

# 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

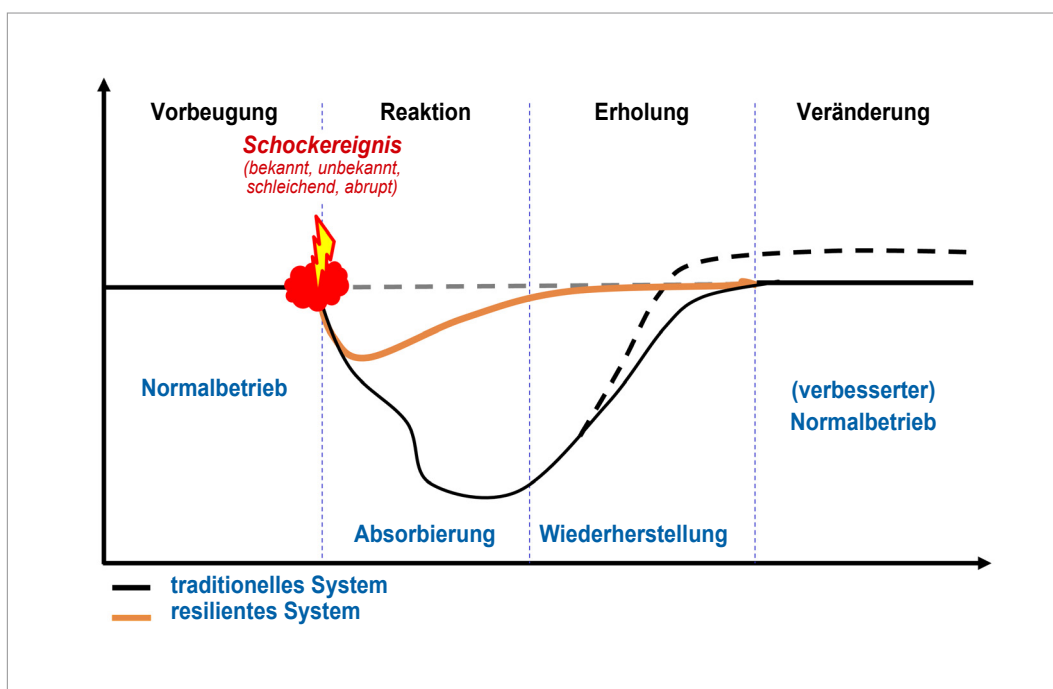
die Definition von resilienten Energiesystemen in einem breiten Kontext. Alle Strategien und Technologien, die zur Stärkung der Resilienz erneuerbarer Energiesysteme beitragen – und dies nicht nur in Zeiten von Schockereignissen – stehen im Fokus der nachfolgenden Betrachtungen.

## 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

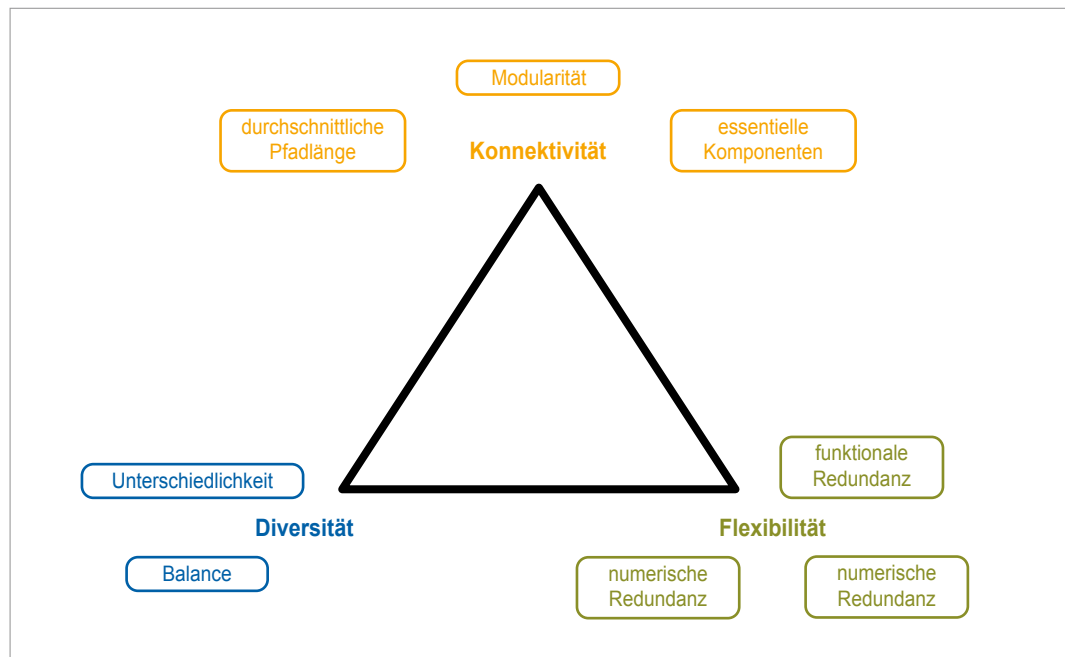
### Illustrative Darstellung von resilienten Energiesystemen

(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)

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

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.