04318 Leipzig
Doris Wolst: Tel. 0341/6025-1269
info@ufz.de



Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
www.wupperinst.org
Döppersberg 19 • 42103 Wuppertal
Christin Hasken: Tel. 0202/2492-187
info@wupperinst.org



ZAE Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.
www.zae-bayern.de
Walther-Meißner-Straße 6 • 85748 Garching
Jan Kunkel Tel. 089/329442-87
jan.kunkel@zae-bayern.de



ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg
Gemeinnützige Stiftung
www.zsw-bw.de
Meitnerstraße 1 • 70563 Stuttgart
Julia Fromm: Tel. 0711/7870-278
info@zsw-bw.de

Standort Ulm
Helmholtzstraße 8 • 89081 Ulm

Impressum

Themen 2023 Forschung für ein resilientes Energiesystem in Zeiten globaler Krisen

Herausgeber

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE)

Renewable Energy Research Association

Büro Berlin-Mitte: Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 • 10178 Berlin • Tel.: 030 288-7565-71

Büro Berlin-Adlershof: Kekuléstr. 7 • 12489 Berlin

E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de

Redaktion

Petra Szczepanski

Franziska Wunschick

Förderung

Die vorliegende Publikation wurde durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) gefördert (FKZ 2220NR312X).

Die Mitgliedseinrichtungen des ForschungsVerbunds Erneuerbare Energien werden durch diese Ministerien gefördert:

- BMWK
- BMBF
- BMUV
- BMEL
- BMVI

Layout, Grafik

Artkolchose GmbH

www.artkolchose.de

Druck

Druckerei Flock, Köln

Berlin, Mai 2024

ISSN • 0939-7582