

Das künftige europäische Energiesystem: Treibhausgasneutral, widerstandsfähig, wettbewerbsfähig und gerecht?

Autoren

Jochen Linßen, Theresa Klütz

Forschungszentrum Jülich, Institut für Klima und Energiesysteme, Jülicher Systemanalyse

Patrick Jochem, Tobias Naegler

DLR, Institut für Vernetzte Energiesysteme

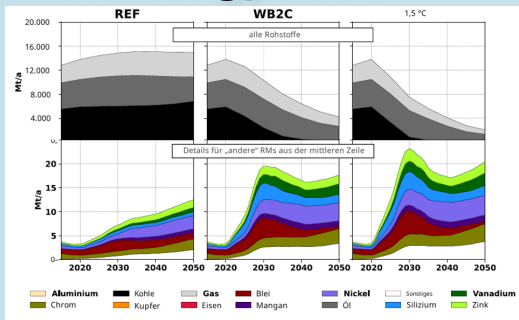
Witold-Roger Pogonietz, Martina Haase

KIT, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

Aktuelle Ausgangslage: Das Energiesystem steht vor großen Herausforderungen

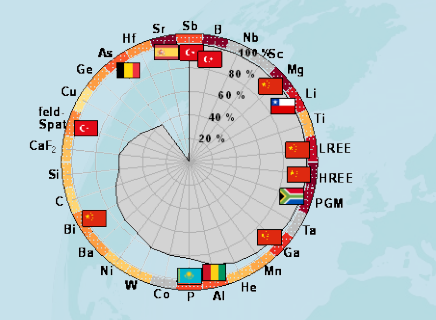
Lieferketten

Materialengpässe



T. Naegler et al. Energy Policy (2026)

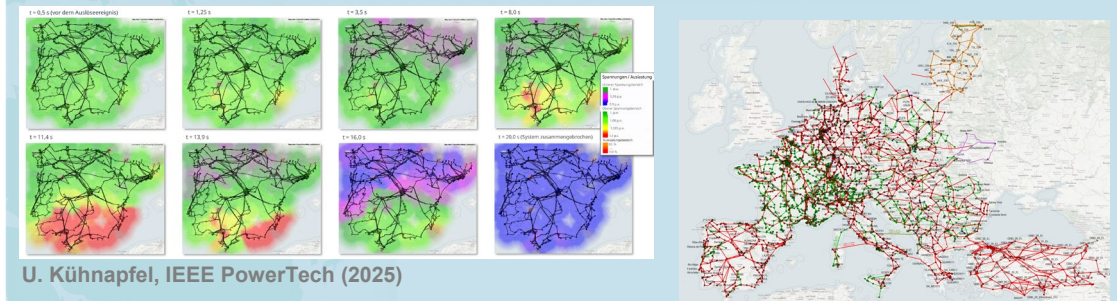
EU-Importabhängigkeit



J. Mutke et al. 2026 & EU Commission 2023

Stromausfälle

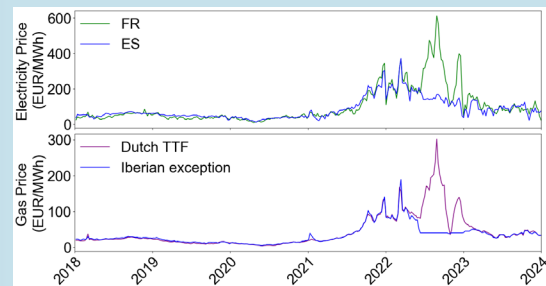
Stromausfall Iberische Halbinsel 2025



U. Kühnapfel, IEEE PowerTech (2025)

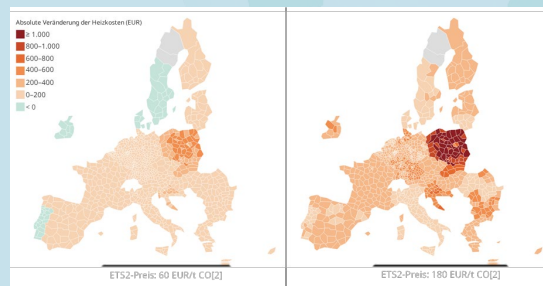
Energiekosten

Strompreise



S. Schreyer et al., Nature Comm. (2026); Y. Pan et al., Energy Economics (2026); T. Schwab et al., Bertelsmann Stiftung (2025)

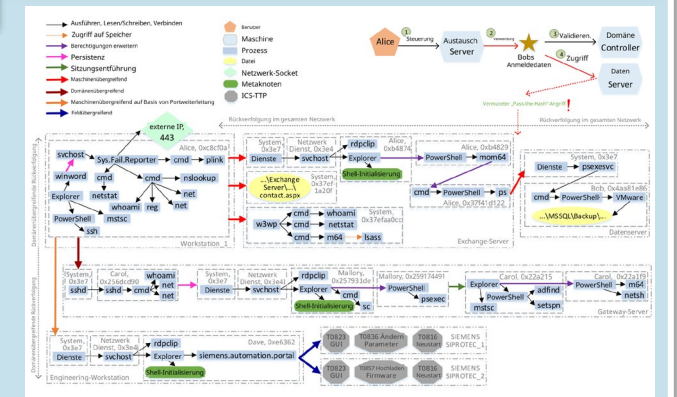
Soziale Auswirkungen



ETS2-Preis: 60 EUR/t CO₂; ETS2-Preis: 180 EUR/t CO₂

Cyberangriffe

Rekonstruktion von simulierten Cyberangriffen



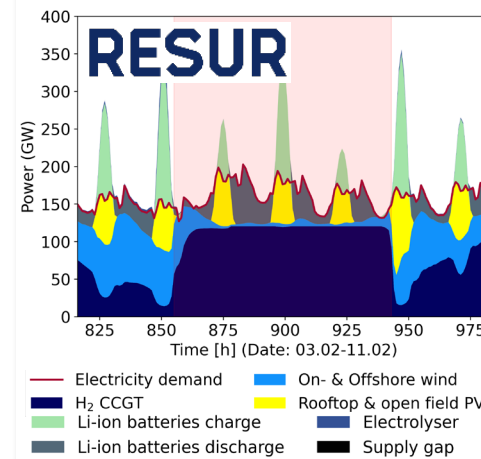
Liu et al., Journal of Information Security and Applications (2025)

Szenarien als wichtiges Hilfsmittel für Planung und Handlung

Strategieoptionen aufzeigen

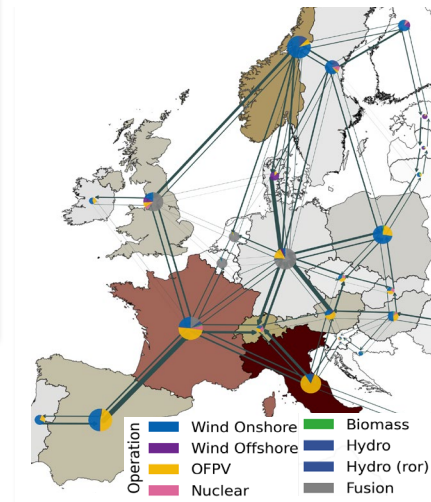
- Entwicklung resilienter und anpassungsfähiger Transformationswege auch über Netto-Null hinaus
- Aufzeigen der Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung von Innovationen
- Bewertung von Optionen zur Minderung materialbezogener Engpässe und Lieferketten-Schwachstellen

Robuste Einsatzplanung auch bei Extremwetter

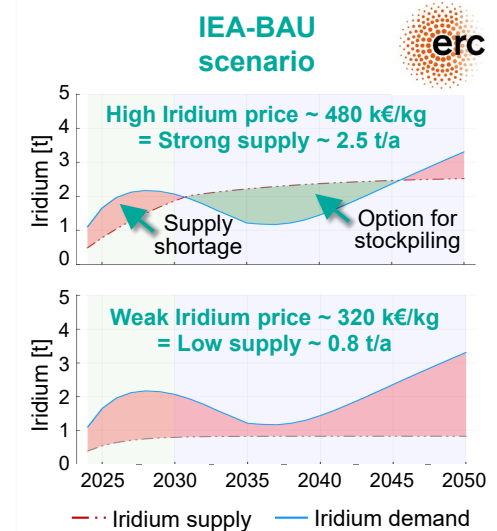


S. Kebrich et al. Science (2026)

Rolle neuer Technologien (z.B. Kernfusion)



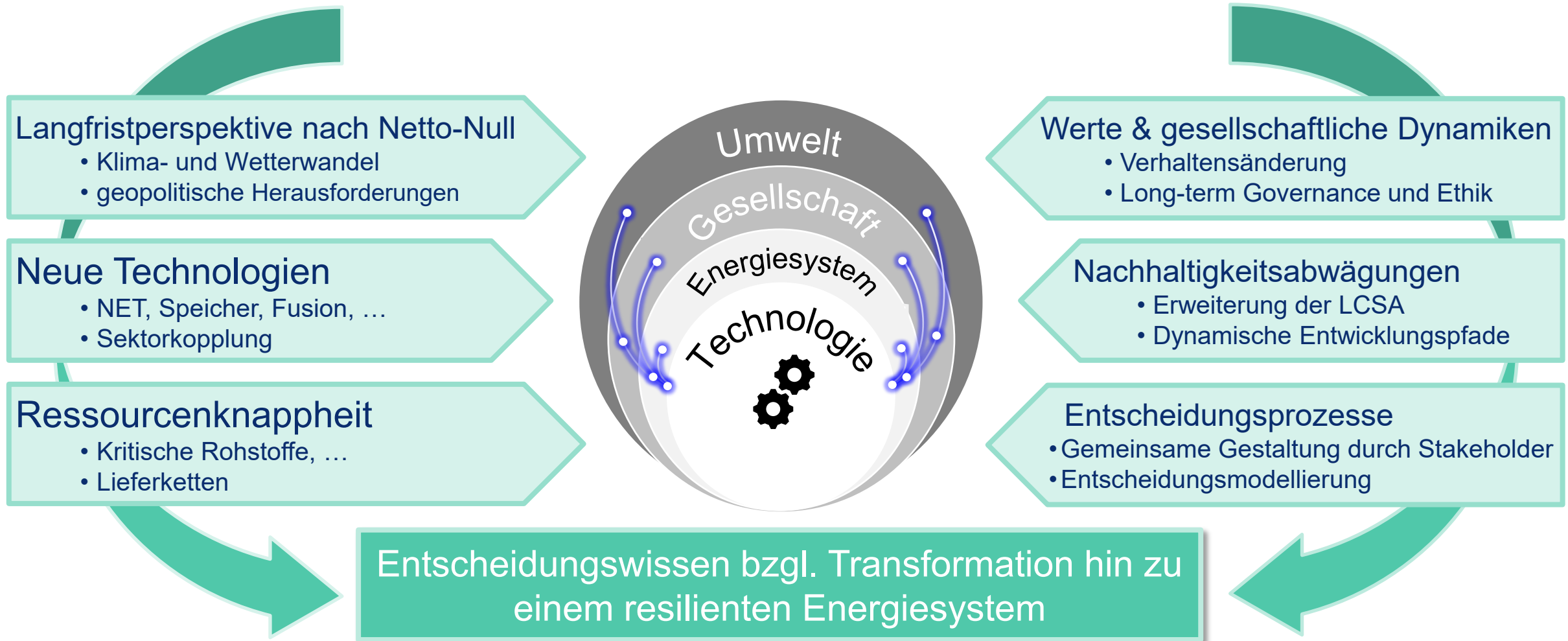
Materialbeschränkung für grüne Technologien



B. Wortmann et al. Journal of Industrial Ecology (2026)

BAU: Business-As-Usual

Inter- und transdisziplinärer Ansatz



NET: Technologien zur negativen Emission;

LCSA: Lebenszyklus-Nachhaltigkeitsbewertung (Lebenszyklusbewertung + Lebenszykluskostenrechnung + soziale Ökobilanz)

Mögliche Abwägungen von Einflüssen

Trade-offs sind im Allgemeinen nicht statisch und können durch Maßnahmen verändert werden

	versus	Kurzfristig	Langfristig
THG-Neutralität	Wettbewerbsfähigkeit	↑ Investitionen/ Kosten Umbau	↓ relativ sinkende Energiekosten
THG-Neutralität	Resilienz	↑ Lernprozesse bei neuen Systemstrukturen ↓ abnehmende Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen	↓ abnehmende Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen ↑ zunehmende Abhängigkeit von strategischen Ressourcen
THG-Neutralität	Gerechtigkeit	↑ steigende Energiekosten ↓ zunehmende „Demokratisierung“ des Angebots ⇅ regionale und gesellschaftliche Verteilung der Transformationskosten	↓ zunehmenden „Demokratisierung“ des Angebots ⇅ regionale und gesellschaftliche Verteilung der Transformationskosten

Auswahl, kein Anspruch auf Vollständigkeit

THG: Treibhausgase



zunehmender Trade-off



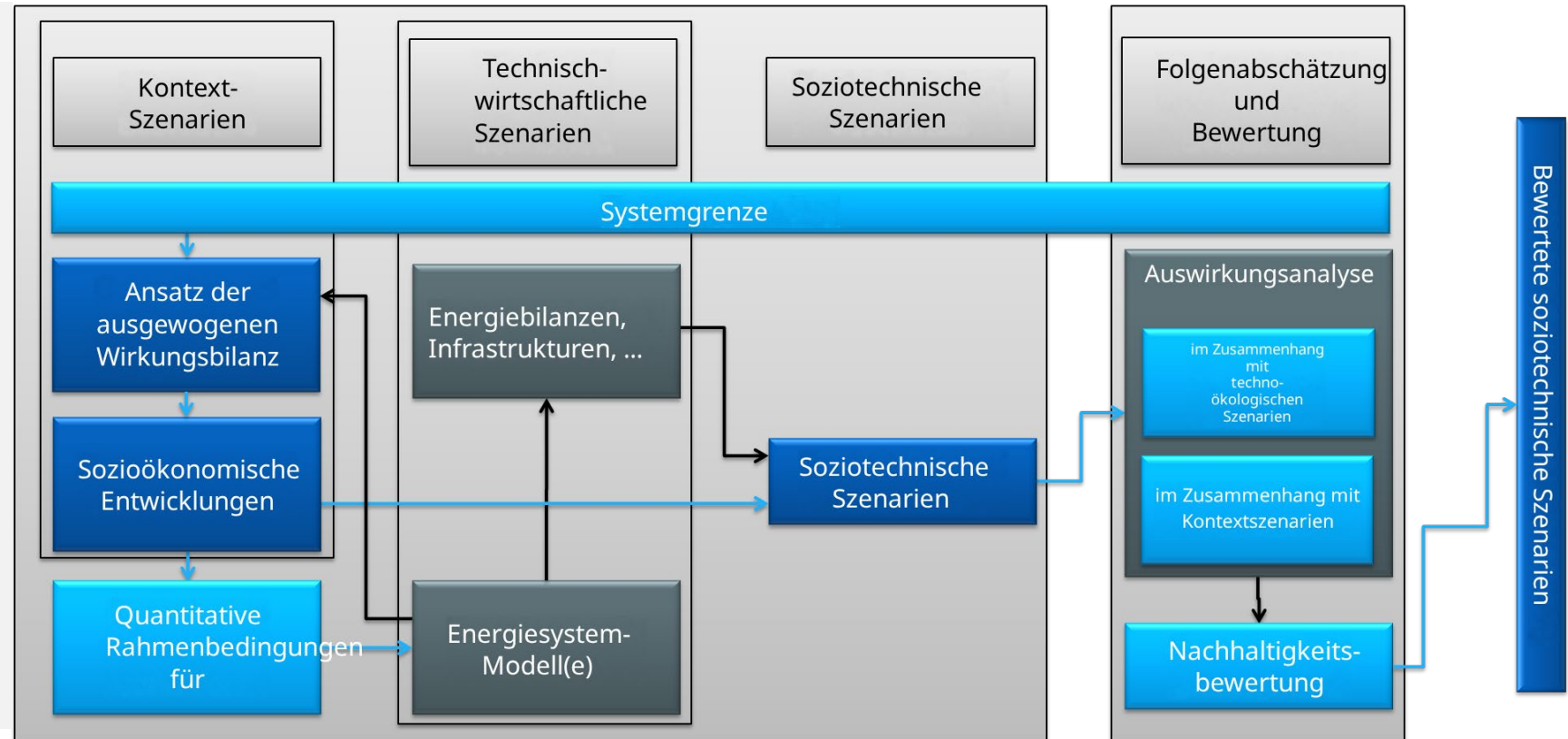
abnehmender Trade-off



nicht eindeutige Entwicklung

Interdisziplinäre Szenarien

- Übersetzung von qualitativen sozio-technischen Deskriptoren in technisch-ökonomische Eingabevariablen
- Unterschiedliche Kontextszenarien führen zu unterschiedlichen technisch-wirtschaftlichen Szenarien
- Randbedingungen für Energiesystemmodelle je nach Sichtweise anpassen



Szenarioanalyse Europäisches Energiesystem



Business as Usual (BAU)

Klimaschutzziele werden außer Acht gelassen.
Nachfrage fossile Kraft-/ Brennstoffe bleibt hoch
Reduzierung der CO₂ Emissionen bis 2050: 55% (versus 1990)



Netto-Null 2050 (NZ-2050)

Treibhausgasneutralität bis 2050 (Green Deal)
Elektrifizierung und grüne Brenn-/Kraftstoffe
Ambitionierter Ausbau Infrastruktur



Netto-Null 2070 (NZ-2070)

Verspätete Zielerreichung Treibhausgasneutralität bis 2070
Verzögerung bei Anpassungen/ Ausbau der Infrastruktur
Reduzierung der CO₂ Emissionen bis 2050: 85% (versus 1990)

Rahmenbedingungen

 EU-27 + UK, NO, CH: 176 Regionen
 Transformationspfad 2030–2050 (2070)

 Stündliche zeitliche Auflösung und Speicherung
 Energiesystem einschließlich Infrastruktur

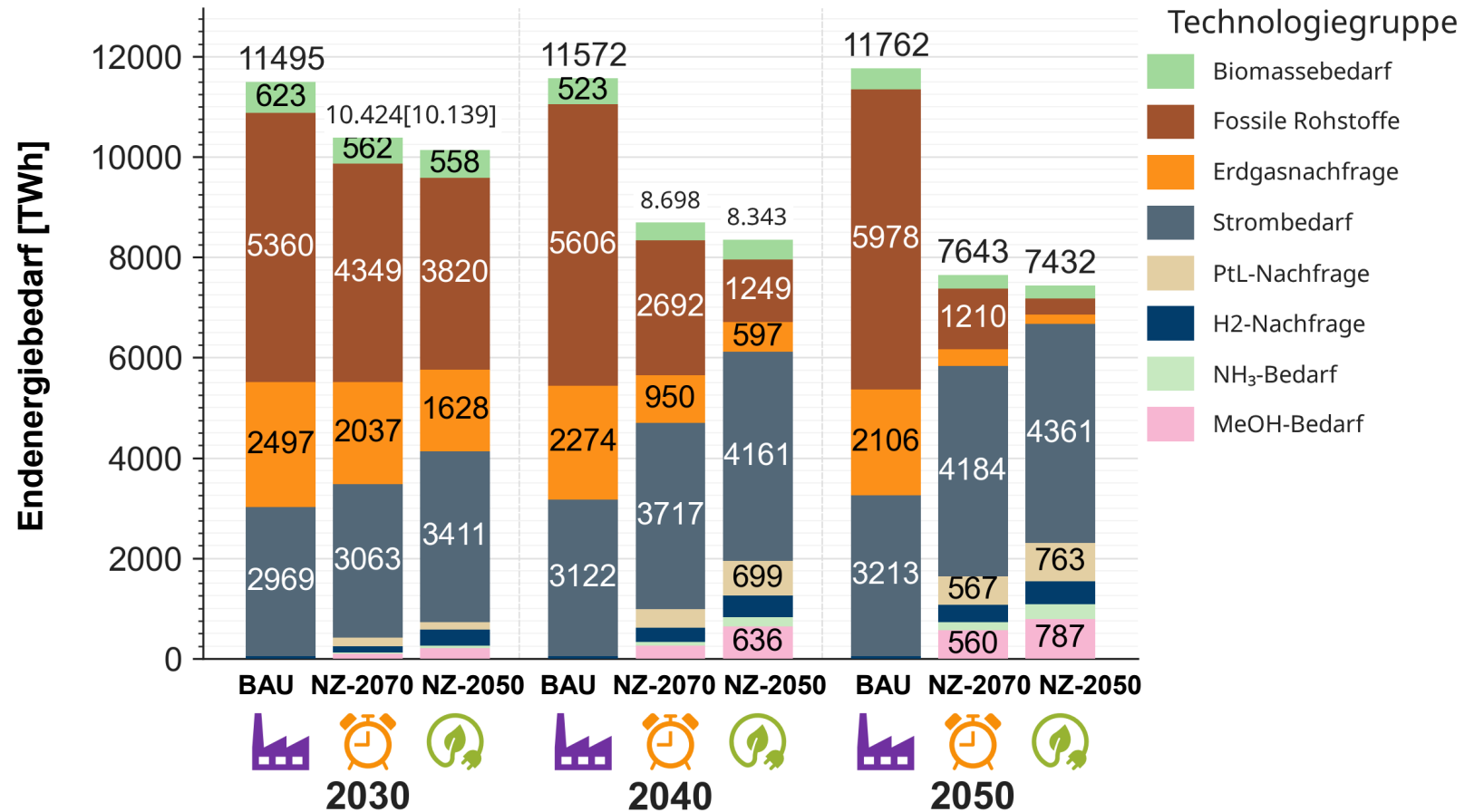
 Stabiler Trend bei Bevölkerung und Industrie
 Szenario-Portfolio für Wege und Lösungen

Quelle T. Klütz et al. Breaking free from dependencies? (2026) go.fzj.de/EU_Scenarios_FZJ_2026

Nachfrageszenarien bestimmen Umfang und Zusammensetzung der Energieversorgung

Sektormodelle bestimmen den Bedarf und die direkten Emissionen; das Versorgungsmodell optimiert das System, um den Bedarf zu decken.

-  BAU: Es besteht weiterhin ein erheblicher Bedarf an fossilen Brennstoffen und Rohstoffen.
-  NZ-2050: Geringere Gesamtnachfrage und eine starke Verlagerung hin zu Strom und erneuerbaren Brennstoffen.



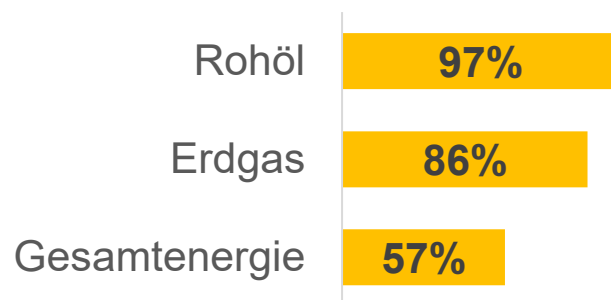
Erzeugung, Import und Infrastruktur richten sich nach den Nachfrageszenarien. Diese werden durch Lebensstile sowie soziale und wirtschaftliche Faktoren beeinflusst.

Quelle T. Klütz et al. Breaking free from dependencies? (2026) go.fzj.de/EU_Scenarios_FZJ_2026

Die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen ist eine strategische Schwachstelle

EU heute

Importabhängigkeit der EU,
2024



Die jüngsten Störungen in der Straße von Hormus verdeutlichen die heutige Anfälligkeit.

Was ändert sich bis 2050?



BAU: Die Importausgaben bleiben hoch: ~250 Mrd. €/Jahr

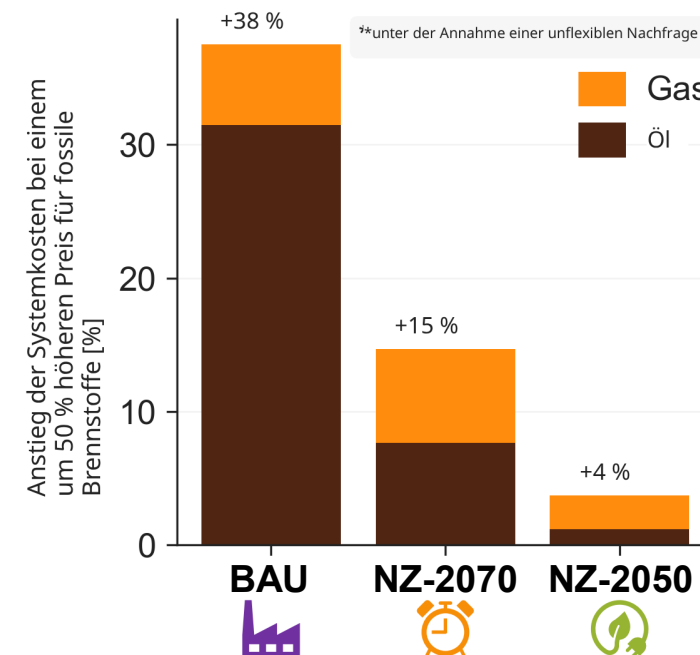


NZ-2050: Die Ausgaben für den Import fossiler Brennstoffe sinken auf ~20 Mrd. €/Jahr.

Diese verlagern sich in Richtung europäischer Produktion und Infrastruktur.

Preisschock-Test 2050

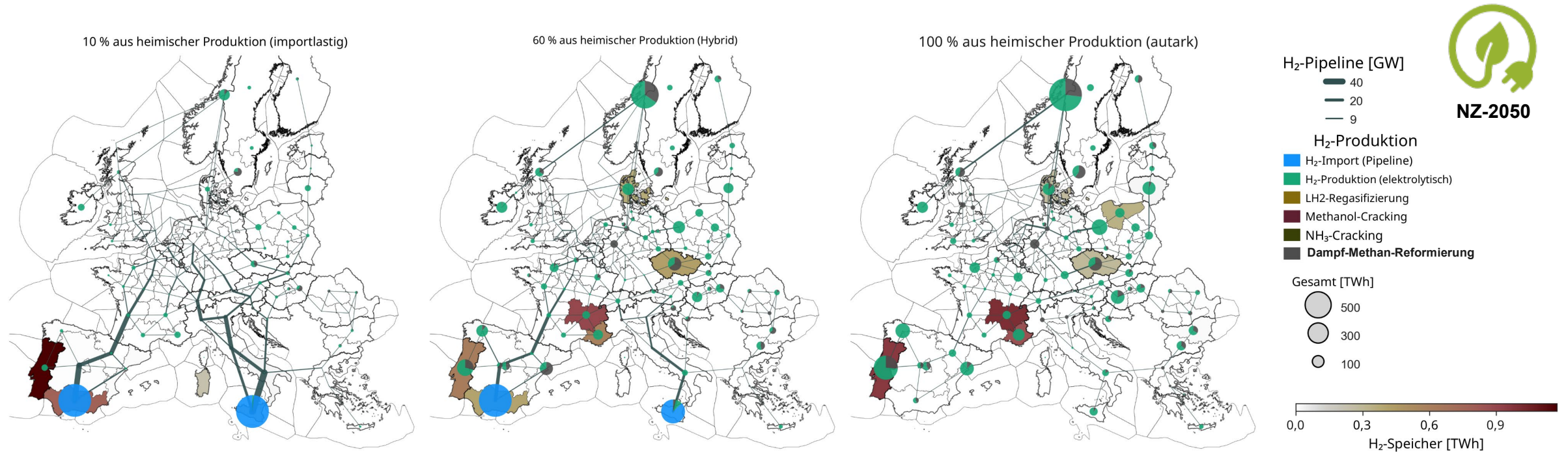
+50 % für fossile Kraft- /Brennstoffpreise



Eine geringere Nachfrage nach fossilen Brennstoffen senkt sowohl die Importkosten als auch die Anfälligkeit gegenüber externen Preisschocks.

Quelle T. Klütz et al. Breaking free from dependencies? (2026) go.fzj.de/EU_Scenarios_FZJ_2026

Beschaffung treibhausgasneutraler Kraft-/ Brennstoffe prägt die Infrastruktur



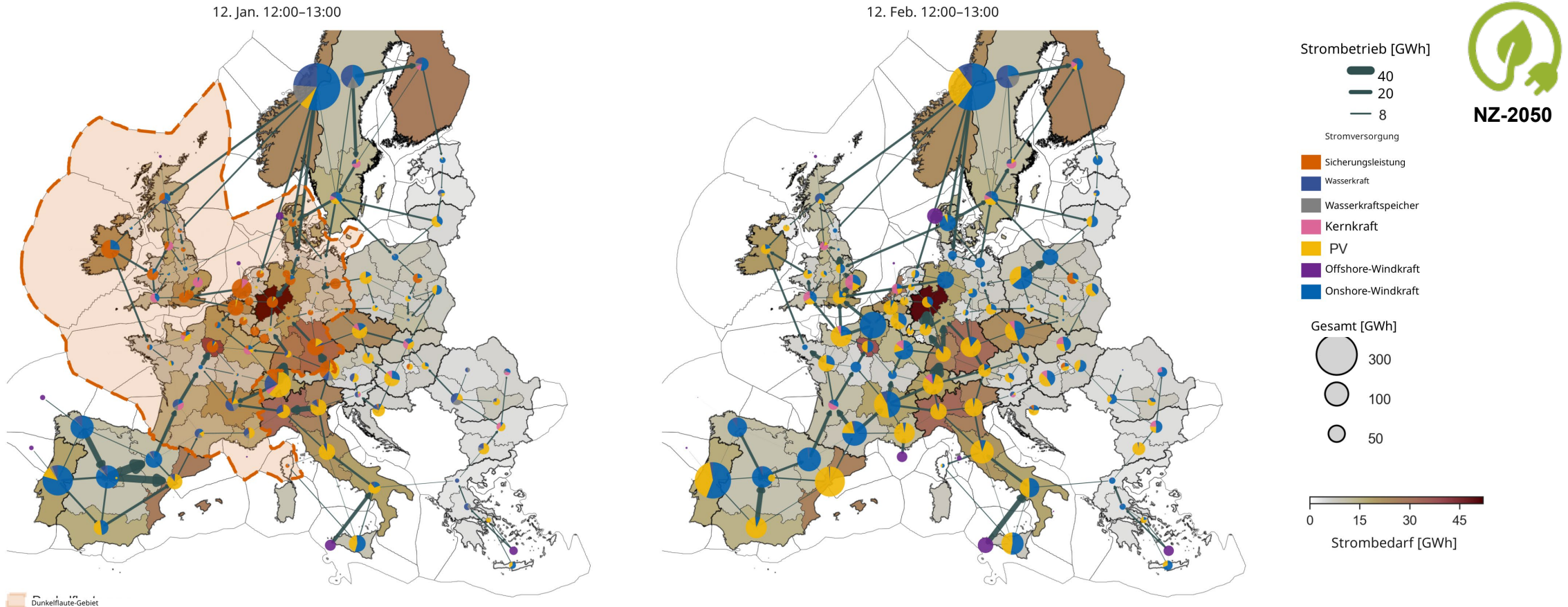
- Importlastige Versorgung: Mehr Importterminals, Umrüstungsinfrastruktur und Abhängigkeit von externen Lieferpartnern
- Hybride Beschaffung: Teilt den Infrastrukturbedarf zwischen heimischer Produktion und diversifizierten Importkorridoren auf
- Heimische Versorgung: Mehr europäische Stromerzeugung, Netze und Wasserstoffinfrastruktur; Höherer Flächen- und Genehmigungsbedarf

Die Strategie zur Kraftstoffbeschaffung bestimmt die Infrastruktur, die Investitionen und die Abhängigkeiten.

Quelle T. Klütz et al. Breaking free from dependencies? (2026) go.fzj.de/EU_Scenarios_FZJ_2026

Reaktion des Energiesystems auf eine Dunkelflaute

21-tägige Dunkelflaute, Mitteleuropa (ab 08. Januar für 21 Tage) – 2050



Dunkelflaute: „Erzeugung aus erneuerbaren Energien (PV und Windkraft – Onshore + Offshore) in den betroffenen Regionen auf 30 % der Nennleistung gesunken“

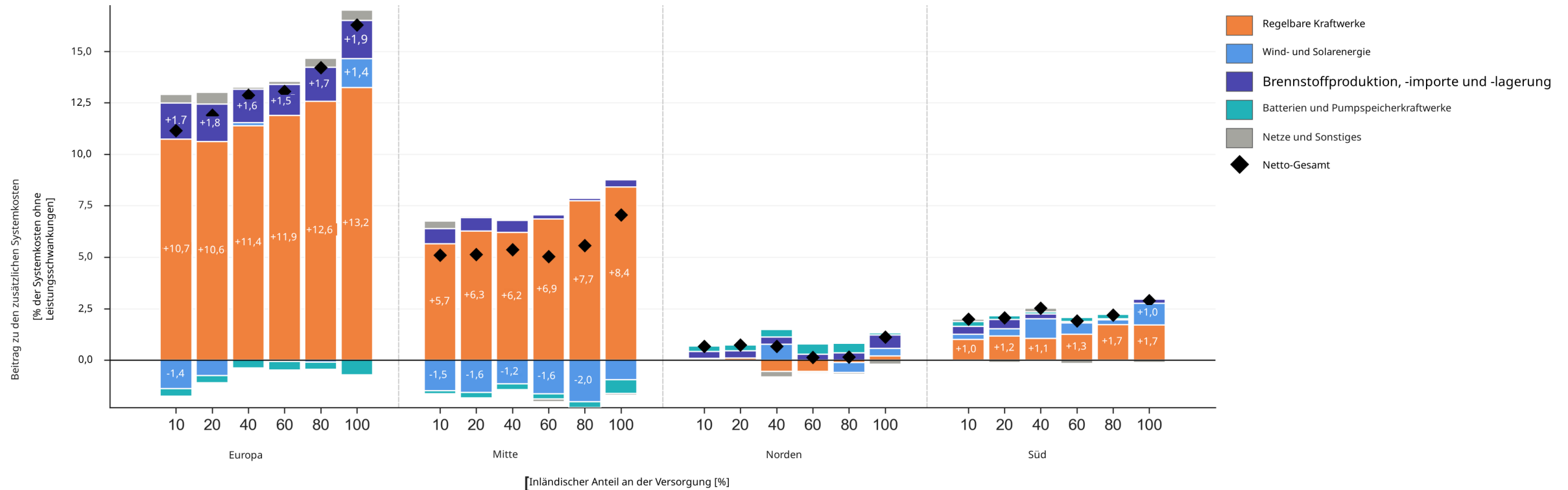
Quelle T. Klütz et al. Breaking free from dependencies? (2026) go.fzj.de/EU_Scenarios_FZJ_2026

Steuerbare Erzeugung und Rückverstromung bestimmen die Resilienzkosten



NZ-2050

Technikanteile an den Zusatzkosten für die Resilienz gegen eine Dunkelflaute

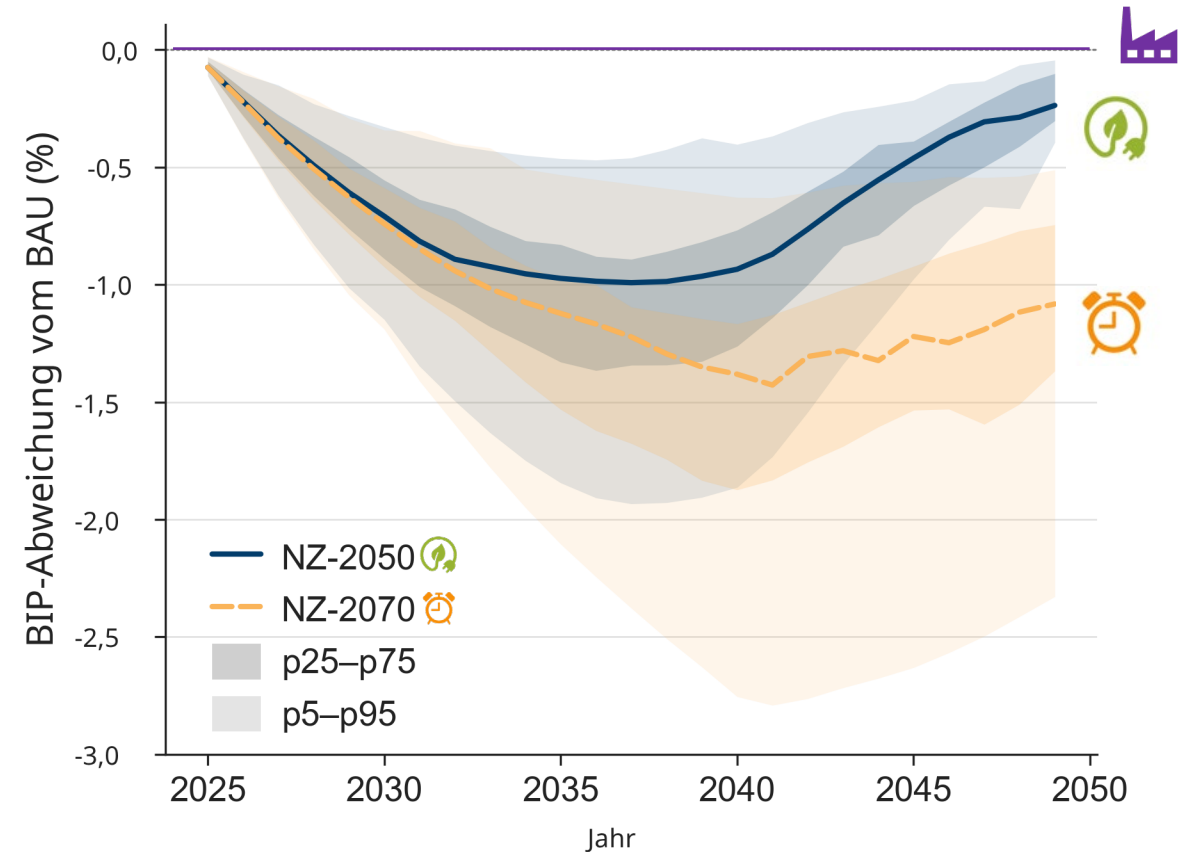


Die Gesamtkosten und Zusammensetzung variiert mit Länge und Ort der Dunkelflaute als auch der Importstrategie grüner Kraft- / Brennstoffe

Quelle T. Klütz et al. Breaking free from dependencies? (2026) go.fzj.de/EU_Scenarios_FZJ_2026

Ökonomischen Effekte der Transformation: Verzögerungen verursachen Zusatzbelastungen

- Alle Szenarien weisen ein positives BIP-Wachstum auf, keine Stagnation oder Rezession
- Die Bandbreiten repräsentieren Unsicherheiten bzgl. Anpassungsfähigkeit von Investoren, Arbeitnehmern und Unternehmen, CO₂-Preise und Rückflüsse aus den Erlösen sowie verfügbare Haushaltseinkommen.
- Die wirtschaftlichen Auswirkungen der Transformation zur THG-Neutralität sind überschaubar und von begrenzter Dauer.
- Verzögerungen können die Kosten durch mögliche länger anhaltende wirtschaftliche Dämpfungen erhöhen.



Die Transformation zur THG-Neutralität bietet die Chance, zu einem stärker von Investitionen geprägten System in Europa mit wirtschaftlichen Vorteilen zu gelangen

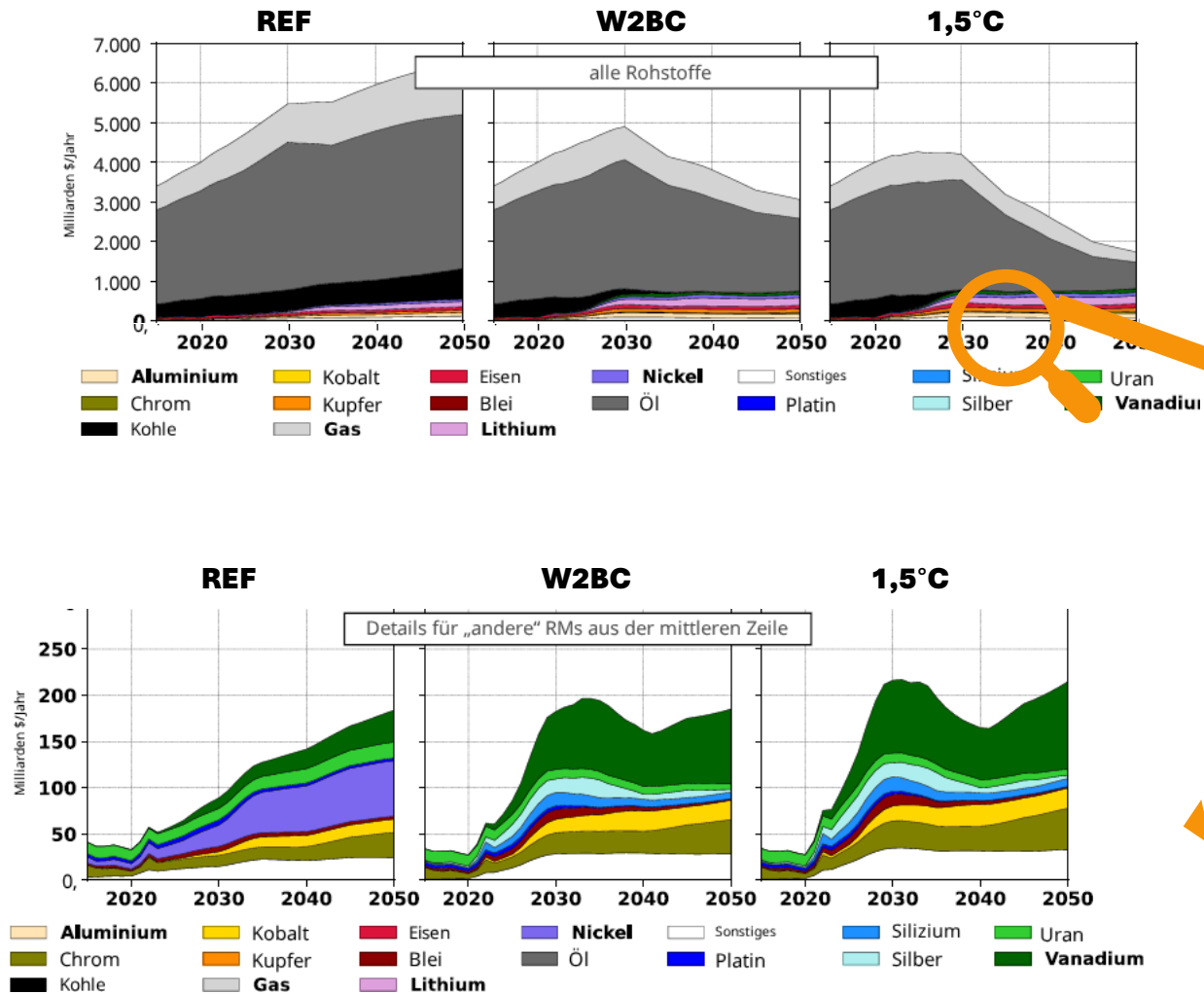
Quelle T. Klütz et al. Breaking free from dependencies? (2026) go.fzj.de/EU_Scenarios_FZJ_2026



Karlsruher Institut für Technologie



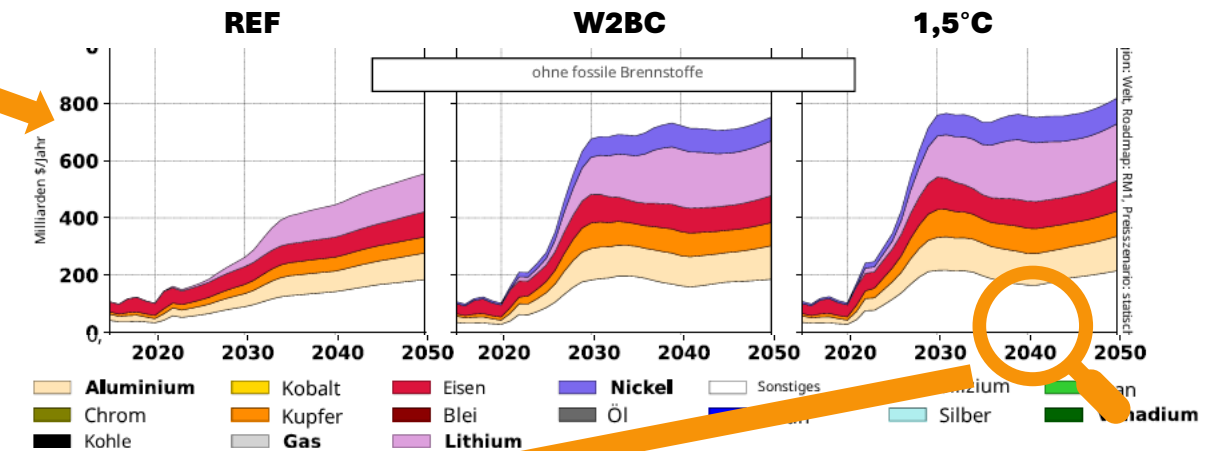
Jährliche globale Rohstoffkosten für das Energiesystem und den Verkehr



REF: Energie- und klimapolitischen Maßnahmen bis 2019 werden fortgeführt ohne Ambitionen zu Verschärfung

W2BC: Begrenzung auf deutlich unter 2 °C nach dem Pariser Abkommens

1,5 °C: Erreichung des 1,5°C-Ziels des Pariser Abkommens



<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114622>

Multikriterielle Entscheidungsanalyse als Baustein einer gerechten Energiewende

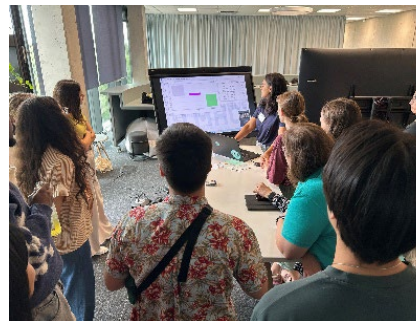
Einbeziehung unterschiedlicher Perspektiven in Entscheidungsprozesse

Einbeziehung verschiedener Interessengruppen

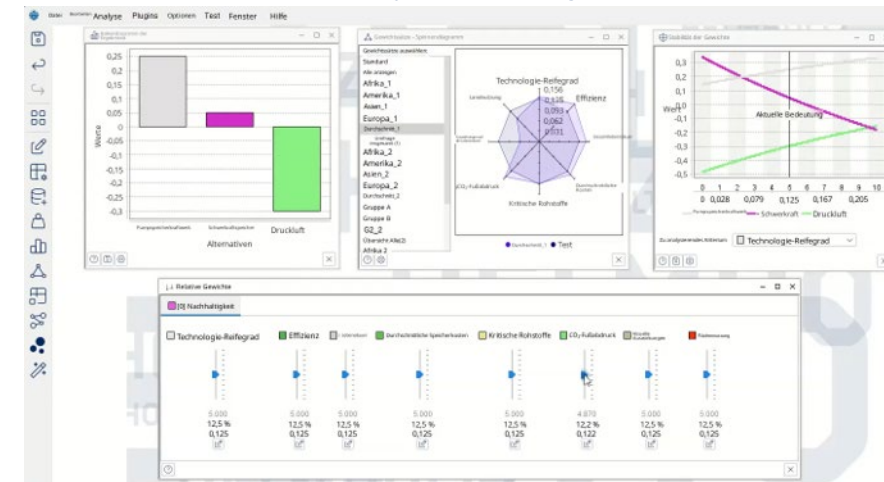
- Identifizierung gesellschaftlicher Dynamiken und Werte
- Bereitstellung partizipativer, reproduzierbarer und umsetzbarer Ansätze zur Entscheidungsunterstützung
- Visualisierung der Konsequenzen von Entscheidungen



Förderung des Dialogs



Interaktive Gewichtung von Entscheidungskriterien und Analyse der Ergebnisse



Immersive räumliche Visualisierung



Erfassung individueller und gruppenbezogener Präferenzen in Echtzeit



L. S. Mesa Estrada et al. 2027 [doi:10.1016/j.eswa.2026.134456](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.134456)

Kernbotschaften

1

Das **Energiesystem** ist derzeit und zukünftig mit **großen Herausforderungen** konfrontiert. Die **inter- und transdisziplinäre Systemanalyse** in der Energieforschung liefert wichtiges **Entscheidungswissen** zur Entwicklung **resilienter und anpassungsfähiger Transformationswege**.

2

Die **Transformation zur Netto-Null** in Europa kann mehr als nur Klimaschutz sein. Eine **intelligente, europäisch abgestimmte Strategie** kann die **Resilienz gegenüber Importrisiken, Preisschwankungen und Extremwetter** deutlich erhöhen.

3

Die **wirtschaftlichen Auswirkungen der Transformation** sind **überschaubar und von begrenzter Dauer**. Sie bietet die **Chance, zu einem investitionsdominierten System überzugehen** mit wirtschaftlichen Vorteilen.

4

Die **Treibhausgasneutralität** erfordert **einen angepassten Rohstoffmix und eine sichere Rohstoffversorgung**. Die **Abhängigkeit von Nicht-Energie-Rohstoffen** nimmt mit dem Ausbau der Technologien für erneuerbare Energien zu.