

Schlussbericht

RESUME

Multikriterielle Optimierung: Auswirkungen von Recyclingpotentialen, kritischen Rohstoffen und Lieferkettenrisiken auf die Energiewende

Modellierung und Analyse von
Energiewendepfaden unter Berücksichtigung
von Rohstoffkritikalitäten

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



DLR

**Institut für Vernetzte
Energiesysteme**

Dokumenteigenschaften

Titel	Multikriterielle Optimierung: Auswirkungen von Recyclingpotentialen, kritischen Rohstoffen und Lieferkettenrisiken auf die Energiewende: Modellierung und Analyse von Energiewendepfaden unter Berücksichtigung von Rohstoffkritikalitäten
Erstellt von	Karl-Kiên Cao, Steffen Schlosser, Tobias Naegler
Beteiligte	Suzanne Le Bihan, Hans Christian Gils, Hedda Gardian, Shima Sasanpour, Eugenio S. Arellano Ruiz
Geprüft von	Patrick Jochem
Freigabe von	Patrick Jochem
Zugänglichkeit	Stufe 1: Allgemein zugänglich
FKZ	Förderkennzeichen: 03EI1048A
Zuwendungs- empfänger	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2022 - 28.02.2026
Datum	14.09.2026
Version	1.1
Info	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Inhalt

Zusammenfassende Darstellung des Gesamtvorhabens	4
I. Kurze Darstellung	6
I.1 Aufgabenstellung	6
I.2 Voraussetzungen	6
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
I.3.1 Verfügbarkeit, Bedarf und Recycling von Rohstoffen	7
I.3.2 Methodenentwicklung	8
I.3.3 Optimierung von Energiewendepfaden mit Rohstoffkritikalität	9
I.3.4 Visuelle Analytik für verbesserte Entscheidungsfindung	10
I.3.5 Bewertung von Handlungsoptionen	10
I.3.6 Projektmanagement und Dissemination	10
I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde	11
I.4.1 Verfahren und Schutzrechte	11
I.4.2 Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste	11
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
II. Eingehende Darstellung	12
II.1 Verwendung der Zuwendung	12
II.1.1 Modellendogene Abbildung von Rohstoffkritikalitäten in REMix	12
II.1.2 Aufbau, Erweiterung und Open-Source-Bereitstellung der REMix-Modellinstanz RE-Europe	13
II.1.3 Integration von Sub-Technologien, Szenariodaten und Rohstoffbedarfsdaten	14
II.1.4 Entwicklung und Anwendung multikriterieller Optimierungsmethoden	14
II.1.5 Aggregation von Kritikalitätsindikatoren und methodische Einordnung	14
II.1.6 Szenarioanalysen und Bewertung von Transformationspfaden des Stromversorgungssystems	16
II.1.7 Bereitstellung von Modell- und Ergebnisdaten	17
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	17
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	17
II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	18
II.5 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	18
II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	19

Zusammenfassende Darstellung des Gesamtvorhabens

Projektbeteiligte

Das Gesamtvorhaben wurde in einem Konsortialverbund bearbeitet. Folgende Institutionen waren daran beteiligt:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (**DLR**)
Institut für Vernetzte Energiesysteme, Abteilung Energiesystemanalyse

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (**ISI**)
Competence Center Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme

GAMS Software GmbH

Universität Konstanz
Datenanalyse und Visualisierung (**VIS**)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (**BGR**)
Fachbereiche Geologie der mineralischen Rohstoffe und Deutsche Rohstoffagentur (DERA)

Ausgangslage

Aus Ex-Post-Analysen von Energieszenarien war bereits zu Beginn des Vorhabens bekannt, dass die Transformation des Energiesystems hin zu einer weitgehend auf erneuerbaren Energien basierenden Versorgung mit einem steigenden Bedarf an kritischen Rohstoffen einhergeht. In Energiesystemen mit hohen Anteilen fossiler Primärenergieträger entsteht der Rohstoffverbrauch überwiegend im laufenden Betrieb. Im Gegensatz dazu sind in zukünftigen Energiesystemen erhebliche Mengen an Rohstoffen, die von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft werden, in den Energietechnologien, wie Erzeugungsanlagen, Speichern und Netzinfrastruktur gebunden. Gleichzeitig gibt es für Energietechnologien mit dem gleichen Wirkungsprinzip unterschiedliche Technologievarianten, die sich in ihren Rohstoffbedarfen deutlich unterscheiden.

Zum Zeitpunkt des Projektstarts lagen Untersuchungen zu den Rohstoffbedarfen einzelner Energietechnologien sowie Analysen zum Rohstoffbedarf kostenminimierter Energieszenarien vor, die der Erstellung dieser nachgelagert waren. Ebenso existierten etablierte Verfahren zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen (d. h. des Risikos von Versorgungsengpässen), aber kein Ansatz, Rohstoffkritikalität auf der Ebene von Energietechnologien oder gar Energieszenarien zu quantifizieren. Entsprechend war die Berücksichtigung von Aspekten der Rohstoffkritikalität im Rahmen der Energiesystemoptimierung wissenschaftliches Neuland.

Darüber hinaus war bekannt, dass bei Erweiterungen etablierter Optimierungsmodelle für die Energiesystemanalyse (d. h. Prozessierung immer größerer Datenmengen) von Beginn an zwischen neuen Erkenntnissen und praktischer Lösbarkeit der Modelle abgewogen werden muss. Hieraus ergab sich ein Forschungsbedarf hinsichtlich der effizienten Bestimmung Pareto-optimaler Lösungen zwischen konkurrierenden Zielgrößen. Gleichzeitig war davon auszugehen, dass die numerischen Ergebnisse solcher Modelle weitaus komplexer als bei herkömmlichen Szenarioanalysen sein würden, wodurch das Ableiten von Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen entsprechend aufwendiger sein würde. Entsprechend ergab sich ein zusätzlicher Analysebedarf speziell für die direkten Ergebnisdaten der Energiesystemoptimierung, um die Auswirkungen der integrierten Betrachtung von Rohstoffverfügbarkeit, Rohstoffkritikalität und Versorgungssicherheit auf Transformationspfade der Energieversorgung quantitativ untersuchen zu können.

Zielsetzung

Ziel des Vorhabens war die Untersuchung, wie Transformationspfade des Energiesystems aussehen können, die Rohstoff-Risiken minimieren (bei gleichzeitiger Erfüllung der Treibhausgas-Emissionsziele) und wie Zielkonflikte zwischen geringen Systemkosten einerseits und geringen Versorgungsrisiken bei Rohstoffen andererseits quantifiziert werden können. Hierfür sollte ein verbundweiter Datenworkflow entwickelt werden, welche die Berücksichtigung von Rohstoffkritikalitäten in einem Energiesystemoptimierungsmodell ermöglicht. Hierzu sollten auf Basis empirischer und modellbasierter Daten zu Rohstoffbedarf- und Verfügbarkeit hochaggregierte

Indikatoren entwickelt und berechnet werden, um als weitere Zielgrößen neben den Systemkosten in Energiesystemoptimierungsmodelle integriert werden zu können. Im Gegensatz zu herkömmlichen Modellanwendungen sollte dies durch die Nutzung von Ansätzen der multikriteriellen Optimierung erreicht werden. Auf der Entwicklung und Implementierung effizienter mathematischer Methoden für die multikriterielle Optimierung lag ein Schwerpunkt des Vorhabens. Darüber hinaus sollte die Verwertbarkeit der Ergebnisse verbessert werden, indem ein Analyse- und Visualisierungswerkzeug entwickelt werden sollte, welches eine interaktive Darstellung komplexer Modellierungsergebnisse ermöglicht.

Methoden

Neben der zentralen Methode der multikriteriellen Optimierung musste insbesondere für die Bestimmung von Kritikalitätsindikatoren eine Reihe weiterer Methoden für die Daten-Bereitstellung und -Aufbereitung angewendet und zum Teil neu entwickelt werden. Zur Bestimmung globaler Rohstoffbedarfe unter Berücksichtigung von Recyclingpotentialen wurden für eine Auswahl an Rohstoffen Stoffflussmodelle entwickelt. Daneben mussten globale Rohstoffverfügbarkeiten durch Erweiterung und Auswertung umfangreicher Datenbanken zu Bergbau- und Rohstoffprojekten ermittelt und in die Zukunft projiziert werden. Zur Erstellung technologiespezifischer Kritikalitätsindikatoren musste weiterhin eine Methode zur Aggregation der Kritikalität von der Rohstoffebene auf die Technologieebene (und letztlich auf die Systemebene als zu optimierende Zielgröße) auf Basis von spezifischen Rohstoffbedarfsdaten und der Kritikalität der einzelnen Rohstoffe entwickelt werden.

Wesentliche Ergebnisse

Verknüpfung von Rohstoffkritikalitätsanalyse und Energiesystemmodellierung: Ein wesentliches wissenschaftliches Ergebnis des Vorhabens besteht in der erstmaligen durchgängigen Verknüpfung von Rohstoffkritikalitätsanalyse, Technologiebewertung und Gesamtsystemoptimierung innerhalb eines konsistenten Modellierungsansatzes. Dieser integriert unterschiedliche Indikatoren zur Beschreibung von Rohstoffkritikalitäten systematisch in die langfristige Energiesystemplanung. Hierzu wurden die Indikatoren für die Rohstoffkritikalität aus zwei Perspektiven entwickelt: marktbasiert K_{Econ} und geopolitisch K_{Geo} . Diese wurden so aufbereitet, dass sie unmittelbar in Energiesystemoptimierungsmodellen verwendet werden können.

Datengrundlagen und Kritikalitätsindikatoren für Energietechnologien: Im Rahmen des Vorhabens wurden umfangreiche Datengrundlagen zu Rohstoffbedarfen, Rohstoffverfügbarkeiten, Recyclingpotentialen und Versorgungsrisiken erstellt. Darüber hinaus wurde ein massenbezogenes Aggregationsverfahren entwickelt, um die rohstoffbezogene Kritikalität auf die Ebene von Energietechnologien bzw. Technologievarianten zu übertragen. Mit diesen Datengrundlagen können diese Technologien hinsichtlich ihrer spezifischen Kosten und spezifischen Rohstoffkritikalität K_{Econ} und K_{Geo} bewertet werden.

Multikriterielles Optimierungsverfahren für die Energiesystemanalyse: Das Modellierungsframework REMix¹ wurde um mehrere Verfahren zur multikriteriellen Optimierung erweitert². Über Anwendung des neu entwickelten Tools zur Optimierung mehrerer Zielgrößen in GAMS³ können die Methoden *Augmented Epsilon Constraint*, *Random Weighting* und *Sandwiching* zur Bestimmung von Kompromisslösungen zwischen konkurrierenden Zielgrößen auf langfristige Transformationspfade angewendet werden. Als effizienteste - weil parallelisierbare - Methode wurde hierfür vor allem *Augmented Epsilon Constraint* genutzt. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass der Rohstoffbedarf (und damit die Kritikalitätsindikatoren) z. T. deutlich von der Technologievariante (z. B. Art des PV-Moduls) abhängen, wurden für mehrere Technologieklassen in REMix verschiedene Technologievarianten ausdifferenziert.

Identifikation robuster Transformationspfade unter Berücksichtigung von Rohstoffrisiken: Die entwickelten Methoden wurden für ein kontinental-europäisches Stromversorgungssystem angewendet und mit *RE-Europe*⁴ eine REMix-Modellinstanz veröffentlicht, welche Analysen von Transformationspfaden unter Berücksichtigung von Rohstoffrisiken ermöglicht. Zur Ergebnisexploration wurde ein umfangreiches Framework zur visuellen Analyse

¹ <https://gitlab.com/dlr-ve/esy/remix/framework>

² <https://gitlab.com/dlr-ve/esy/remix/framework/-/tags/resume%2Fmoo-method>

³ https://www.gams.com/54/docs/T_LIBINCLUDE_MOO.html

⁴ <https://gitlab.com/dlr-ve/esy/remix/projects/re-europe/-/tags/resume%2Fmulti-criteria-criticality>

aller Ergebnisse entlang der verbundweiten Datenaufbereitung bereitgestellt⁵. Die Ergebnisse zeigen, dass rohstoffbezogene Risiken die optimale Technologieauswahl und die Struktur zukünftiger Energiesysteme beeinflussen können. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass sich Versorgungsrisiken und Rohstoffkritikalität teilweise deutlich reduzieren lassen, ohne dass hierdurch erhebliche zusätzliche Systemkosten entstehen.

Schlussfolgerung

Mit dem integrierten Ansatz zur Berücksichtigung von Rohstoffkritikalität in der Energiesystemplanung wurde eine wesentliche Forschungslücke geschlossen, da Rohstoffaspekte von Transformationsstrategien bislang überwiegend nachgelagert bewertet wurden. Die Ergebnisse des Vorhabens liefern neue wissenschaftliche Grundlagen (sowohl datenseitig als auch methodisch) für die Entwicklung von Transformationspfaden unter Berücksichtigung von Versorgungssicherheit, Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft. Sie ermöglichen es nun, geopolitische und marktbasierte Rohstoffrisiken schon unmittelbar bei der Erstellung langfristiger Transformationspfade der Energiewende zu berücksichtigen.

Die entwickelten Methoden und Datengrundlagen können künftig zur Unterstützung strategischer Entscheidungen eingesetzt werden und dazu beitragen, die Resilienz zukünftiger Energiesysteme gegenüber Rohstoffversorgungsrisiken zu erhöhen.

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Zu Projektstart ist es in der Energiesystemanalyse üblich, Rohstoffaspekte von Energieszenarien ex-post zu untersuchen. Das heißt, dass Energieszenarien, die beispielsweise auf einer Systemkostenminimierung basieren, ausgehend von vorberechneten Erzeugungs- und Speicherkapazitäten und unter Nutzung von Life-Cycle-Inventory (LCI)-Datenbanken hinsichtlich des sich ergebenden Rohstoffbedarfs bewertet werden. Diese Vorgehensweise ignoriert allerdings die Möglichkeit weniger rohstoffintensive Transformationspfade zu identifizieren und genauer zu untersuchen. Hierfür ist eine so genannte modellendogene Optimierung unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Kosten- und Rohstoffverfügbarkeits-Metriken notwendig. Dem sich daraus ergebenden Ziel der Integration von Rohstoffaspekten mittels multikriterieller Optimierung von Energieszenarien widmete sich das Teilvorhaben des DLR: „Modellierung und Analyse von Energiewendepfaden unter Berücksichtigung von Rohstoffkritikalitäten“. Hierbei stand die Erweiterung des Energiesystemoptimierungsmodells REMix im Mittelpunkt.

Das Teilvorhaben des DLR umfasste insbesondere folgende Aufgaben: **i)** die Entwicklung und Parametrierung geeigneter REMix-Modellinstanzen, **ii)** die Integration neu entwickelter Indikatoren und modellendogene Optimierung von Rohstoffkritikalität in diesen REMix-Modellinstanzen, **iii)** das Nutzen und Testen neuer Methoden zur multikriteriellen Optimierung hierfür, **iv)** die Durchführung von Modellrechnungen für Transformationspfade des Energieversorgungssystems und anschließende Analyse von Trade-offs zwischen Systemkosten und Rohstoffkritikalität, u.a. unter Nutzung neu entwickelter Instrumente der Visualisierungsanalytik, sowie **v)** die Ableitung und Diskussion von Handlungsoptionen für Politik, Energiewirtschaft und weitere Stakeholder.

Als zentrale Aufgabe des Vorhabens ist die Beantwortung folgender Frage zu sehen:

Wie sehen Transformationspfade der Energieversorgung aus, wenn eine integrierte Systemausbauplanung mit einem Energiesystemmodell unter gleichzeitiger Minimierung von Rohstoffkritikalitäten stattfindet?

I.2 Voraussetzungen

RESUME wurde in Zusammenarbeit der im Abschnitt *Projektbeteiligte* genannten Institutionen und Unternehmen durchgeführt. Diese brachten komplementäre Kompetenzen in den Bereichen Rohstoffkritikalitätsanalyse (BGR),

⁵ <https://resume.dbvis.de>

Stoffflussanalyse (ISI), mathematischer Optimierung (GAMS) und Visualisierungsanalytik (VIS) in das Verbundvorhaben mit ein.

Beim DLR lagen umfangreiche Ergebnisse und Know-How aus Vorarbeiten mit dem Energiesystemmodell REMix vor. Dazu zählten unter anderem Erfahrungen in der Modellierung von großskaligen Energieversorgungssystemen und bei der Verarbeitung großer Datenmengen. Besonders hervorzuheben sind in dieser Hinsicht die Nutzbarkeit von Rechenclustern mit ausreichend großem Arbeitsspeicher (512 GB), sowie die Kenntnis, Modellrechenzeiten beherrschbar zu halten, da insbesondere letztere mit der Anzahl Pareto-optimaler Lösungen skalieren. Darüber hinaus konnten frei verfügbare Datensätze zur Modellierung von Szenarien des kontinentaleuropäischen Stromversorgungssystems, sowie interne Datenbanken des Rohstoffbedarfs verschiedener Energietechnologien und -Szenarien genutzt werden. Dementsprechend waren Ex-Post Analysen von Rohstoffbedarfen durchführbar. RESUME konnte also an bestehende Arbeiten anknüpfen, diese aber auch entscheidend erweitern.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtvorhaben war in sechs Arbeitspakete untergliedert: **AP1** Verfügbarkeit, Bedarf und Recycling von Rohstoffen, **AP2** Methodenentwicklung, **AP3** Optimierung von Energiewendepfaden mit Rohstoffkritikalität, **AP4** Visuelle Analytik für verbesserte Entscheidungsfindung, **AP5** Bewertung von Handlungsoptionen und **AP6** Projektmanagement und Dissemination. Die Arbeitspakete 1 und 2 waren darüber hinaus in Unterarbeitspakete aufgeteilt. Die vom DLR in diesen Arbeitspaketen übernommen Aufgaben und der zeitliche Verlauf von deren Bearbeitung ist im Folgenden pro Arbeitspaket beschrieben.

I.3.1 Verfügbarkeit, Bedarf und Recycling von Rohstoffen

In **AP1** wurde in engem Austausch mit den Projektbeteiligten ISI (Federführung in Unterarbeitspaket „1a Entwicklung des Rohstoffverfügbarkeits- und Versorgungssicherheitsindex“ und „1c Stoffflussmodellierung für ausgewählte Rohstoffe“) und BGR (Federführung in Unterarbeitspaket „1b Erstellung der Datengrundlage“) die Entwicklung von zwei Rohstoffkritikalitätsindizes umgesetzt. Hierfür und zur Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses über die Anforderungen an die Indexeigenschaften, um eine wirksame Integration in eine multikriterielle Energiesystemoptimierung zu erreichen, initiierte das DLR die Erstellung eines projektinternen Whitepapers. Dieses beschreibt mehrere Möglichkeiten zur Aggregation von Kritikalitätsindikatoren ausgehend von bestehenden Rohstoffkritikalitätsbewertungen hin zu einer Kritikalitätsmetrik auf Ebene von Energietechnologien. Diese Überführung der Kritikalität von der Rohstoffebene auf die Technologieebene stellte eine zentrale methodische Herausforderung des Vorhabens dar. Zur vorläufigen Festlegung der zu betrachtenden Systemgrenzen wurden Listen der in RESUME zu betrachtenden Rohstoffe und Energietechnologien erstellt, wofür u.a. ein intensiver Austausch mit ISI und BGR notwendig war. Hierfür fand im November 2022 ein projektinterner Workshop in Karlsruhe statt. Beim virtuellen Projekttreffen im April 2023 wurde anschließend die Konzeption von zwei Kritikalitätsindizes vereinbart. Für die definierten Rohstoffe und Energietechnologien sollten jeweils ein marktbasierter (K_{Econ}) und ein geopolitischer (K_{Geo}) bestimmt werden. Die finale Methodik zu deren Ermittlung wurde abschließend beim Projekttreffen im November 2023 in Berlin vereinbart. Das DLR stellte hierfür im Projektverlauf einen Teil der notwendigen Datengrundlage zur Bestimmung der Kritikalität auf Technologieebene bereit. Hierzu zählten Daten zum spezifischen Rohstoffbedarf von Energietechnologien und zur zukünftigen Bedarfsentwicklung. Darüber hinaus übernahm das DLR die Aufgabe eine weitere Ausdifferenzierung von Energietechnologien durchzuführen. Grund hierfür war, dass die in der Energiesystemmodellierung übliche Unterscheidung basierend auf Primärenergieträgern, also z.B. Windkraft oder Solarstrahlung, für eine modellendogene, rohstoffbasierte Betrachtung nicht ausreichend erschien. So unterscheiden sich kommerziell verfügbare Energietechnologien trotz gleichem Primärenergieträger zum Teil erheblich in Bezug auf die Materialzusammensetzung, z.B. Windkraftanlagen mit und ohne Permanentmagneten im Generator.

Im weiteren Projektverlauf unterstützte das DLR in AP1 insbesondere die Materialflussanalysen durch die Bereitstellung von Ergebnissen aus früheren Studien zum globalen Rohstoffbedarf von Energie- und Verkehrstechnologien.

Im letzten Projektjahr, nach dem Vorliegen erster Ergebnisse aus der Energiesystemmodellierung, wurden Möglichkeiten zur Anpassung der Kritikalitätsindizes diskutiert. Hierzu zählte unter anderem die Berücksichtigung der Materialbedarfe für Bau und insbesondere Betrieb thermischer Kraftwerke. Um den Fokus auf Schlüsseltechnologien der Energiewende zu behalten, wurde entschieden, dass Ausphasen fossiler Kraftwerke über eine CO₂-Nebenbedingung im Energiesystemoptimierungsmodell zu forcieren und installierte Kapazitäten von Kernkraftwerken modellexogen fest vorzugeben. Damit konzentrierten sich die Analysen auf erneuerbare Stromerzeugungs- und Speichertechnologien. Mit Blick auf AP5 wurde zur Sicherstellung robuster Ergebnisse entschieden die entwickelte, massenbasierte Aggregationsmethodik zur Ermittlung der Kritikalität auf Technologieebene mit einer alternativen, kostenbasierten Aggregationsmethodik zu benchmarken sowie, eine vergleichende Analyse mit einer erweiterten Rohstoffliste im Rahmen der wissenschaftlichen Ergebnisverwertung durchzuführen (siehe auch I.3.5).

I.3.2 Methodenentwicklung

AP2 umfasste die zusätzliche, modellendogene Abbildung der Rohstoffengpass-bedingten Kritikalität als Zielfunktionswert in REMix. Es wurde in den Unterarbeitspaketen „2a Modellendogene Abbildung von Rohstoffkritikalität“ und „2c Langfristige Optimalität“ federführend vom DLR umgesetzt. Wesentliche Aufgabe war das Zusammenführen und Harmonisieren typischer Daten der Energiesystemoptimierung mit REMix und der Kritikalitätsindikatoren einerseits sowie die Implementierung und das Testen von Methoden der multikriteriellen Optimierung andererseits, um letztlich langfristig robuste Transformationspfade für Szenarien der Energieversorgung in AP3 ermitteln zu können.

Eine wesentliche Herausforderung in der frühen Projektphase war die zunächst nicht erfolgreiche Besetzung der für die REMix-Modellentwicklung vorgesehenen Doktorandenstelle. Diese konnte erst im Juni 2023 besetzt werden, wodurch der zeitliche Verzug gegenüber der ursprünglichen Planung zunächst begrenzt werden sollte. Letztlich konnte der Personalengpass aber erst im März 2024 durch eine Neueinstellung von ausreichend qualifiziertem Personal behoben werden. Dadurch kam es zu Verzögerungen in den modellbezogenen Arbeiten. Als Gegenmaßnahme wurde eine Masterarbeit konzipiert und durchgeführt, in deren Rahmen eine erste REMix-Modellinstanz so parametrisiert wurde, dass zunächst Materialbedarfe und später -Kritikalitäten von Batteriespeichertechnologien prototypisch mit Hilfe von bereits in REMix implementierten Ansätzen zur Mehrzieloptimierung minimiert werden konnten. Die Arbeit nutzte keine Daten der Verbundpartner, ermöglichte aber einen ersten Proof-of-Concept und wurde im November 2023 abgeschlossen [2]. Sie bildete mit der hierfür erstellten REMix-Modellinstanz *RE-Europe* über den weiteren Projektverlauf die Grundlage für die Modellentwicklung, sowie für eine Konferenzpublikation beim Symposium Energieinnovation 2024 in Graz [4]. Im weiteren Projektverlauf wurde damit begonnen die von GAMS entwickelte Methode zur Mehrzieloptimierung in Form des Moduls *moogms* in *RE-Europe* zu integrieren. Hierfür wurde, wie auch für die inhaltliche Vorbereitung des Workshops „Kritische Ressourcen im Energiesystem-Design. Wie modellieren wir das?“ Ende Januar 2024 in Stuttgart, erfahrenes wissenschaftliches Personal eingesetzt, das aus anderen Forschungsprojekten des DLR temporär abgezogen wurde. Nach Behebung des Personalengpasses konnten die Implementierungsarbeiten beendet werden, sodass beim Projekttreffen im Mai 2024 in Konstanz erste Modellergebnisse diskutiert werden konnten, die sowohl auf Eingangsdaten der Projektpartner BGR und ISI sowie auf der von GAMS entwickelten Methoden zur multikriteriellen Optimierung bzw. Mehrzieloptimierung beruhen.

Im zweiten Halbjahr 2024 erfolgten umfangreiche Tests zur Modelllaufzeit, insbesondere mit Blick auf die Skalierbarkeit auf größere geografische Untersuchungsräume bei gleichzeitiger Pfadausbauoptimierung und Mehrzieloptimierung unter gleichzeitiger Nutzung erweiterter Kritikalitäts- und Szenariodaten. Hierbei zeigte sich eine zentrale Herausforderung: Neben dem Trade-off zwischen Modelllaufzeit und angestrebtem Modellumfang erwies sich insbesondere die Gewährleistung numerischer Stabilität als deutlich aufwendiger als ursprünglich erwartet. Grund hierfür war, dass nur bei Modellinstanzen von anwendungsrelevanter Größe numerische Probleme im Verlauf der verhältnismäßig langen Modelldurchläufe auftraten, wodurch sich die Evaluation unterschiedlicher Problembehebungsstrategien als sehr zeitintensiv herausstellte. Zusammen mit GAMS wurden diese Strategien diskutiert und schrittweise auf *RE-Europe* angewendet, z.B. durch neue Parametrisierungsmöglichkeiten für die von GAMS entwickelte MOO-Methode (z.B. über die Argumente „*bounds_rel_tol*“, „*equality_rel_tol*“, „*fallback_solver*“, „*parallel_jobs*“) oder durch die Variationen des Modellumfangs, des Ausbauhorizonts der Pfadoptimierung und der

Anzahl oder Reihenfolge der optimierten Zielfunktionen. Im Ergebnis wurde eine belastbare Balance zwischen wissenschaftlichem Anspruch des Modellumfangs, numerischer Stabilität und praktikablen Rechenzeiten erreicht, allerdings vor allem wenn lediglich zweidimensionale Pareto-Fronten exploriert wurden.

I.3.3 Optimierung von Energiewendepfaden mit Rohstoffkritikalität

AP3 zielte auf die Anwendung der entwickelten Methodik zur Ermittlung von Energiewendepfaden, die sowohl aus gesamtwirtschaftlicher als auch aus Sicht der Rohstoffversorgungssicherheit vorteilhaft sind. Technisch übersetzte sich dies zu Beginn der Bearbeitungszeit in die Anforderung einer integralen Pfadausbauoptimierung von Kraftwerks- und Speicherkapazitäten über mehrere Stützjahre hinweg bei gleichzeitiger Berücksichtigung multipler Zielfunktionen. Das bedeute gleichzeitig eine Fokussierung auf den europäischen Untersuchungsraum⁶ und ein bewusstes Ausklammern der Rohstoffkritikalität des Netzausbaus, wofür räumlich höher aufgelöste und deutlich schwieriger zu lösende REMix-Modellinstanzen gelöst werden hätten müssen. Diese Entscheidung beruhte unter anderem auf den Erfahrungen und Ergebnissen einer in diesem Kontext durchgeführten studentischen Abschlussarbeit, die im Juni 2024 abgeschlossen wurde [8].

Aufgrund der in AP2 beobachteten Herausforderungen in Bezug auf die Gewährleistung numerischer Stabilität wurde außerdem im zweiten Halbjahr 2024 entschieden, die weiteren Arbeiten in AP3 auf den Stromsektor zu fokussieren. In Bezug auf die Schlüsseltechnologien der Energiewende wurden damit die Datenerhebung in AP1 und die Modellparametrierung für Elektrolyse-Technologien nicht weiterverfolgt.

Ein wichtiger Meilenstein war die Open-Source-Veröffentlichung der REMix-Modellinstanz *RE-Europe* Anfang 2024.⁷ Im weiteren Projektverlauf wurde diese erweitert, für die Pfadausbauoptimierung parametrisiert und für multikriterielle Modellrechnungen genutzt. Im Zentrum standen erneuerbare Stromerzeugungstechnologien und Speichertechnologien, ergänzt durch die oben beschriebenen Annahmen zum Umgang mit thermischen Kraftwerkskapazitäten. Die Szenariodaten für die Entwicklung von 2025 bis 2050 wurden erweitert und aktualisiert. Sie umfassten unter anderem CAPEX und OPEX der Sub-Technologien, CO₂-Budgets, sowie eine Anpassung der Ausbaupotenziale erneuerbarer Energien und Strombedarfe im Vergleich zur Originaldatenquelle⁸. Ein wesentlicher Meilenstein war Ende 2024 erreicht, als erstmals die vollständige angestrebte Datenverarbeitungskette des Verbundvorhabens RESUME erfolgreich ausgeführt werden konnte. D.h. basierend auf Daten von Rohstoffverfügbarkeit und Rohstoffbedarf wurde ein Kritikalitätsindex von der Rohstoffebene auf Technologie- bzw. Sub-Technologieebene aggregiert, eine multikriterielle Optimierung von Transformationspfaden des Stromversorgungssystems mit *RE-Europe* umgesetzt und die Ergebnisse mit Hilfe des in AP4 entwickelten Dashboards visualisiert und ausgewertet. Diese vollständige Datenverarbeitungskette wurde zunächst mit reduzierten bzw. Teilmodellinstanzen getestet. Exemplarische Ergebnisse zeigten Substitutionseffekte bei PV-Sub-Technologien unter Berücksichtigung von Rohstoffkritikalitäten. Ein wesentlicher wissenschaftlicher Meilenstein war in diesem Zusammenhang eine Fallstudie für Transformationspfade des deutschen Stromversorgungssystems. Sie betrachtete zweidimensionale Pareto-optimale Lösungen mit den Zielfunktionen Systemkosten und geopolitische Kritikalität. Die Ergebnisse wurden als Fachaufsatz und Konferenzbeitrag bei der MCO 2025 Conference in Metz vorgestellt [12]. Anschließend wurden der Untersuchungsraum der Fallstudie um Frankreich, Belgien und Luxemburg erweitert und die entsprechenden Ergebnisse bei der EURO 2025 in Leeds präsentiert [12].

In der Abschlussphase stand die Durchführung multikriterieller Modellrechnungen und Szenarioanalysen für Ausbaupfade des kontinental-europäischen Stromversorgungssystems von 2025 bis 2050 im Fokus. Die Ergebnisse zeigten, dass bei Rohstoffengpass bedingter Differenzierung von Technologien mit gleicher Primärenergiequelle häufig eine einzelne Sub-Technologie den Technologiemix dominiert. Entlang der Pareto-Front von Systemkosten und Rohstoffkritikalität wurden Technologie-Switches vor allem zwischen Technologien mit unterschiedlichen Primärenergiequellen beobachtet. Bei der Auswertung dreidimensionaler Pareto-Optima mit den Zielfunktionen Systemkosten, geopolitische Kritikalität und marktbedingte Kritikalität konnten darüber hinaus signifikante Korrelationen der beiden Kritikalitätsindikatoren beobachtet werden. Die anschließende Analyse dieses Effekts

⁶ Dies stellte im Ergebnis einen Kompromiss zu einem aus Rohstoffperspektive präferierten, aber zu umfangreichen globalen Modellierungsansatz und dem auf Deutschland zentrierten Untersuchungsfokus aus der initialen Projektplanung dar.

⁷ <https://gitlab.com/dlr-ve/esy/remix/projects/re-europe>

⁸ <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.175>

zeigte, dass im verwendeten Aggregationsansatz die massebasierten Gewichtungsfaktoren bei der Überführung der Kritikalitäten von der Rohstoff- auf die Technologieebene einen dominierenden Einfluss hatten. Die inhaltlichen Analysen wurden deshalb im weiteren Verlauf auf zweidimensionale Lösungsräume begrenzt, dafür aber um eine Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Aggregationsmethoden für die technologiespezifische Kritikalität ergänzt. Hierbei wurden jeweils Pareto-Optima aus Systemkosten und einem der Indizes zur Berücksichtigung der Rohstoffengpass bedingten (bzw. Preisrisiko bedingten) Systemkritikalität ausgewertet.

Unter Berücksichtigung des Feedbacks aus dem finalen Stakeholder-Workshop „Rohstoff-Risiken bei der Transformation des Stromversorgungs-Systems“ Anfang 2026 in Berlin wurden die Modellrechnungen abgeschlossen. Die ausführliche Dokumentation der gesamten Methodik und der wesentlichen Ergebnisse des Gesamtvorhabens sind Teil eines umfangreichen Fachaufsatzes mit dem Arbeitstitel „Trade-offs between system cost and raw material risks in climate-neutral scenarios“, der im Rahmen des Verwertungsplans in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift frei zugänglich veröffentlicht wird [18].

I.3.4 Visuelle Analytik für verbesserte Entscheidungsfindung

AP4 hatte die Entwicklung eines interaktiven Frameworks zur Visualisierungsanalyse zum Ziel. Dieses sollte die explorative Analyse multikriterieller Optimierungsergebnisse ermöglichen und Entscheidungsprozesse in Politik, Wissenschaft und Energiewirtschaft unterstützen. Im ersten Projektjahr trug das DLR wesentlich zur Erstellung eines Lastenhefts für die Front-End-Entwicklung bei. Im weiteren Projektverlauf stimmte es Datenformate und Workflows mit der Universität Konstanz ab und stellte neben den Rohstoffbedarfsdaten regelmäßig Ergebnisdaten bereit. Das DLR testete die Beta-Version des Frameworks zur Visualisierungsanalyse intensiv und gab mehrfach Feedback hinsichtlich notwendiger Bug-Fixes und sinnvoller Feature-Requests. Hierfür wurden weitere Meta- und Ergebnisdaten aus der Datenprozessierungskette identifiziert und bereitgestellt. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass als Zielgruppe des erstellten Frameworks vor allem Fachexpertinnen und Fachexperten gesehen werden können. Ihnen steht ein Werkzeug zur einfacheren Vorbereitung von Entscheidungsvorlagen für Entscheidungsträger zur Verfügung.

I.3.5 Bewertung von Handlungsoptionen

In **AP5** sollten auf Grundlage der modellierten Energiewendepfade und des Frameworks zur Visualisierungsanalyse politische und strategische Handlungsoptionen abgeleitet werden. Das DLR führte hierzu unter anderem den Stakeholder-Workshop „Rohstoff-Risiken bei der Transformation des Stromversorgungs-Systems“ am 29. Januar 2026 in Berlin durch. Zur zielgruppengerechten Aufbereitung der Inhalte wurden im Vorhinein Interviews mit interessierten Teilnehmenden geführt. Ergänzend wurde eine Meta-Analyse von Policy-Studien zur Rohstoffkritikalität und zu Handlungsoptionen im Umgang mit Rohstoffrisiken durchgeführt. Ein wichtiger Beitrag der RESUME-Projektergebnisse zum Workshop war die neue Möglichkeit, eine Absenkung der Rohstoffkritikalität in Form von zusätzlichen Kosten quantifizieren zu können. Ein wesentliches Ergebnis des Workshops für den Abschluss von RESUME war das Bedürfnis zur Priorisierung kritischer Materialien basierend auf den Projektergebnissen. Hierfür wurde kurzfristig eine Erweiterung der initialen Rohstoffliste aus AP1 umgesetzt und somit die Ermittlung des geopolitischen Kritikalitätsindikators $K_{Geo-XXL}$ unter Berücksichtigung so genannter „Bulk Materials“ wie Eisen und Aluminium ermöglicht. Dieser Sachverhalt wird in Abschnitt II.1.6 genauer beleuchtet.

I.3.6 Projektmanagement und Dissemination

Im Rahmen von **AP6** übernahm das DLR als Koordinator das übergeordnete Projektmanagement des Verbundvorhabens, die Koordination und inhaltliche Organisation der Konsortialtreffen sowie die Koordination von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen (siehe auch II.5), sowie der Open-Source-Veröffentlichung von *RE-Europe* und weitere Dissemination. Im Juni 2023 wurden in diesem Sinne die Projekteinhalte und Vorarbeiten beim Treffen der Forschungsnetzwerke Energie in Berlin vorgestellt, sowie ein Jahr später bei den Workshops der European Energy Research Alliance in Kaunas [3]. Weitere wichtige Meilensteine waren die Organisation des Workshops „Kritische Ressourcen im Energiesystem-Design. Wie modellieren wir das?“ Ende

Januar 2024 in Stuttgart, sowie die Unterstützung und inhaltliche Mitorganisation des Stakeholder-Workshops „How Visual Analytics can support decision-making based on Energy Systems Analysis“ im März 2025 in Konstanz. Dieser Workshop wurde vom Projektpartner VIS federführend organisiert und diente der Diskussion, wie visuelle Analysewerkzeuge die Entscheidungsfindung auf Basis komplexer Energiesystemanalysen unterstützen können. Organisation und Durchführung des Abschlussworkshops „Rohstoff-Risiken bei der Transformation des Stromversorgungs-Systems“ im Januar 2026 in Berlin oblagen erneut dem DLR.

Die Durchführung des Vorhabens war durch organisatorische und technische Herausforderungen geprägt. Hervorzuheben sind die oben beschriebenen Verzögerungen durch Personalengpässe, sowie die unerwarteten methodischen Herausforderungen insbesondere in Bezug auf die numerische Stabilität der multikriteriellen Optimierung bei anwendungsrelevanten Energiesystemoptimierungsmodellen. Der Projektplan wurde daher im Zuge einer kostenneutralen Verlängerung angepasst und die geplante Laufzeit bis einschließlich Februar 2026 verlängert. Durch die kostenneutrale Verlängerung konnten die wesentlichen Projektziele innerhalb des bewilligten Kostenrahmens erreicht werden. Die im Projektverlauf vorgenommenen methodischen Anpassungen waren notwendig, um nachvollziehbare und wissenschaftlich belastbare Ergebnisse zu erzielen.

I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

I.4.1 Verfahren und Schutzrechte

Für die Durchführung des Vorhabens wurden etablierte Verfahren und Softwarewerkzeuge zur Modellierung, Optimierung und Simulation elektrischer Energiesysteme eingesetzt.

Die Modellierung am DLR erfolgte mit der Modelliersprache GAMS. Zum Lösen der formulierten Optimierungsmodelle kamen die Solver Gurobi, MOSEK und CPLEX zum Einsatz. Die verwendeten Werkzeuge implementieren etablierte Verfahren der mathematischen Optimierung und Energiesystemanalyse, insbesondere lineare Optimierungsverfahren, wie das Innere-Punkte-Verfahren oder eine Mehrzieloptimierung auf Basis der Epsilon-Constraint-Methode.

I.4.2 Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste

Das Literaturverzeichnis von Schlosser et al. [18] führt die wichtigsten wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus den Bereichen Energiesystem-Optimierung, multikriterielle Optimierung, sowie zur Kritikalitätsbewertung auf Rohstoff- und Technologieebene auf. Hinzu kommen ausgewählte technische Berichte, wie jener von Gervais et al. (2022)⁹. Die Literaturrecherche erfolgte unter Nutzung üblicher wissenschaftlicher Informationsdienste. Hierzu zählen in geringem Maße beispielsweise die Lebenszyklus-Inventardatenbank Ecoinvent¹⁰, welche als Grundlage für die Ermittlung der technologispezifischen Bedarfe an Massenrohstoffen genutzt wurde oder die Annual Technology Baseline des National Laboratory of the Rockies¹¹ als eine Quelle für techno-ökonomische Daten.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In RESUME wurden jährliche Stakeholder-Workshops durchgeführt, um einen regelmäßigen fachlicher Austausch mit unterschiedlichen Akteuren. Dabei wurden im ersten unter Federführung des DLR veranstalteten, methodisch ausgerichteten Workshop „Kritische Ressourcen im Energiesystem-Design. Wie modellieren wir das?“ Anforderungen an die Modellentwicklung diskutiert und Feedback zur Ausgestaltung der Kritikalitätsbewertung auf Technologieebene eingeholt. Verbunden wurde dies mit einer Hands-on Einführung in die multikriterielle Optimierung mit REMix. Teilnehmende waren Expert:innen aus der Wissenschaft. Ähnliches galt für den von der Universität Konstanz ausgerichteten Workshop, welcher dazu diente einen Austausch zwischen unterschiedlichen Forschungsdisziplinen hinsichtlich der Visualisierung und Analyse komplexer Daten zu ermöglichen. Mit dem dritten

⁹ <https://dx.doi.org/10.24406/publica-427>

¹⁰ <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

¹¹ <https://atb.nlr.gov/>

Workshop „Rohstoff-Risiken bei der Transformation des Stromversorgungs-Systems“ wurden abschließend insbesondere eine Einordnung der Ergebnisse in aktuelle energiepolitische Fragestellungen sowie die Identifikation praxisrelevanter Anwendungsfälle angestrebt. Das Spektrum der Teilnehmenden umfasste Vertreterinnen und Vertreter unterschiedlichster Interessenverbände, Rohstoff verarbeitende Unternehmen und Mitarbeitende aus der Bundesministerialverwaltung, sowie den Büroleiter eines Mitglieds des Bundestags.

Von besonderer Bedeutung für die wissenschaftliche Bearbeitung des Vorhabens war der fachliche Austausch mit den Forschungsgruppen von Prof. Heidi Heinrichs, Prof. Valentin Bertsch, sowie Prof. Christoph Helbig. Zusammen mit den Projektbeteiligten des vom BMW geförderten Vorhabens SOUVERÄN und des ERC-geförderten Forschungsprojekts MATERIALIZE wurde im Rahmen der Fortschreibung des Verwertungsplans der Workshop „Integration von Supply-Risk der Energiewende in Energiesystemmodelle“ beim Jahrestreffen des Forschungsnetzwerks Energiesystemanalyse vom 28.-29.04.2026 in Berlin durchgeführt.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung

Als Überblick stellt Tabelle 1 die Arbeitsziele und erreichten Ergebnisse einander gegenüber. In den folgenden Unterkapiteln wird auf die damit verbundenen Arbeitsschwerpunkte des DLR eingegangen und die erreichten Ergebnisse im Detail vorgestellt und diskutiert. Weiterführende Informationen können den jeweilig referenzierten wissenschaftlichen Fachpublikationen entnommen werden.

Tabelle 1: Arbeitsziele und erreichtes Ergebnis.

Arbeitsziel	Ergebnis
Verfügbarkeiten, Recyclingmöglichkeiten und Versorgungssicherheit kritischer Rohstoffe	Umfassende Datenbank zu Rohstoffbedarf und -angebot erstellt
Effiziente Ermittlung von Kompromisslösungen	MOO-Methode implementiert und zur Generierung von Pareto-optimalen Lösungen eingesetzt
Optimale Transformationspfade aus wirtschaftlicher und rohstoffkritischer Sicht	Szenarioanalysen durchgeführt und wissenschaftlicher Verwertung zugeführt
Visualisierung für Entscheidungsträger	Entwicklung des Frameworks zur Visualisierungsanalyse unterstützt und getestet
Handlungsoptionen für Politik	Erreicht – Meta-Analyse von Policy-Studien und Workshop zur Diskussion von Handlungsoptionen durchgeführt

II.1.1 Modellendogene Abbildung von Rohstoffkritikalitäten in REMix

In der weiterentwickelten Version des REMix Frameworks² erfolgt die Modellierung von Rohstoffkritikalitäten grundsätzlich einer ähnlichen Logik wie die Abbildung von Systemkosten: Dem Zubau und dem Betrieb von Technologien können „Kritikalitäts-Kosten“ analog zu den klassischen Investitionskosten zugeordnet werden. So können Systemkonfiguration einschließlich Betriebsstrategie ermittelt werden, deren aufsummierte Kritikalitäts-Kosten minimal sind. Um diesen Zweck zu erfüllen, müssen Kritikalitäts-Kosten *pro funktioneller Einheit* angegeben sein, z.B. pro MW installierter Leistung oder pro kWh Energieinhalt.¹² Zwar ist ebenfalls analog zu den klassischen Systemkosten die Berücksichtigung einer Art „Betriebs-Kritikalität“ durch den Einsatz unterschiedlicher Technologien grundsätzlich möglich; aus Sicht der Modellanwendung ist hierfür allerdings die Entwicklung neuer methodischer Ansätze erforderlich, um die Kritikalität von Energieträgern mit der in RESUME entwickelten Methodik zur Ermittlung der Kritikalität auf Technologieebene zu kombinieren. Dementsprechend fokussiert sich die Anwendung des weiterentwickelten REMix Modellierungsframeworks mit *RE-Europe* auf die Minimierung der

¹² Zu Projektbeginn bekannte Ansätze aus der wissenschaftlichen Literatur zur Bestimmung von „Kritikalität“ für den Neubau von Technologien beschränken sich im Wesentlichen auf die Angabe *dimensionsloser* Werte für die Kritikalität. Sie sind wegen des fehlenden Bezugs zu einer funktionellen Einheit daher für die modellendogene Abbildung von Rohstoffkritikalitäten in REMix ungeeignet.

Kritikalität, die durch Herstellung bzw. den Bau von Technologien bedingt ist. Diese „Investitions-Kritikalität“ ist insbesondere bei Schlüsseltechnologien der Energiewende entscheidend, wohingegen die „Betriebs-Kritikalität“, die sich aus der Energieträgerumwandlung ergibt, vornehmlich fossile und nukleare Brennstoffe beträfe und damit den Einsatz thermischer Kraftwerke. Der Fehler, der sich durch die Vernachlässigung der „Betriebs-Kritikalität“ ergibt, wird durch weitere Festlegungen in *RE-Europe* gering gehalten: Es werden Obergrenzen für kumulierte CO₂-Emissionen für die zu optimierenden Transformationspfade sowie die installierten Leistungen der thermischen Kraftwerke im Zeitverlauf bis 2045 vorgegeben (Kernkraft) bzw. so limitiert, dass kein weiterer Ausbau über die heute installierten Erzeugungskapazitäten hinaus möglich ist (Kohle, Gas). Der Freiheitsgrad zur Variation des Betriebs thermischer Kraftwerke ist so bereits eingeschränkt und diese in den verschiedenen Pareto-optimalen Systemkonfigurationen dementsprechend gering. Damit ist der Bedarf an Energieträgern und deren Kritikalität in allen Pareto-Lösungen ähnlich.

II.1.2 Aufbau, Erweiterung und Open-Source-Bereitstellung der REMix-Modellinstanz RE-Europe

Die REMix-Modellinstanz *RE-Europe* bildet die zentrale Grundlage für die Szenarioanalysen und Bewertung von Transformationspfaden des Stromversorgungssystems unter Berücksichtigung von Rohstoffkritikalitäten. Sie entsteht durch die Kombination des oben beschriebenen, weiterentwickelten Modellierungsframeworks REMix² mit drei wesentlichen Datenquellen: i) Basisdaten für ein räumlich aufgelöstes Energiesystem-Optimierungsmodell basierend auf frei verfügbaren Daten¹³ angepasst zur Nutzung mit REMix¹⁴, ii) Daten der technologiespezifischen Rohstoffkritikalität (siehe II.1.5) und iii) techno-ökonomische und Szenario-Daten zur Modellierung von Ausbaupfaden für erneuerbare Stromerzeugungsanlagen und Speicher, welche nach Sub-Technologien differenziert werden¹⁵. Zu letzteren zählen insbesondere weiterführende Annahmen zu zentralen Treibern, wie der Entwicklung des Strombedarfs, der Betriebs- und Investitionskosten inklusive der Brennstoffkosten sowie ansetzbarer Treibhausgasemissionsgrenzen für den Stromsektor und installierten Kernkraftwerkskapazitäten für den betrachteten Zeithorizont 2025-2030-2040-2050, sowie der Ausbaupotentiale für erneuerbare Stromerzeugungsanlagen. Tabelle 2 fasst die Eigenschaften der REMix-Modellinstanz *RE-Europe*⁴ in einem Steckbrief zusammen.

Tabelle 2: Modellsteckbrief der REMix-Modellinstanz RE-Europe

Modell	REMix: <i>RE-Europe</i>
Sektor	Strom
Betrachtungsgebiet	Kontinental-Europa
räumliche Auflösung	aggregiertes Netzwerk aus 25 Nationalstaaten (auflösbar bis Übertragungsnetzebene mit 1.494 Knoten)
Betrachtungszeitraum	2025-2030-2040-2050 Pfadoptimierung
zeitliche Auflösung	stündlicher Kraftwerkseinsatz
Technologien	Stromerzeugung: Kernkraft-, Steinkohle-, Braunkohle-, Gasturbinen-, Wasserkraftwerke, sowie Photovoltaik-PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), Photovoltaik-SHJ (Silicon-Hetero-Junction), Windturbinen-SCIG (Squirrel Cage Induction Generator), Windturbinen-DD (Permanent Magnet Direct-Drive), Windturbinen-HS (Permanent Magnet High Speed) Stromspeicher: LFP (Lithium-Eisen-Phosphat), NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt), Vanadium-Redox-Flow, Blei-Säure
Optimierbare Zielgrößen	
1. Systemkosten	Investitions- & Betriebskosten
2. Rohstoff-Kritikalität	Geopolitische K_{Geo} Geopolitische $K_{Geo-XXL}$ Marktbedingte K_{Econ} Preis-Kritikalität oder Verfügbarkeits-Kritikalität

¹³ <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.175>

¹⁴ <https://gitlab.com/dlr-ve/esy/remix/projects/re-europe>

¹⁵ Die Datensätze werden als Supplementary Information zusammen mit der Fachpublikation von Schlosser et al. [18] veröffentlicht. Das entsprechende Gitlab-Repository von RE-Europe wird nach der abschließenden Veröffentlichung dieser Daten im Rahmen der Ergebnisverwertung aktualisiert, sodass alle wesentlichen Datenquellen darin zusammengeführt werden (siehe auch II.1.7).

II.1.3 Integration von Sub-Technologien, Szenariodaten und Rohstoffbedarfsdaten

Der Rohstoffbedarf verschiedener Ausführungsarten einer Technologie unterscheidet sich zum Teil deutlich, z.B. innerhalb der Technologiekategorie „stationäre Batterien“ von NMC-, LFP- oder Vanadium-Redox-Flow-Batterien. Daher ist es zentral, bei den Technologien, die im Modell berücksichtigt sind, nicht nur Technologieklassen („Wind Onshore“, „Wind Offshore“, „Photovoltaik“) zu berücksichtigen, sondern möglichst alle relevanten Ausführungsarten, im Folgenden als „Sub-Technologien“ bezeichnet. Der Auswahl, welche Rohstoffe Berücksichtigung finden, liegt eine Abstimmung der Projektpartner FhG ISI und BGR zu Grunde. Diese orientiert sich insbesondere daran, ob als kritisch eingestufte Rohstoffe in den ausgewählten Sub-Technologien verwendet werden. Darüber hinaus spielen die Datenverfügbarkeit und der Aufwand für die Modellierung zukünftiger globaler Bedarfe und Recycling-Potentiale, sowie zur zukünftigen Produktion eine Rolle. Die Bestimmung der globalen Rohstoffbedarfe für alle Anwendungen durch FhG ISI basiert auf einer Analyse des globalen Bedarfs der ausgewählten Rohstoffe in Energie- und Verkehrstechnologien von Naegler et al.¹⁶. Die somit von FhG ISI und BGR bestimmten Kritikalitäten auf Rohstoffebene sind wiederum die Grundlage für die technologiespezifische „Investitions-Kritikalität“ pro funktioneller Einheit der berücksichtigten Sub-Technologien (siehe auch II.1.5 und II.1.7).

II.1.4 Entwicklung und Anwendung multikriterieller Optimierungsmethoden

Nach Abschluss des Vorhabens steht eine Reihe unterschiedlicher methodischer Erweiterungen für REMix zur Verfügung, welche für *RE-Europe* implementiert und durch zahlreiche, numerische Experimente evaluiert sind. Hierzu zählen:

- 1) **Modellendogene Abbildung von Rohstoffkritikalitäten** anhand i) der von GAMS neu entwickelten Funktionalität zur Mehrzieloptimierung, *MOO.gms* und ii) einer Built-in-Funktion von REMix, welche zunächst Systemkosten minimiert und anschließend das Kritikalitätsminimum für bis zu beliebig wählbare (zumeist 2%) höhere Systemkosten ermittelt. Obwohl erstere die Nutzung unterschiedlicher Algorithmen zulässt („Random Weighting“, „Sandwiching“, „Epsilon Constraint“), liegen die meisten Erfahrungswerte für die parallelisierbare Epsilon-Constraint-Methode vor. Für verkleinerte Test-Modellinstanzen mit einem räumlich eingeschränkten Untersuchungsbereich können damit Pareto-optimale Lösungen in einem dreidimensionalen Raum ermittelt werden, während für *RE-Europe* in den in Tabelle 2 angegebenen Skalen die problemfreie Ermittlung zweidimensionaler Pareto-Fronten möglich ist.
- 2) **Modellparametrierung** zur Sicherstellung der Lösbarkeit und Beherrschbarkeit multikriteriell optimierter Pfadausbauoptimierungen mit *RE-Europe*. Hierzu zählen insbesondere Maßnahmen zur Vermeidung von numerischen Schwierigkeiten anhand überarbeiteter Eingangsdaten. Hierfür sind die verschiedenen Zielfunktionswerte so skaliert, dass sie und ihre Teilkomponenten in ähnlichen Größenordnungen liegen und für die Mehrheit der Modellparameter eine harmonisierte Anzahl an Nachkommastellen sichergestellt ist. Hinzu kommen passende Argumente für „*bounds_rel_tol*“, „*equality_rel_tol*“, „*fallback_solver*“, „*parallel_jobs*“ beim Aufruf der *MOO*-Methode, sowie überarbeitete Solver-Parameter, wie „*aggressive scaling*“. Unter Nutzung der Parallelisierung auf Shared-Memory-Rechenclustern mit 1 TB Arbeitsspeicher ist so die Bestimmung des Transformationspfades für ein Szenario innerhalb von ein bis zwei Tagen Rechenzeit möglich.
- 3) **Modellausgangsdaten** liegen so vor, dass sie direkt zur Datenbereitstellung über das Framework für die Visualisierungsanalyse genutzt werden können. Hierfür beinhalten alle REMix-Ausgangsdatensätze Metadaten, wie beispielsweise Einheiten und Erklärungstexte.

II.1.5 Aggregation von Kritikalitätsindikatoren und methodische Einordnung

Nach Abschluss des Projekts stehen zwei von den Projektpartnern FhG ISI und BGR definierte Kritikalitäts-Indikatoren zur Verfügung, welche grob die Wahrscheinlichkeit möglicher Engpässe bei den untersuchten

¹⁶ <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114622>

Rohstoffen quantifizieren, die sich i) aus einem möglichen Missverhältnis zwischen dem global stark steigenden Bedarf und einer vermutlich langsameren Produktionssteigerung („marktbedingte Engpässe“) und ii) aus geopolitischen Spannungen ergeben können („geopolitische bedingte Engpässe“).

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, dass die Kritikalitätswerte zunächst für einzelne Rohstoffe vorliegen, für die Anwendung in REMix jedoch unter Berücksichtigung der Rohstoff-Zusammensetzung der jeweiligen Technologien auf die Technologie-Ebene aggregiert werden müssen. Durch diese Aggregation lassen sich „Kritikalitäts-Kosten“ für Technologien ermitteln, die in der Optimierung des im Modell abgebildeten Energiesystems analog zu den typischerweise adressierten (monetären) Systemkosten minimiert werden können.

Es können darüber hinaus zwei Aggregationsansätze unterschieden werden, welche sich auf unterschiedliche Aspekte der Kritikalität konzentrieren. Zum einen beschreibt die „Preis-Kritikalität“ auf semi-quantitative Art und Weise den Erwartungswert von Preiserhöhungen aufgrund möglicher Lieferengpässe (aufgrund von marktbedingten oder geopolitischen Faktoren). Auf der anderen Seite beschreibt die „Verfügbarkeits-Kritikalität“, inwieweit Lieferengpässe Einfluss auf die Verfügbarkeit von Rohstoffen haben oder ob die Möglichkeit besteht, die benötigten Rohstoffe anderweitig auf dem Weltmarkt zu erhalten. Insgesamt liegen so also vier verschiedene Datensätze für Kritikalitäts-Indikatoren auf *Technologieebene* vor:

- 1) **Zwei Indikatoren für jeden Rohstoff** (für „markt-“ und „geopolitisch bedingte“ Engpässe)
- 2) **Zwei Aggregationsmethoden**, um die Indikatoren von der Rohstoffebene auf Technologieebene zu überführen.

Eine nähere Analyse der Indikatoren auf Technologieebene zeigt, dass die Indikatorwerte für die markt- und geopolitisch bedingten Engpässe stark korreliert sind (bei Verwendung derselben Aggregationsmethode). Dies hat wiederum eine starke Korrelation der Ergebnisse der Systemoptimierung zur Folge. Die Ursache für die Korrelation ist, dass die rohstoff-spezifischen Gewichtungsfaktoren für die Aggregation (die bei der Aggregation der markt- und der geopolitischen Risiken identisch sind) eine deutlich größere Bandbreite aufweisen als die eigentlichen Indikatoren (marktbedingt/geopolitisch bedingt) für die einzelnen Rohstoffe und somit das Aggregationsergebnis dominieren.

Eine weitere Erkenntnis ist in diesem Zusammenhang: Die Auswahl der berücksichtigten Rohstoffe hat einen großen Einfluss auf die Kritikalitäts-Ergebnisse und insbesondere das Ranking verschiedener Technologien in Bezug auf den untersuchten Kritikalitäts-Aspekt. An und für sich wenig kritische Massenrohstoffe („Bulk Materials“) wie z.B. Stahl oder Aluminium können aufgrund ihres i.d.R. deutlich höheren Bedarfs als kritische Rohstoffe einen beträchtlichen Einfluss auf die technologiespezifische Kritikalität haben. Daher ist prinzipiell eine umfassende Berücksichtigung aller Rohstoffe, die für die Technologien im Modell relevant sind, anzustreben. Allerdings erfordert die Ermittlung der Zahlenwerte für die „marktbedingten“ Engpässe der einzelnen Rohstoffe eine umfangreiche Materialfluss-Analyse deren zukünftiger Entwicklung des Bedarfs und des Recycling-Potentials. Die Bestimmung des „geopolitisch“ bedingten Engpass-Indikators ist hingegen methodisch und datenseitig einfacher. Aus diesem Grund existieren lediglich für letzteren zwei Varianten: K_{Geo} und $K_{Geo-XXL}$, für welchen seitens der BGR für *alle* relevanten Rohstoffe in den berücksichtigten Technologien Abschätzungen vorliegen (wenn auch z.T. mit unterschiedlicher Detail-Tiefe). Die zentrale wissenschaftliche Publikation des Vorhabens von Schlosser et al. [18] fokussiert sich daher vornehmlich auf die geopolitischen Risiken. Anstelle des ursprünglich geplanten Vergleichs des Effektes der Minimierung von K_{Geo} und K_{Econ} auf die Transformationsstrategie tritt in der Publikation nun der Vergleich der beiden Aggregationsmethoden „Preis-Kritikalität“ $K_{Geo-XXL-PR}$ vs. „Verfügbarkeits-Kritikalität“ $K_{Geo-XXL-WM}$ ¹⁷ in den Vordergrund. In den folgenden Abschnitten wird für eine bessere Unterscheidbarkeit der Kritikalität diese also begrifflich für die Verfügbarkeits-Kritikalität und Preis-Kritikalität unterschieden. Beide Aggregationsansätze nehmen – wie auch schon die beiden Engpass-Indikatoren – unterschiedliche Blickwinkel auf den Themenkomplex „Risiken der Rohstoffversorgung“ ein und ermöglichen damit unterschiedliche Aussagen bzw. erfordern unterschiedliche Interpretationen der Ergebnisse. Daher bleibt es wichtig, für zukünftige Analysen die verwendete Methodik zur Ermittlung der Rohstoffkritikalität entsprechend der intendierten Forschungsfragen auszuwählen.

¹⁷ PR: Preis, WM: Weltmarktverfügbarkeit, XXL: alle betrachteten Rohstoffe inklusive Massenrohstoffe

II.1.6 Szenarioanalysen und Bewertung von Transformationspfaden des Stromversorgungssystems

Die zentralen Projektergebnisse in Bezug auf Szenarioanalysen für Transformationspfade des Stromversorgungssystems sind im wissenschaftlichen Fachartikel „Trade-offs between system cost and raw material risks in climate-neutral scenarios“ von Schlosser et al. [18] ausgewertet und beschrieben. Der Fokus liegt hier auf folgenden Forschungsfragen:

- 1) Wie kann das REMix-Modell erweitert werden, um Transformationsszenarien für das kontinental-europäische Stromsystem bis 2050 zu entwickeln, die die geopolitische Rohstoffpreis- oder die geopolitische Verfügbarkeits-Kritikalität zusätzlich zu den Systemkosten reduzieren?
- 2) Um wie viel teurer sind die Rohstoffkritikalität-minimalen Lösungen im Vergleich zu den kostenminimalen Lösungen?
- 3) Welche erneuerbaren Energietechnologien (Stromerzeuger und Speicher), bzw. deren Sub-Technologien, kommen in den Rohstoffkritikalität-minimalen bzw. den kostenminimalen Systemlösungen zum Einsatz?

Wie in II.1.5 beschrieben werden die geopolitische Preis-Kritikalität $K_{Geo-XXL-PR}$ bzw. die geopolitische Verfügbarkeits-Kritikalität $K_{Geo-XXL-WM}$ als zusätzliche Zielfunktionswerte für eine multikriterielle Optimierung mit der REMix-Modellinstanz *RE-Europe* genutzt. Dies trägt den in II.1.5 beschriebenen Herausforderungen Rechnung. Der geopolitische Indikator auf Rohstoffebene erlaubt die Betrachtung einer umfassenden Materialauswahl, während die Verwendung der zwei unterschiedlichen Aggregationsmethoden zur Ableitung der Risiken auf Technologieebene unterschiedliche Auswirkungen von Lieferkettenproblemen betont.

Aufgrund der Zeitabhängigkeit der Technologiekosten als auch der Kritikalitätsindikatoren und da mehrere Modelljahre betrachtet werden (2025, 2030, 2040, 2050), wird die Pfadausbauoptimierung unter Verwendung der *Augmented Epsilon Constraint*-Methode durchgeführt. Die individuelle Analyse unterschiedlicher, zweidimensionaler Pareto-Fronten (d.h. die Menge der erhaltenen Pareto-effizienten Systemlösungen) zeigt folgende Ergebnisse:

- a) **Systemkosten vs. geopolitische Preis-Kritikalität $K_{Geo-XXL-PR}$:** Die Pareto-Front zwischen diesen beiden Zielgrößen zeigt sowohl bei der kostenminimalen als auch der kritikalitätsminimalen Lösung kontinental-europäische Stromerzeugungssysteme, die zum großen Teil auf PV-PERC basieren. Dies erklärt sich dadurch, dass sowohl die Kosten als auch die geopolitische Preis-Kritikalität (per installierter Leistung bzw. erzeugter Energiemenge) von PV-PERC gegenüber den alternativen Technologien geringer sind. Da hinsichtlich der dominanten Stromerzeugungstechnologie (PV-PERC) kein Übergang bzw. Substitution von Technologien zwischen Kostenminimum und Kritikalitätsminimum zu beobachten sind, ist der Systemkostenunterschied zwischen diesen Lösungen gering. Kosten- und Kritikalitätsunterschiede resultieren hauptsächlich aus Sub-Technologie-Übergängen in der Offshore-Windenergie und Unterschieden beim Ausbau stationärer Batterien.
- b) **Systemkosten vs. geopolitische Verfügbarkeits-Kritikalität $K_{Geo-XXL-WM}$:** Die Pareto-Front zwischen diesen beiden Zielgrößen zeigt einen deutlichen Technologieübergang: die kostenminimale Lösung hat einen Fokus auf PV-PERC, während die kritikalitätsminimale Lösung auf Onshore-Windkraftanlagen bevorzugt. Letzteres resultiert daraus, dass diese Technologie, ausgeführt als SCIG, mit der geringsten geopolitischen Verfügbarkeits-Kritikalität unter den erneuerbaren Stromerzeugern behaftet ist. Entsprechend höher ist der Kosten- und Kritikalitätsunterschied zwischen der kosten- und der kritikalitätsminimalen Lösung im Vergleich zu a).

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Aggregationstechnik zur Ermittlung der technologiespezifischen Kritikalität, welche unterschiedliche Annahmen bzgl. der Schadensmechanismen nach Lieferkettenstörungen eines Rohstoffs widerspiegelt, die Ergebnisse der Energiesystemoptimierung maßgeblich beeinflusst. Somit erlaubt der Einsatz beider Indikatoren eine differenzierte Kritikalitätsanalyse und die Ableitung darauf angepasster kritikalitätsminimaler Energiesysteme.

Folgende Ergebnisse liegen außerdem vor:

- c) **Geopolitische Verfügbarkeits-Kritikalität K_{Geo} (ausschließlich für „kritische“ Rohstoffe):** Werden nur Materialien betrachtet, welche auf Rohstoffebene als „kritisch“ eingestuft werden, resultiert dies in

einem signifikant verschiedenen, kritikalitätsminimalen Technologiemix auf Energiesystemebene. Dies belegt, dass die Kritikalität auf Technologieebene und folglich die kritikalitätsminimalen Systemzusammensetzungen maßgeblich von der Rohstoffauswahl abhängig sind.

- d) **Marktbedingte Verfügbarkeits-Kritikalität K_{Econ} (ausschließlich für „kritische“ Rohstoffe):** Wird diese als Kritikalitätsindikator verwendet, resultiert dies in einer kritikalitätsminimalen Systemzusammensetzung, die der kritikalitätsminimalen Systemzusammensetzung unter Verwendung der geopolitischen Verfügbarkeits-Kritikalität K_{Geo} ähnlich ist. Dies liefert den Beleg für das in II.1.5 beschriebene Korrelationsverhalten und unterstreicht die entscheidende Bedeutung der Aggregationsmethode für die technologische Ausgestaltung kritikalitätsminimaler Energieversorgungssysteme.

Zusammenfassend lässt sich anhand der Szenarioanalysen feststellen, dass trotz der Möglichkeit den Technologiemix stärker zu diversifizieren, häufig eine Sub-Technologie pro Technologieklasse ebendiesen dominiert (z.B. LFP bei Batteriespeichern, PERC bei Photovoltaik). Die hohe Sensitivität der Kritikalitätsbewertung in Abhängigkeit der betrachteten Rohstoffe und Technologien sowie der verwendeten Aggregationsmethode (von Rohstoff- zu Technologieebene) sind der Grund dafür, dass im Ergebnis des Projekts auf das Formulieren konkreter politischer Maßnahmen in Form einer Priorisierung kritischer Rohstoffe aus Perspektive des Gesamtsystems verzichtet wird. Generelle, aber bekannte Handlungsoptionen können hingegen auf Basis der Ergebnisse bestätigt werden: Maßnahmen zur Reduktion oder Substitution von kritischen Materialanteilen in Schlüsseltechnologien, die Diversifikation des Technologiemies und Anstrengungen zum Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.

Zum Zeitpunkt der Einreichung dieses Berichts befinden sich die Arbeiten am Artikel von Schlosser et al. [18] in der Abschlussphase. Die vorliegende Version des Artikels und des Anhangs zum Artikel sind als weiterer Anhang Erfolgskontrollbericht (Abschnitt III.) beigelegt.

II.1.7 Bereitstellung von Modell- und Ergebnisdaten

Neben den Daten zur Erstellung der quell-offenen REMix-Modellinstanz *RE-Europe* (s. II.1.2) liegen weitere, vom DLR erzeugte Datensätze vor, welche im Rahmen des Fachartikels von Schlosser et al. [18] veröffentlicht werden. Zum einen aufbereitete Szenario- und Rohstoffbedarfsdaten, welche die Durchführung technologiespezifischer Kritikalitätsbewertungen und Materialflussanalysen ermöglichen. Die Daten der gelösten REMix-Modellinstanzen liegen im GDX-Datenformat vor, die für die bessere Interpretierbarkeit erstellten Meta-Daten als Textdateien. Insofern nicht Teil der Studie von Schlosser et al. [18], sind die im Rahmen von RESUME erstellten Datensätze indirekt mit dem öffentlich zugänglichen Framework zur Visualisierungsanalyse der Universität Konstanz⁵ explorierbar.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der überwiegende Teil der Zuwendung wurde für wissenschaftliches Personal eingesetzt. Die Personalmittel dienten insbesondere der Datenrecherche und -Prozessierung, sowie der Implementierung der Modellierungsmethoden, der Durchführung der Szenarioanalysen und der wissenschaftlichen Auswertung und Veröffentlichung der Projektergebnisse. Darüber hinaus wurden Personalmittel für Projektmanagement, Vernetzungsaktivitäten und Supervision von Doktorarbeiten verwendet.

Sachmittel wurden insbesondere für projektbezogene Reisekosten und die Durchführung der Workshops in Präsenz verwendet.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Vorhaben geleisteten Arbeiten waren notwendig, um die Rohstoffkritikalität bei Erstellung und Analyse von Transformationspfaden des Energiesystems mittels eines Energiesystemmodells als gleichwertiges Design-

Kriterium zu den Systemkosten zu betrachten. Dies erforderte die modellendogene Berücksichtigung dieser beiden Zielgrößen und eine enge Verknüpfung von Rohstoffdaten, Kritikalitätsbewertung, Energiesystemmodellierung und multikriterieller Optimierung. Diese Kombination stellte gegenüber dem Stand der Technik zu Beginn des Vorhabens eine methodische Neuheit dar.

Die Arbeiten zur Ausdifferenzierung von Sub-Technologien waren erforderlich, da aufgrund der unterschiedlichen Rohstoffbedarfe der Sub-Technologien das Ergebnis für die Kritikalität auf Technologieebene (wie in II.1.5 erläutert) nicht trivial ableitbar ist. Ohne diese Differenzierung wäre eine belastbare Bewertung möglicher Substitutionseffekte innerhalb der Energiesystemoptimierung nicht möglich gewesen. Für ebendiese waren die umfangreichen Tests zur numerischen Stabilität und Modelllaufzeit ebenfalls unvermeidbar. Die Kombination aus Pfadausbauoptimierung, möglichst großräumiger Modellierung, sub-technologiespezifischen Kritikalitätsdaten und Mehrzieloptimierung führte zu einer erheblichen Komplexitätssteigerung. Die daraus resultierenden methodischen Anpassungen, insbesondere die Fokussierung auf den kontinental-europäischen Stromsektor und die zweidimensionale Auswertung, waren angemessen, um robuste und interpretierbare Ergebnisse innerhalb des verfügbaren Zeit- und Kostenrahmens zu erzielen. Hier stellte das Framework zur Visualisierungsanalyse ein wertvolles Instrument dar, das dem interdisziplinär zusammengesetzten Team des Gesamtvorhabens einen deutlichen Mehrwert bei der Interpretation der Ergebnisse bot. Dieses Verständnis auf Expertenebene muss in diesem Zusammenhang für die Ergebnisverwertung durch Akteure aus Politik und Gesellschaft als eine notwendige Voraussetzung betrachtet werden. Der Umfang der geleisteten Arbeiten war daher angemessen.

Die kostenneutrale Verlängerung war erforderlich, um die durch Personalengpässe und technische Herausforderungen entstandenen Verzögerungen auszugleichen (siehe auch Abschnitt I.3.6).

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Ergebnisse des Vorhabens eröffnen Verwertungsmöglichkeiten insbesondere in Bezug auf die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit. Grundsätzlich können die Verwertung der entwickelten Methoden und der erzeugten Daten unterschieden werden:

- 1) **Methodentransfer:** Die Methoden zur Mehrzieloptimierung sind für REMix-Modellinstanzen mit anderem Untersuchungsschwerpunkt anwendbar. Dies betrifft sowohl von *RE-Europe* verschiedene oder erweiterte Ausprägungen der räumlichen und zeitlichen Skalen als auch von der Rohstoffkritikalität verschiedene Zielfunktionswerte, wie beispielsweise zur Beschreibung von Umweltauswirkungen. Die Quellcodes zur Erzeugung von *RE-Europe*⁴ sowie das erweiterte REMix-Modellierungsframework² stehen hierfür in frei zugänglichen Gitlab-Repositories zur Verfügung.
- 2) **Datenweitzernutzung:** Die in Abschnitt II.1.7 beschriebenen Datensätze stehen für Folgestudien zur Quantifizierung zukünftiger Rohstoffversorgungsrisiken zur Verfügung. Thematischer Schwerpunkt kann beispielsweise die Ausgestaltung einer geo-strategisch resilienteren Energieversorgung sein. Dies betrifft Trade-Offs zwischen zu erwartenden Kosten und Erhöhung der Resilienz durch bewusste Technologieentscheidungen auf Basis der mit der Rohstoffverfügbarkeit verbundenen Engpass- oder Ausfallrisiken.

Weiterführende Details sind im vertraulichen Erfolgskontrollbericht dargestellt.

II.5 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurden keine Ergebnisse Dritter bekannt, die eine Änderung der Zielsetzung erforderlich machten. Ergebnisse Dritter wurden vor allem von Seiten der in Abschnitt I.5 genannten Stellen bekannt und bestätigten die Relevanz des Forschungsthemas.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Im Folgenden sind alle erfolgten und geplanten Veröffentlichungen des Gesamtvorhabens aufgeführt. Veröffentlichungen, die dem Verwertungsplan des Teilvorhabens „Modellierung und Analyse von Energiewendepfaden unter Berücksichtigung von Rohstoffkritikalitäten“ des DLR zuzuordnen sind, sind entsprechend mit einem  gekennzeichnet.

- [1] Schicho, M., & Tercero, L. (2023). Exploring CRM requirements for the German energy transition, Raw Materials Week 2023, 13.-17.11.2023, Brussels, Belgium.
-  [2] Martens, L. (2023). Consideration of Material Criticality for Battery Subtechnologies in an Energy System Optimization Model for Belgium and the Netherlands. Masterarbeit, Hanze University of Applied Science Groningen, <https://elib.dlr.de/202060/>
-  [3] Gils, H. C., Cao, K.-K., Le Bihan, S., & Yeligi, M. (2024). Multi-objective optimization for European power system planning. In EERA JPs ESI & e3s workshops, 3.6.-6.6.2024, Kaunas, Lithuania, <https://elib.dlr.de/205905/>
-  [4] Cao, K.-K., Martens, L., Arellano Ruiz, E. S., Schlosser, S. J., Buschmann, J., & Naegler, T. (2024). Multi-criteria energy system optimization: Costs vs. Critical materials, 18. Symposium Energieinnovation 2024, 14.-16.02. 2024, Graz, Österreich, <https://elib.dlr.de/202888/>
- [5] Schicho, M., Perger, J., Fritz, A., Liedtke, M., Naegler, T., Cao, K.-K., & Tercero, L. (2024). Criticality: From Raw Materials to Energy Systems, IRTC 2024 – Raw Materials in a Changing World, 21.-23.02.2024, Turin, Italien
-  [6] Schlosser, S. J., & Naegler, T. (2024). Price contributions of raw materials to clean energy technologies, IRTC 2024 – Raw Materials in a Changing World, 21.-23.02.2024, Turin, Italien, <https://elib.dlr.de/202373/>
-  [7] Schlosser, S. J., & Naegler, T. (2024). Supply Disruption Probabilities of Renewable Energy Sources and Storage Technologies: Assessment from an Energy System Perspective, IRTC 2024 – Raw Materials in a Changing World, 21.-23.02.2024, Turin, Italien, <https://elib.dlr.de/202973/>
-  [8] Ingelmann, N. (2024). Bestimmung des Rohstoffbedarfs für den Netzausbau in Szenarien für die Energiewende. Bachelorarbeit, Hochschule Nordhausen, <https://elib.dlr.de/204816/>
- [9] Melcher, F., & Dunkel, F. (2025). Can we do it? Thoughts on Europe's future demand for critical mineral raw materials. BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 170(10), 595-603, https://doi.org/10.1007/978-3-032-08381-4_22
-  [10] Schlosser, S. J., & Naegler, T. (2025), Raw material risk in clean energy technologies and the power supply system: For which materials should price fluctuations be prioritised? Energy Reports Volume 13, June 2025, 4359-4374, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.03.051>
- [11] Schicho, M., Dunkel, F., Perger, J., Fritz, A., Liedtke, M., Naegler, T., Schlosser, S., Le Bihan, S., Cao, K.-K., Loibl, A., Tercero Espinoza, L., (2025). Raw materials for the green energy transition: Criticality of materials, technologies, and systems, International Energy Workshop (IEW) 2025, 11.-14.06.2025, Nara, Japan
-  [12] Le Bihan, S., Cao, K.-K., Naegler, T., Schlosser, S. J., & Homey, A. (2025). Mitigating Technology Raw Material Supply Risks in Energy System Planning: A Multi-Objective Approach, EURO 2025, 22.-25.06.2025, Leeds, UK, <https://elib.dlr.de/215176/>
-  [13] Le Bihan, S., Naegler, T., Schlosser, S. J., Cao, K.-K., Schicho, M., & Dunkel, F. (2025, June). Energy System Pathway Optimization Considering Market-Based and Geopolitical Technology Criticality. In International Conference on Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences (pp. 284-295). Cham: Springer Nature Switzerland, https://doi.org/10.1007/978-3-032-08381-4_22

- [14] Schicho, M., & Tercero Espinoza, L. (2026). Criticality assessment for raw materials: perspectives and focuses. *Mineral Economics*, 39(1), 93-110, <https://doi.org/10.1007/s13563-024-00474-7>
- [15] Howind Rodriguez, A., Dunkel, F., Perger, J., Liedtke, M., Sievers, H., Fritz, A. (2026): „Rohstoffe für die Energiewende –Angebotsszenarien und geopolitische Risiken“. DERA Rohstoffinformationen [in Arbeit]
- [16] Frings, A., Jäckl, B., Tercero Espinoza, L. A., Joos, L., Rentschler, J., Dennig, F. L., Keim, D. A. (2026). MORECriT: Understanding Multi-Objective Optimization Results in Resource Criticality Analysis through Visual Analytics, In *EuroVA 2026: EuroVis Workshop on Visual Analytics*. The Eurographics Association, 2026, <https://doi.org/10.2312/eurova.20261010>
- [17] Homey, A., & Le Bihan, S. (2026). A Multi-Objective Optimization Framework for Large-Scale Linear Programs: An Application in Resilient Energy System Planning, *IFORS 2026*, 12.-17.07.2026, Wien, Österreich
-  [18] Schlosser, S. J., Le Bihan, S., Cao, K.-K., Naegler, T., Schicho, M., Tercero Espinoza, L., Dunkel, F., Howind Rodriguez, A., Fritz, A., Perger, J., Homey, A., Jochem, P. [in Arbeit] Trade-offs between system cost and raw material risks in climate-neutral scenarios