

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,

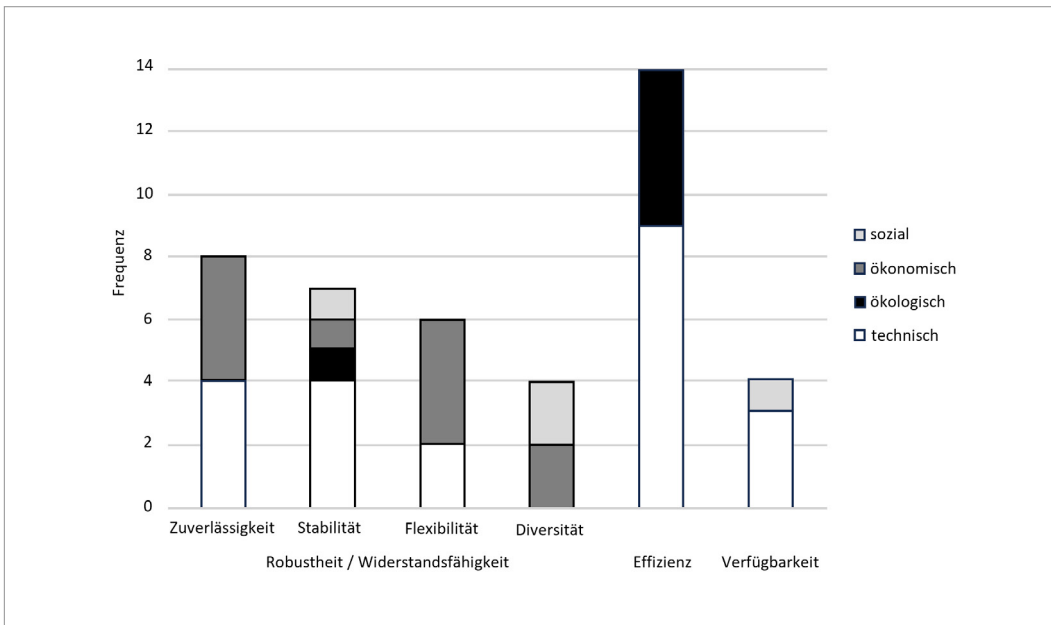
insbesondere dem Effizienzparadigma (Chaigneau et al. 2022).

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
- Umannakwe, 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.