

# 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 CO<sub>2</sub>) 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 CO<sub>2</sub>-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.

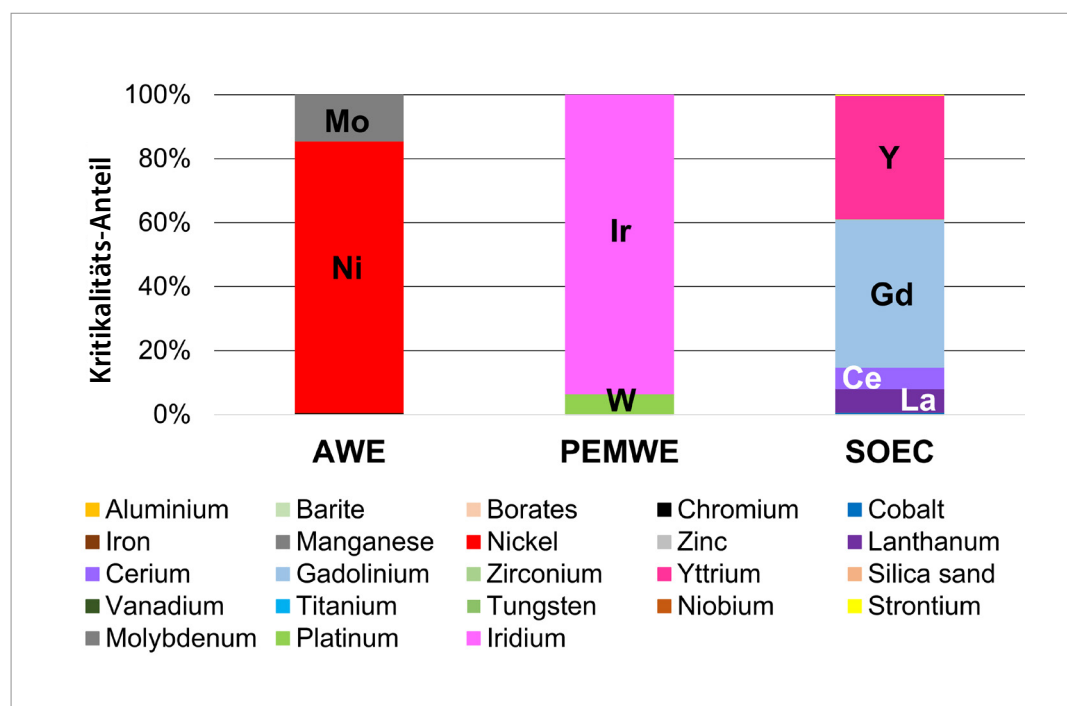
► Abbildung 2 zeigt beispielsweise die Bewertung eines Szenarios, in dem die direkten Emissionen in Deutschland im Jahr 2050 Netto-Null entsprechen. Bei Betrachtung der Herstellung und Entsorgung der berücksichtigten Technologien zeigt sich jedoch, dass erhebliche Treibhausgasemissionen verbleiben,

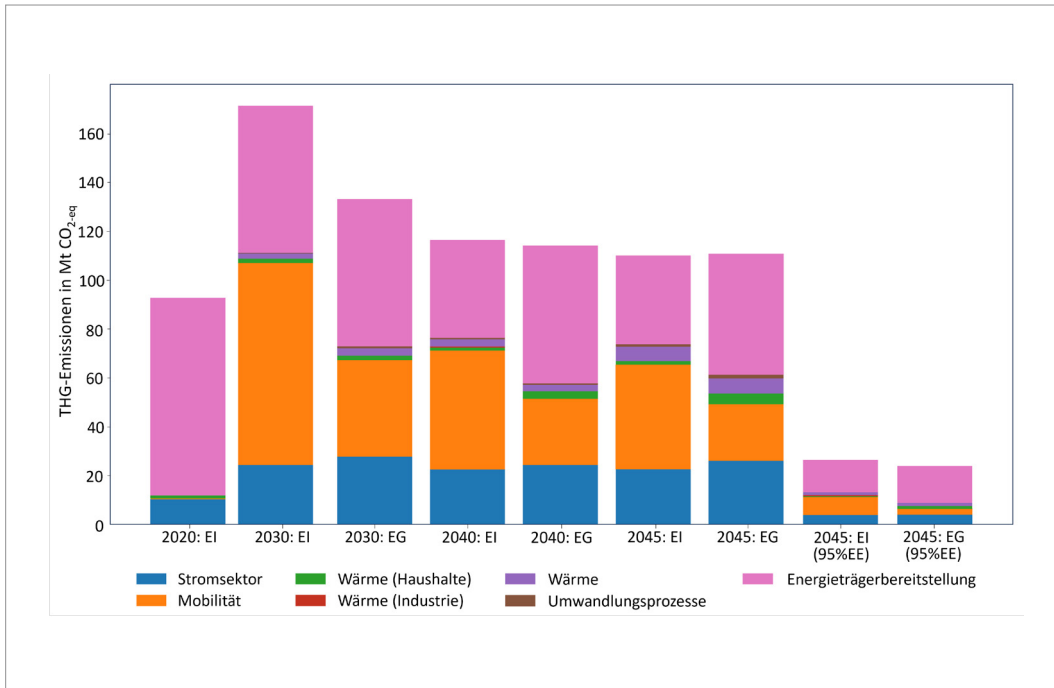
► Abbildung 1

### Kritische Materialien für unterschiedliche Elektrolyseure

AWE:  
alkalische Wasserelektrolyse  
PEMWE:  
Protonenmembranelektrolyse  
SOEC:  
Festkörperelektrolyse

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





► Abbildung 2

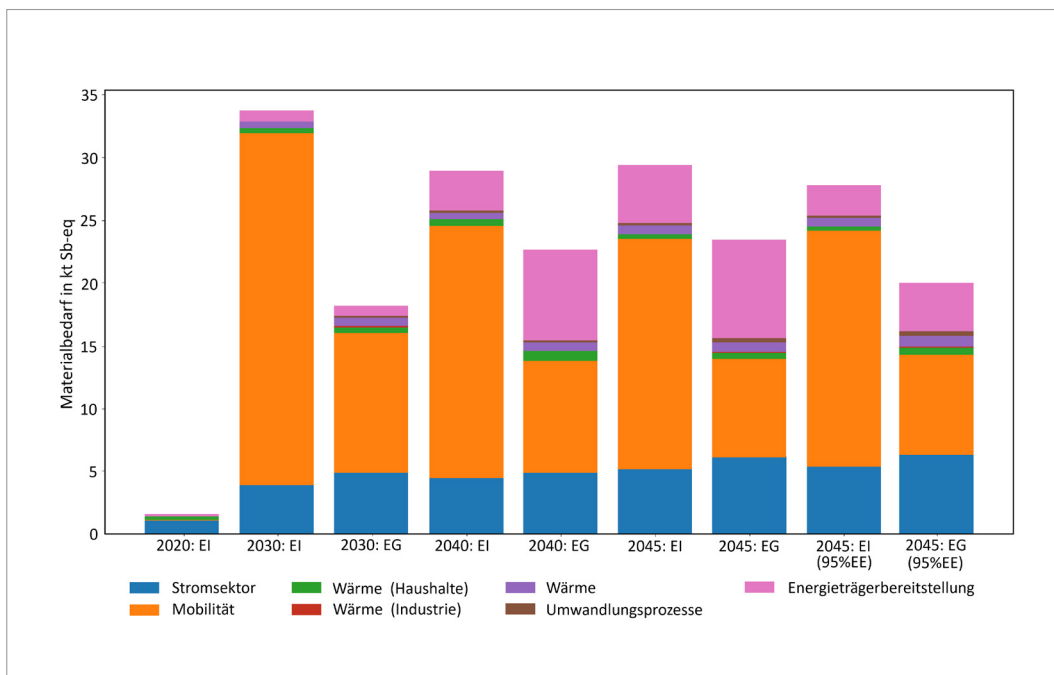
**THG-Emissionen bei Herstellung und Entsorgung der Transformationstechnologien**

(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](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*.