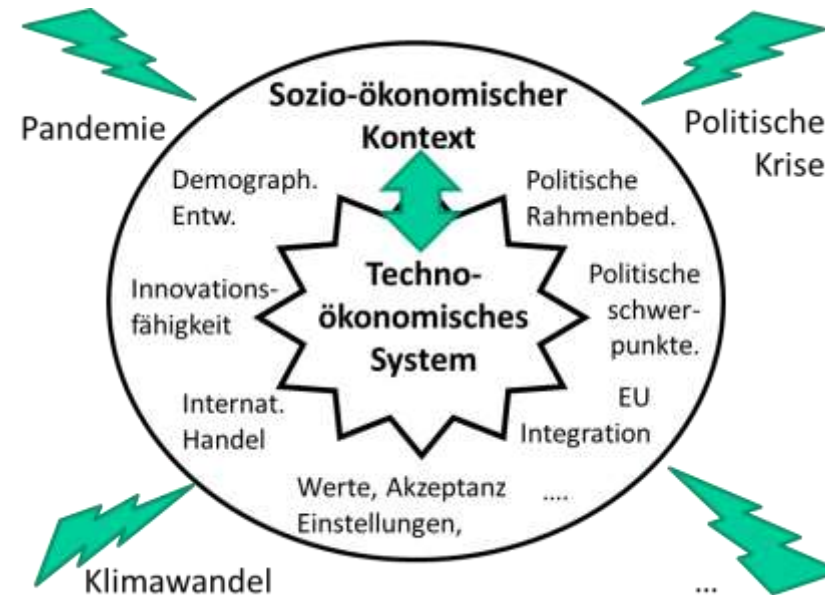


Energiesystem-Resilienz in Szenarien und Transformationspfaden

Dr. Hans Christian Gils • DLR | Dr. Henning Wigger • DLR | Dr. Philipp Härtel • Fraunhofer IEE | Dr. Stefan Vögele • FZ Jülich | Dr. Raphael Niepelt • ISFH | Dr. Sadeeb S. Ottenburger • KIT | Dr. Reinhold Lehneis, David Manske • UFZ | Dr. Larissa Doré, Frank Merten • Wuppertal Institut | Andreas Püttner • ZSW



Resilienz wird in Klimaschutzszenarien bisher unzureichend adressiert

**Versorgungssicherheit
≠
Resilienz**

Szenarien	Strom	Wasserstoff	Power-to-Liquids
BDI Zielpfad	H ₂ -ready Gaskraftwerke Batteriespeicher	H ₂ -Importe und Netzaufbau	Keine konkreten Angaben
Dena Leit*	Kapazitäts-/Netzreserve Speicher, Importe	H ₂ -Importe und Netzaufbau	
ISE Wege KND	Regelbare Erzeuger Batteriespeicher	Keine konkreten Angaben	
ISI Langfrist	Backup via Wasserstoff; in geringen Umfang Speicher und Wasserkraft	H ₂ -Speicherbedarf	

- Versorgungssicherheit in Klimaschutzszenarien bzgl. Leistungsvorhaltung im Stromsystem betrachtet
- Gewährleistet v.a. durch Gaskraftwerke, ergänzt durch Stromspeicher, Importe, Lastflexibilität
- Weniger Analysen zu sicherer H₂-Versorgung, keine konkreten Angaben zu Power-to-Liquid

Mertens, F., Doré, L., Pastowski, A., [Grüner Wasserstoff und Wasserstoffderivate – Kernelemente einer nachhaltigen und sicheren Energieversorgung Deutschlands](#), Forschungsbericht, 2023

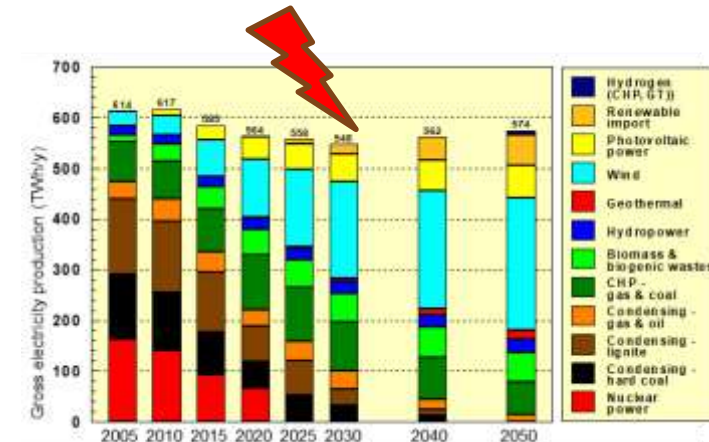
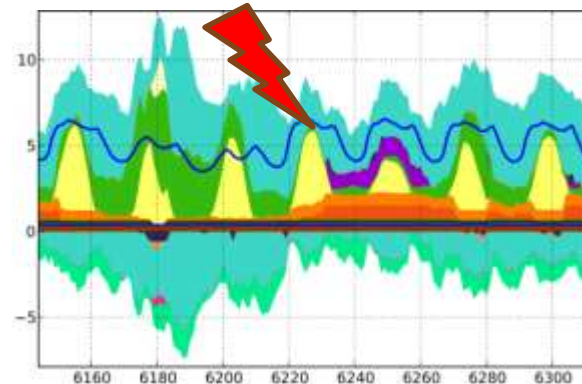
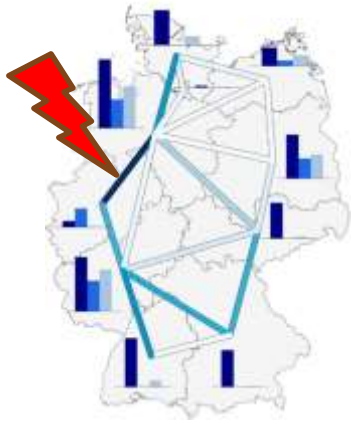
Einflussfaktoren auf die Resilienz von Zielsystemen und Transformationspfaden

Nachhaltige Zukunftssysteme

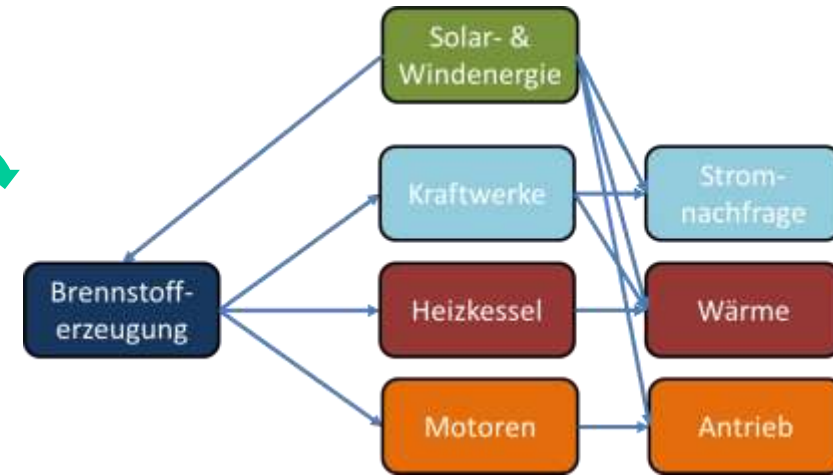
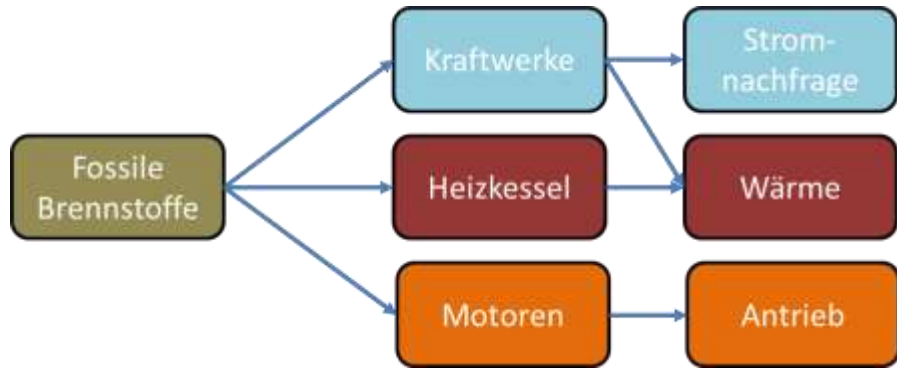
- Volatilität erneuerbarer Energiequellen
- Dezentralisierung
- Digitalisierung
- Sektorenkopplung
- Klimawandel
- ...

Transformationspfade

- Politische Entwicklungen
- Gesellschaftliche Entwicklungen
- Energietechnologieentwicklung
- Disruptive Ereignisse
- ...



Wirkung von Dezentralisierung und Sektorenkopplung auf die Resilienz



- + Erhöhte Redundanz durch mehrere Umwandlungstechnologien
- + Dezentralisierung kann Risiko räumlicher Ausbreitung mindern

- Höhere Abhängigkeit von der Strominfrastruktur (Erzeugung, Netz)
- Potenzielle Ausbreitung von Störungen auf Wärme-/Verkehrssektor

Bei der Bewertung der Wirkung von Sektorenkopplung und Dezentralisierung auf die Resilienz sind die Interessen der Akteure zu beachten.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

ReMoDigital
FKZ: 03E11020B

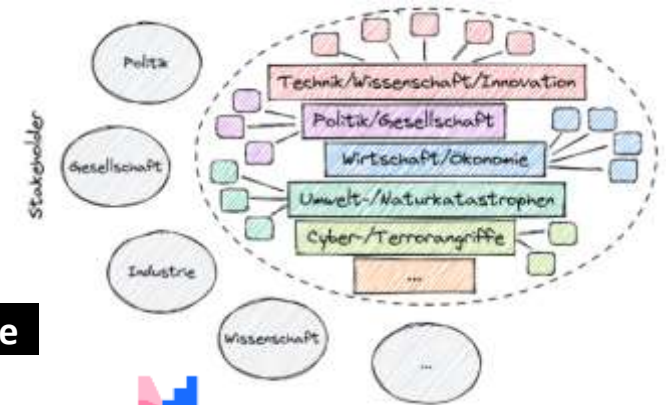
Systematische Betrachtung von Stressfällen und disruptiven Ereignissen

Welche Beeinträchtigung des Systems ergibt sich?

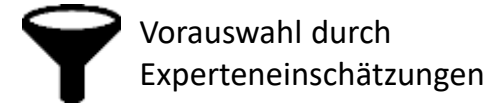
Welche Disruptionen sind besonders relevant?

- **Wo und wann tritt der Stressfall auf?**
- **Welche Wirkungen auf das Energiesystem gibt es?**
- **Wie lange dauert diese Wirkung an?**
- **Gibt es eine Ausbreitung durch das System?**

Identifizierung und Strukturierung mit vielfältigen Stakeholdern



>170 disruptive Ereignisse



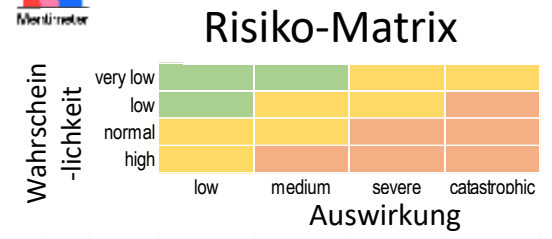
12 disruptive Ereignisse



2 detaillierte Szenarien

Szenarien-Auswahl zur Voranalyse im Gesamtprojekt

Beschreibung priorisierter Szenarien



Ziel: Quantifizierung von Parametern für modellgestützte Analysen

Untersuchung der Systemverletzlichkeit gegenüber Stressfällen

Inzidenzbasierte Verletzlichkeitsanalyse

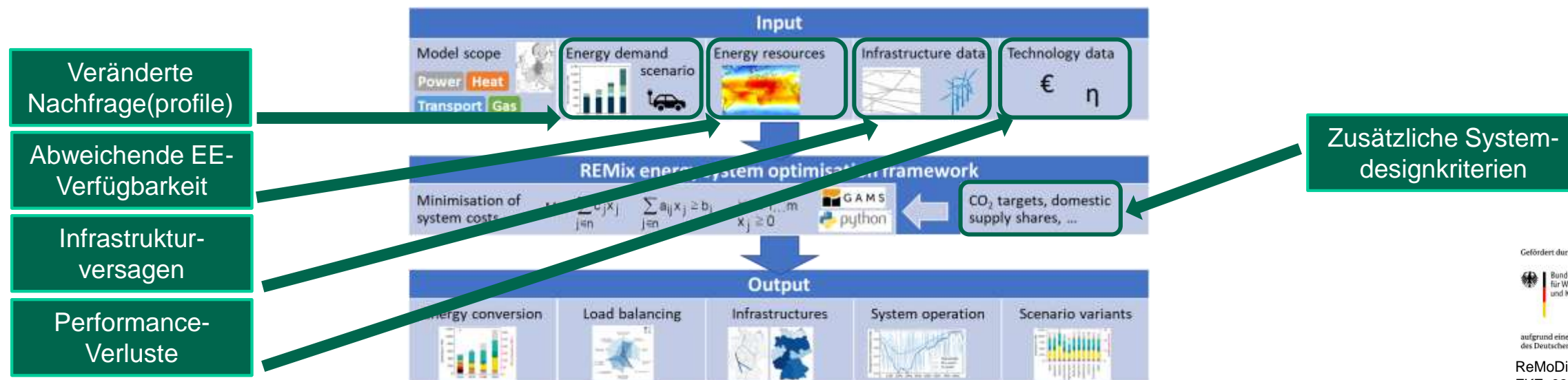
Modellierung von Stressfällen, z.B.:

- Extreme Kälte und Sturm
- Extreme Hitze und Überflutung
- Hackerangriff
- Physische Angriffe

Strukturelle (Inzidenz-unabhängige) Verletzlichkeit

Analyse von Systemcharakteristika

- Identifizierung möglicher Schwachstellen
- Resilienzsteigerung z.B. durch Diversifizierung
- Inselnetzfähigkeit
- Netz- und Speicherkapazität



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

ReMoDigital
FKZ: 03E11020B

Neue Ansätze zur Resilienzanalyse mit Energiesystemmodellen erforderlich

Bisherige Ansätze

Deterministische Optimierung



+

Sensitivitätsanalysen

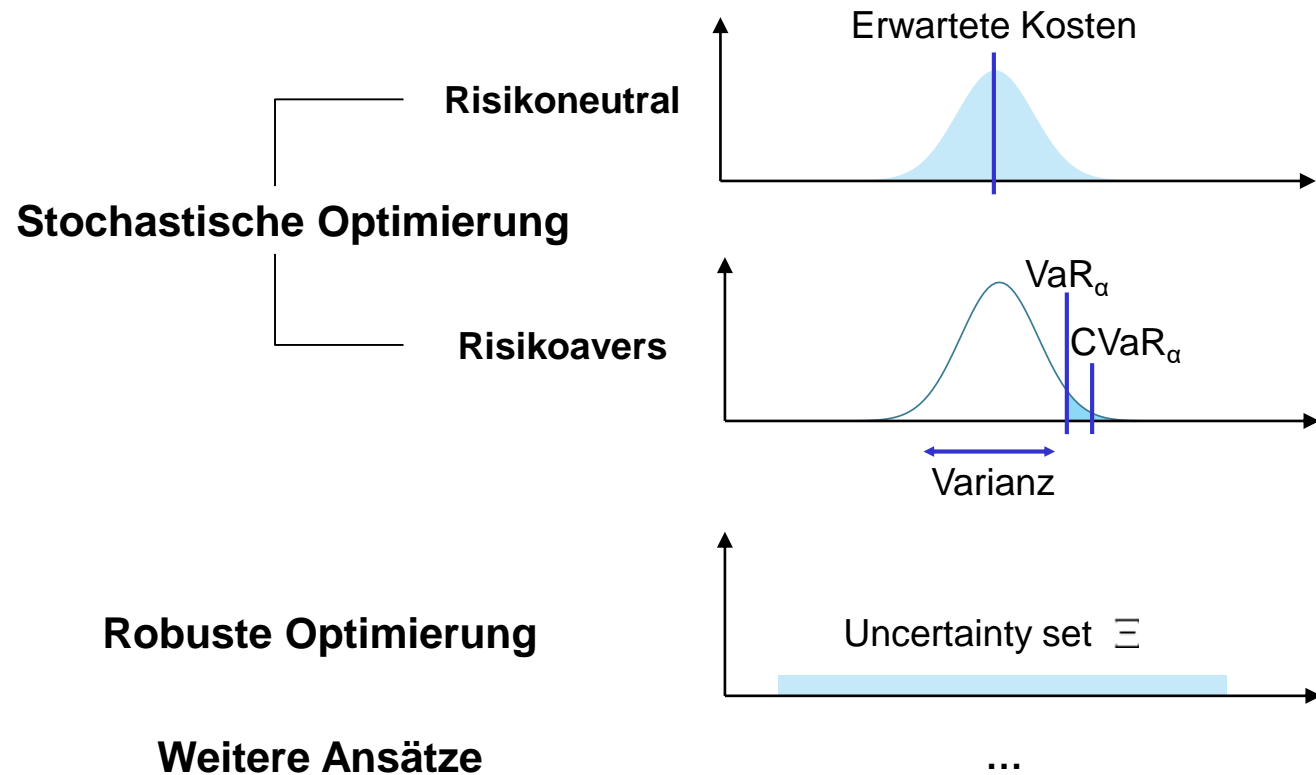


...

Sensitivitätsanalysen mittels deterministischer Werkzeuge unzureichend für Optimierung unter Unsicherheit

Mögliche neue Ansätze zur endogenen Betrachtung von Unsicherheiten

Formulierungen hängen von Risiko-Operatoren ab, die das Risiko extremer Kosten/Verluste und verletzter Nebenbedingungen bemessen und ihren Umgang damit beschreiben



Resilientere Energiewendepfade durch Integration von Konfliktanalysen

- Systemische und prospektive Betrachtung gesellschaftlicher Konflikte der Energiewende
- Analyse der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Energiewendekonflikten
- Integration in Energiesystemmodelle, um resilientere Pfade entwickeln zu können
- Weiterentwicklung von Instrumenten, um Konflikten gegensteuern zu können

Konfliktbewertung von 6 Szenarien anhand von 11 quantifizierten Indikatoren (Auszug):

	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	Orange	Yellow	Orange	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

Betrachtete Indikatoren: (1) Flächennutzungskonkurrenz, (2) Regelungen zur Ausgestaltung der Energiewende, (3) Wohn- und Lebensqualität vor Ort, (4) Nutzung Technologien und Infrastruktur, (5) Lokale Teilhabe und Partizipation, (6) Genehmigungsverfahren, (7) Kosten-/Nutzenverteilung, (8) Arbeitsmarkteffekte, (9) Zielkonflikte EE-Ausbau, (10) Auswirkungen auf Rohstoffverfügbarkeit, (11) Auswirkungen im Ausland durch Importe. Jeder Indikator besteht wiederum aus mehreren Unterindikatoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



FKZ: 03E11034B

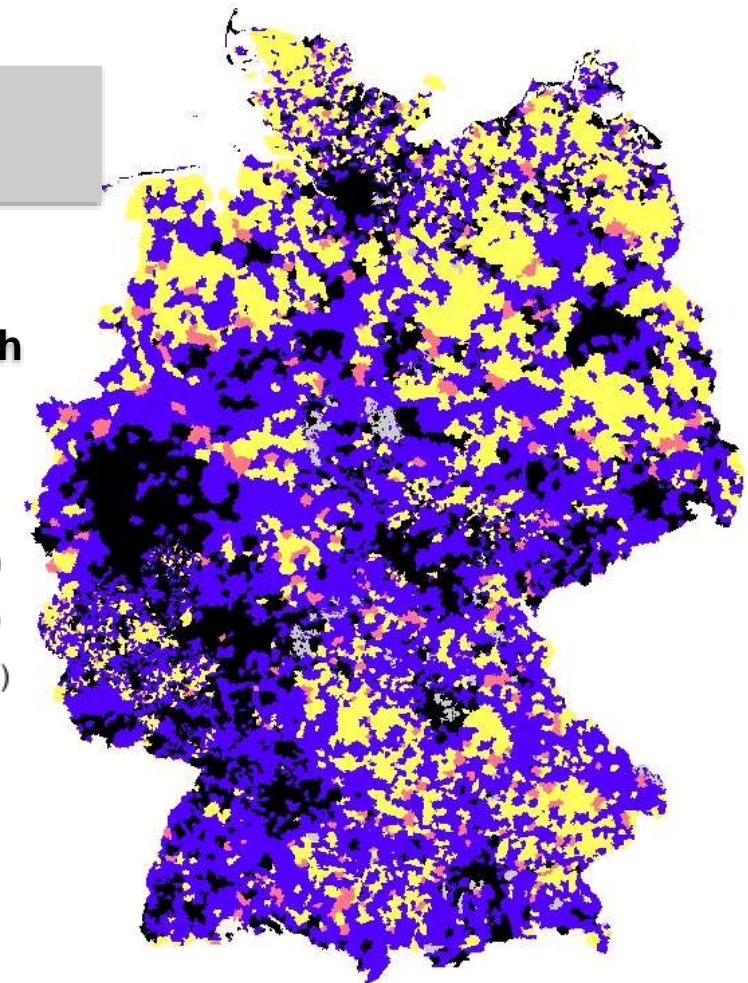
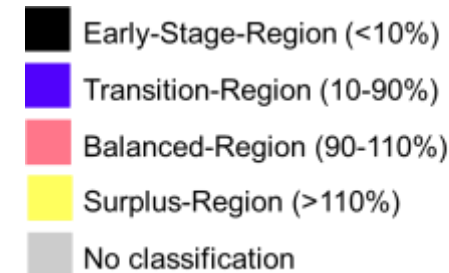
Resilienzbewertung erfordert neben neuen Methoden gute Datengrundlagen

Die räumlich aufgelöste Stromerzeugung und der zugehörige Stromverbrauch zeigen mögliche Schwachstellen auch bzgl. der Resilienz im Energiesystem

Analyse mittels Kennzahlen, z.B.: **Deckungsrate = Stromerzeugung / Stromverbrauch**

Datenbedarf modellgestützter Resilienzanalyse

- Bestandsinfrastrukturen
- Technologiepotenziale
- Nachfrageentwicklung
- Ausprägung von Stressfällen
- Technologieentwicklung

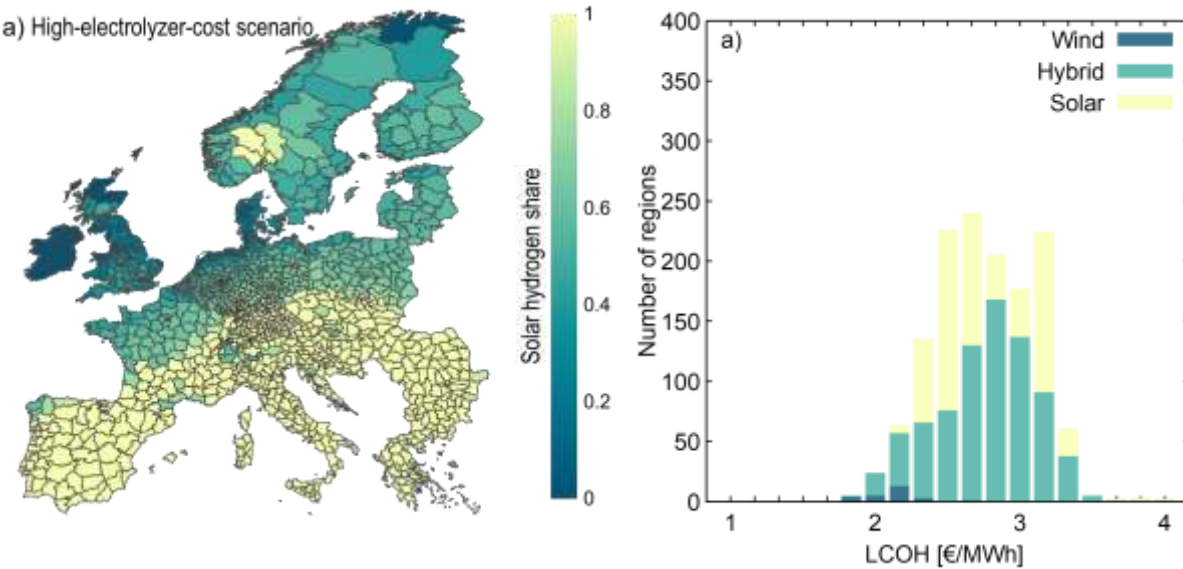


Räumliche Deckungsrate durch lokal erzeugten erneuerbaren Strom für das Jahr 2019

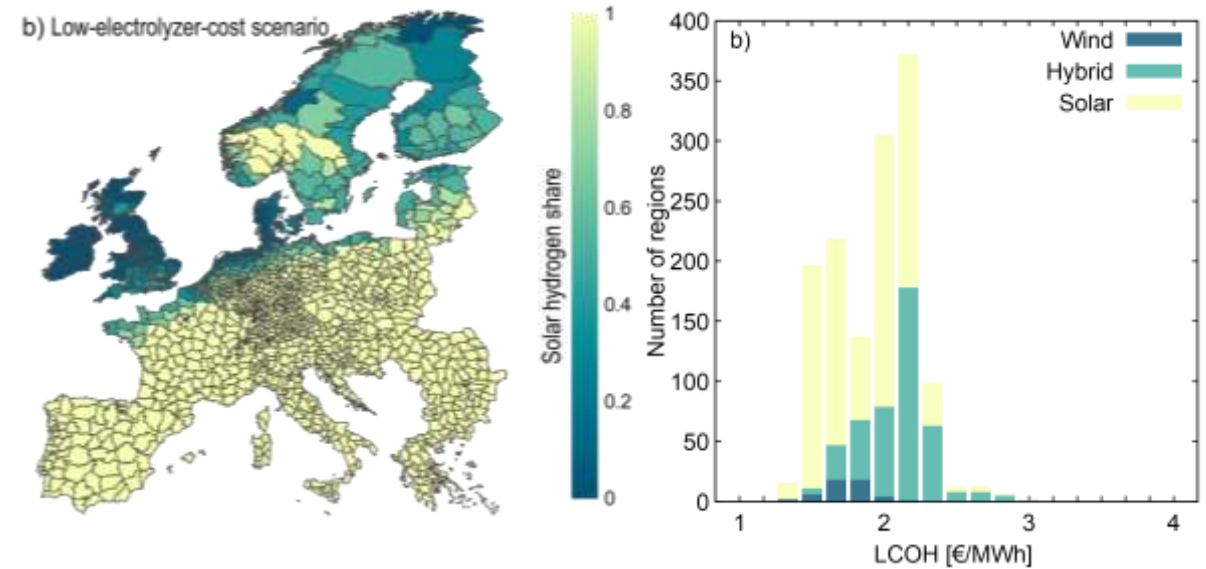
Lehneis, R., Manske, D., Schinkel, B., Thrän, D., [Spatiotemporal Modeling of the Electricity Production from Variable Renewable Energies in Germany](#), ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2022, 11, 90.

Technologieentwicklung beeinflusst Design optimaler, resilienter Zielsysteme

a) High-electrolyzer-cost scenario



b) Low-electrolyzer-cost scenario



- Günstigere Elektrolisetechnologie verändert optimales Verhältnis Sonne zu Wind in der H₂-Produktion
- H₂-Gestehungskosten sinken überall, die Regionen rücken jedoch preislich zusammen
- Vor-Ort-Produktion wird konkurrenzfähiger

Niepelt, R., Schlemminger, M., Bredemeier, D. et al., [The influence of falling costs for electrolyzers on the location factors for green hydrogen production](#), Sol. RRL 2023, 7, 2300317

Technologieentwicklungspfade bei Auslegung resilienter Systeme im Blick halten

Resiliente Verteilnetze: Microgrids & Lokale Energiegemeinschaften

Zieldimensionen von Microgrids:

I. Baustein zur Erhöhung der **Resilienz zukünftiger Energiesysteme**

- Netzdienstleistungen & Schwarzstartfähigkeit
- Reduktion von Kaskaden und großflächigen Blackouts durch Inselbetrieb

Techno-ökonomische Aspekte

II. Erhöhung der **Resilienz von Städten und Kommunen**

- Systematischer Schutz kritischer Infrastrukturen
- Verbesserung von Daseinsvorsorge und Well-Being

Sozio-technische, sozio-ökonomische Aspekte

III. Bildung **nachhaltiger lokaler Energiegemeinschaften**

- Partizipation unterstützen
- Ungleichheit minimieren

Neu entwickelte **Metriken** zeigen, dass **unterschiedliche Designs** von Microgrids, insb. ihre **räumliche Ausdehnung**, sich **unterschiedlich** auf I.-III. auswirken!

Welche Microgrid-Designs unterstützen die Erreichung der Ziele I.-III. möglichst gut?

Zusammenfassung

- Neue Instrumente und Methoden für die Resilienzbewertung nachhaltiger Energiesysteme benötigt
- Ergänzend bedarf es guter Daten zur zukünftigen Entwicklung von Technologien und System
- In der Energiesystemplanung greifen Robustheit der Planung und Resilienz des Zielbilds ineinander
- Analysen müssen neben techno-ökonomischen Aspekten auch das sozio-ökonomische System umfassen
- Resilientes Energiesystem muss mit hybriden bzw. sich überlagernden Gefahren umgehen können
- Um Resilienz in der Planung von Transformationspfaden berücksichtigen zu können, ist ein Modell-instrumentarium erforderlich, bei dem auch Wechselwirkungen mit Kontextgrößen berücksichtigt werden