

Internationale Verlagerung von Umweltwirkungen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland

Die Auswirkungen der Transformation Deutschlands in eine treibhausgasneutrale Gesellschaft machen nicht an den Grenzen des Landes halt. So entsteht schon heute ein erheblicher Anteil der Umweltwirkungen für den deutschen Energiebedarf im Ausland. Im Zuge der Defossilisierung wird dieser Anteil steigen – auch wenn die absolute Höhe der Belastungen abnimmt.

In Projekt REFINE¹ wurden die Rohstoffbedarfe und Umweltbelastungen im Zuge der Energiewende untersucht. Dabei standen u. a. zwei Forschungsfragen im Mittelpunkt:

- In welchem Verhältnis stehen die national eingesparten Treibhausgas(THG)-Emissionen zu den Emissionen, die aufgrund der unterstellten Energiewende national und international entstehen?
- Welche weiteren Umweltwirkungen werden im Ausland durch die angenommene Energiewende einschließlich Vorketten wahrscheinlich ausgelöst?

Zur Untersuchung dieser Fragen wurde ein prospektives Ökobilanzmodell entwickelt (→ Methode: Prospektive Ökobilanz). Dazu wurde die Ökobilanzdatenbank der schweizerischen ecoinvent Association an ausgewählte Szenarien angepasst, die den Transformationspfad zu einem treibhausgasneutralen und ressourceneffizienten Deutschland im Jahr 2050 beschreiben. Dies ermöglicht eine Berechnung der Umweltwirkungen, die aus dieser Transformation resultieren.

Methode: Szenarien

Für das Projekt REFINE wurden die Szenarien GreenSupreme und GreenLate aus dem RESCUE-Projekt für eine vertiefende Betrachtung ausgewählt². Beide Szenarien erreichen im Jahr 2050 Netto-null Emissionen³. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Transformationsgeschwindigkeit, Struktur der eingesetzten Technologien und in Annahmen zu gesellschaftlichen Veränderungen. In REFINE wird anders als in RESCUE auch für GreenLate angenommen, dass die Energiewende global 2050 abgeschlossen ist, statt 10 Jahre verzögert. Erreicht wird dies durch die Annahme von Carbon Capture Storage (CCS) der restlichen THG-Emissionen.

Das Szenario **GreenSupreme** beschreibt eine schnelle und tiefgreifende Transformation des Energiesystems. Es findet ein zügiger Ausstieg aus der Nutzung fossiler Rohstoffe statt. Optionen zur Erschließung von Energieeinsparungen werden erschlossen, sodass der Endenergiebedarf über alle Anwendungsbereiche in 2050 bei 1.366 TWh liegt. Die nationale Nettostromerzeugung steigt auf insgesamt 741 TWh und 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

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

² www.umweltbundesamt.de/rescue

³ Auch durch Nutzung von natürlichen Senken.

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.

Das Szenario **GreenLate** beschreibt eine langsame Transformation des Energiesystems, mit der eine Treibhausgasneutralität in 2050 knapp erreicht werden kann. Maßnahmen und Investitionen werden erst ab 2040 in größerem Umfang realisiert. Die Energieversorgung beruht auch hier im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien. Energieeffizienzpotentiale werden nur teilweise genutzt; der Endenergiebedarf liegt in 2050 bei 2.071 TWh. Hohe Durchdringungen direkt strom-basierter und damit systemisch effizienter Techniken können bis 2050 nur noch in Anwendungsbe-reichen mit kurzen Erneuerungszyklen und in Bereichen mit hohen Investitionsanreizen realisiert werden. Rohstoffeffizienz- und Recyclingpotentiale werden nur zum Teil ausgeschöpft. In Green-Late ist der Gebäudebestand weniger modernisiert und saniert im Vergleich zu GreenSupreme. Auch wenn die Elektromobilität den Individualverkehr dominiert, ist der Schwerlastverkehr 2050 weiterhin von Verbrennungskraftmaschinen geprägt. Dies führt zu hohen Bedarfen an erneuerba-ren Kraftstoffen.

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 bestehende 1,5°-und 2°-Szenarien zurückgegriffen⁴.

Dieses Factsheet zeigt die Ergebnisse für die RESCUE-Szenarien GreenSupreme und GreenLate. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den deutschen Endenergiebedarf (Strom, Fern-wärme, Kohle, Gase, Mineralöle und Biomasse), dessen Höhe und Zusammensetzung sich für 2020 aus der Statistik der AGE⁵ und für die Jahre 2030 bis 2050 direkt aus den zugrunde lie-genden Transformationsszenarien ergeben. Die Prozess- und Lieferketten der Energieträgerbe-reitstellung sind in ecoinvent regional differenziert abgebildet. Durch diese Klassifizierung nach Regionen, ist es möglich Verlagerungseffekte der zugehörigen Umweltwirkungen und Ressour-cenbedarfe zu analysieren.

Der Anteil deutscher Treibhausgasemissionen im Ausland steigt

Die Klimawirkung, die durch den deutschen Endenergiebedarf verursacht wird, sinkt im Szena-rio GreenSupreme bis zum Jahr 2050 um 99 % gegenüber 2020. In GreenLate wird eine Reduk-tion um 96 % erreicht. Die verbleibenden Beiträge von Treibhausgasen sind Kältemittlemissio-nen von Wärmepumpen, Schwefelhexafluorid (SF₆) aus Schaltanlagen und Umspannwerken, Lachgas (N₂O) v. a. aus der Hochspannungsübertragung von Strom sowie Methan (CH₄) überwie-gend aus Biogas und synthetischem Erdgas.

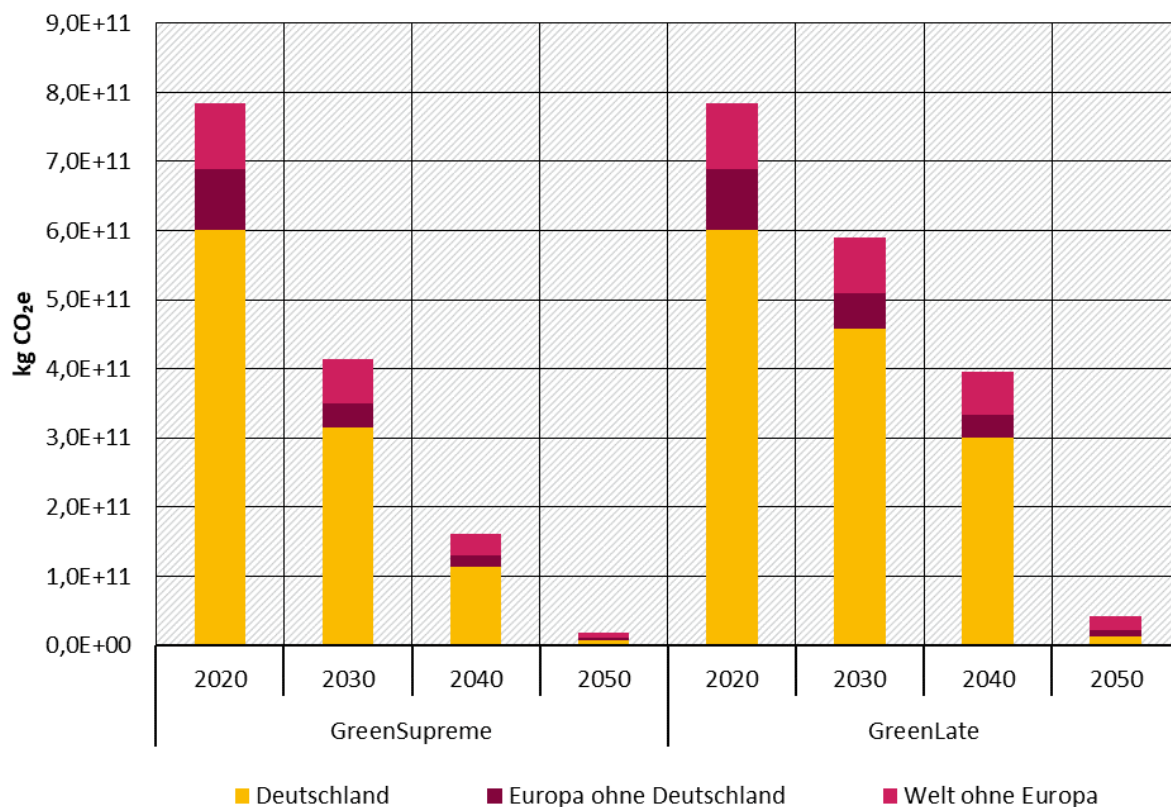
Während Kältemittel und SF₆ durch klimafreundliche Alternativen ersetzt werden können, sind Methan- und Lachgasemissionen schwieriger zu vermeiden. Doch wo entstehen heute und in Zu-kunft die Emissionen, um den deutschen Endenergiebedarf zu decken? Abbildung 1 zeigt das Er-gebnis für den Indikator Treibhauspotenzial (GWP100 nach IPCC 2013⁶) in kg CO₂-Äquivalenten (CO₂e), differenziert nach Ort der Freisetzung.

⁴ 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.

⁵ <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/>

⁶ <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Abbildung 1: Treibhauspotenzial des deutschen Endenergiebedarfs, differenziert nach Region der Emission



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Diese Analyse der THG-Emissionen nach dem **Ort der Freisetzung** zeigt, dass im Jahr 2020 23 % des gesamten Treibhauspotenzials von 784 Mio. t CO₂e über die Vorketten von Rohstoffen und Produkten im Ausland verursacht werden. Im Szenarienjahr 2050 liegen die Auslandsanteile des Treibhauspotenzials höher: bei 57 % in GreenSupreme und 70 % in GreenLate. Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass in den Szenarien das Treibhauspotenzial in Deutschland stärker fällt (99 bzw. 98 %) als im Ausland (94 bzw. 84 %). Während in den Regionen gleichermaßen die direkten THG-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger wegfallen, bestehen Änderungen bei den Importen. Heute werden hauptsächlich Energierohstoffe (Erdgas, Erdöl, Kohle) importiert und hier verbrannt. Vor allem im Szenario GreenLate werden 2050 synthetische Energieträger eingeführt, für deren Produktion (Infrastruktur-)Emissionen im Ausland anfallen. Eine absolute Zunahme des Treibhauspotentials im Ausland infolge der deutschen Energiewende bleibt aber aus. Voraussetzung hierfür ist die angenommene gleichzeitige Transformation der Energie- und Produktionssysteme auch im Ausland.

Weitere Umweltwirkungen zeigen stärkere Verlagerungseffekte

Ein ähnliches Bild wie für den Klimawandel zeigt sich für die Kategorie Versauerung. Während in Deutschland die versauernden Emissionen bis 2050 um 92 % bis 97 % abnehmen, liegt die Reduktion im Ausland nur bei 65 % bis 85 %. Der Anteil der ausländischen Emissionen für den deutschen Endenergiebedarf steigt von 78 % auf 91 % bis 94 %. Eine noch stärkere Verschiebung zeigt sich beim Frischwasserbedarf (Abbildung 2). Dort steigt der Anteil des für den deutschen Endenergiebedarf im Ausland entnommenen Frischwassers von 55 % auf rund 90 %.

Abbildung 2: Frischwasserbedarf verursacht durch den deutschen Endenergiebedarf, differenziert nach Region der Entnahme

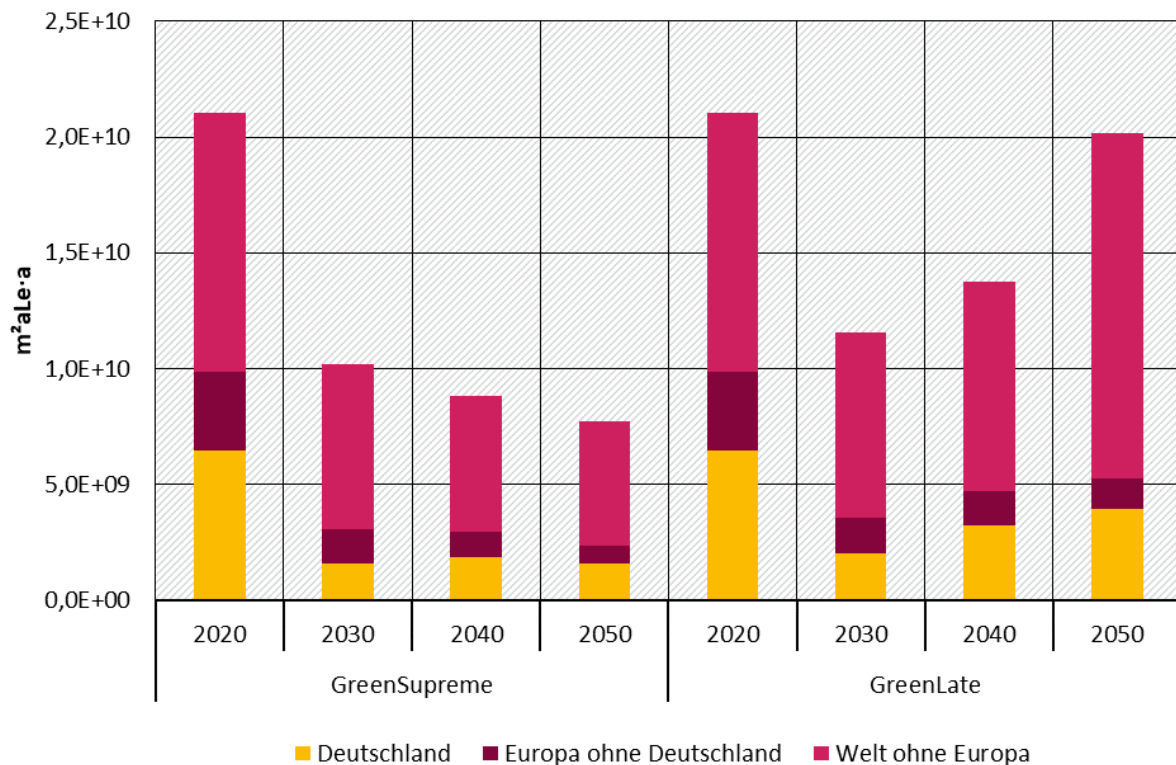


Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Für die Naturraumbeanspruchung (hemerobiegewichtete Landnutzung⁷) führt – zumindest im Szenario GreenLate – die Befriedigung des deutschen Endenergiebedarfs sogar zu einem absoluten Anstieg der Belastung außerhalb Deutschlands (Abbildung 3). Während die Landnutzung in Deutschland um mindestens 39 % sinkt, steigt sie im Szenario GreenLate im Ausland um 14 % an. In GreenSupreme ist dort eine Abnahme um 57 % zu beobachten. Der Grund für die nach 2020 zunächst stark sinkende Landnutzung für den deutschen Endenergiebedarf ist der modellierte Ausstieg aus der Braunkohleverstromung und aus der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse. Die Landnutzung im Ausland erfolgt 2050 im Wesentlichen durch die Nutzung von PV-Anlagen für die Produktion synthetischer Energieträger (PtX). Die Importmengen an PtX-Energieträgern liegt im Szenario GreenLate mit 947 TWh mehr als doppelt so hoch wie in GreenSupreme mit 412 TWh. Dies führt sowohl zu höheren direkten Umweltauswirkungen im Ausland, z.B. in Form von Naturraumbeanspruchung und Frischwasserentnahme, wie auch zu indirekten Wirkungen durch die Herstellung der PtX-Infrastruktur (z.B. für kumulierten Rohstoffaufwand, Treibhauspotenzial und Versauerung).

⁷ Die Art der Landnutzung wird nach ihrer Naturferne gewichtet; für versiegelte Flächen als maximal naturferne Landnutzung ist der Gewichtungsfaktor = 1.

Abbildung 3: Hemerobiegewichtete Landnutzung verursacht durch den deutschen Endenergiebedarf, differenziert nach Region der Inanspruchnahme



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Methode: Prospektive Ökobilanz mit der ecoinvent-Datenbank

Die Umweltwirkungen für die in REFINE betrachteten Szenarien, Regionen und Stützjahre werden mit der Ökobilanzmethode ermittelt. Dazu wurde die ecoinvent-Datenbank-Version 3.7.1⁸ an die Szenarien GreenSupreme und GreenLate angepasst. Die Datenbank besteht aus über 18.000 Einzeldatensätzen. Diese beschreiben in der Regel einzelne technische Prozesse oder Marktmixe – mit den Input- und Outputflüssen zwischen ihnen und der Technosphäre (v. a. Zwischenprodukte und Abfälle) bzw. der Biosphäre (Rohstoffentnahme und Emissionen). Diese Prozesse stellen ein vereinfachtes, verknüpftes Abbild der weltweiten Produktionsverflechtungen dar. Veränderungen einzelner Prozesse in der Datenbank, können somit Rückkopplungen auf vorgelagerte Prozessschritte in der Lieferkette haben.

Um die Datenbank an die RESCUE-Szenarien anzupassen, wurden eine Vielzahl von Prozessen verändert oder neu hinzugefügt. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms, Herstellungstechnologien für synthetische Energieträger, Wärmepumpen, Energiespeicher und alternative Antriebe gelegt. Außerdem wurden in der gesamten Datenbank die Strommixe und Wärmeerzeugung umgestellt, neue Industrieprozesse (u. a. Stahl- und Zementproduktion) eingeführt und Effizienzentwicklungen einbezogen. Insgesamt wurden im Rahmen der Anpassung der ecoinvent-Datenbank je Szenario und Bezugsjahr ca. 3.000 Datensätze ergänzt bzw. modifiziert und ca. 70.000 Parameter in Datensätzen geändert oder neu erzeugt.

⁸ www.ecoinvent.org

Die ecoinvent-Datenbank erlaubt die Auswertung eines umfassenden Sets an Umweltwirkungen und Indikatoren– sowohl für einzelne Technologien und Produkte wie Stromerzeugungsanlagen und synthetische Kraftstoffe, als auch für absolute Umweltwirkungen und Ressourceninanspruchnahmen wie den Endenergieverbrauch eines Landes oder einer Region.

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
[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
[t/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)

Autorenschaft, Institution

Daniel Münter, Axel Liebich, Monika Ditrach, Regine Vogt
ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Stand: April/2024