Ariadne-Report

Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045

Szenarien und Pfade im Modellvergleich

KOPERNIKUS PROJEKTE
Ariadne
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Der vorliegende Ariadne-Report wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Er spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Corrigendum
In einer früheren Version dieses Reports waren die Flächenverbrauchskoeffizienten für Freiflächenphotovoltaik, Wasserstoff, E-Fuels und Importe nicht korrekt abgeleitet. Zudem wurden Szenarienupdates nicht konsistent in Kapitel 9 umgesetzt. Diese Fehler sind nun behoben und betreffen Angaben zum spezifischen Flächenverbrauch, Gesamtfächenverbrauch und zur Nutzung erneuerbarer Energien in der Zusammenfassung (Abschnitt Z.6) sowie in Kapitel 9 (Abschnitte 9.6 und 9.7). Die betroffenen Abbildungen Z.15, 9.8, 9.9 und 9.10 ebenfalls korrigiert.

Herausgegeben von
Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

Oktober 2021

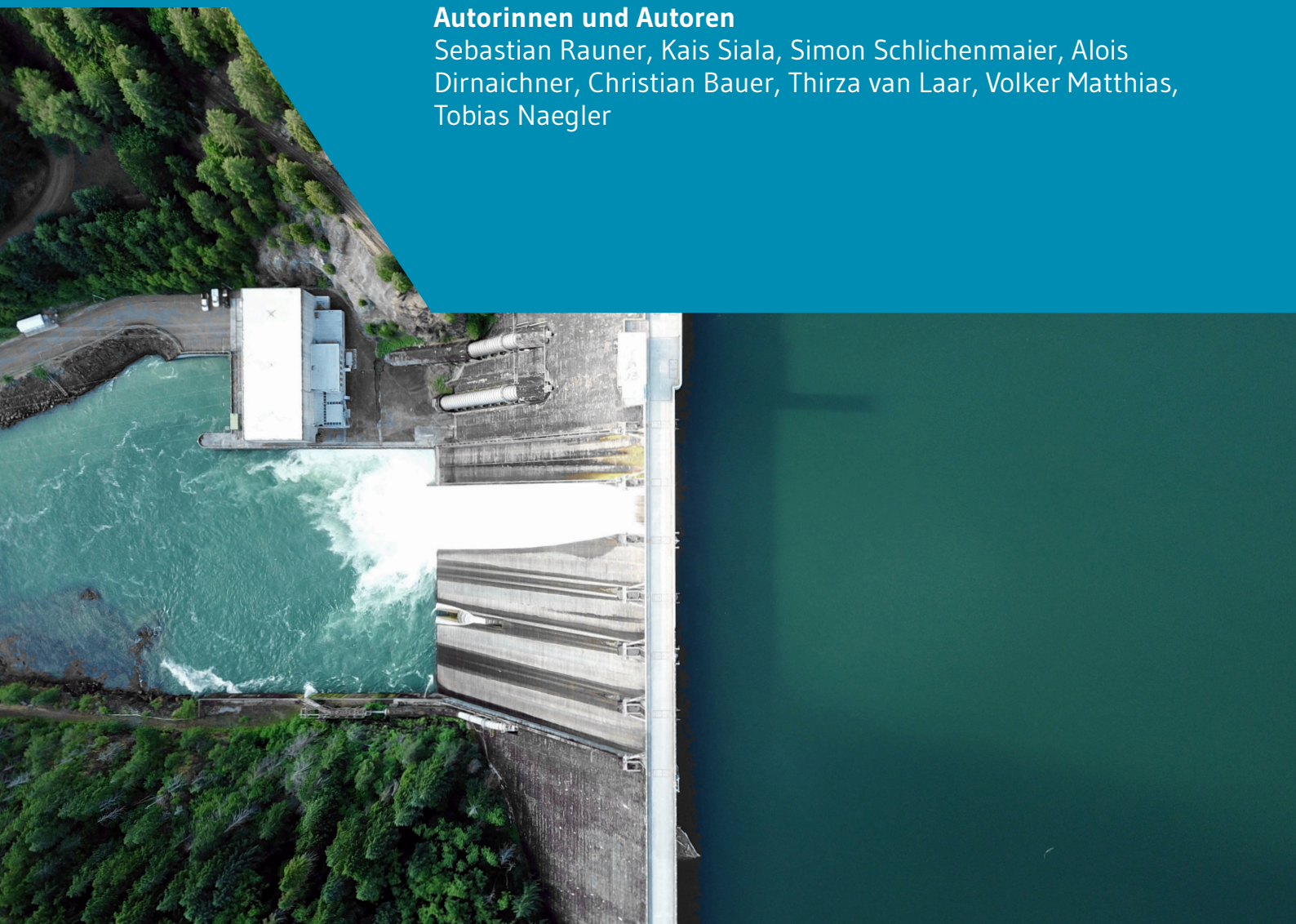
Kopernikus-Projekt Ariadne (2021):
Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich.
https://doi.org/10.48485/pik.2021.006

Bildnachweise
Titel: Yeshi Kangrangz / Unsplash; Zusammenfassung: Andrea Boldizsar / Unsplash; Kapitel 1: Ashley Batz / Unsplash; Kapitel 2: funky-data / iStock; Kapitel 3: Julian Hochgesang / Unsplash; Kapitel 4: Robin Sommer / Unsplash; Kapitel 5: huangyifei / iStock; Kapitel 6: audioundwerbung / istock; Kapitel 7: Clint Adair / Unsplash; Kapitel 8: Adam Vradenburg / Unsplash; Kapitel 9: Dan Meyers / Unsplash; Kapitel 10: Micheile Henderson / Unsplash

9. Umweltwirkungen

9.1	Zusammenfassung	252
9.2	Hintergrund	253
9.3	Methoden	253
9.4	Gesundheitswirkung	254
9.4.1	*Luftverschmutzung*	*254*
9.4.2	*Gesundheitswirkungen der Mobilität*	*258*
9.5	Kritische Materialien für die Energiewende	263
9.6	Landnutzung	268
9.7	Synthese / Handlungsempfehlungen	275
Literaturangaben		277

Autorinnen und Autoren
Sebastian Rauner, Kais Siala, Simon Schlichenmaier, Alois Dirnaichner, Christian Bauer, Thirza van Laar, Volker Matthias, Tobias Naegler



9.1 Zusammenfassung

Die Energiewende bietet großen Zusatznutzen besonders für die öffentliche Gesundheit.
Die verwendeten Szenarien zeigen, dass im Jahr 2045 eine deutliche Verringerung der Luftverschmutzung zu erwarten ist, vorausgesetzt die neuen Filtertechnologiestandards werden stringent umgesetzt. Das hat positive Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung. Durchschnittlich könnte sich bis 2045 durch diesen Effekt die Lebenserwartung im Vergleich zu heute um ca. 0,4 Lebensjahre verlängern, wobei im Ariadne *E-Fuels*-Szenario die im Vergleich der Szenarien höchsten Schäden verbleiben.

Negative Gesundheitswirkungen des Transportsektors werden künftig nicht mehr hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen, sondern durch die Produktionsprozesse.
Die indirekten Gesundheitswirkungen der Produktionsprozesse sinken im Gegensatz zu den direkten Auswirkungen nur um ca. 30 % bis 2045. Die notwendige Förderung klimafreundlicher und effizienter Mobilität sollte daher einhergehen mit einer nachhaltigen Transformation der Produktionsprozesse und der Rohstoffgewinnung sowie einer Verringerung des Individualverkehrsaufkommens.

Große Herausforderungen zeigen sich beim Bedarf an kritischen Materialien.
So steigt der Materialbedarf in allen Zielszenarien zur Klimaneutralität 2045, wobei die einzelnen Technologieentwicklungspfade jeweils die Nachfrage nach bestimmten Rohstoffen besonders erhöhen. Zusätzlich zur Erschließung von neuen Rohstoffvorkommen sind politische Maßnahmen erforderlich, um Recycling sowie die Verringerung des Energiebedarfs zu fördern. Außerdem kann die Reduktion der Nachfrage im Transportsektor, unter anderem durch die Verringerung der durchschnittlichen Fahrzeug- und Batteriegröße, dabei helfen, knappe Materialien zu erhalten, die auch für die Energiewende von kritischer Bedeutung sind.

Die Energiewende hat eine deutliche Auswirkung auf die Flächennutzung in Deutschland.
Durch den Ausbau von Wind und Solar steigt die benötigte Fläche von heute 0,6 % auf 1,9 – 3,4 % der Landesfläche Deutschlands. Die Nutzung von Wasserstoff und E-Fuels führt durch die geringere Effizienz dieser Energieträger zu zusätzlichen Flächenbedarfen verglichen mit der direkten Elektrifizierung. Dieser Bedarf kann jedoch durch den in den Szenarien unterstellten Rückgang der des Biomasseanbaus kompensiert werden, sodass unterm Strich der Gesamtflächenbedarf für die Erneuerbaren Energien leicht sinkt. Um Flächenkonkurrenz mit anderen Sek-

toren abzuschwächen, sollten Formen der gemeinsamen Nutzung dieser Flächen etwa für Photovoltaik (PV)-, Windprojekten und die Landwirtschaft gefördert werden sowie die Nutzung von Dachflächen für Solaranlagen und von biologischen Reststoffen zur Energiegewinnung.

9.2 Hintergrund

Die Transformation hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft erfordert einen raschen und tiefgreifenden Umbau des Energiesystems sowie aller Nachfragesektoren (Industrie, Verkehr sowie Gebäude). Dieser Umbau birgt Chancen für den Umwelt- und Naturschutz sowie die öffentliche Gesundheit, aber auch das Risiko unerwünschter Auswirkungen. Diese Risiken hängen von der spezifischen Ausgestaltung der Energiewende ab.

Wie genau das zukünftige Energiesystem und der Technologiemix in den Sektoren Gebäude, Verkehr und Industrie aussehen und welche Rolle neue Technologien wie Wasserstoff und E-Fuels spielen, ist nicht nur eine Kostenfrage. Relevant ist auch eine Betrachtung der Umweltwirkungen, welche über die Klimawirkung hinausgehen. Nur so ist es Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern möglich, potenzielle Engpässe und Zielkonflikte zu umgehen und den Zusatznutzen der Energiewende zu optimieren.

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass der alleinige Fokus auf Klimaschutz bei der Politikgestaltung zu unerwünschten negativen Effekten für die Umwelt führen kann, die wiederum die gesellschaftliche Akzeptanz der Maßnahmen massiv reduzieren kann. Als Beispiele sind die Vermaisung der Landschaft durch die frühe Bioenergieförderung oder der Import von Biosprit aus Biodiversitäts-Hotspots zu nennen. Andererseits lassen sich Zusatznutzen von Klimaschutzmaßnahmen realisieren, so mindert z. B. die Elektrifizierung des Individualverkehrs die Luftverschmutzungssituation im urbanen Kontext.

Die Umweltaspekte der verschiedenen Transformationspfade, welche durch das Energiesystem am meisten belastet werden oder wo zukünftig eine Mehrbelastung zu erwarten ist, werden im Rahmen dieser Studie untersucht. Der Fokus liegt auf den Gesundheitswirkungen des Verkehrssektors sowie auf der Luftverschmutzung durch das Energiesystem. Des Weiteren werden die Nachfrage nach kritischen Materialien sowie der Flächenbedarf untersucht.

9.3 Methoden

Eine Untersuchung der Umweltauswirkungen erfordert die Erweiterung der Systemgrenzen von Integrated Assessment Modellen (IAMs), um die Vorleistungen in den Lieferketten einzubeziehen

und Umweltwirkungen wie Luftverschmutzung, Materialverbrauch und Landverknappung zu berücksichtigen. Diese erweiterte Betrachtung wird durch Kopplungen mit anderen Werkzeugen ermöglicht. Zum Beispiel wird in dieser Studie die Methode der Ökobilanzierung (Englisch: Life Cycle Assessment, kurz LCA) verwendet, um die indirekten Auswirkungen der Verlagerung des ökologischen Fußabdrucks von der Energieerzeugung und -nutzung zur Produktion von Energieanlagen und Endgeräten in einem erneuerbar dominierten Energiesystem abzuschätzen. Atmosphärenchemische Modelle bieten die Möglichkeit, die Entwicklung der Luftschadstoffemissionen abzubilden. Außerdem wird eine Materialflussanalyse durchgeführt, um den Verbrauch von Rohstoffen und die Recyclingraten besser abzubilden. Ein Vorteil dieses modularen Ansatzes ist es, Unsicherheiten, welche mit den jeweiligen Forschungsfeldern assoziiert sind, sichtbar machen zu können. Eine detaillierte Beschreibung der angewandten Methoden ist im Appendix des Berichts zu finden.

In dieser Studie werden mehrere Szenarien analysiert und zuerst auf Systemebene verglichen. Dafür werden nur die Ergebnisse des REMIND-Modells genutzt, um die Analyse rechentechnisch beherrschbar zu halten. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der eingesetzten Treibstoffe (Strom, Wasserstoff, E-Fuels). Die Produktionsketten dieser Treibstoffe beruhen auf der Nutzung unterschiedlicher Materialien und weisen daher unterschiedliche Energieeffizienz- und Landnutzungsbedarfe auf. Auch in der Nutzungsphase verursachen die eingesetzten Technologien unterschiedlich hohe Emissionen. Die Analysen unterscheiden auch zwischen einheimischer Erzeugung und Importen, damit die Schäden in den exportierenden Ländern berücksichtig werden.

9.4 Gesundheitswirkung

9.4.1 Luftverschmutzung

Die anhaltende Corona-Pandemie hat die öffentliche Gesundheit in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Luftverschmutzung ist weltweit eine der Hauptursachen von vorzeitigen Todesfällen (Kassebaum et al., 2016) und belastet die öffentliche Gesundheit in Europa mit jährlich ca. 490.000 vorzeitigen Todesfällen (2018), wobei Deutschland mit 76.000 Fällen das am meisten belastete Land in der EU ist (European Environment Agency (EEA), 2020). Die Verbrennung fossiler Energieträger ist mit Abstand die größte Quelle von anthropogener Luftverschmutzung. Diese Studie untersucht die Szenarien auf die wichtigsten Luftschadstoffemissionen sowie deren Wirkung auf die öffentliche Gesundheit.

Abbildung 9.1 zeigt die Entwicklung der wichtigsten Luftschadstoffemissionen des Energiesektors in Deutschland. Bei angenommener effizienter Implementierung von Emissionsstandards und Filtertechnologien führen alle Szenarien zu einer erheblichen Reduktion der Luftverschmutzung, wobei das *E-Fuel*-Szenario die größte Menge an Emissionen in 2045 aufweist.

Die Untersuchung hypothetischer Szenarien ohne eine Verbesserung der Luftverschmutzungsfiltertechnologien (gestrichelte Linien) ermöglicht eine isolierte Analyse der Beiträge der Klimaschutzanstrengung auf die Luftverschmutzung. Hier wird deutlich, dass Klimaanstrengungen unabhängig von der angenommenen Filtertechnologieentwicklung zu erheblichen Reduktionen der Luftverschmutzung führen. Die beiden Szenarien *Technologiemix* und *E-Fuels* weisen die größte Menge verbleibender Emissionen auf, welche in 2045 je nach Schadstoff stellenweise doppelt so hoch wie bei direkter Elektrifizierung und Fokus auf Wasserstoff sind.

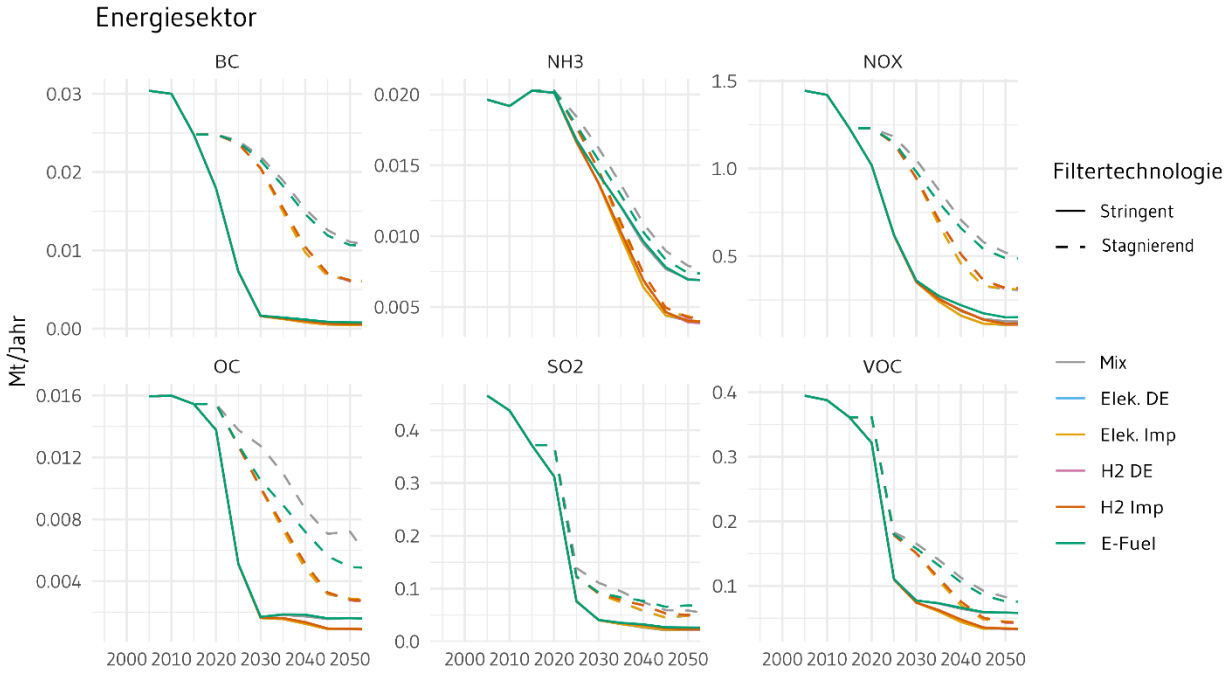


Abbildung 9.1: Luftschadstoffemissionen des Energiesektors in Deutschland für die Fokusszenarien bei stringentem Einsatz von Filtertechnologien (durchgehende Linie) und bei Fixierung der Filtertechnologie auf dem Niveau von 2010 (gestrichelte Linie). BC: Ruß; NH_3: Ammoniak, NOX: Stickstoffoxide, OC: Organischer Kohlenstoff; SO_2: Schwefeldioxid, VOC: Flüchtige organische Verbindungen.

Abbildung 9.2 zeigt beispielhaft die räumliche Verteilung der Gesamt- und Verkehrssektoremissionen von Stickoxiden (NOx) für das Jahr 2020 und für das *Technologiemix*-Szenario im Jahr 2045. Stickoxide schaden der Gesundheit und gelten als Indikator für sämtliche Verkehrsemissionen. Aus Abbildung 9.2 wird deutlich, dass die Gesamtemissionen stark sinken werden, es aber im

Jahr 2045 besonders durch den Verkehrssektor zu substanziellen verbleibenden Emissionen in den Ballungszentren kommt. Die *Technologiemix*- und *E-Fuels*-Szenarien zeichnen sich hierbei durch deutlich höhere verkehrsbedingte Emissionen in den Ballungszentren aus als die *Elektrifizierungs*- und *Wasserstoff*-Szenarien.

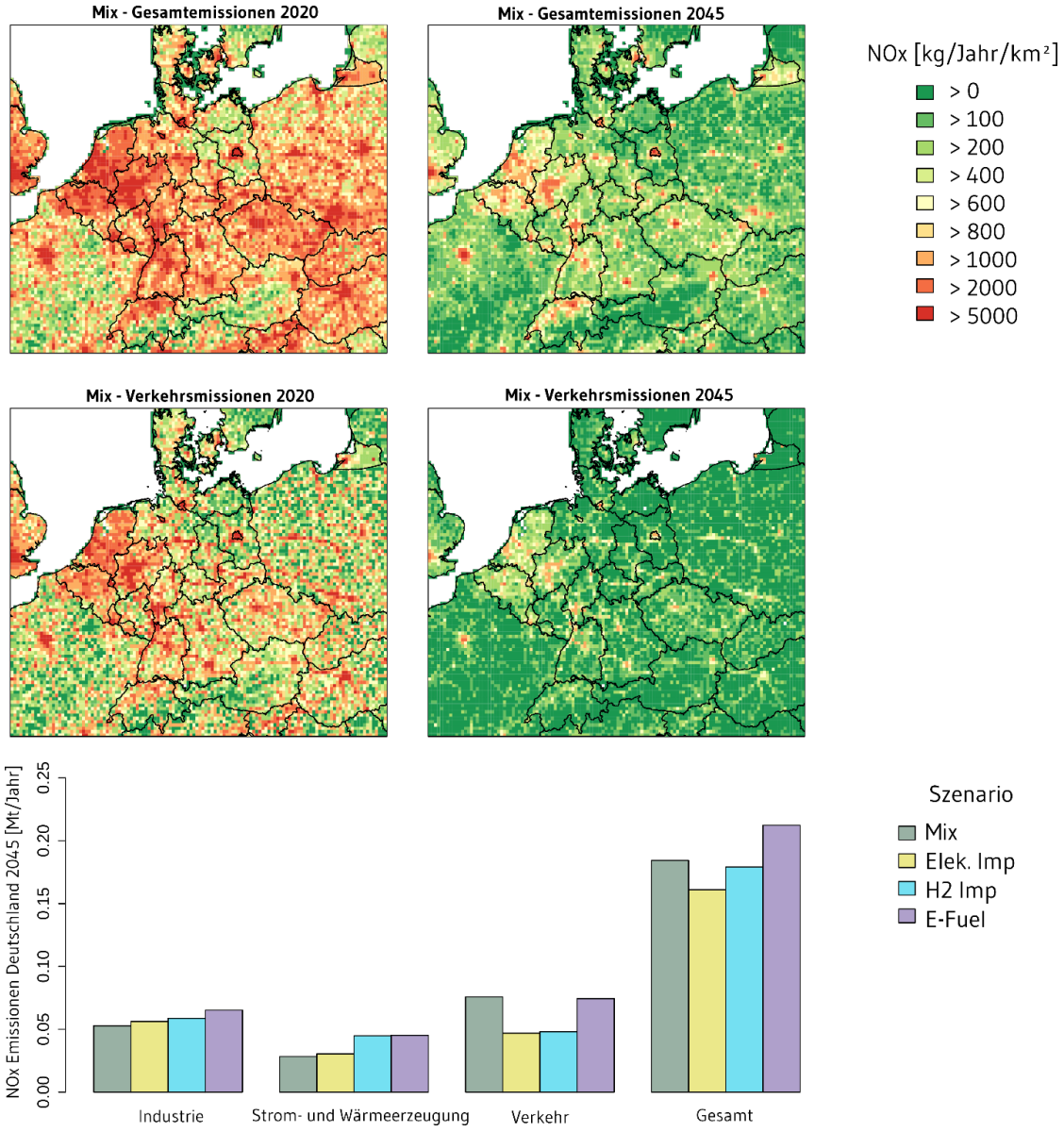


Abbildung 9.2: Oberer Teil: Räumliche Verteilung der NOx ($NO+NO_2$) Gesamt- und Verkehrssektoremissionen für das Jahr 2020 (links) und das Technologiemix-Szenario im Jahr 2045 (rechts). Unterer Teil: Sektorale Verteilung der NOx Emissionen für die Szenarien: Technologiemix, Elektrifizierung (Import), Wasserstoff (Import) und E-Fuels.

Luftverschmutzung wirkt vielfältig auf die menschliche Gesundheit. Neben den gut untersuchten Auswirkungen auf Herzkreislauf-, Lungen- und Krebserkrankungen werden auch negative Effekte auf die kognitive Leistungsfähigkeit (Zhang et al., 2018), Kindersterblichkeit (Heft-Neal et al.,

2018) und Demenz (The Lancet Neurology, 2018) diskutiert. Als Indikator für das erhöhte Risiko durch Luftverschmutzung werden die verlorenen oder durch Krankheit beeinträchtigten Lebensjahre kumuliert über die gesamte hypothetische Lebenserwartung angegeben. Weiterhin wurden assoziierte direkte und soziale Kosten ermittelt.

Abbildung 9.3 zeigt die Gesundheitswirkungen und sozialen Kosten der Szenarien bei angenommener stringenter und stagnierender Filtertechnologieumsetzung. Die Verringerung der Emissionen führt zu einer Senkung der Gesundheitseffekte gemessen in den zuvor erläuterten verlorenen gesunden Lebensjahren in allen Szenarien um mehr als die Hälfte auf über 0,45 Jahre pro Person in 2045 in Deutschland bei einer angenommenen Lebenserwartung von durchschnittlich 85 Jahren. Die Szenarien unterscheiden sich dabei nicht signifikant.

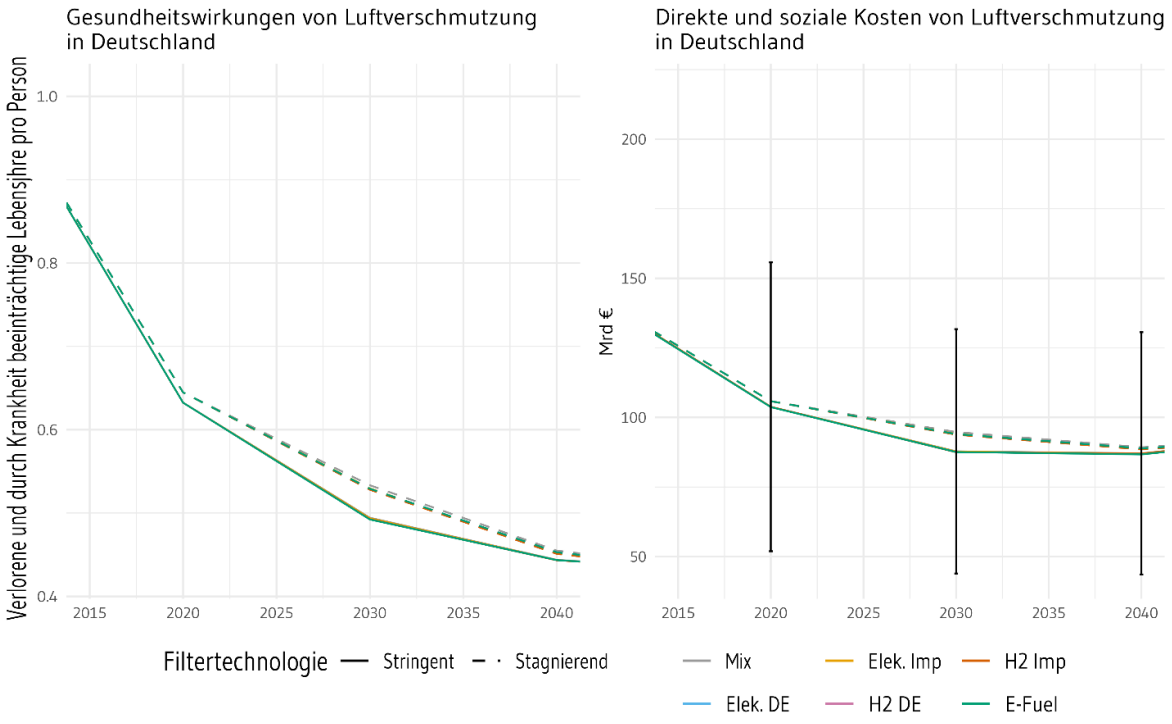


Abbildung 9.3: Gesundheitswirkungen sowie direkte und soziale Kosten durch Luftverschmutzung in Deutschland für die Fokusszenarien bei stringenter Filtertechnologieumsetztung (durchgehende Linie) und bei Fixierung der Filtertechnologie auf dem Niveau von 2010 (gestrichelte Linie). Das Konfidenzintervall bildet die Unsicherheit bei der Übersetzung der Gesundheitsschäden in Geldwerte ab.

Die Übersetzung der Gesundheitswirkungen in monetäre Schäden wirft ethische Fragen auf, ermöglicht aber eine Einordnung der sonst schwer interpretierbaren Schäden. Dazu werden direkte Kosten, welche den Arbeitsausfall durch Krankheit und Produktivitätsminderung sowie die Kosten für das Gesundheitssystem umfassen, betrachtet. Daneben werden die indirekten sozialen Kosten durch einen Ansatz der theoretischen Zahlungsbereitschaft (OECD, 2012) geschätzt, welche auf Befragungen zur Höhe der einer hypothetischen monetären Kompensation beruhen ab der Menschen bereit sind Gesundheitsschäden durch Luftverschmutzung in Kauf zu nehmen. Da die Höhe der ermittelten monetären Kompensation abhängig ist von der Wirtschaftsleistung einer Volkswirtschaft, stagnieren die sozialen Kosten trotz sinkender Gesundheitswirkungen bei knapp unter 100 Mrd. Euro jährlich. Die Unsicherheit in den auf diese Weise ermittelten Geldwerten ist jedoch substanziell und führt zu einer Bandbreite von 40 bis 135 Mrd. Euro.

9.4.2 Gesundheitswirkungen der Mobilität

Bei den gesundheitlichen Auswirkungen des Verkehrs stehen in der Regel die direkten Effekte im Vordergrund: Verkehrsunfälle, Atemwegsprobleme durch Luftschadstoffe aus Verbrennungsmotoren und lärmbedingter Stress. Der größte Anteil an dieser Belastung, der auch weiterhin steigt, kann auf den Autoverkehr zurückgeführt werden: Das ICCT Institut schätzt die Anzahl der vorzeitigen Todesfälle durch Luftverschmutzung im Verkehr in Deutschland auf 13.000 im Jahr, zwei Drittel der Fälle werden durch Diesel Pkw verursacht (Anenberg et al., 2019). Diese Auswirkungen können durch eine Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe vermieden werden. Eine vollständige Analyse der Gesundheitswirkungen verschiedener Flottenszenarien sollte die Wertschöpfungskette mit einbeziehen (Cox et al., 2020). Zu diesem Zweck wird das Energiesystemmodell REMIND mit einem detaillierten Transportsystemmodell (EDGE-T) gekoppelt. Die resultierenden Flottenszenarien werden mit Hilfe von Lebenszyklusanalysen auf ökologische und gesundheitliche Auswirkungen untersucht. Mit dem Energiesystemmodell werden Szenarien der zukünftigen Entwicklung des Stromsektors ermittelt. Die so ermittelten Daten des Stromsektors werden auf Prozessdaten der Lebenszyklusanalyse übertragen. Eine Beschreibung der Methodik findet sich im Appendix. Auch die Bewertung der Luftschadstoffwirkungen basiert auf Methoden der Lebenszyklusanalyse. Nicht alle Datensätze lassen eine räumliche Unterscheidung des Emissionsstandorts zu.

Da die Ergebnisse in diesem Fall für die gesamte Fläche Deutschlands gemittelt werden, ist davon auszugehen, dass der Zusatznutzen durch geringere Luftschadstoffbelastungen in Ballungsräumen durch diese Analyse systematisch unterschätzt wird.

In Abbildung 9.4 werden die Gesundheitseffekte pro Fahrzeug-Kilometer für durchschnittliche Elektroautos mit denen von Verbrennerfahrzeugen auf Wirkungs- (Abbildung 9.4a, Einheit: Verlorene gesunde Lebensjahre, Disability-Adjusted Life Years, DALYs) und auf Stoffflussebene (*Abbildung 9.4*b) nach der ReCiPe2008 Charakterisierungsmethode verglichen. Die Gesundheitsfolgen des Klimawandels, der durch die Treibhausgase verursacht wird, werden hier nicht berücksichtigt. Als Hintergrundszenario wird für die E-Autos das Ariadne-Szenario *Elektrifizierung (inländisch)* angenommen, für die Fahrzeuge mit Ottomotor wird im Jahr 2045 zwischen konventionellem Kraftstoff im Szenario *Trend* und mehrheitlich synthetischen Kraftstoffen im Szenario *E-Fuels* unterschieden.

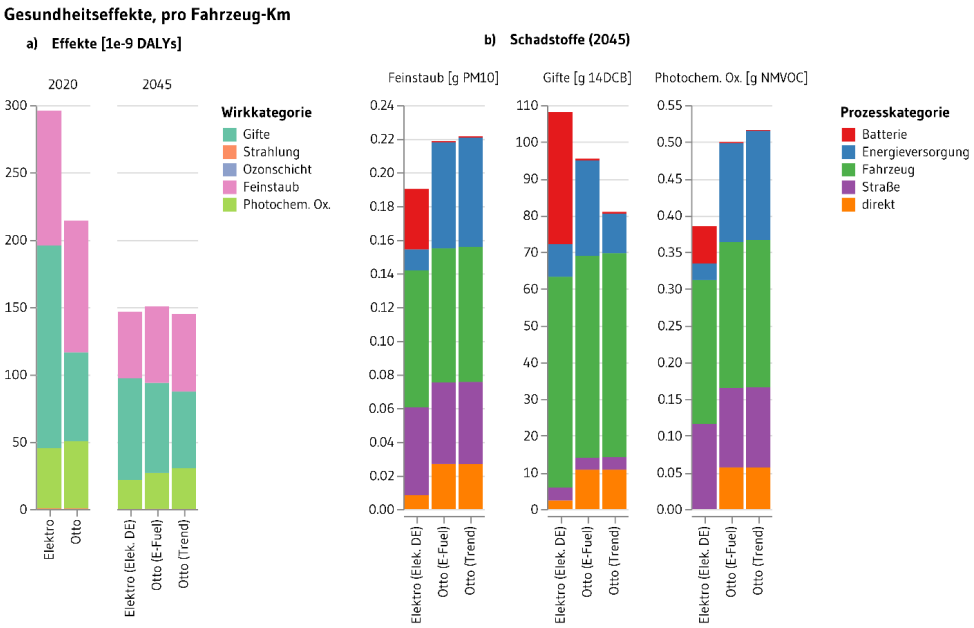


Abbildung 9.4: Gesundheitseffekte (verlorene gesunde Lebensjahre, Disability-Adjusted Life Years) von durchschnittlichen Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Ottomotor pro Fahrzeug-km in verschiedenen Ariadne-Szenarien auf a) Gesamteffekt- und b) Wirkungskategorieebene für die Jahre 2020 (nur Effekte) und 2045. Betrachtet werden Gifte, (ionisierende) Strahlung, Ozonbildung, Feinstaub und photochemische Oxidationsmittelformation (Sommersmog). Gesundheitliche Folgen von Treibhausgasemissionen sind nicht berücksichtigt.

Im Jahr 2020 überwiegen die negativen Gesundheitseffekte durch Umweltgifte bei der Erzeugung der Elektrizität für batterieelektrische Fahrzeuge (battery electric vehicle, BEV) in Kohlekraftwerken und entlang der Wertschöpfungskette bei der Herstellung von Batterien. In der Feinstaub Kategorie halten sich die (direkten) Emissionen der Fahrzeuge mit Ottomotor (OMF) und die Emissionen aus der Kohleverstromung die Waage. Für das Jahr 2045 sieht die Bilanz der BEVs vor dem Hintergrund einer erneuerbaren Stromerzeugung deutlich besser aus. Die verbleibenden Feinstaubemissionen entstehen bei der Gewinnung und der Aufbereitung von Stahl und Aluminium für den Fahrzeugbau, beim Straßenbau und bei der Batterieherstellung (auch hier fällt in erster Linie die Bereitstellung von Kobalt und Lithium für die Kathode und von Kupfer für die Anode ins Gewicht). Die OMFs der Zukunft verfügen über ausgereifte Filtertechnologien (EURO-7), dementsprechend ist der Beitrag der Abgasemissionen zur Feinstaubbelastung gering. Größer ist der Fußabdruck der Ölraffinerien und der Verbrennung der Gase bei der Ölförderung (Flaring) in der Prozesskategorie Energieversorgung. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den photochemischen Oxidationsmitteln (PO), die für Sommersmog verantwortlich sind. Beide Stoffflusskategorien sind mit Verbrennungsvorgängen verknüpft. In der Kategorie der Umweltgifte schlagen die höheren Materialverbräuche der BEFs vor allem bei der Batterieherstellung zu Buche. Unter den einzelnen Prozessen leisten die größten Beiträge die Verbringung von Abfällen aus der Kupferschmelze (12 %) und der Minenabraum von Silberminen (12 %), aus denen Schadstoffe ins Grundwasser gelangen. Zwischen den beiden Szenarien mit OMF zeigt sich hier ein größerer Unterschied bei den Auswirkungen durch die Energieversorgung, der auf den hohen Stromverbrauch zur Erzeugung der synthetischen Kraftstoffe zurückzuführen ist.

In Abbildung *9.5* sind die Folgen direkter (links) und indirekter Emissionen (rechts) der deutschen Autoflotte für die Jahre 2020 und 2045 abgebildet. Die Auswirkungen aus indirekten Emissionen übersteigen die direkten Wirkungen um eine Größenordnung. In allen Szenarien verringern Filtertechnologien und zunehmende Elektrifizierung die Gesundheitseffekte durch direkte Emissionen. Während sich im Jahr 2030 noch kaum szenariospezifische Unterschiede zeigen, sind im Jahr 2045 die niedrigsten (direkten) schädlichen Auswirkungen im Szenario mit der ambitioniertesten Elektrifizierungsstrategie (*Elektrifizierung (inländisch)*) zu erwarten. Der Fußabdruck durch direkte Emissionen der Flotte mit einem synthetischen Kraftstoffanteil (58 %) in *E-Fuels* ist im Vergleich zum *Trend*-Szenario durch einen etwas höheren Elektroanteil (50 % in *Trend* gegenüber 60 % in *E-Fuels*) geringer.

Bei den Gesundheitseffekten, die durch Emissionen entlang der Herstellungs-, Energiebereitstellungs- und Entsorgungskette entstehen, ist der Unterschied zwischen den Szenarien überraschend gering. Hier gleichen sich die Wirkungen durch Batterieherstellung (*Elektrifizierung (inländisch)*), die Folgen der Treibstoffbereitstellung (*Trend*) und der Fußabdruck eines höheren Strombedarfs (*E-Fuels*) in etwa aus.

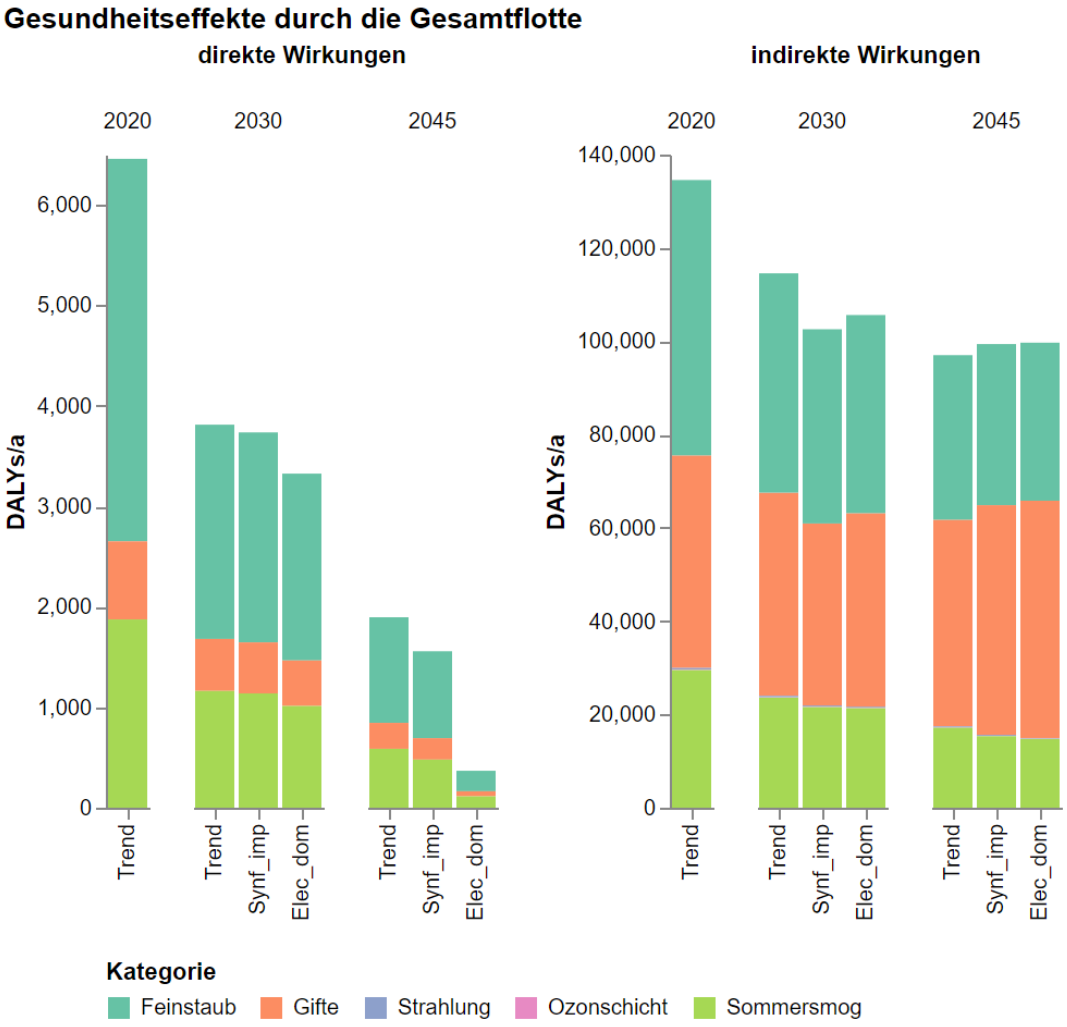


Abbildung 9.5: Verlorene gesunde Lebensjahre (DALYs) als Folge des motorisierten Individualverkehrs in Deutschland in den Jahren 2020 und 2045 für verschieden Szenarien. Unterschieden werden die Folgen direkter Emissionen auf der linken und die Folgen indirekter Emissionen auf der rechten Seite.

Die wesentliche Grundannahme, unter der diese Ergebnisse zu interpretieren sind, ist eine größtenteils unveränderte industrielle Produktionsweise. Es fließen zwar Abschätzungen zur Verbesserung von Filtertechnologien für einzelne Prozesse ein, doch werden die Prozesse an sich nicht ausgetauscht. Der Grund hierfür ist die mangelnde Datenlage hinsichtlich der Umweltbilanz zukünftiger nachhaltigerer Produktionsprozesse. In dieser Hinsicht kann von einer Verzerrung zu Lasten der materialintensiveren Elektrofahrzeuge gesprochen werden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Auswirkungen, die mit der Lebenszyklusanalyse nach ISO14040 abgeschätzt werden, als linear skalierend angenommen werden. Durch großen zusätzlichen Ressourcenbedarf können allerdings überproportionale Schäden entstehen. Außerdem nicht berücksichtigt werden gesellschaftliche Auswirkungen, die durch problematische Geschäftspraktiken in Ländern mit nicht ausreichender Regulierung entstehen (zum Beispiel bei der Kobaltförderung im Kongo) oder durch Übernutzung knapper Ressourcen (zum Beispiel bei der Förderung von Lithium in Chile) (Frischknecht, 2012).

Des Weiteren werden nicht in allen Datensätzen die Emissionen in Stadt und Land unterschieden. Dies führt zu einer systematischen Unterschätzung der Auswirkungen der direkten Emissionen, welche oft in dicht besiedelten Räumen stattfinden. Umgekehrt werden die Auswirkungen der Emissionen einiger Prozesse (z. B. zur Rohstoffgewinnung), die in abgelegenen Gebieten stattfinden, überschätzt.

Aus diesen Resultaten können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die verschiedenen Antriebsoptionen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer gesamten (globalen) schädlichen Auswirkung auf die menschliche Gesundheit im Sinne von verlorenen Lebensjahren nicht wesentlich, da Differenzen bei den direkten Emissionen durch Unterschiede in den indirekten Emissionen ausgeglichen werden.
- Über alle Szenarien hinweg gehen die direkten Emissionen zurück, die geringsten Gesundheitswirkungen aus dem direkten Betrieb finden sich im Szenario mit einem hohen Anteil an batterieelektrischen Fahrzeugen.
- Schäden durch Ressourcenabbau, Metallherstellung und Verarbeitung in produzierenden Ländern sind vergleichbar in allen Szenarien.
- Bei konventionellen Fahrzeugen mit synthetischen Kraftstoffen gleicht die Gesundheitsbelastung durch den Stromverbrauch zur Herstellung der Kraftstoffe etwa den Gesundheitswirkungen aus der Bereitstellung fossiler Kraftstoffe.

Zur Verbesserung der Umweltbilanz der Pkw-Flotte legen die Ergebnisse nahe, die aus Sicht des Klimaschutzes notwendige Förderung klimafreundlicher und effizienter Elektromobilität mit einer strengen Regulierung der Produktionsprozesse und der Rohstoffgewinnung in der Lieferkette zu kombinieren (siehe auch Öko-Institut (2017)). Die Ergebnisse unterstreichen auch die Notwendigkeit, die Verkehrswende über die Antriebswende hinaus zu denken: Ein Rückgang des motorisierten Individualverkehrs und des Fahrzeugbestandes durch eine Verlagerung auf öffentliche Verkehrsmittel und Fahrräder mindert auch die Umweltwirkungen der Produktionsprozesse.

9.5 Kritische Materialien für die Energiewende

Erneuerbare Energien benötigen im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken mehr und vielfältigere Metalle/Materialien (Watari et al., 2018; Zepf et al., 2014); die Materialanforderungen für Elektrofahrzeuge sind ein seit Jahren diskutiertes Thema (Kushnir and Sandén, 2012; Ziemann et al., 2013). Die Problematik der Materialverfügbarkeit ist also nicht grundlegend neu und wird bereits auf nationaler sowie internationaler Ebene erforscht und kontrolliert (European Commission, 2020; Marscheider-Weidemann et al., 2021; Watari et al., 2020).

Im Zuge dieser Analyse soll aufgezeigt werden, welche Metalle/Materialien für Deutschland kritisch sind bzw. werden können und welche Möglichkeiten zur Abschwächung der Materialproblematik bestehen. Betrachtet werden die Entwicklung des spezifischen Bedarfs (zum Beispiel pro kW installierte Leistung oder pro kWh Speicherkapazität) für 26 Materialien und über 50 Technologien in verschiedenen Technologieklassen im Zeitraum bis 2045 sowie Subtechnologieroadmaps, welche zu einem höheren (*RM1*) bzw. niedrigeren (*RM2*) Materialbedarf führen. Eine detailliertere Beschreibung der Subtechnologieroadmaps befindet sich im Anhang.

Die Kritikalität bezieht sich dabei ausschließlich auf die geologischen Beschränkungen (Lagerstätten und Produktionskapazitäten) der einzelnen Materialien. Faktoren wie beispielsweise geopolitische Risiken aufgrund der Lage der Abbaustätten werden nicht berücksichtigt.

Zur Abschätzung der Kritikalität der einzelnen Materialien wird der kumulierte Bedarf mit globalen Werten für Ressourcen[27] und Reserven[28] des jeweiligen Materials abgeglichen, die über den deutschen Anteil am globalen BIP auf Deutschland heruntergerechnet wurden. Beim Vergleich des Bedarfs mit Reserven und Ressourcen muss beachtet werden, dass diese Größen dynamisch z. B. von den Weltmarktpreisen und Fortschritten im Bereich der Abbautechnologien abhängen und somit keine fixen Grenzen für den Materialbedarf darstellen. Eine detailliertere Beschreibung der Methodik befindet sich im Anhang.

Anhand des Abgleichs des Bedarfs aller 26 Materialien mit den Deutschland zugeordneten Reserven und Ressourcen konnten insbesondere sechs Materialien (Kobalt, Dysprosium, Iridium, Lithium, Nickel und Vanadium) als potenziell kritisch identifiziert werden.

[27] Ressourcen = Eine Konzentration von natürlich vorkommendem festen, flüssigen oder gasförmigen Material in oder auf der Erdkruste in einer solchen Form und Menge, dass die wirtschaftliche Gewinnung eines Rohstoffs aus der Konzentration derzeit oder potenziell möglich ist (U. S. Geological Survey, 2020).

[28] Reserven = Der Teil der Ressourcen, der zum Zeitpunkt der Bestimmung wirtschaftlich abgebaut oder gefördert werden könnte. Der Begriff "Reserven" setzt nicht voraus, dass die Förderanlagen vorhanden und in Betrieb sind (U. S. Geological Survey, 2020).

In Abbildung 9.6 ist der kumulierte Bedarf der Jahre 2015 – 2045 für die verschiedenen Szenarien und die beiden Roadmaps auf Basis von REMIND-Szenarienergebnissen dargestellt. Dabei sind die verschiedenen Technologieklassen, in denen die Materialien benötigt werden, farblich differenziert.

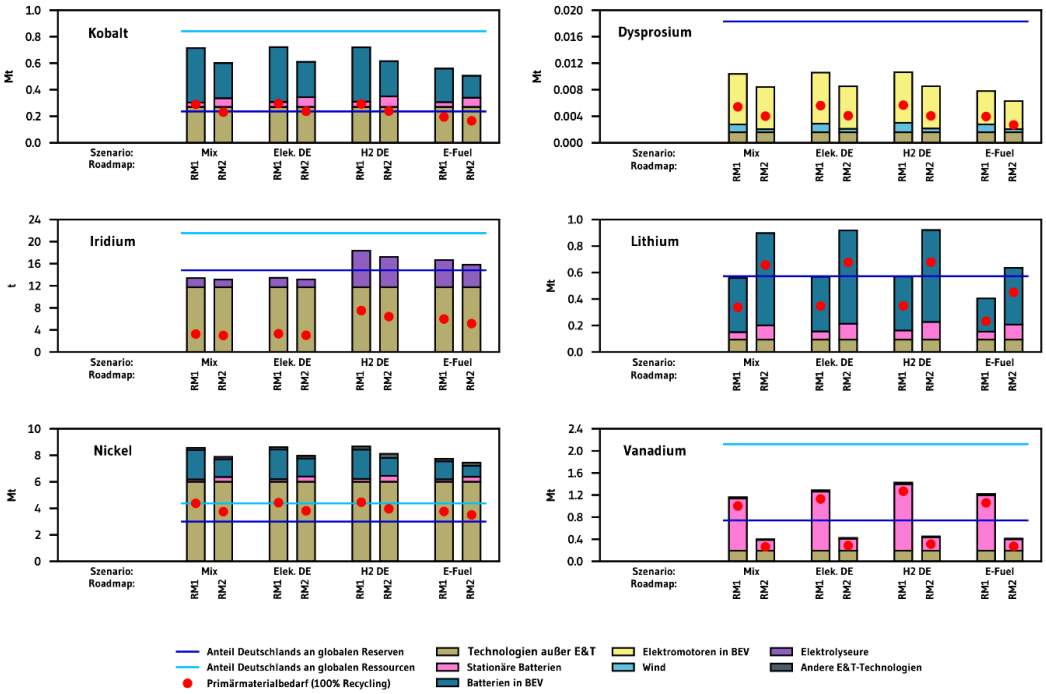


Abbildung 9.6: Kumulierter Bedarf (2015-2045) ausgewählter Materialien nach Technologieklassen, Primärmaterialbedarf insgesamt, sowie ggf. Vergleich mit dem Deutschland zugeordneten Anteil an globalen Reserven und Ressourcen (hell- und dunkelblaue Linie). Der rote Punkt kennzeichnet jeweils den Primärmaterialbedarf, das heißt die Menge, die abgebaut werden muss, selbst wenn 100 % der Materialien nach der Lebenszeit der Technologien wieder recycelt und dem System zugeführt werden.

Anhand der Ergebnisse in Abbildung 9.6 wird ersichtlich, dass sich der Bedarf an kritischen Materialien in allen betrachteten Szenarien in einem vergleichbaren Rahmen bewegt. Insbesondere Kobalt, Dysprosium, Lithium und Nickel werden in erster Linie für die Elektrifizierung des Transportsektors benötigt, die in allen Szenarien in einem ähnlichen Ausmaß erfolgt. Treiber für den Bedarf sind in erster Linie Batterien im Verkehrssektor (Kobalt, Nickel, Lithium) und Elektromotoren (Dysprosium). Auffällig ist allerdings, dass die Roadmap-Auswahl für Lithium einen gegenläufigen Effekt zu Kobalt und Nickel hat. Das bedeutet, dass der Einsatz von Batterietechnologien für den Verkehr, die nur einen geringen Kobalt- bzw. Nickelgehalt aufweisen, zwar Engpässe bezüglich Kobalt und Nickel reduzieren kann, dies jedoch durch einen höheren Bedarf an Lithium erkauft wird – und umgekehrt. Andere Anwendungen im Energiesektor sind stationäre Batterie-

speicher (Kobalt, Vanadium) und Permanentmagnete für Windkraftanlagen (Dysprosium). Vanadium reagiert auch sehr stark auf die Roadmap-Auswahl, das heißt die Frage, welche Batterietypen im stationären Bereich eingesetzt werden. In *RM1*, in der Vanadium-Redox-Flow Batterien einen Marktanteil von ca. 30 % im stationären Segment im Jahr 2045 aufweisen, werden die Reserven für alle Szenarien deutlich überschritten. Etwas anders gelagert ist der Fall von Materialien wie Iridium, die in erster Linie für Technologien im Wasserstoffsektor notwendig sind. Der Bedarf an Iridium (insbesondere für Elektrolyseure) liegt in denjenigen Szenarien, in denen größere Mengen an Wasserstoff entweder für die direkte Nutzung oder als Ausgangsbasis für synthetische Kraftstoffe benötigt werden (*Wasserstoff (inländisch)* und *E-Fuels*), deutlich über den Szenarien, in denen Wasserstoff nur eine untergeordnete Rolle spielt (*Technologiemix* und *Elektrifizierung (inländisch)*). Kobalt, Iridium und Nickel haben einen nicht zu vernachlässigenden Bedarf für Anwendungen jenseits der Energie- und Transportsektoren (zum Beispiel als Legierungsmetall).

Bei allen Materialien kann ein ambitioniertes Recycling den Primärmaterialbedarf deutlich reduzieren. Jedoch übersteigt der kumulierte Materialbedarf je nach Roadmap die Deutschland zugeordneten Reserven im Falle von Kobalt, Iridium, Lithium und Vanadium, und sogar die Ressourcen im Falle von Nickel. Lediglich bei Dysprosium erreicht der kumulierte Bedarf in 2045 ca. die Hälfte der Deutschland zugeordneten Reserven. Die Verhältnisse würden sich drastisch ändern, wenn die Anteile an Ressourcen und Reserven anders verteilt werden. Eine Verteilung z. B. nach dem Anteil Deutschlands an der Weltbevölkerung führt zu „deutschen" Reserven und Ressourcen, die ca. um einen Faktor drei niedriger liegen als im Falle einer Verteilung nach Bruttoinlandsprodukt (BIP). Die hier angenommene Verteilung stellt daher eher einen für Deutschland günstigen Fall dar.

In Abbildung 9.7 ist der jährliche Bedarf der einzelnen Materialien für die Jahre 2020 – 2045 in den jeweiligen Szenarien abgebildet. Die dargestellten Bandbreiten ergeben sich dabei aus den Unterschieden der beiden verwendeten Roadmaps. Dieser Materialbedarf kann durch Primärmaterial oder – falls vorhanden – recyceltes Material gedeckt werden. Anhand der Ergebnisse in Abbildung 9.7 wird ersichtlich, dass der jährliche Bedarf der einzelnen Materialien bis ca. 2035 stark ansteigt. Danach stabilisiert sich der Bedarf auf einem höheren Niveau. Ausnahmen bilden hierbei Dysprosium und Vanadium, die nach 2035 einen Bedarfsrückgang verzeichnen. Je nach Roadmapauswahl steigt der Lithiumbedarf ab 2040 noch einmal signifikant an, während der Kobaltbedarf abnimmt. Dies ist bedingt durch den Einsatz lithiumreicher, kobaltarmer Batterien im Verkehrssektor in *RM2*. Im Falle von Kobalt, Dysprosium, Lithium und Nickel ist der Treiber in erster Linie der schnelle Ausbau einer elektrifizierten Fahrzeugflotte. Der Iridium-Bedarf spiegelt

den Aufbau einer H_2-Infrastruktur wider. Der Vanadiumbedarf hängt stark davon ab, inwieweit Vanadium-Redox-Flow-Batterien als Kurz-Mittelfrist-Speicher zum Einsatz kommen.

Die Analyse zeigt, dass es unabhängig von der technischen Transformationsstrategie in Zukunft bei den meisten hier untersuchten Materialien zu Engpässen kommen kann. Ursache ist dabei die zum Teil deutlich steigende Nachfrage bei denjenigen Energie- und Verkehrstechnologien (Batterien, Permanentmagnete in Elektromotoren und Windkraftanlagen, Elektrolyseure), die einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten können. In den nachfolgenden Abschnitten werden Möglichkeiten erläutert, wie diese Engpässe potenziell abgeschwächt werden können.

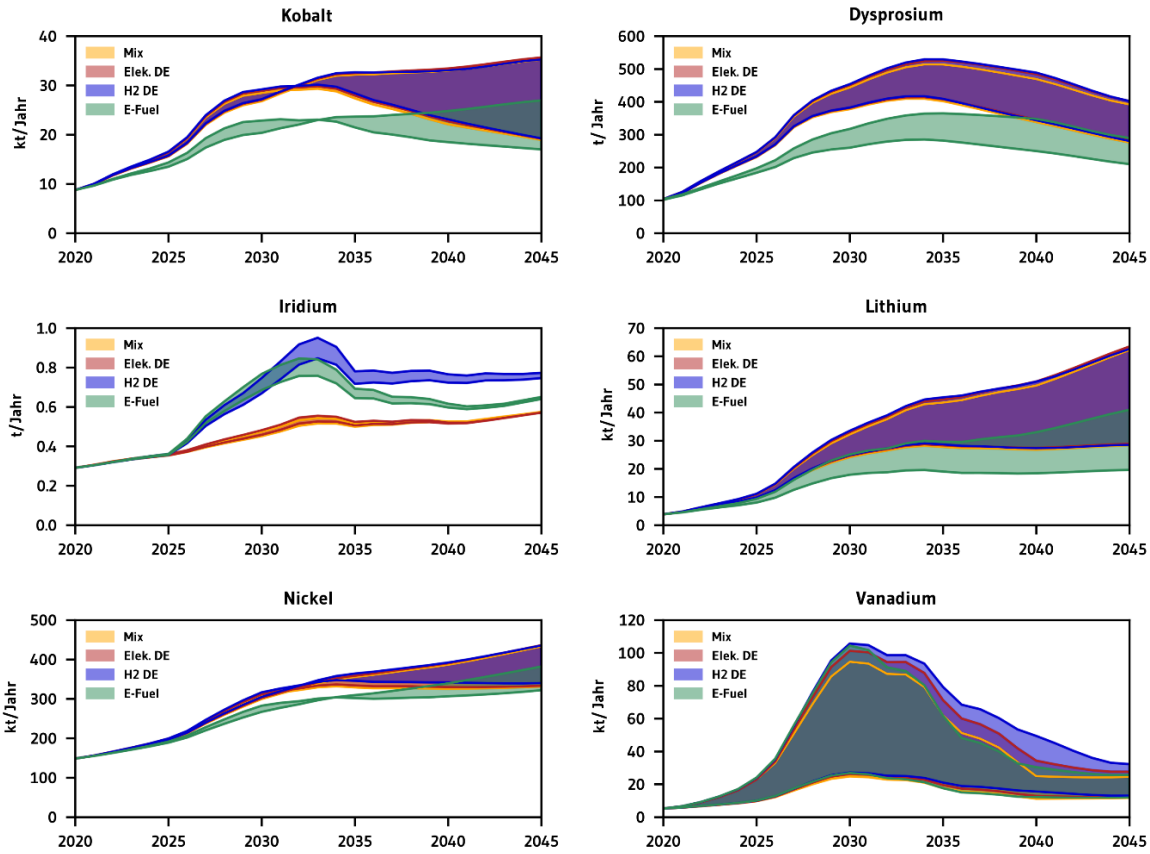


Abbildung 9.7: Jährlicher Bedarf (2020-2045) ausgewählter Materialien pro Szenario. Die dargestellten Bandbreiten der Ergebnisse reflektieren den unterschiedlichen Bedarf in den beiden Subtechnologie-Roadmaps (RM1 und RM2).

Reduktion der Nachfrage im Transportsektor: Durch den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs (insofern er einen Verzicht auf das eigene Auto ermöglicht), den Ausbau von Car-Sharing-Konzepten und den Ausbau der Radinfrastruktur könnte der Fahrzeugbedarf in Deutschland und da-

mit einhergehend der Materialbedarf reduziert werden. Ein zusätzlicher Hebel wäre eine Reduzierung der durchschnittlichen Fahrzeug- und insbesondere Batteriegröße, sowie ggf. höhere Marktanteile von Plug-in-Hybriden mit geringerer elektrischer Reichweite und kleinerer Batterie als reine BEVs.

Steigerung der Materialeffizienz: In der Kalkulation des Gesamtbedarfs sind bereits Annahmen zur Senkung des spezifischen Materialbedarfs einberechnet. Durch entsprechende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten muss ermöglicht werden, dass die hier unterstellte Reduktion des spezifischen Bedarfs der einzelnen Materialien in den relevanten Technologien auch realisiert werden kann.

Recycling: Recycling ist langfristig unumgänglich, um zu verhindern, dass immer neue Lagerstätten erschlossen und ausgebeutet werden müssen, die ggf. zu sehr hohen Kosten und nur mit erhöhter Umweltbelastung zu erschließen sind. Der Aufbau von Recycling-Anlagen benötigt allerdings eine lange Vorlaufzeit. Daher ist die rasche Entwicklung von Recycling-Strategien und ein entschlossener Aufbau der entsprechenden Infrastrukturen erforderlich. Zudem sollten die Technologien, soweit möglich, so aufgebaut werden, dass das Recycling der kritischen Materialien möglichst einfach zu bewerkstelligen ist.

Erschließung neuer Lagerstätten und deutlicher Ausbau der Produktionskapazitäten nötig: Im globalen Kontext führt der zu erwartende deutliche Anstieg des Bedarfs der hier untersuchten Materialien dazu, dass aktuelle Produktionskapazitäten deutlich ausgebaut und neue Lagerstätten erschlossen werden müssen. Diese Herausforderungen sind absehbar und lassen sich, wie erwähnt, auch nicht durch eine bestimmte technische Transformationsstrategie des Energiesystems (z. B. direkte Elektrifizierung vs. H_2 vs. E-Fuels) umgehen.

9.6 Landnutzung

Der Ausbau der erneuerbaren Energien (PV und Wind) wird sich auf die Flächennutzung in Deutschland auswirken. Außerdem spielt die Anbaubiomasse eine entscheidende Rolle im Energiesektor (aktuell: 7,3 % der Fläche Deutschlands), weil sie unter anderem in der Produktion von emissionsarmen Kraftstoffen eingesetzt wird und in Bioenergiekraftwerken mit CO_2-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) benutzt werden kann. Ein steigender Flächenbedarf[29] im Energiesektor würde mit der Landwirtschaft konkurrieren, und dieser Nutzungskonflikt könnte durch die

[29] Der Flächenbedarf wird definiert als die konkrete Flächeninanspruchnahme je Leistungseinheit, sowie die spezifischen Raumwirkungen, die die Landnutzung für andere Zwecke qualitativ beschränken (Peters et al., 2015).

Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktivität noch verschärft werden. Aus diesem Grund ist es wichtig zu verstehen, wie sich der gesamte Flächenbedarf für den Energiesektor entwickelt und welche Risiken damit verbunden sind.

Um die Szenarien anhand des aus der Dekarbonisierung resultierenden Flächenbedarfs zu vergleichen, werden aktuelle und prognostizierte Flächenbedarfskoeffizienten aus der Literatur verwendet (Bons et al., 2019; Kelm et al., 2019). Zuerst wird der Flächenbedarf für Anbaubiomasse zur energetischen Nutzung betrachtet, da er aktuell im Energiesektor am größten ist. Danach wird der von Wind- und PV-Kraftwerken in Deutschland verursachte Flächenbedarf analysiert. Der Fokus liegt auf diesen zwei Technologien, da sie eine wichtige Rolle in der erneuerbaren Stromerzeugung spielen. Abbildung 9.8 stellt den gesamten Flächenbedarf von Anbaubiomasse, Solar- und Onshore-Windanlagen in Deutschland in Bezug auf die Gesamtfläche Deutschlands für die Jahre 2020, 2030 und 2045 und für alle betrachteten Szenarien dar.

Der zukünftige Flächenbedarf der Anbaubiomasse lässt sich schwer abschätzen, da er von verschiedenen Faktoren abhängt. Dazu zählen physiologische und ökologische Faktoren (Entwicklung der Bodenqualität, der Biodiversität und der Wasserverfügbarkeit), technische Faktoren (technologischer Fortschritt zur Erhöhung des Ertrags), und wirtschaftliche und politische Faktoren (Wirtschaftlichkeit und Konkurrenz mit anderen landwirtschaftlichen Aktivitäten). Deswegen wurden Abschätzungen des Flächenbedarfs und des Primärenergieertrags aus einer aktuellen, detaillierten Studie des Deutschen Biomasseforschungszentrums (Thrän et al., 2019) entnommen. Diese Studie hat drei Pfade untersucht: eine konstante Entwicklung des Flächenbedarfs für Anbaubiomasse bei 2,6 Mio. ha (davon 2,35 Mio. ha für die energetische Nutzung in 2015), eine Senkung auf 1 Mio. ha, oder ein Anstieg auf 4 Mio. ha bis 2050. Welcher Pfad relevant ist, hängt von den politischen Vorgaben zur gewünschten Anbaufläche ab. Angesichts der bereits erwähnten Risikofaktoren wird im Folgenden angenommen, dass in 2050 nur eine Million Hektar für die Anbaubiomasse zur Verfügung stehen. Somit können in allen untersuchten Szenarien etwa 395 PJ pro Jahr in 2030 bzw. 303 PJ pro Jahr in 2045 Primärenergie aus der Anbaubiomasse in Deutschland bereitgestellt werden. Unter diesen Annahmen sinkt der Anteil des Flächenbedarfs für Anbaubiomasse zur energetischen Nutzung von 6 % der Fläche Deutschland in 2020 auf 2,7 % in 2045 (bzw. von 12 % auf 5,4 % der landwirtschaftlichen Flächennutzung). Das setzt eine Ertragssteigerung von 40 % zwischen 2020 und 2045 voraus, die durch verbessertes Landmanagement und den Umstieg auf mehrjährigen Kulturen mit höheren Erträgen (wie Miscanthus) möglich ist (Thrän et al., 2019). Nichtsdestotrotz stellen der Klimawandel, die Bodendegradation, der Biodiversitätsverlust, die Wasserkonkurrenz, die Energie- und Rohstoffverknappung und der nichtnachhaltige Konsum Risikofaktoren dar (Fehrenbach et al., 2017).

Ähnlich zu Fehrenbach et al. (2017) wird der Biomasse aus Reststoffen kein Flächenbedarf zugerechnet. Ihr Beitrag schwankt zwischen 884 PJ pro Jahr in 2020 und 889 PJ pro Jahr in 2045. Die Biomasse (sowohl aus Reststoffen als auch aus Anbau) dient zur Nutzung fester Biomasse, die 39,8 % der Nachfrage in 2030 ausmacht, gefolgt von der Herstellung von flüssigen Kraftstoffen (39,6 %) und Biomasseverstromung (12,7 %). In 2045 dient die Biomasse fast ausschließlich zur Herstellung von flüssigen Kraftstoffen (83,5 % der Nachfrage). Außerdem gewinnen die BECCS-Technologien im gleichen Zeitraum an Signifikanz, da ihr Anteil im Primärenergiebedarf von 6,9 % auf 72,2 % steigt (heute wird die Technologie nicht eingesetzt).

Im Folgenden wird die direkte Nutzfläche für Windparks und PV- Freiflächenanlagen betrachtet. Die Flächenbedarfskoeffizienten für Windparks beinhalten sowohl den Flächenbedarf für Fundamente als auch die Fläche zwischen Windkraftanlangen. Eine Voruntersuchung mittels Lebenszyklusanalyse des indirekten Flächenbedarfs, zum Beispiel für die notwendige Straßeninfrastruktur oder den Bergbau, hat gezeigt, dass dieser vernachlässigbar ist (<10 %). Aus Abbildung 9.8 lässt sich zuerst herauslesen, dass der Flächenbedarf von Wind und PV im Gegensatz zur Anbaubiomasse zwar steigen wird, der gesamte Flächenbedarf bis 2045 jedoch sinkt. Die Szenarien unterscheiden sich kaum in 2030. Der abgeschätzte Flächenbedarf für Wind und PV liegt bei 5.300 km², also ca. 1,5 % der Fläche Deutschlands, und wird hauptsächlich von Onshore-Wind beansprucht. Der dargestellte Flächenbedarf durch Photovoltaik wird ausschließlich durch Freiflächenanlagen verursacht (37,5 % der installierten Photovoltaikkapazität), weil Dachflächenanlagen nicht zum Flächenbedarf beitragen. In allen Szenarien steigt die installierte Kapazität von Wind und Solar bis 2045 sehr stark (Onshore-Wind: +66 %, Solar: +51 % gegenüber 2030 im Szenario *Technologiemix*), jedoch verbessern sich auch die Effizienz und der spezifische Flächenbedarf pro Leistungseinheit, so dass sich die gesamte Nutzfläche auf ca. 1,9 – 3,4 % beziffert (+57 % Flächenbedarf gegenüber 2030 im Szenario *Technologiemix*). Verglichen mit 2020 entspricht dies eine Vervierfachung im Szenario *Technologiemix*. Am höchsten ist der Flächenbedarf im Szenario *Wasserstoff (einheimisch)*. Jedoch ignoriert diese Darstellung den Flächenbedarf durch Importe von Biomasse, Strom, Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen, wodurch die Szenarien, die eine inländische Versorgung vorsehen, im Nachteil sind. Andererseits findet dieser Flächenbedarf außerhalb Deutschlands statt und ist somit für die innenpolitische Diskussion um den Flächenbedarf in Deutschland weniger relevant.

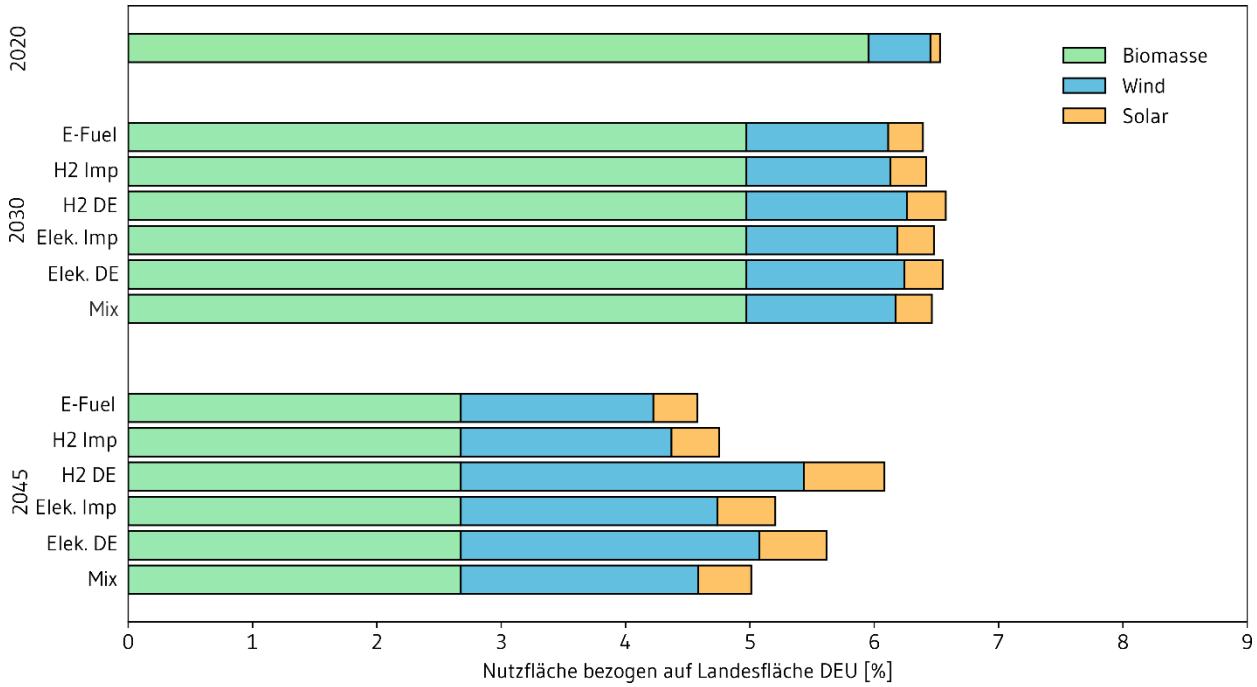


Abbildung 9.8: Gesamter Flächenbedarf von Biomasseanbau, Solar- und Onshore-Windanlagen in Deutschland bezogen auf die Landesfläche Deutschlands für die Jahre 2020, 2030 und 2045 und für alle betrachteten Szenarien.

Der Hochlauf der erneuerbaren Energien aus Wind und PV führt zu einer deutlichen Erhöhung des Flächenbedarfs von heute 0,6 % auf über 1,9 – 3,4 % der Landesfläche Deutschlands. Jedoch schließt die Solar- und Windenergienutzung weitere Flächennutzungen nicht aus (Peters et al., 2015; Wirth, 2021). Die Räume mit Windenergienutzung können sowohl landwirtschaftlich als auch gewerblich genutzt werden, da das Fundament, die Kranstellfläche und die Zuwegung zu den Windturbinen nur einen Bruchteil des Flächenbedarfs dauerhaft beanspruchen (ca. 5 %, je nach Turbinengröße). Agriphotovoltaikanlagen ermöglichen die gleichzeitige Nutzung der Flächen für die Landwirtschaft und die Energiegewinnung, und können in manchen Fällen sogar den landwirtschaftlichen Ertrag erhöhen (Wirth, 2021). Im Vergleich zur Biomasse aus nachwachsenden Rohstoffen zur Stromherstellung sind Agriphotovoltaikanlagen bis zu 32-mal flächeneffizienter (Wirth, 2021). Darüber hinaus können schwimmende Photovoltaikanlagen in Wasserreservoiren installiert werden und damit Fläche auf dem Land sparen und Verluste durch Verdunstung reduzieren.

Der produzierte Strom aus Wind und PV wird zum Teil zur Herstellung von Wasserstoff und sonstigen synthetischen Kraftstoffen verwendet. Je nach Szenario unterscheiden sich die Anteile der Endenergiekraftstoffe und somit auch ihre entsprechenden Flächenverbräuche. Fügt man den Flächenbedarf durch Importe hinzu (zum Beispiel aus grünem Wasserstoff aus Spanien), ergibt sich eine neue Reihenfolge der Szenarien bezüglich ihrer Umweltwirkungen in Abbildung 9.9.

Tendenziell fällt der Flächenbedarf in den Szenarien mit Fokus auf importierten synthetischen Kraftstoffen und Wasserstoff am höchsten aus, da die Transformationskette zur Herstellung von Wasserstoff bzw. von synthetischen Kraftstoffen niedrigere Effizienzen als die direkte Elektrifizierung aufweisen. Die Importe verlagern den Flächenbedarf ins Ausland und beanspruchen ca. 0,3 – 1,2 Mio. ha, was ungefähr 0,9 – 3,3 % der Landesfläche Deutschlands entspricht.

Die Differenz zwischen Szenarien mit Fokus auf einheimischer Produktion bzw. auf Importen lässt sich durch die Modellannahmen erklären. Das REMIND-Modell schätzt die Importe unabhängig von der Herkunft ab. In der aktuellen Berechnung wird davon ausgegangen, dass diese Energie in anderen Ländern produziert wird, wo das Verhältnis zwischen Wind und PV-Kapazitäten ähnlich zu Deutschland ist, und wo die Flächenbedarfskoeffizienten pro Einheit Energie lediglich 5 % niedriger sind. Jedoch ist es durchaus möglich, aus Ländern zu importieren, die bessere Potenziale zur Nutzung erneuerbarer Energien als Deutschland aufweisen, was zu einer deutlich besseren Flächeneffizienz führen kann.

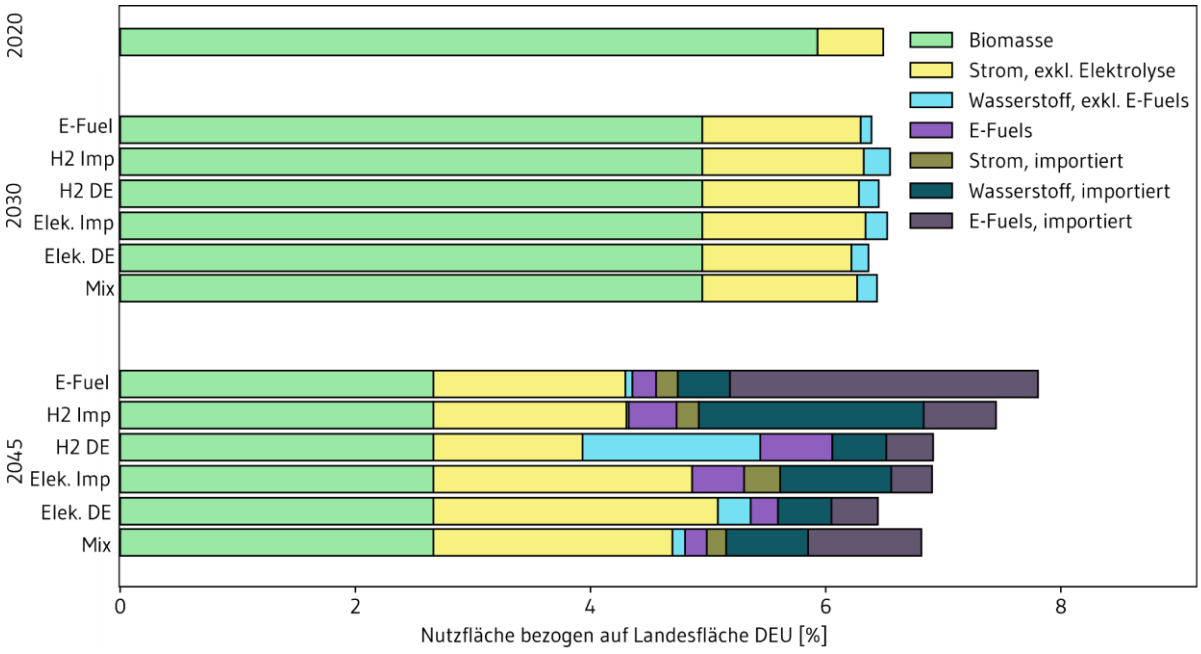


Abbildung 9.9: Gesamter Flächenbedarf weltweit von Anbaubiomasse, Strom (aus Wind und PV), Wasserstoff (aus Elektrolyse) und synthetischen Kraftstoffen bezogen auf die Landesfläche Deutschlands für die Jahre 2020, 2030 und 2045 und für alle betrachteten Szenarien.

Beim Vergleich der spezifischen Flächenbedarfe (in km² pro Einheit Sekundärenergie in TWh) in Abbildung 9.10 bestätigt sich die Erkenntnis, dass die Strombereitstellung am effizientesten ist (11,7 km²/TWh für Wind Onshore und 12,3 km²/TWh für Freiflächen-PV in 2045 im Szenario *Technologiemix*), gefolgt von Wasserstoffbereitstellung (16,7 km²/TWh in 2045) und der Herstellung

von synthetischen Kraftstoffen (23 km²/TWh). Der spezifische Flächenbedarf für die Sekundärenergie aus Wind, PV und Anbaubiomasse sowie aus Importen von Wasserstoff und E-Fuels liegt aber deutlich höher bei 18,7 km²/TWh, weil die Anbaubiomasse trotz Ertragssteigerungen einen spezifischen Flächenbedarf von 203,6 km²/TWh in 2045 aufweist.

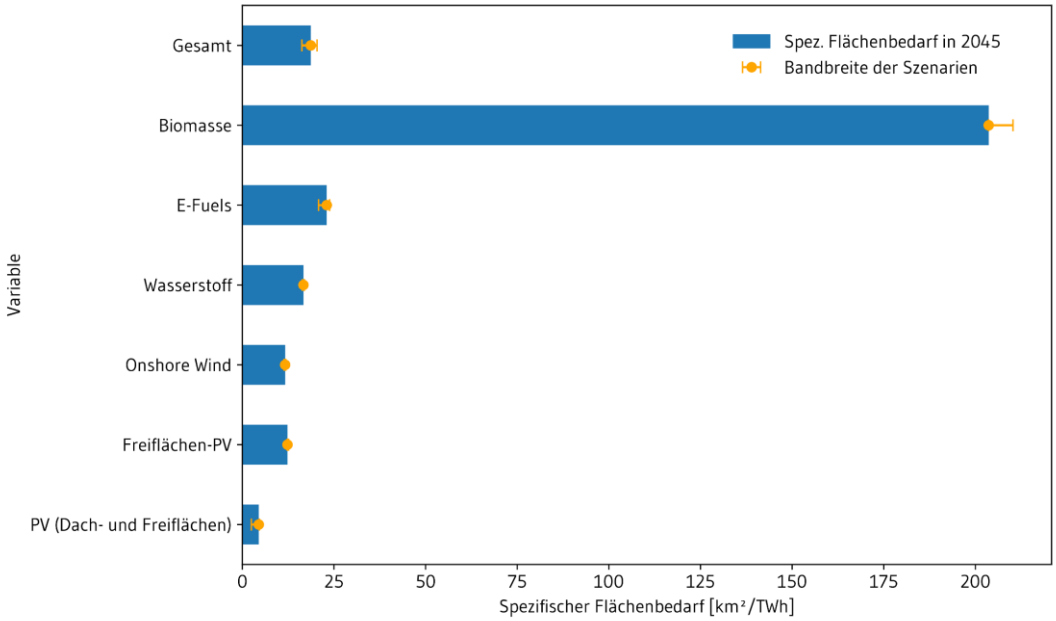


Abbildung 9.10: Spezifischer Flächenbedarf der verschiedenen Technologien im Jahr 2045 für das Technologiemix-Szenario. Die orangen Linien zeigen szenarienbezogene Bandbreiten (Elektrifizierung (inländisch), Elektrifizierung (Import), Wasserstoff (inländisch), Wasserstoff (Import), E-Fuels). PV (Dach- und Freiflächen) bezieht sich auf das gewichtete Mittel unter Berücksichtigung, dass Dach-PV keine zusätzlichen Flächen beansprucht.

Aus dieser Analyse lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Die Energiewende hat eine deutliche Auswirkung auf die Flächennutzung in Deutschland: Trotz des steigenden Flächenbedarfs von Wind und Solar in Deutschland von heute 0,6 % auf 1,9 – 3,4 % in 2045, könnte die Einschränkung des Biomasseanbaus auf 1 Mio. ha in 2050 dazu führen, dass der gesamte Flächenbedarf aus erneuerbaren Energien sinkt. Je nach Technologiepfad ändert er sich von 2,3 Mio. ha (6,5 % der Landesfläche Deutschlands) zu 1,6 – 2,2 Mio. ha (4,6 – 6,1 %). Der Anstieg ist durch den wachsenden Strombedarf getrieben, dazu kommen zusätzliche Belastungen für die Bereitstellung von Wasserstoff und E-Fuels von ca. 0,3 % bis über 2,1 % je nach Technologiepfad. Zusätzlich beanspruchen Importe von Strom, Wasserstoff und E-Fuels Flächen im Ausland, die 0,9 – 3,3 % der Landesfläche Deutschlands entsprechen.

Unsicherheit beim Flächenbedarf durch Biomasse: Der prognostizierte Flächenbedarf durch nachwachsende Rohstoffe zur Energiegewinnung setzt politische Vorgaben zur Einschränkung des Sektors auf 1 Mio. ha in 2050 voraus sowie eine Verbesserung des Ertrags durch den Umstieg auf mehrjährigen Kulturen. Zu diesen Annahmen kommen Unsicherheiten wegen des Klimawandels und des Konsumverhaltens der Gesellschaft, die diese Entwicklung gefährden können. Manche Risikofaktoren (z. B. die Bodendegradation, Biodiversitätsverlust, die Wasserkonkurrenz mit anderen Sektoren) können auf nationaler Ebene bekämpft werden, um den Ertrag aus der Landwirtschaft aufrecht zu erhalten. Die Einhaltung dieser Rahmenbedingungen ist umso wichtiger, weil die Sekundärenergie aus Anbaubiomasse eine deutlich niedrigere Flächeneffizienz aufweist als andere Kraftstoffe (ca. 25-mal schlechter als Strom).

Um Konflikte mit anderen Nutzungsformen abzumildern sollten diese Punkte beachtet werden:

Priorisierung von Technologien ohne zusätzlichen Flächenbedarf: Die Ergebnisse setzen voraus, dass die Mehrheit der Solarphotovoltaikanlagen in 2045 auf Dachflächen installiert sind, und dass etwa dreiviertel der Primärenergie aus Biomasse aus Reststoffen stammt. Dies kann nur gelingen, wenn diese innerhalb einer nationalen Dekarbonisierungsstrategie priorisiert werden, zum Beispiel durch die Integration von Dachflächenanlagen in allen öffentlichen Gebäuden und die Schaffung von einer angemessenen Infrastruktur zur Aufwertung von landwirtschaftlichen Reststoffen.

Synergetische Flächennutzung: Konzepte zur gleichzeitigen Nutzung von Flächen, z. B. für Windenergiegewinnung und Landwirtschaft oder die Agriphotovoltaik könnten dabei helfen, die Umweltwirkungen durch Landnutzung zu reduzieren. Die Förderung von Bioenergie der zweiten und dritten Generation kann dazu dienen, den Flächenbedarf der Bioenergie und deren Effekte auf die Umwelt abzumildern.

Indirekte synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff führen zu zusätzlichen Flächenbedarfen: Beschränkt man sich auf Flächen in Deutschland, würde das Szenario zur Herstellung einheimischen Wasserstoffs (*Wasserstoff (einheimisch)*) zum höchsten Flächenbedarf führen. Wenn Flächen im In- und Ausland berücksichtigt werden, dann schneidet das Szenario mit Fokus auf synthetische Kraftstoffe am schlechtesten ab (2,8 Mio. ha, +14,6 % gegenüber *Technologiemix*), gefolgt von Wasserstoffs- und Elektrifizierungsszenarien (+9,3 % für *Wasserstoff (Import)* und -0,4 % für *Elektrifizierung (Import)* gegenüber *Technologiemix*). Um die Umweltwirkungen durch Landnutzung zu minimieren soll also die direkte Elektrifizierung gefördert werden.

9.7 Synthese / Handlungsempfehlungen

Die Analyse der Szenarien zeigt, dass die zeitnahe und tiefgreifende Dekarbonisierung entscheidend ist, um die Auswirkungen des Energiesystems auf die öffentliche Gesundheit zu reduzieren. So führen alle Szenarien zu einer erheblichen Reduktion der Gesundheitseffekte durch Luftverschmutzung von heute 0,8 auf knapp über 0,4 verlorene gesunde Lebensjahre pro Person, wobei das *Technologiemix*- und das *E-Fuels*-Szenario zu den höchsten verbleibenden Emissionen in den Ballungszentren führen. Ein stringenter Einsatz von Filtertechnologien führt zwar zu einer weiteren Verminderung, diese fällt aber bei allen Szenarien relativ gering aus. Klimaschutz kann also als eine Art Versicherung gesehen werden gegen eine nicht stringente Umsetzung von Filtertechnogien.

Auch im Mobilitätssektor führen die Klimaschutzanstrengungen zu einer erheblichen Reduktion der Gesundheitswirkungen von Elektro- sowie konventionellen Fahrzeugen. Die verschiedenen Antriebsoptionen allerdings unterscheiden sich hinsichtlich ihrer gesamten (globalen) schädlichen Auswirkung auf die menschliche Gesundheit im Sinne von verlorenen Lebensjahren nicht wesentlich. Jedoch führen Elektrofahrzeuge zu einer Verschiebung. Die Auswirkungen verlagern sich weg von deutschen Straßen und Städten hin zu Schäden durch Ressourcenabbau sowie Metallherstellung und -verarbeitung in produzierenden Ländern. Da diese Produktionsprozesse aber als größtenteils statisch angenommen werden und die tatsächlichen Gesundheitseffekte dort dank geringerer Bevölkerungsdichte erheblich schwächer sind, sollten diese Schäden als Obergrenze interpretiert werden. Die notwendige Förderung klimafreundlicher und effizienter Elektromobilität sollte daher einhergehen mit einer nachhaltigen Transformation der Produktionsprozesse und der Rohstoffgewinnung sowie einer Reduktion des Individualverkehrsaufkommens.

Herausforderungen zeigen sich beim Materialbedarf von kritischen Materialien. Das Hochfahren von erneuerbarer Infrastruktur erhöht den Bedarf besonders bis 2035 und stabilisiert sich dann auf hohem Niveau. Recycling kann für die Reduzierung dieses Bedarfs also erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts eine größere Rolle spielen. Generell erhöht sich der Bedarf an den betrachteten seltenen Erden in allen Szenarien und vervielfacht sich für Materialien, welche in Lithium-Ionen-Batterien benötig werden (Co, Li, Ni). Einzelne Szenarien führen zwar zu einem geringeren Anstieg für bestimmte Materialien, so fällt der Lithiumbedarf im *E-Fuels*-Szenario geringer aus, neue Technologien führen aber wiederum zu neuen Bedarfen für z. B. Iridium bei einem Fokus auf E-Fuels und Wasserstoff.

Als kritisch werden Kobalt, Dysprosium, Iridium, Lithium, Nickel und Vanadium eingestuft. Da

eine Substitution kaum möglich ist, sollte ein Fokus, neben dem effizienten Recycling dieser Stoffe auch auf der Reduzierung des Bedarfs sowie der Erschließung von neuen Lagerstätten liegen. Die Energiewende muss also durch eine nachhaltige und technisch-, wirtschafts- und außenpolitisch abgestimmte Rohstoffstrategie begleitet werden, um Engpässe zu vermeiden und sicher zu stellen, dass der deutschen Wirtschaft ausreichend Materialien zur Verfügung stehen, um weiterhin eine hohe heimische Wertschöpfung im Energie- und Automobilsektor zu gewährleisten.

Des Weiteren wird die Energiewende deutliche Auswirkungen auf die Flächennutzung in Deutschland haben. Der Flächenbedarf der erneuerbaren Energien könnte sinken, falls die Einschränkung des Biomasseanbaus den steigenden Flächenbedarf durch Wind Onshore und Freiflächenphotovoltaik kompensiert. Hier schneiden die Szenarien mit Fokus auf direkte Elektrifizierung besser ab als Dekarbonisierungspfade, die auf Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe setzen. In allen Fällen ist die Förderung von Dachphotovoltaikanlagen und die Nutzung von Biomasse aus Reststoffen unabdingbar, um den Flächenbedarf zu minimieren. Synergien mit der Landwirtschaft, zum Beispiel durch Agriphotovoltaik oder die gleichzeitige Nutzung von Flächen für Windprojekte und für landwirtschaftliche Aktivitäten, sollten ebenso ausgeschöpft werden. Zusammen mit einem umweltgerechten Management der Land- und Wasserressourcen kann sichergestellt werden, dass der Ertrag von nachwachsenden Rohstoffen zur Energiegewinnung ausreichend hoch wird, um die Biomassenachfrage zu decken und Auswirkungen auf die Biodiversität zu minimieren.

Literaturangaben

Anenberg S, Miller J, Henze D, Minjares R, 2019. A global snapshot of the air pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015 | International Council on Clean Transportation. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://theicct.org/publications/health-impacts-transport-emissions-2010-2015.

Bons M, Döring M, Klessmann C, Knapp J, Tiedemann S, Pape C, Horst D, Reder K, Stappel M, 2019. Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land. Umweltbundesamt (Climate Change) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-kurz-mittelfristigen-verfuegbarkeit-von.

Cox B, Bauer C, Mendoza Beltran A, van Vuuren DP, Mutel CL, 2020. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. Applied Energy, 269:115021 DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115021.

European Commission, 2020. Study on the EU's list of Critical Raw Materials - Final Report (2020). DOI: 10.2873/11619.

European Environment Agency (EEA), 2020. Air quality in Europe - 2020 report. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.eea.europa.eu//publications/air-quality-in-europe-2020-report.

Fehrenbach H, Köppen S, Breitmayer E, Essel R, Baur F, Kay S, Wern B, Bienge K, von Geibler J, Kauertz B, et al., 2017. Biomassenkaskaden: Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. Umweltbundesamt [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Forschungsdatenbank/fkz_3713_44_100_biomassekaskaden_bf.pdf.

Frischknecht R, 2012. Umweltaspekte von Elektroautos. Uster (CH) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: http://esu-services.ch/fileadmin/download/frischknecht-2012-Umweltaskpekte-Elektroautos.pdf.

Heft-Neal S, Burney J, Bendavid E, Burke M, 2018. Robust relationship between air quality and infant mortality in Africa. Nature, 559(7713):254–258 DOI: 10.1038/s41586-018-0263-3.

Kassebaum NJ, Arora M, Barber RM, Brown J, Carter A, Casey DC, Charlson FJ, Coates MM, Coggeshall M, Cornaby L, et al., 2016. Global, regional, and national disability-adjusted life-years (DALYs) for 315 diseases and injuries and healthy life expectancy (HALE), 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. The Lancet, 388(10053):1603–1658 DOI: 10.1016/S0140-6736(16)31460-X.

Kelm T, Metzger J, Jachmann H, Günnewig D, Püschel M, Schicketanz S, Kinast P, Thylmann M, Nazerian V, 2019. Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz - Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.html.

Kushnir D, Sandén BA, 2012. The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles. Resources Policy, 37(1):93–103 DOI: 10.1016/j.resourpol.2011.11.003.

Marscheider-Weidemann F, Langkau S, Baur S-J, Billaud M, Deubzer M, Eberling E, Erdmann L, Haendel M, Krail M, Loibl A, et al., 2021. Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021 - DERA Rohstoffinformationen 50. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

OECD, 2012. Mortality risk valuation in environment, health and transport policies. OECD Publishing DOI: 10.1787/9789264130807-en.

Öko-Institut, 2017. Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesenpapier_WEB.pdf.

Peters W, Schicketanz S, Hanusch M, Rohr A, Kothe M, Kinast P, 2015. Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMV) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvi/bmvi-online/2015/BMVI_Online_08_15.html.

The Lancet Neurology, 2018. Air pollution and brain health: an emerging issue. The Lancet Neurology, 17(2):117 DOI: 10.1016/S1474-4422(17)30462-3.

Thrän D, Lauer M, Dotzauer M, Oehmichen K, Majer S, Millinger M, Jordan M, 2019. Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/technooekonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

U. S. Geological Survey, 2020. Mineral commodity summaries 2020. DOI: 10.3133/mcs2020.

Watari T, McLellan B, Ogata S, Tezuka T, 2018. Analysis of Potential for Critical Metal Resource Constraints in the International Energy Agency's Long-Term Low-Carbon Energy Scenarios. Minerals, 8(4) DOI: 10.3390/min8040156.

Watari T, Nansai K, Nakajima K, 2020. Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. Resources Conservation and Recycling, 155 DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104669.

Wirth H, 2021. Recent Facts about Photovoltaics in Germany. Fraunhofer ISE [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf.

Zepf V, Simmons J, Reller A, Ashfield M, Rennie C, 2014. Materials critical to the energy industry: An introduction. 2nd Aufl. BP p.l.c., London and United Kingdom.

Zhang Xin, Chen X, Zhang Xiaobo, 2018. The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(37):9193–9197 DOI: 10.1073/pnas.1809474115.

Ziemann S, Grunwald A, Schebek L, Muller DB, Weil M, 2013. The future of mobility and its critical raw materials. Revue De Metallurgie-Cahiers D Informations Techniques, 110(1):47–54 DOI: 10.1051/metal/2013052.

Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:

@AriadneProjekt

ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf kopernikus-projekte.de

Wer ist Ariadne? Durch den Faden der Ariadne gelang Theseus in der griechischen Mythologie die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne. Im Konsortium von mehr als 25 Forschungseinrichtungen führt Ariadne durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, erforscht Optionen zur Gestaltung der Energiewende und erarbeitet wichtiges Orientierungswissen für politische Entscheider. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg (BTU) | Deutsche Energie-Agentur (dena) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Guidehouse Germany | Helmholtz-Zentrum Hereon | Hertie School | Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) | ifok | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität | Institute For Advanced Sustainability Studies (IASS) | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung 2° – Deutsche Unternehmer für Klimaschutz | Stiftung Umweltenergierecht | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Münster | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung