

Schlüsseltechnologien und Rohstoffbedarf der Transformation zu einer defossilisierten Welt

Während eine ambitionierte Energiewende in 2050 zu sinkenden Rohstoffbedarfen in Deutschland und Europa führt, überkompensieren Aufholeffekte im Rest der Welt diesen Effekt und sorgen für einen insgesamt steigenden Bedarf an Primärrohstoffen. Der Rohstoffbedarf für Schlüsseltechnologien hat dabei nur einen geringen Anteil am Gesamtrohstoffbedarf.

Im Projekt REFINE¹ wurden Rohstoffbedarfe und Umweltbelastungen im Zuge einer globalen Energiewende untersucht. Forschungsfrage war dabei unter anderem, wie sich der Rohstoffbedarf Deutschlands, Europas und der Welt im Zuge dieser Transformation bis zum Zieljahr 2050 entwickelt und ob entsprechende Rohstoffe in ausreichendem Maße und zum notwendigen Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Ein zusätzlicher Fokus wurde auf die für das Energiesystem wichtigen Metalle gelegt, welche vor allem in den Schlüsseltechnologien der Energiewende zum Einsatz kommen. Zu den Schlüsseltechnologien zählen im Projektkontext Technologien zur Bereitstellung von erneuerbarer Energie, sowie Power-To-X-Anlagen, Wasserstoffbrennstoffzellen und Batteriespeicher.

Zur Untersuchung dieser Fragestellungen wurde der gesamtwirtschaftliche Bedarf von Ressourcen, insbesondere Rohstoffen, mit Hilfe des Modells URMOD-3R berechnet.² Das Modell unterscheidet die drei Regionen Deutschland, Europa (ohne Deutschland) und Welt (ohne Europa) und die Jahre 2030, 2040 und 2050. Die Berechnungen wurden für drei Szenarien vorgenommen. Die in diesem Factsheet dargestellten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf das GreenSupreme-Szenario³, das von einer sehr ambitionierten Transformation ausgeht und am Ende des Textes kurz beschrieben wird. Im Vergleich zu den anderen beiden Szenarien handelt es sich dabei um das Szenario mit dem geringsten Rohstoffbedarf. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind daher als „Best-Case“ zu interpretieren.

¹ REFINE – Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland, FKZ 3719 31 103 0

² Es handelt sich hierbei um ein multiregionales umweltökonomisches Input-Output-Modell. Eine kurze Beschreibung des Modells findet sich am Ende des Textes.

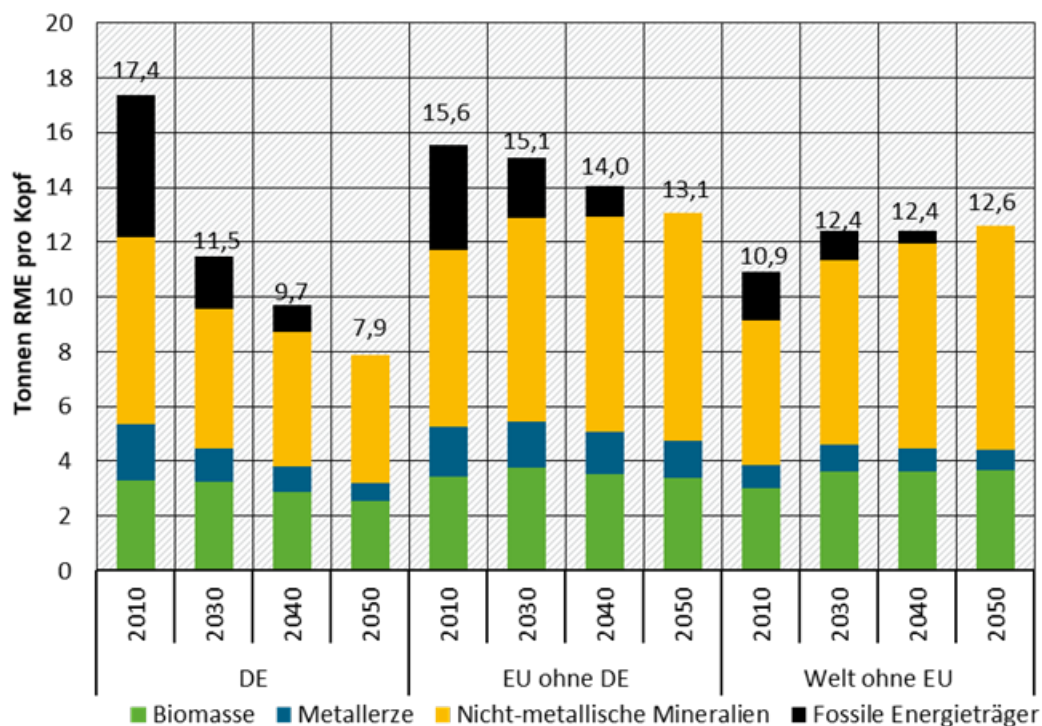
³ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-konzepte-fuer-die-klimaschutz/ressourcenschonendes-treibhausgasneutrales/rescue-szenario-greensupreme>

Der Primärrohstoffkonsum pro Kopf sinkt in Deutschland und steigt in der Welt ohne EU

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung des Rohstofffußabdrucks (RMC) von 2010 bis 2050 in den Regionen Deutschland (DE), EU ohne DE und Welt ohne EU. Wie zu erkennen ist, führt die unterstellte globale Energiewende dazu, dass in allen drei Regionen bis 2050 keine fossilen Energieträger mehr genutzt werden. Abbildung 1 illustriert dabei, wie mit einer ambitionierten Transformation in Deutschland der Pro-Kopf-Primärrohstoffkonsum von vergleichsweise hohen 17,4 t Rohstoffäquivalenten (RME) bis 2050 auf bis zu 7,9 t RME pro Kopf reduziert wird. Dies entspricht einer Reduktion von 55 % gegenüber dem Niveau von 2010⁴. In der EU ohne DE sinkt der RMC im selben Zeitraum um ca. 17 %, während der RMC pro Kopf in der Welt ohne EU um 15 % ansteigt. Dabei ist zu beachten, dass der Pro-Kopf-Bedarf an Rohstoffen in der Welt ohne EU in 2010 im Vergleich zu den beiden anderen Regionen auf einem deutlich niedrigeren Ausgangsniveau liegt und auch in 2050 noch nicht das Niveau der EU ohne DE erreicht.

Die unterschiedlichen Entwicklungen der Rohstoffbedarfe lassen sich hauptsächlich durch unterschiedliche Annahmen zum wirtschaftlichen Wachstum in den jeweiligen Regionen erklären: Während angenommen wird, dass das Bruttoinlandsprodukt (BIP) Pro-Kopf in Deutschland zwischen 2010 und 2050 um ca. 26 % wächst, wird für die EU ohne DE fast eine Verdopplung und für Welt ohne EU ein Anstieg um gut 140 % angenommen.

Abbildung 1: Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Kopf nach Jahren (im Szenario GreenSupreme)



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Globaler Primärrohstoffkonsum steigt trotz Verbesserungen bei Recycling und Effizienz

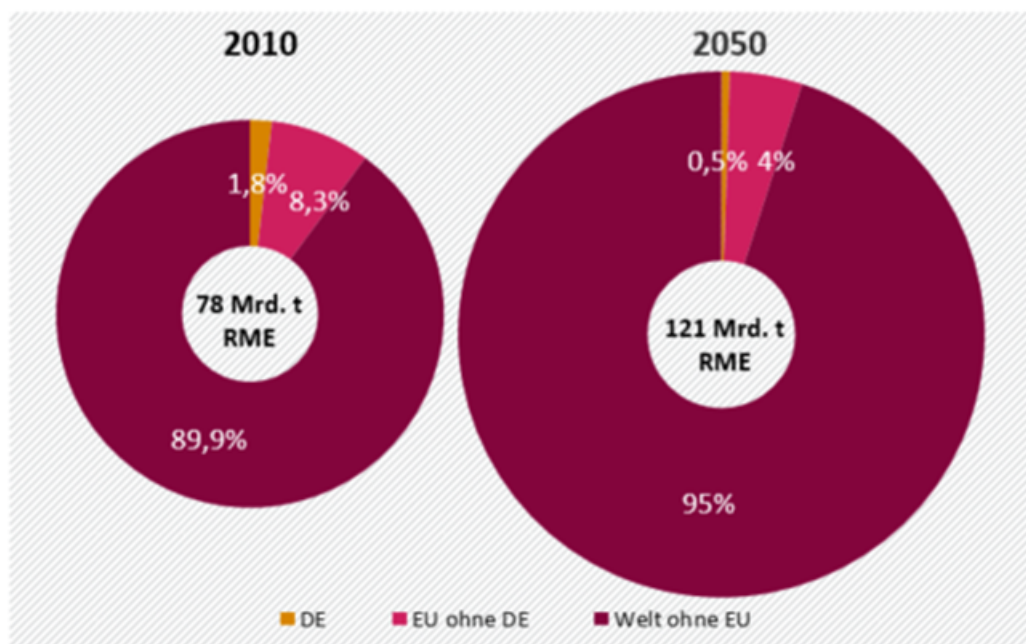
Abbildung 2 zeigt den globalen Primärrohstoffkonsum in 2010 und 2050. Insgesamt steigt der Primärrohstoffbedarf zwischen 2010 und 2050 von 78 Mrd. t RME auf 121 Mrd. t RME an. Dies ist auf den prognostizierten Anstieg der Bevölkerung von 6,4 Mrd. in 2010 auf

⁴ Der unterstellte globale Transformationspfad ist analog zur Energiewende im GreenSupreme Szenario in RESCUE. Die REFINE-Ergebnisse fallen im Vergleich zu den RESCUE-Ergebnissen etwa 30 % niedriger aus. Dies ist vor allem auf die Revision einiger Ausgangsdaten für das Basismodell 2010, die methodische Weiterentwicklung des Schätzmodells und die Überarbeitung von Szenario-Annahmen zurückzuführen.

9,2 Mrd. Menschen in 2050 in der Region Welt ohne EU und das gleichzeitige Ansteigen des Pro-Kopf-RMC in dieser Region (s. o.) zurückzuführen. Der IRP Global Resource Outlook geht vergleichsweise von einer globalen Rohstoffextraktion von ca. 160 Mrd. t im Jahr 2050 aus, wenn die Art und Weise der Ressourcennutzung nicht geändert wird.⁵ In den Regionen Deutschland und EU ohne DE ist die Bevölkerungsentwicklung dagegen im gleichen Zeitraum leicht rückläufig.⁶ An der Entwicklung des Primärrohstoffkonsums in den drei Regionen zeigt sich, dass die angenommenen, deutlich gestiegenen Sekundärrohstoffinputs und die Verbesserung der Materialeffizienz von der wirtschaftlichen Entwicklung deutlich überkompensiert werden. Aufholeffekte und das Bevölkerungswachstum in der Welt ohne EU prägen den globalen Primärrohstoffkonsum.

In Abbildung 2 ist zusätzlich der Anteil aller Regionen am globalen Bedarf von Primärrohstoffen abzulesen: Während Deutschland in 2010 im Vergleich zu seinem Anteil an der globalen Bevölkerung (1,17 %) einen überproportional hohen Konsum aufweist, liegt der Anteil des Primärrohstoffkonsums in 2050 mit 0,5 % unter dem Anteil an der Weltbevölkerung (0,82 %).

Abbildung 2: Primärrohstoffkonsum (RMC) 2010 und 2050 der drei Regionen (im Szenario GreenSupreme)



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Schlüsseltechnologien nur für überschaubaren Teil des Rohstoffbedarfs verantwortlich

Mit Blick auf die Schlüsseltechnologien der Energiewende sind vor allem Metalle als Rohstoff von besonderer Bedeutung. Der Bedarf an ausgewählten Metallen⁷ entwickelt sich in den Regionen bis 2050 unterschiedlich: Für Deutschland verringert sich der Bedarf insgesamt um 31 %, in der EU ohne DE ergibt sich eine Zunahme von 21 % und für die Welt ohne EU von 153 %. In allen Regionen ist eine deutliche Steigerung des Einsatzes von Sekundärmetall zu erkennen, weshalb der Bedarf an Primärmetallen für Deutschland und die EU ohne DE sinkt

⁵ https://www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/gro24_full_report_29feb_final_for_web.pdf

⁶ Für Deutschland, siehe: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Publikationen/Downloads-Vorausberechnung/statistischer-bericht-bvbd-deutschland-2070-5124202219005.html?nn=208696>

Für die beiden anderen Regionen, siehe: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/MostUsed/>.

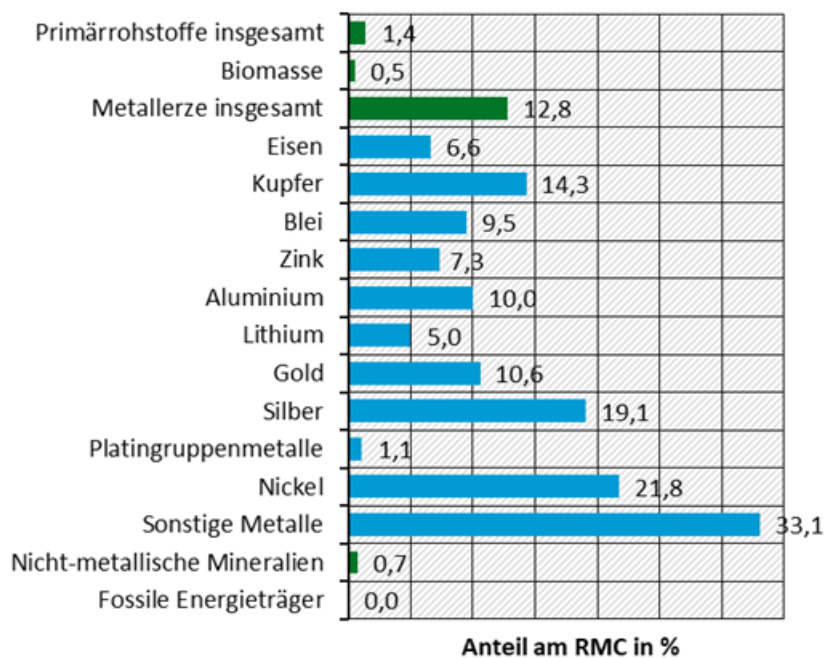
⁷ Betrachtet wurden hier Eisen, Kupfer, Blei, Zink, Aluminium und Lithium

(-65 % bzw. -36 %), während er in der Welt ohne EU in deutlich geringerem Ausmaß steigt als die Nachfrage nach Metall gesamt (22 %).

In allen drei Regionen steigt der Anteil der rohstoffintensiven Bauinvestitionen deutlich an, worunter auch Investitionen in die Schlüsseltechnologien der Energiewende fallen. Der Bedarf an Primärrohstoffen für die Investitionen in Schlüsseltechnologien steigt zwar in allen Regionen, macht insgesamt allerdings nur einen überschaubaren Teil des gesamten Primärrohstoffkonsums (RMC) aus (je nach Region 1,3 – 1,6 %). Zu beachten ist allerdings, dass der Rohstoffaufwand der Schlüsseltechnologien zu 80 % aus Metallen besteht und sich damit stark von der Zusammensetzung der restlichen Bauinvestitionen abhebt (ca. 6 % Metallgehalt). Insgesamt machen Investitionen in Schlüsseltechnologien ca. 12,8 % der globalen Nachfrage nach Metallerzen in 2050 aus. Wie Abbildung 3 zeigt, liegt der Anteil an der Gesamtnachfrage einzelner Metalle jedoch deutlich darüber: Kupfer (14,3 %), Silber (19,1 %), Nickel (21,8 %) und der Sammelposten sonstige Metalle (33,1 %).

Abbildung 3: Weltweiter Bedarf an Primärrohstoffen für die Investitionen in Schlüsseltechnologien in GreenSupreme im Jahr 2050

Anteil am Primärrohstoffkonsum (RMC) in %



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Eine Übertragung dieser Modellergebnisse auf die Realität lässt die Schlussfolgerung zu, dass der Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien, in Hinblick auf dessen verhältnismäßig geringen Gesamtrohstoffbedarf, der Umsetzung einer ambitionierten Energiewende prinzipiell nicht im Wege steht. Allerdings kann der hohe Bedarf an einzelnen Metallen zu Konflikten mit anderen Sektoren führen, falls die Fördermengen nicht entsprechend angepasst, oder weitere Einsparungen bzw. Bedarfsreduktionen erzielt werden können.

Folgende zentrale Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

- Mit einer ambitionierten Transformation kann in Deutschland der Primärrohstoffkonsum bis 2050 um 55 % auf 7,9 t RME pro Kopf reduziert werden. In der EU ohne DE geht der RMC pro Kopf langsamer zurück und liegt 2050 bei 13,1 t RME. In der Region Welt ohne EU besteht **Aufholbedarf** und der Primärrohstoffkonsum steigt auf 12,6 t RME pro Kopf bis 2050.

- Der deutsche Anteil am globalen Ressourcenbedarf ist im Jahr 2050 deutlich niedriger als der Anteil Deutschlands an der weltweiten Bevölkerung und an der Wirtschaftsleistung. Dies ist eine deutliche **Umkehr** zu den Verhältnissen im Jahr 2010, in welchem Deutschland einen überproportionalen Anteil am Rohstoffbedarf aufweist.
- In den betrachteten Szenarien macht der **Rohstoffaufwand für die Schlüsseltechnologien** einen überschaubaren Anteil am Primärrohstoffkonsum aus und stellt damit **kein Hindernis** für eine ambitionierte und schnelle Umsetzung der Energiewende dar.
- Das ambitionierte **GreenSupreme-Szenario** ist für alle drei Betrachtungen das Szenario mit den niedrigsten Ressourcen- und Rohstoffaufwendungen und Umweltkosten in 2050. Insbesondere aus der Perspektive der Umweltkosten zeigt sich der gesellschaftliche Nutzen einer schnellen und umfassenden Transformation.

Methode: URMOD-3R

Für die Ermittlung des Rohstoffkonsums (RMC) kommt das multiregionale umweltökonomische Ressourcenmodell URMOD-3R zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung von URMOD, das bereits im Vorgängerprojekt RESCUE zum Einsatz kam. URMOD-3R hat das Ziel, den Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen, sowie primäre- und sekundäre erneuerbare Energien auf gesamtwirtschaftlicher Ebene lückenlos und in konsistenter Weise, für die drei Regionen, die ausgewählten Szenarien und Stützjahre abzubilden.

Bei URMOD-3R handelt es sich um ein multiregionales Input-Output Model, dessen wichtigste Elemente die Güterverflechtungsmatrix, die Matrix der letzten inländischen Verwendung (LIV) und die Ressourcenmatrix sind. Die Güterverflechtungsmatrix bildet lückenlos die weltweiten Verflechtungen der Produktionsaktivitäten in Form von Gütertransaktionen zwischen den Sektoren ab (sog. Vorleistungen). Die LIV stellt die Endnachfrage nach Konsum- und Investitionsgütern dar, gegliedert nach Endnachfragekategorien, Gütergruppen und Regionen. Die Ressourcenmatrix beinhaltet den primären und sekundären Ressourceninput in die einzelnen Regionen. Daraus lässt sich der kumulierte (direkte und indirekte) Ressourcenaufwand der inländischen Nachfrage einer Volkswirtschaft berechnen und einzelne Ressourcenaufwendungen können spezifischen Endnachfrageaktivitäten zugeordnet werden.

Im Vergleich zu URMOD wurde URMOD-3R auf die drei Regionen Deutschland, EU ohne Deutschland und Welt ohne EU erweitert. Das Modell ist aktuell nach 299 Gütergruppen pro Region untergliedert. Die Weiterentwicklung beinhaltet außerdem eine gezielte Ausweitung der Input-Output-Tabellen (IOT) für die in REFINE vertieft untersuchten Schlüsseltechnologien der Energiewende, sowie für ausgewählte Rohstoffe und Industriebranchen.

Methode: Szenarien

Für das Projekt REFINE wurden die Szenarien GreenSupreme und GreenLate aus dem RESCUE-Projekt für eine vertiefende Betrachtung ausgewählt. Zusätzlich wurde auf das Hauptszenario TN-H₂-G der Langfristszenarien⁸ zurückgegriffen (im Folgenden H₂-Szenario genannt). Alle drei erreichen im Jahr 2050 Netto-null Emissionen⁹.

⁸ Die Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland wurden durch ein Konsortium aus Fraunhofer ISI, consentec, ifeu und TU Berlin im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie erstellt, <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>

⁹ Auch durch Nutzung von natürlichen Senken.



GreenSupreme beschreibt eine schnelle und tiefgreifende Transformation des Energiesystems. In GreenSupreme findet ein zügiger Ausstieg aus der Nutzung fossiler Rohstoffe statt und Optionen zur Erschließung von Energieeinsparungen werden erschlossen. Die nationale Nettostromerzeugung wird 2050 ausschließlich mit erneuerbaren Energien gedeckt. Neue Energieträger (Power to X, PtX-Technologien) substituieren fossile Rohstoffe in der Chemie- und Metallindustrie. Darüber hinaus werden sie in Bereichen eingesetzt, in denen eine Umstellung auf die direkte Stromnutzung schwer möglich ist, z. B. im Flugverkehr oder für bestimmte Nutzfahrzeuge. In GreenSupreme steigt die Materialeffizienz in allen Sektoren stark an. Es werden weitgehende Veränderungen im Verhalten angenommen, beispielsweise bei den Ernährungsgewohnheiten, der Mobilität, den Wohnansprüchen und im allgemeinen Konsumverhalten. Die Bevölkerungszahl in Deutschland sinkt, das Wirtschaftswachstum geht bis 2030 auf null zurück, aber das Einkommen pro Person steigt an. Im Vergleich zu GreenSupreme erfolgt in GreenLate die Transformation in geringerem Tempo und zu großen Teilen erst gegen Ende der Jahrhunderthälfte. Das H₂-Szenario beschreibt ebenfalls eine ambitionierte Transformation, legt aber einen Fokus auf die Nutzung von Wasserstoff.

Die RESCUE-Szenarien wurden für Deutschland formuliert. Um einerseits die Importe abzudecken und andererseits auch eine Übertragung der Energiewende betrachten zu können, wurde für die Transformation in der EU ohne Deutschland und für den Rest der Welt auf das 1,5°-Szenario von Teske¹⁰ zurückgegriffen. Die Transformation geht wie in GreenSupreme sehr zügig und umfassend voran. Das Szenario berücksichtigt alle umsetzbaren technologischen Maßnahmen, ohne gesellschaftliche bzw. politische Risiken und Hemmnisse zu berücksichtigen. Effizienzpotenziale sowie EE-Technologien werden schnell in der Breite gehoben bzw. entwickelt. Auch in weniger entwickelten Regionen werden ohne Übergang über fossilbasierte Energie sofort effiziente, auf erneuerbaren Energien basierende Technologien eingesetzt. Regionale Präferenzen für Energieerzeugung wurden berücksichtigt; so spielt beispielsweise Biomasse in Südamerika weiterhin eine Rolle in der Energieerzeugung.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de
 [umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
 [umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Autorenschaft, Institution

Dr. Karl Schoer
Schoer-Consult, Wiesbaden
Dr. Monika Dittrich, Florian Petri, Birte Ewers, Sonja Limberger Anja Doppelmayr, Regine Vogt, Axel Liebich
ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg

Stand: 03/2024

¹⁰ Teske, S. (2019): Achieving the Paris climate agreement goals: Global and regional 100% renewable energy scenarios with non-energy GHG pathways for+ 1.5 C and+ 2 C. Springer Nature.