

Ressourcenbedarfe und Umweltwirkungen einer globalen Energiewende

Übertragung eines deutschen Transformationsszenarios auf die Welt

Mit der Erweiterung und Übertragung deutscher Transformationsszenarien hin zur Treibhausgasneutralität ist es möglich, abzuschätzen, welche Ressourcenbedarfe und Umweltwirkungen mit einer globalen Energiewende verbunden wären. Treibhausgase, Versauerung und andere Lasten, lassen sich stark reduzieren. Der Bedarf an Rohstoffen, vor allem Metallen, und Flächen steigt.

Im Projekt REFINE¹ wurden die Rohstoffbedarfe und Umweltbelastungen im Zuge der deutschen Energiewende untersucht. Neben den unmittelbaren Konsequenzen im In- und Ausland² war eine weitere Forschungsfrage, ob sich die Umweltwirkungen und Rohstoffbedarfe einer Übertragung der deutschen Energiewende auf andere Länder abschätzen lassen.

Zur Untersuchung dieser Fragen wurde ein prospektives Ökobilanzmodell entwickelt. Dazu wurde die Ökobilanzdatenbank der schweizerischen ecoinvent Association an das RESCUE-Szenario GreenSupreme³ angepasst, das einen Transformationspfad zu einem treibhausgasneutralen und ressourceneffizienten Deutschland im Jahr 2050 beschreibt. Für die Welt ohne Deutschland wurde das 1,5°C-Szenario von Teske⁴ als Grundlage der Anpassung verwendet. Die Modellierung ermöglicht eine Berechnung der Umweltwirkungen, die aus der Transformation resultieren.

Die in diesem Factsheet dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den globalen Endenergiebedarf (Strom, Fernwärme, Kohle, Gase, Mineralöle und Biomasse), dessen Höhe und Zusammensetzung sich für die Jahre 2020 bis 2050 direkt aus dem zugrunde liegenden 1,5°C-Szenario ergibt.

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 3.7.1⁵ an die Szenarien 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.

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

² Verlagerungen von Umweltlasten sind kompakt im Factsheet „Internationale Verlagerung von Umweltlasten auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland“ dargestellt

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

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 www.ecoinvent.org

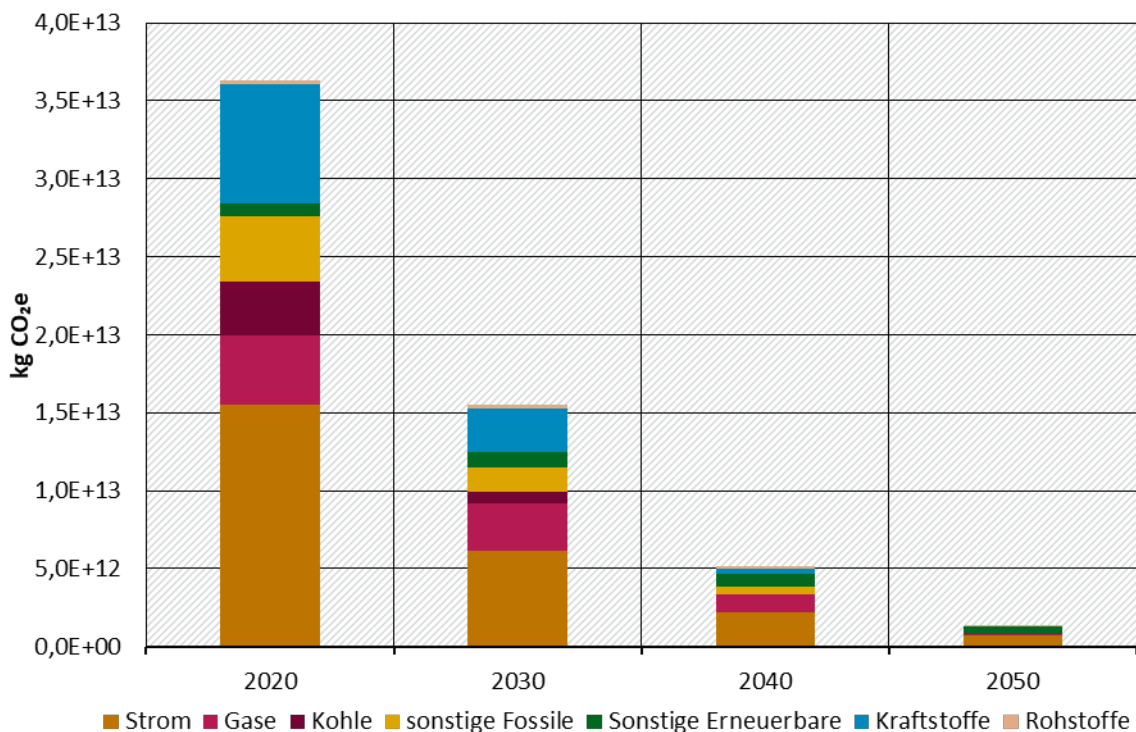
Um die Datenbank an die Szenarien anzupassen, wurden eine Vielzahl von Prozessen angepasst, verändert oder neu hinzugefügt. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms, Herstellungstechnologien für synthetische Energieträger, Wärmepumpen, Energiespeicher und alternative 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.

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.

Energiebedingte globale Treibhausgasemissionen können um 97 % sinken

Das aus den Berechnungen ermittelte Ergebnis für den Indikator Treibhauspotenzial (GWP100 nach IPCC 2013⁶) des weltweiten Endenergiebedarfs (Abbildung 1) liegt im Jahr 2020 bei 36 Gt CO₂-Äquivalenten (CO₂e); davon sind 33 Gt Kohlendioxid (CO₂). Im Vergleich dazu beziffert die Emissionsdatenbank der Europäischen Kommission (EDGAR) die weltweiten energiebedingten Treibhausgas(THG)-Emissionen mit 37 Gt CO₂e und davon 33 Gt Kohlendioxid.

Abbildung 1: Treibhauspotenzial des globalen Endenergiebedarfs, differenziert nach Energieträgern



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Im Jahr 2020 ist die Stromherstellung für 43 % des Treibhauspotenzials verantwortlich und die Wärmebereitstellung für 36 % (aus Gasen 12 %, aus Kohle 10 %, aus sonstigen Fossilen 12 %)

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

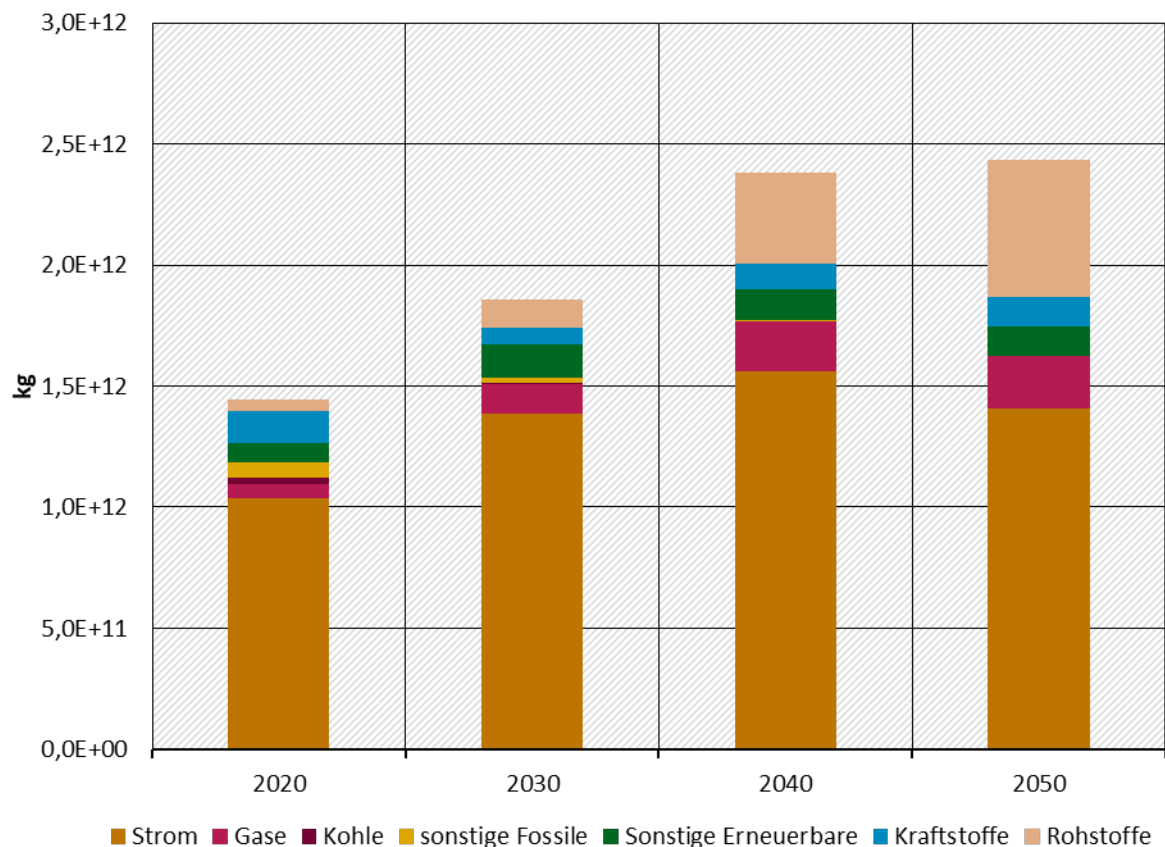
und aus sonstigen Erneuerbaren 2,2 %). Kraftstoffe verursachen einen Anteil von 21 % und die Bereitstellung von Energieträgern als Rohstoffe (z.B. für die chemische Industrie) von 0,7 %.

Zwischen 2020 und 2050 führt die weitgehende Defossilisierung der Energiebereitstellung zu einer Reduktion des Treibhauspotenzials des globalen Endenergiebedarfs um 97 %. Die Klimawirkung der verbleibenden THG-Emissionen beträgt 2050 noch rund 1 Gt CO₂e. Davon sind 25 % durch CO₂ aus der Landnutzung und Landnutzungsänderung (LULUC) für Bioenergieträger, 22 % durch Lachgas (N₂O) aus der Herstellung von Biokraftstoffen und dem Betrieb von Hochspannungsleitungen, 16 % durch Kühlmittel R134a aus dem Betrieb von Wärmepumpen, 15 % durch SF₆ (Schwefelhexafluorid) aus Schaltanlagen, 9 % durch CO₂ aus der Herstellung von Zement für die Energieinfrastruktur und aus der Entgasung mineralischer Karbonate bei der Geothermienutzung und 7 % durch biogenes Methan aus der Biogasherstellung verursacht. Diese Auflistung zeigt zum einen, dass eine solche Analyse Hinweise auf weitere Reduktionspotenziale liefert. Zum anderen ist es sinnvoll, in einem iterativen Vorgehen zu prüfen, ob die in der ecoinvent-Datenbank hinterlegten Technologien auch für die Zukunft plausibel sind. So sind treibhaussschädliche Kühlmittel und SF₆ im vollständigen deutschen Transformationsszenario auch durch unschädliche Alternativen ersetzt.

Der Bedarf an Metallen und Fläche steigt

Die Ergebnisse für andere Umweltwirkungen wie Versauerung, Eutrophierung, Ozonabbau und Feinstaubbelastung folgen im Wesentlichen dem Reduktionstrend des Treibhauspotenzials. Für einige Indikatoren zeigt sich aber eine andere Entwicklung.

Abbildung 2: Kumulierter Aufwand an Metallrohstoffen des globalen Endenergiebedarfs, differenziert nach Energieträgern

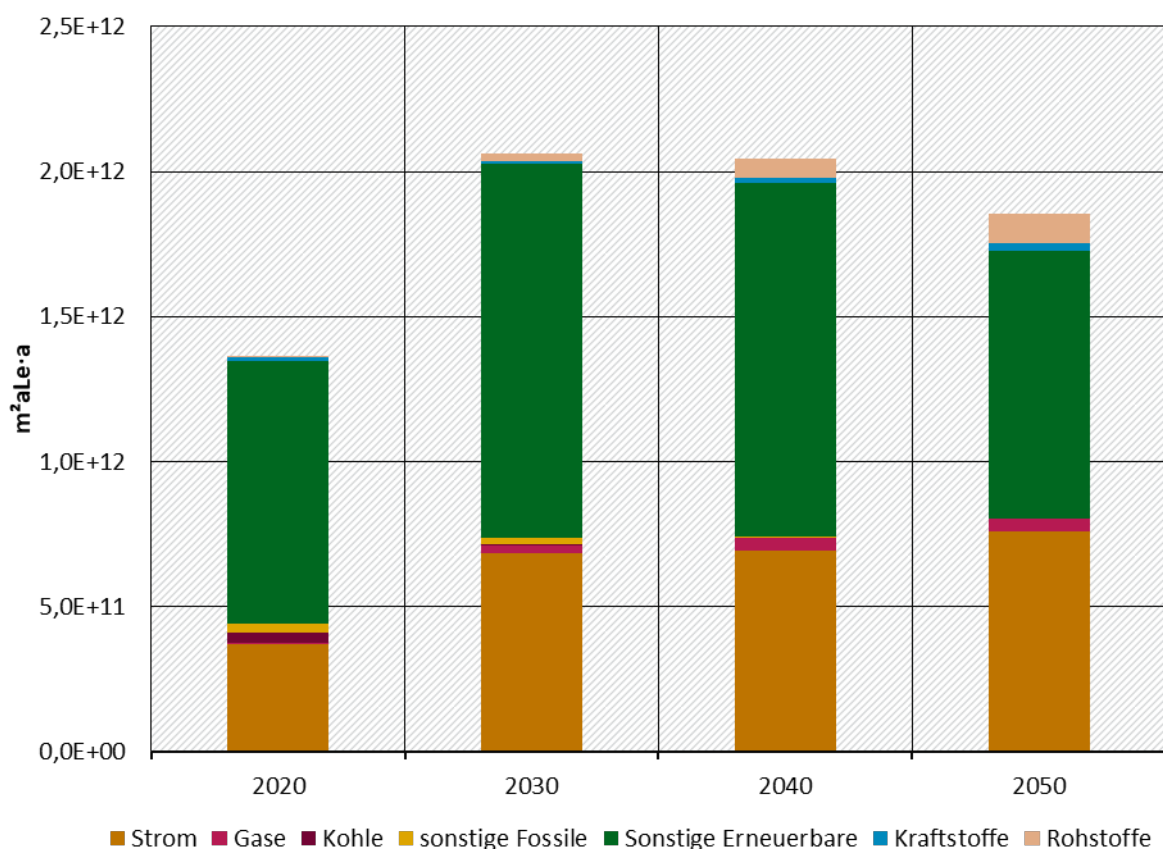


Quelle: eigene Darstellung, ifeu

So steigt der kumulierte Aufwand an Metallrohstoffen („KRA Metalle“) zur Deckung des globalen Endenergiebedarfs von 2020 bis 2050 um rund 70 % an. Dafür ist vor allem der zusätzliche Bedarf an Strom, aber auch für Gase und stofflich genutzte Energieträger („Rohstoffe“ in Abbildung 2) verantwortlich. In den Transformationsszenarien werden letztere durch strombasierte synthetische Energieträger (Power-to-X (PtX)-Energieträger Wasserstoff, synthetisches Methan/Methanol/Naphta) ersetzt. Die dafür notwendigen Stromerzeugungsanlagen (hauptsächlich Photovoltaik (PV) und Windenergie) benötigen vor allem Kupfer, Stahl, Nickel, Gold und Aluminium. Diese Ergebnisse machen deutlich, wie wichtig es ist, metallische Rohstoffe effizient und sparsam einzusetzen und frühzeitig die Stoffkreisläufe zu schließen.

Auch das Indikatorergebnis für die hemerobiegewichtete Landnutzung⁷ zeigt einen anderen Trend (Abbildung 3) als das Ergebnis des Treibhauspotenzials. Die weitestgehende Defossilisierung der Energiebereitstellung bis 2050 führt zur Steigerung der hemerobiegewichteten Landnutzung um 36 %. Im Jahr 2020 wird das Ergebnis überwiegend von der Stromerzeugung (27,1 %) und vor allem den sonstigen Erneuerbaren (66,5 %) bestimmt. Letztere setzen sich 2020 aus 56 % Biomasse (Holz, Holzpellets, u. ä. für Wärme) und aus 9,2 % Biokraftstoffen zusammen.

Abbildung 3: Hemerobiegewichtete Landnutzung des globalen Endenergiebedarfs, differenziert nach Energieträgern



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Der Anstieg bis 2050 ist vor allem durch die Stromerzeugung zu verantworten – mit einer Erhöhung der Landnutzung um 106 % bei einer Steigerung des Strombedarfs um 86 %. Eine Zunahme ist auch für die Bereitstellung von Gasen, Kraft- und Rohstoffen zu verzeichnen. Obwohl

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

der Kraftstoffbedarf leicht sinkt (-9 %) erhöht sich die hemerobiegewichtete Landnutzung um das 24-fache. Dies ist auf die Stromerzeugung für strombasierte synthetische Kraftstoffe zurückzuführen. 11 % der endenergiebedingten globalen hemerobiegewichteten Landnutzung gehen 2050 auf PV-Freiflächenanlagen zur direkten Stromnutzung zurück. Die Stromnutzung zur Bereitstellung von PtX-Energieträgern verursacht 9,4 % des Ergebnisses.

Der Beitrag sonstiger Erneuerbarer bleibt gegenüber 2020 nahezu konstant. Im Gegensatz zu den Ergebnissen für Deutschland dominiert die energetische Biomassenutzung die hemerobiegewichtete Landnutzung auch in 2050 (76 %), obwohl auch im hier zugrunde gelegten globalen Szenario der Anteil von Anbaubiomasse zurückgeht und nur 11,8 % des Endenergiebedarfs deckt. Um die hemerobiegewichtete Landnutzung zu vermindern, ist eine weitere Reduktion von energetisch genutzter Anbaubiomasse eine zentrale Stellschraube.

Eine ambitionierte und zügige globale Energiewende, wie sie in dem prospektiven Ökobilanzmodell abgebildet wird, führt insgesamt zu signifikanten Umweltentlastungen der Energiebereitstellung:

- ▶ Das Treibhauspotential vermindert sich um 97 % infolge der vollständigen Defossilisierung.
- ▶ Die weiteren Umweltwirkungen sind heute ebenfalls überwiegend auf die Bereitstellung und Nutzung der fossilen Energieträger zurückzuführen und reduzieren sich um 12 % bis 92 %.

Die Ressourcenbedarfe erhöhen sich teilweise erheblich durch die Energiewende:

- ▶ Der Bedarf an Metallrohstoffen erhöht sich um knapp 70 % und macht deutlich, dass eine weitgehende Schließung der Stoffkreisläufe grundlegend ist.
- ▶ Die hemerobiegewichtete Landnutzung ist wesentlich auf Anbaubiomasse und PV-Freiflächenanlagen zurückzuführen und erhöht sich global um 36 %.
- ▶ Der Frischwasserbedarf reduziert sich hingegen mit der Defossilisierung um 56 %.

Methode: Szenarien

Für das Projekt REFINE wurden u. a. das Szenario **GreenSupreme** aus dem RESCUE-Projekt für eine vertiefende Betrachtung ausgewählt. Es erreicht im Jahr 2050 Netto-null Emissionen⁸. Es beschreibt eine schnelle und tiefgreifende Transformation des Energiesystems. In GreenSupreme findet ein zügiger Ausstieg aus der Nutzung fossiler Rohstoffe statt. Optionen zur Erschließung von Energieeinsparungen werden erschlossen, sodass der Endenergiebedarf über alle Anwendungsgebiete 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 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

⁸ Auch durch Nutzung von natürlichen Senken.



Deutschland sinkt, das Wirtschaftswachstum geht bis 2030 auf Null zurück, aber das Einkommen pro Person steigt an.

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 Teske** zurückgegriffen. In diesem Szenario ist das zwischen 2015 und 2050 verbleibende CO₂-Emissionsbudget mit 450 Gt vorgegeben. 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)
 [/umweltbundesamt](https://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