



Ariadne-Report

Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045

Szenarien und Pfade im Modellvergleich

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**
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.

Herausgegeben von

Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

Oktober 2021

DOI: 10.48485/pik.2021.006

Bildnachweise

Titel: Yeshe Kangrangz / Unsplash; Kapitel 1: Andrea Boldizsar / 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

Appendix: Modellbeschreibungen

A.	REMIND-EU	302
B.	REMod	305
C.	TIMES-PanEU	310
D.	VECTOR21	315
E.	DEMO	318
F.	FORECAST	321
G.	NEWAGE	325
H.	E2M2	326
I.	energyANTS	329
J.	RWI-Modell (CO ₂ -Verbrauchsmodell)	337
K.	Luftverschmutzung	338
L.	Lebenszyklusanalyse des Mobilitäts-sektors	339
	Literaturangaben	347

A. REMIND-EU

REMIND (Regional Model of Investments and Development) (Baumstark et al., 2021; Luderer et al., 2020) ist ein globales multiregionales Energie-Wirtschafts-Klima-Modell, das die Jahre 2005-2100 umfasst. Abbildung A.1 veranschaulicht seine allgemeine Struktur.

REMIND verbindet ein intertemporales makroökonomisches Wachstumsmodell mit einer detaillierten Darstellung des Energiesystems, einschließlich einer detaillierten Darstellung der gesamtwirtschaftlichen Energienachfrage und der Nachfrage nach Energiedienstleistungen im Verkehrssektor. Ein wichtiges Merkmal, das REMIND von anderen energieökonomischen Modellsystemen wie MESSAGEix (Huppmann et al., 2019), REMod (Abschnitt B.) oder TIMES (Abschnitt C) unterscheidet, ist die Formulierung als nichtlineares Optimierungsproblem. Dies ermöglicht die Berücksichtigung entscheidender Nichtlinearitäten, wie z. B. endogenem technologischen Wandel (Edenhofer et al., 2006), nichtlineare makroökonomische Produktionsfunktionen als Energienachfrage-treiber (Bauer et al., 2008), oder die nichtlineare Zunahme der Integrationsherausforderungen mit zunehmendem Anteil von fluktuierender Erneuerbarer Stromerzeugung. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Komponenten des Modells gegeben. Der Modellcode ist unter <https://rse.pik-potsdam.de/doc/remind/2.1.3/> detailliert dokumentiert und ist als Open Source unter <https://github.com/remindmodel> verfügbar.

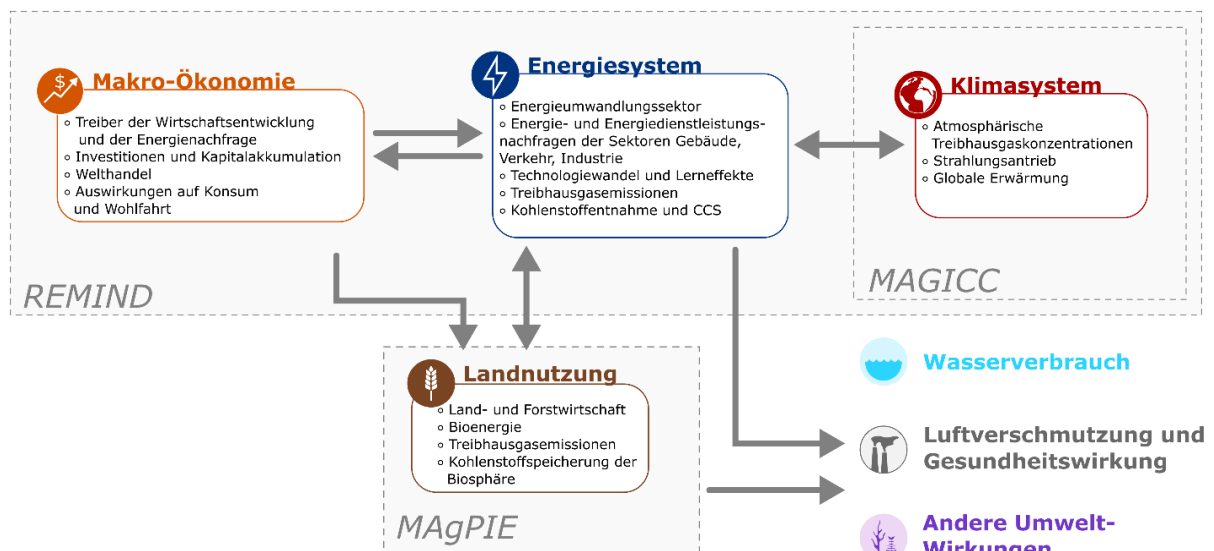


Abbildung A.1: Allgemeine Struktur des REMIND-Modells.

Der makroökonomische Kern von REMIND ist ein Investitionsmodell zur Maximierung der Wohlfahrt unter durch die Systemeigenschaften sowie Klima- und Nachhaltigkeitsziele gegebene Nebenbedingungen. Die gesamtwirtschaftliche Produktion wird anhand einer Produktionsfunktion

mit konstanter Substitutionselastizität und den Inputfaktoren Kapital, Arbeit und Energie berechnet. In Bezug auf seine makroökonomische Formulierung ähnelt REMIND anderen klimaökonomischen Modellen wie RICE (Nordhaus and Yang, 1996) und MERGE (Manne et al., 1995). REMIND ist jedoch breiter angelegt und weist einen wesentlich höheren Detaillierungsgrad bei der Darstellung von Energiesystemtechnologien, Handel und globalen Kapitalmärkten auf. Für die hier vorgestellten Szenarien optimiert das Modell die Regionen einzeln und verwendet einen iterativen Algorithmus, um die internationalen Märkte für Brennstoffe und nichtenergetische Güter zu räumen (Leimbach et al., 2017).

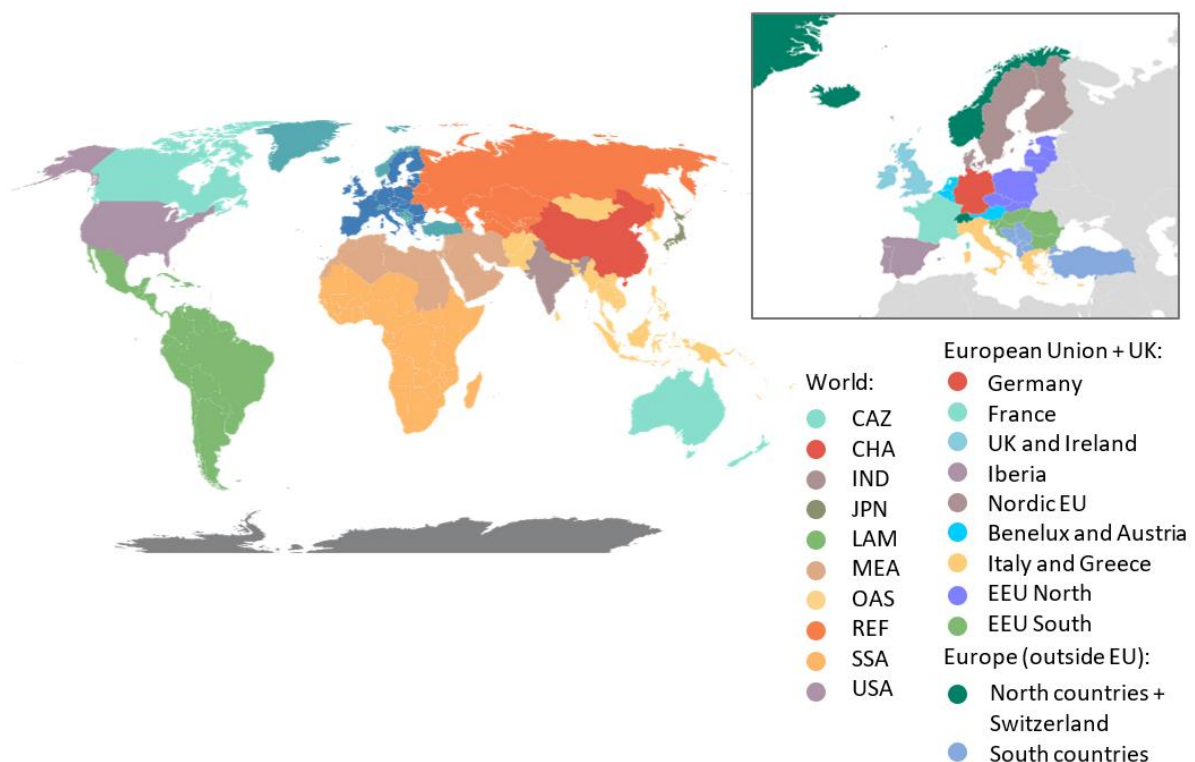


Abbildung A.2: Regionen von REMIND-EU

Die Modellversion REMIND-EU (Rodrigues et al., 2022) ergänzt die ursprüngliche REMIND-Formulierung um eine erweiterte Darstellung der europäischen Politik und räumliches Detail. REMIND-EU behält die globale Abdeckung des REMIND-Modells bei, erweitert aber die bisherige Darstellung von 12 Weltregionen auf insgesamt 21 Regionen (siehe Abbildung A.2). Die erweiterte räumliche Detaillierung konzentriert sich auf Europa, indem insgesamt neun Regionen eingeführt werden, die die Europäische Union und das Vereinigte Königreich repräsentieren, sowie zwei zusätzliche Regionen, die die übrigen europäischen Länder darstellen. Die eingeführte räumliche

Disaggregation folgte einer Kompromissanalyse zwischen zusätzlicher mathematischer Komplexität und besserer Darstellung europäischer Klimazonen, energiespezifischer Politiken, Clustering von Wirtschaftsmerkmalen, Verhaltensannahmen und Länderspezifika.

Das Energiesystem in REMIND bildet die Umwandlung von Primärenergieressourcen in Sekundärenergieträger und deren Transport und Bereitstellung für die Endnutzungssektoren Verkehr, Gebäude und Industrie ab. In der hier genutzten Version besteht zusätzlich eine Kopplung zum detaillierten Transportmodell EDGE-T, das REMIND eine genauere Auflösung der Transformation des Transportsektors ermöglicht (Rottoli et al., 2021).

Pfadabhängigkeiten und Trägheiten sind durch Kapitalstöcke und technologische Lerneffekte beispielsweise für Windenergie, Photovoltaik, Batteriespeicher und Elektrolyseure abgebildet. Zusätzlich werden Kostenaufschläge für sehr schnelle Hochskalierung von Technologien angenommen (Wilson et al., 2013).

REMIND bildet die Integration fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung von Wind- und Solarenergie über detaillierte Parametrisierungen der Bedarfe für Netzausbau, Kurzfristspeicher (Batterien) und Langfristspeicher (Elektrolyse und Rückverstromung), sowie der Abregelung in Abhängigkeit Wind- und PV-Erzeugungsanteile. Diese Integrationsherausforderungen wurden auf Basis von Dispatch-Modellen abgeleitet (Scholz et al., 2017; Ueckerdt et al., 2017) und steigen überproportional mit dem Anteil der EE-Erzeugung.

REMIND verwendet Emulatoren in reduzierter Form, die aus dem detaillierten Landnutzungs- und Landwirtschaftsmodell MAgPIE (Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment) (Dietrich et al., 2019) abgeleitet sind, um Landnutzungs- und landwirtschaftliche Emissionen sowie die Bioenergieversorgung und andere landbasierte Minderungsoptionen darzustellen.

Das Modell berücksichtigt die gesamte Bandbreite der anthropogenen Treibhausgasemissionen (THG), von denen die meisten explizit in Abhängigkeit der Quellaktivität berücksichtigt werden. Es kann sowohl globale Klimaziele wie CO₂-Budgets als auch spezifische regionale Ziele analysieren. Das MAGICC 6 Klimamodell (Meinshausen et al., 2011) wird verwendet, um Emissionen in Veränderungen der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration und die resultierende globale Erwärmung zu übersetzen. Die Implementierung der Klimaziele erfolgt hier über einen iterativen Algorithmus, bei dem ein CO₂-Preis in der jeweiligen Region so lange angepasst wird, bis das gewünschte Klimaziel erreicht ist.

B. REMod

Das Energiesystemmodell REMod wurde entwickelt, um technisch umsetzbare und kostengünstige Transformationspfade des deutschen Energiesystems bis 2050 zu berechnen, mit denen zugleich klimapolitische Ziele in Form von CO₂-Reduktionspfaden, beziehungsweise eines CO₂-Budgets eingehalten werden.³² Eine zentrale Eigenschaft von REMod ist die gleichzeitige Kostenoptimierung aller Verbrauchssektoren des Energiesystems mit einer stündlichen Auflösung (Palzer, 2016; Sterchele, 2019). Der vorgegebene Reduktionspfad der energiebedingten CO₂-Emissionen setzt sich aus jahresscharfen Zielwerten und einem Gesamtbudget zusammen. Die stundenscharfe Simulation des Energiesystems stellt sicher, dass alle Wandler, Speicher und Verbraucher so dimensioniert werden, dass jeder Verbrauchssektor in jeder Stunde ausreichend mit Energie versorgt wird. Neben Annahmen zur Entwicklung der verschiedenen Sektoren werden abgestimmte Prognosen zu Kostenentwicklungen und Wirkungsgraden sämtlicher berücksichtigter Technologien hinterlegt. Der in REMod verwendete Optimierungsalgorithmus ist das sogenannte „Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy“-Verfahren (Hansen, 2016).

Abbildung A.3 zeigt eine schematische Übersicht über das Modell. Dargestellt sind die wichtigsten Energiewandlungstechnologien und die vier Verbrauchssektoren, gegliedert nach den wesentlichen Nutzungsformen Gebäudewärme (Raumwärme, Trinkwarmwasser), (klassische) Stromanwendungen (z. B. Beleuchtung, Informations- und Kommunikationstechnik, Kältetechnik, mechanische Energie), industrielle Prozesswärme und Verkehr.

³² Diese Modellbeschreibung ist eine gekürzte und aktualisierte Version aus Sterchele et al., 2020.



Abbildung A.3: Schematische Darstellung des Modells REMod (KW: Kraftwerk, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung (Sterchele et al., 2020).

Die stündliche Nachfrage nach Raumwärme und Warmwasser im Gebäudesektor wird nach der DIN EN 13790 (DIN e.V., 2008) berechnet, welche auf einer Gebäudedatenbank mit insgesamt 19 charakteristischen Typgebäuden aufbaut. Für die Bereitstellung von Raumwärme werden zwei Klassen von Heizungssystemen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus der Vorlauftemperatur unterschieden (Standardheizungssystem mit Radiatoren, Niedertemperaturheizung wie z. B. Flächenheizung). In Verbindung mit elf Techniken zur Wärmebereitstellung ergeben sich somit 20 verschiedene Wärmeversorgungsoptionen für den Gebäudesektor. Die zur Verfügung stehenden Wärmetechnologien umfassen konventionelle Kessel basierend auf Methan, Biomasse oder Öl, motorische Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen), elektrische, brennstoffbasierte und

hybride Wärmepumpen (mit Luft oder Erdreich als Wärmequelle) und Brennstoffzellensysteme basierend auf Methan oder Wasserstoff. Alle Technologien können optional mit Warmwasserspeichern und solarthermischen Kollektoren ergänzt werden. Neben diesen Systemen ist im Modell die Wärmeversorgung auf Basis von Wärmenetzen als Option hinterlegt. Diese Wärmenetze können mit geothermischer Wärme oder durch Wärme aus KWK-Anlagen, elektrischen Großwärmepumpen, (Spitzenlast-) Gaskesseln oder solarthermischen Kollektoren versorgt werden. Außerdem können Großwärmespeicher in Wärmenetzen genutzt werden.

Klassische Stromanwendungen beschreiben die heute im Netz vorkommende Last exklusive der Stromnachfrage für Wärme (Raumwärme und Trinkwarmwasser sowie industrielle Prozesswärme), straßengebundenen Verkehr sowie sonstige flexible Stromverbraucher wie beispielsweise Power-to-X-Technologien.³³ Diese wird über Lastprofile abgebildet, basierend auf den Daten des europäischen Verbandes der Übertragungsnetzbetreiber („European Network of Transmission System Operators for Electricity“, kurz ENTSO-E). Hierin ist auch die Stromnachfrage des Schienenverkehrs sowie der Industrie für mechanische Energie enthalten. Im Laufe der zukünftigen Systementwicklung hinzukommende Stromverbräuche wie batterieelektrische Kraftfahrzeuge oder elektrische Wärmepumpen werden innerhalb der Modellierung zusätzlich zur Basisstromlast betrachtet.

Als konventionelle Stromerzeuger sind Kraftwerke mit Braun- und Steinkohle als Brennstoff, Kernkraftwerke (bis zum Ausstieg aus deren Nutzung im Jahr 2022), ölbefeuerte Kraftwerke, Gasturbinen (mit Brennstoff CH_4 oder H_2), KWK-Anlagen, Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) und Brennstoffzellensysteme (basierend auf H_2 oder CH_4) implementiert. Erneuerbarer Strom kann aus Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen und Laufwasserkraftwerken gewonnen werden. Zusätzlich stehen je nach Parametrierung unterschiedliche Kuppelleistungen für den Import und Export von Strom zur Verfügung.

Die Energienachfrage des Verkehrs wird mit den Daten des BMWi (BMWi, 2019b) und mit stündlich aufgelösten Fahr- bzw. Nachfrageprofilen auf jede Stunde des Jahres verteilt. Über die Wirkungsgrade der jeweiligen Antriebstechnologien wird die Endenergienachfrage für die jeweiligen

³³ Hierbei wird auf das Jahr 2016 verwiesen, da für dieses Jahr die entsprechenden statistischen Werte vorliegen.

Kraftstoffe beziehungsweise Strom ermittelt. Die Energienachfrage für Luft- und Schifffahrt³⁴ sowie des brennstoffbasierten Bahnverkehrs werden bilanziell berücksichtigt. Der Verkehrssektor wird im Detail durch Pkw und Lkw mit jeweils sieben Antriebskonzepten und dazugehöriger Energienachfrage zur Fortbewegung abgebildet. Neben heute etablierten Verbrennungsmotoren, die als Kraftstoff flüssigen Kraftstoff oder Methan verwenden, sind batterie- und wasserstoffelektrische Antriebskonzepte implementiert. Alle Konzepte können auch als Plug-In-Hybrid-Variante Teil der Lösung sein. Antriebskonzepte mit Batterie können im System als Flexibilitätsoption, also als Stromspeicher, verwendet werden, der zu einem Anteil netzdienlich be- und entladen werden kann.

Energie zur Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie wird in verschiedene Temperaturniveaus unterteilt. Für den Temperaturbereich unter 480 °C wird ein stündliches Profil angenommen, das demjenigen der Basisstromlast angenähert ist. Für Anwendungen mit einer Temperatur über 480 °C wird eine konstante Energienachfrage unterstellt. Die gesamte Energienachfrage über ein Jahr basiert auf den Daten des BMWi (BMWi, 2019b) und den szenariospezifischen Annahmen.

Als Speicher stehen dem System elektrische Energiespeicher in Form von stationären und mobilen Batterien in Fahrzeugen, Pumpspeicherkraftwerken oder Carnot-Batterien als Hochtemperaturspeicher mit Option zur Rückverstromung zur Verfügung. Zusätzlich werden Wasserstoffspeicher und thermische Warmwasserspeicher in verschiedenen Größenordnungen berücksichtigt.

Wasserstoff kann im Verkehr, der Industrie (stofflich oder energetisch zur Erzeugung von Prozesswärme) oder in Gebäuden (mittels H₂-Brennstoffzellen) genutzt werden. Neben der Einspeisung ins Erdgasnetz besteht zudem die Möglichkeit, Wasserstoff als Rückverstromungsoption in Gasturbinen zu nutzen. Ferner kann Wasserstoff in Methanisierungs- oder in Power-to-Liquid-Anlagen in synthetisches Erdgas beziehungsweise flüssige Kraftstoffe zur Verwendung in Kraftwerken, Heizungstechnologien oder im Verkehr gewandelt werden. Wasserstoff kann entweder importiert werden oder inländisch aus Biomasse, durch Dampfreformierung von Methan oder durch Elektrolyse aus EE-Strom erzeugt werden.

Biomasse kann in unterschiedlichen Nutzungspfaden entweder direkt oder nach Umwandlung in einen anderen Energieträger verwertet werden. So kann z. B. Holz in Kesseln für die Industrie zur

³⁴ Der Energiebedarf der Luft- und Schifffahrt ist in einen innerdeutschen und einen internationalen Teil, also von Deutschland ausgehenden oder in Deutschland ankommenden, getrennt.

Bereitstellung von Prozesswärme oder zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme im Gebäudesektor verwendet werden. Zusätzlich sind als Anlagen zur Umwandlung von Biomasse Biogasanlagen, Vergaser-Anlagen mit anschließender Synthetisierung in Wasserstoff, Methan oder flüssige Brennstoffe und Biodieselanlagen implementiert.

Neben der inländischen Erzeugung können aus Erneuerbaren Energien hergestellte synthetische Energieträger importiert werden. Hierzu zählen Wasserstoff, Methan und flüssige Kraftstoffe. Jahresscharf wird dafür eine maximal zur Verfügung stehende Menge mit einem jeweiligen spezifischen Preis als Annahme vorgegeben. Der spezifische Preis ergibt sich aus den Herstellungskosten und den jeweils notwendigen Kosten für den Transport des Energieträgers. Wieviel dieser zur Verfügung stehenden Kapazitäten letztendlich verwendet wird, ist Ergebnis der Optimierung.

REMod simuliert stundenscharf den Betrieb und die dabei entstehenden CO₂-Emissionen des Energiesystems, das durch die installierten Kapazitäten der genannten Technologien beschrieben wird. Hierbei wird das Zusammenspiel der Technologien durch eine Betriebsführungshierarchie vorgegeben, welche emissionsarme Technologien bevorzugt betreibt (Palzer, 2016; Sterchele, 2019).

C. TIMES-PanEU

TIMES ist ein Modellgenerator für bottom-up Energiesystemmodelle, der innerhalb des Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) der International Energy Agency (IEA) entwickelt wurde (ETSAP, n.d.). Hierbei kann das Optimierungsproblem als lineares Optimierungsproblem oder als gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem modelliert werden. In TIMES erfolgt eine Trennung zwischen der anwenderspezifischen Modellstruktur (dargestellt als Referenzenergiesystem), den Daten, der mathematischen Formulierung der Nebenbedingungen und dem Lösungsverfahren (Loulou et al., 2016a; Remme, 2006). Der Anwender erstellt ein Energiesystemmodell mittels eines Datenmanagementsystems (VEDA-TIMES), von dem die nutzerspezifischen Modellstruktur- und Eingabedaten an TIMES übergeben und in mathematische Gleichungen, basierend auf der algebraischen Modellierungssprache GAMS, umgewandelt werden (Gargiulo, 2009; Gargiulo et al., 2016; Wright et al., 2016). Hierbei werden unterschiedliche Algorithmen zur Lösung des mathematischen Optimierungsproblems zur Verfügung gestellt. Die Zielfunktion in TIMES beinhaltet die Minimierung der Gesamtsystemkosten unter Einhaltung aller Nebenbedingungen (Loulou et al., 2016b).

Grundstruktur von TIMES PanEU

Das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU ist ein lineares Optimierungsmodell, in dem das Energiesystem der Staaten der EU27 sowie von Norwegen, Großbritannien und der Schweiz (siehe A.4Abbildung) hinsichtlich seiner Gesamtsystemkosten integral optimiert wird. Der Modellierungszeitraum reicht von 2010 bis 2050 und ist in mehrere Zeitschritte unterteilt (Fünf-Jahres-Schritte). Bei der Optimierung erfolgen eine integrale Ausbau- und Einsatzoptimierung über den gesamten Modellierungszeitraum (Blesl et al., 2010; Europäische Kommission, 2013).



Abbildung A.4: Regionen des TIMES-PanEU-Modells.

Abbildung A.5 zeigt das länderspezifische Referenzenergiesystem des bestehenden TIMES PanEU Modells in aggregierter Form. Zielfunktion des Modells ist eine zeitintegrale Minimierung der gesamten diskontierten Systemkosten für den Zeithorizont 2010 bis 2050. Dabei ist im Modell ein vollständiger Wettbewerb zwischen verschiedenen Technologien beziehungsweise Energieumwandlungspfaden unterstellt. Als Energiesystemmodell enthält TIMES PanEU auf einzelstaatlicher Ebene alle an der Energieversorgung und -nachfrage beteiligten Sektoren, wie beispielsweise die öffentliche und industrielle Strom- und Wärmezeugung, die Industrie, den Gewerbe-, Handels-, Dienstleistungssektor (GHD), die Haushalte und den Transportsektor. Sowohl die Treibhausgasemissionen (CO_2 , CH_4 , N_2O) als auch die wichtigsten Schadstoffemissionen (CO , NO_x , SO_2 , NMVOC, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$) sind in TIMES PanEU erfasst.

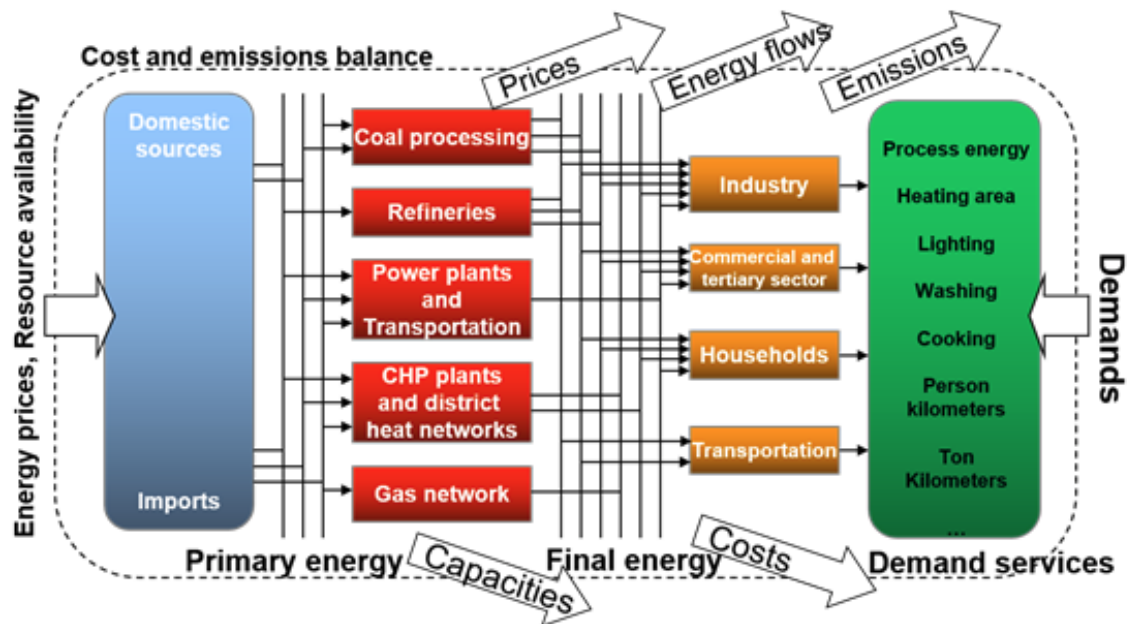


Abbildung A.5: Allgemeine Struktur des TIMES-PanEU-Modells.

Bereitstellung von Energieträgern und sonstige Energieumwandlung

Im Energieträger-Bereitstellungssektor sind die Primärenergieressourcen durch Angebotskurven mit mehreren Kostenstufen modelliert. Dazu gehören Rohöl, Erdgas, Steinkohle und Braunkohle. Darüber hinaus werden verschiedene Bioenergieträger modelliert: Holz, Biogas, Haushaltsmüll, Industriemüll und Energiepflanzen. Für die Rohstoffe stehen verschiedene Umwandlungstechnologien wie Raffinerien zur Verfügung (Kober, 2013).

Öffentliche Strom- und Wärmebereitstellung

Die Modellierung der öffentlichen Strombereitstellung erfolgt auf Basis von drei Spannungsebenen: Höchst- und Hochspannung, Mittelspannung, Niederspannung. Versorgungsseitig stehen verschiedene Strombereitstellungstechnologien zur Verfügung, die die elektrische Energie in die unterschiedlichen Spannungsebenen einspeisen. Hierbei nutzen die zentralen Großkraftwerke das Höchstspannungsnetz, dezentrale Kraftwerke, wie z. B. PV Anlagen, das Mittel- und Niederspannungsnetz. Sowohl der Kraftwerksbestand im Jahr 2015 als auch die Investitionsoptionen für die folgenden Perioden sind dabei nach Technologieleistungsklassen und eingesetztem Brennstoff aggregiert. Die Wasserkraftwerke (Pumpspeicher, Laufwasser) sind ebenso im Strombereitstellungssektor modelliert.

Die Stromnachfrage ist in TIMES PanEU in die Sektoren Haushalte, GHD, Landwirtschaft, Transport und Industrie unterteilt. Transportverluste werden über Wirkungsgrade der Transformationsprozesse berücksichtigt. Zudem fallen hier Netznutzungsentgelte in Form von variablen Kosten an. Die von den öffentlichen KWK-Anlagen und Heizwerken zentral bereitgestellte Fernwärme wird ebenfalls über Wärmeumwandlungsprozesse in sektorspezifische Fernwärme umgewandelt. Auch diese Prozesse berücksichtigen Kosten und die Wärmeverluste in Form von Wirkungsgraden.

Haushalte, GHD und Landwirtschaft

Hinsichtlich der Nachfrage nach Energiedienstleistungen beziehungsweise -mengen wird in TIMES PanEU sektorspezifisch differenziert, wobei für jede Nachfragekategorie verschiedene Bestandstechnologien und Investitionsoptionen, aggregiert nach Technologie und eingesetztem Endenergieträger, zur Bereitstellung der entsprechenden Nutzenergie zur Verfügung stehen. Im Haushaltssektor ist die Nachfrage in folgende Nutzenergien unterteilt: Raumwärme, Raumklimatisierung, Warmwasser, Kochen, Beleuchtung, Kühlung, Spülmaschine, Waschmaschine, Trockner, Sonstige Elektrizitätsnachfrage, Sonstige Energienachfrage. Der Wärmebedarf (Raumwärme, Klimatisierung, Warmwasser) wird zusätzlich unterteilt in den Wärmebedarf städtischer und ländlicher Einfamilienhäuser sowie der Mehrfamilienhäuser (jeweils Alt- und Neubau). Im Sektor GHD ist die Nachfrage in folgende Nutzenergien unterteilt: Raumwärme, Raumklimatisierung, Warmwasser, Kochen, Beleuchtung, Kühlung, Öffentliche Beleuchtung, Sonstige Elektrizitätsnachfrage, Sonstige Energienachfrage. Hier wird der Wärmebedarf weiter unterteilt nach Gebäudetyp (kleine und große Gebäude). Die Energienachfrage der Landwirtschaft wird durch einen allgemeinen Prozess modelliert, der verschiedene Energieträger als Input zur Deckung der Nachfrage benötigt.

Transport

Im Transportsektor sind verschiedene Nachfragekategorien abgebildet. Die Nachfragekategorien werden unterteilt in: Pkw-Personenkilometer, Bus-Personenkilometer (Stadt/Land), Lkw-Tonnenkilometer (leicht/schwer), Kraftrad-Personenkilometer, Passagierzug-Personenkilometer (leicht/schwer), Güterzug-Tonnenkilometer, Flugverkehr-PJ (Inland/international innerhalb der EU/international außerhalb der EU), Schifffahrt-PJ (allgemein/Bunker). Die Nachfragen können jeweils durch verschiedene Technologien (Prozesse) mit unterschiedlichen Input-Energieträgern gedeckt werden.

Industrie

Im Industriesektor wird zwischen energieintensiven und nicht-energieintensiven Branchen unterschieden. Die energieintensiven Branchen werden unterteilt in die Bereiche Eisen und Stahl, Aluminium, Kupfer, Ammoniak, Chlor, Zement, Kalk, Flachglas, Behälterglas und Papier. Zur Deckung der Nachfragen stehen auf den unterschiedlichen Prozessstufen verschiedene Technologien zur Verfügung. Die nicht-energieintensiven Branchen werden unterteilt in sonstige Nichteisenmetalle, sonstige Chemie, sonstige nichtmetallische Mineralien, Lebensmittel und übrige Industrien (Kober, 2013). Darüber hinaus sind in TIMES PanEU die industriellen Eigenerzeuger modelliert. Für die Wärme- und Strombereitstellung stehen unterschiedliche Technologien zur Deckung der Nachfrage zur Verfügung.

D. VECTOR21

Das Simulationstool VECTOR21 (Vehicle Technology Scenario Model) des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte dient der Erstellung von Szenarien zur Marktentwicklung von Fahrzeugtechnologien des deutschen Pkw- und Lkw-Markts bis 2050. Die Modellierung des Marktangebots berücksichtigt Fahrzeuge mit unterschiedlichen technisch-ökonomischen Eigenschaften, differenziert nach Antriebsstrangkonfiguration (z. B. Diesel und Benzin; Plug-in Hybrid, batterieelektrisch) und Fahrzeugsegment. Nachfrageseitig bildet VECTOR21 für verschiedene Käufergruppen das Fahrverhalten (z. B. Jahresfahrleistung) sowie Präferenzen (z. B. Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur und Beschleunigungsverhalten der Fahrzeuge) ab. Zusätzlich sind Entwicklungen von für den Fahrzeugmarkt relevanten Rahmenbedingungen hinterlegt, wie die zukünftige Entwicklung der EU-CO₂-Emissionsnormen für Fahrzeuge, Verfügbarkeit der Lade- und Tankinfrastruktur, Technologiekosten sowie Kraftstoff- und Stromkosten. Der wichtigste Output der Modellierungen ist die Entwicklung der Marktanteile der Fahrzeugtechnologien, sowie darauf basierende Indikatoren wie Energieverbrauch und CO₂-Emissionen des Straßensektors. Tabelle A.1 fasst die Annahmen für die VECTOR21-Simulationen zusammen.

	Mix	Elek.	H2	E-Fuel
CO₂-Preise (Euro2020)	Starke Erhöhung, 2025: 100 Euro, 2030: 200 Euro, 2045: 500 Euro	Starke Erhöhung, 2025: 100 Euro, 2030: 200 Euro, 2045: 500 Euro	Starke Erhöhung, 2025: 100 Euro, 2030: 200 Euro, 2045: 500 Euro	Starke Erhöhung, 2025: 100 Euro, 2030: 200 Euro, 2045: 500 Euro
Flotten-grenzwerte Pkw	Reduktion von 50 % gegenüber 2021 bis 2030, post-2030 Verschärfung bis 2050, um 90 % THG-Minderung zu erreichen (gemäß Green Deal)	Reduktion von 50 % gegenüber 2021 bis 2030, post-2030 Verschärfung bis 2050, um 90 % THG-Minderung zu erreichen (gemäß Green Deal)	Reduktion von 50 % gegenüber 2021 bis 2030, post-2030 Verschärfung bis 2050, um 90 % THG-Minderung zu erreichen (gemäß Green Deal)	Reduktion von 50 % gegenüber 2021 bis 2030, post-2030 Verschärfung bis 2050, um 90 % THG-Minderung zu erreichen (gemäß Green Deal) + Anrechenbarkeit von synthetischen Kraftstoffen auf die CO ₂ Flottengrenzwerte für bis zu 10 % der abgesetzten Pkw ab 2030

	Mix	Elek.	H2	E-Fuel
Flotten-grenzwerte Lkw	31 % für leichte und 30 % für schwere Nutzfahrzeuge bis 2030, Verschärfung bis 2050, um 90 % THG-Minderung zu erreichen	31 % für leichte und 30 % für schwere Nutzfahrzeuge bis 2030, Verschärfung bis 2050, um 90 % THG-Minderung zu erreichen	31 % für leichte und 30 % für schwere Nutzfahrzeuge bis 2030, Verschärfung bis 2050, um 90 % THG-Minderung zu erreichen	31 % für leichte und 30 % für schwere Nutzfahrzeuge bis 2030, Verschärfung bis 2050, um 90 % THG-Minderung zu erreichen + Anrechenbarkeit von synthetischen Kraftstoffen auf die CO ₂ -Flottengrenzwerte ab 2030
Energiesteuer	Benzin+Diesel: 2020 Sätze nominal konstant, H ₂ /E-Fuels bis 2030 befreit, bis 2035 halber Satz, ab 2035 wie fossile Kraftstoffe	Benzin+Diesel: 2020 Sätze nominal konstant, H ₂ /E-Fuels bis 2030 befreit, bis 2035 halber Satz, ab 2035 wie fossile Kraftstoffe	Benzin+Diesel: 2020 Sätze nominal konstant, H ₂ /E-Fuels bis 2030 befreit, bis 2035 halber Satz, ab 2035 wie fossile Kraftstoffe	Benzin+Diesel: 2020 Sätze nominal konstant, H ₂ /E-Fuels bis 2030 befreit, bis 2035 halber Satz, ab 2035 wie fossile Kraftstoffe
Synthetische Kraftstoffe (E-Fuels)	Ab 2023 1 % Beimischung, bis 2045 >90 %	Ab 2023 1 % Beimischung, bis 2045 >90 %	Ab 2023 1 % Beimischung, bis 2045 >90 %	Ab 2023 1 % Beimischung, bis 2040 >90 %
H₂ Tank- / Ladeinfrastruktur Pkw, Leichte Nutzfahrzeuge	Ladeinfrastruktur-Ausbau bis 2030 abgeschlossen, H ₂ -Infrastrukturausbau bis 2035 abgeschlossen	Schneller Ausbau der Ladeinfrastruktur bis 2025, bis 2030 abgeschlossen, geringer Ausbau der H ₂ -Infrastruktur	Schneller Ausbau der Ladeinfrastruktur bis 2030, bis 2035 abgeschlossen, H ₂ -Infrastrukturausbau bis 2030 abgeschlossen	Schneller Ausbau der Ladeinfrastruktur bis 2030, bis 2035 abgeschlossen, H ₂ -Infrastrukturausbau bis 2040 abgeschlossen
Ladeinfrastruktur Schwere Nutzfahrzeuge	Ausbau der notwendigen Strom-Lade- und H ₂ -Tank-Infrastruktur bis 2035 abgeschlossen	Ladeinfrastruktur-Ausbau bis 2030, geringer Ausbau der H ₂ -Infrastruktur	Ladeinfrastruktur-Ausbau bis 2035, H ₂ -Infrastrukturausbau bis 2030 abgeschlossen	Ausbau der Ladeinfrastruktur bis 2035, geringer Ausbau der H ₂ -Infrastruktur
PKW Technologiekosten Annahmen (Euro2020)	Batterie: 90 Euro/kWh bis 2030 (Avicenne Energy, 2020); Brennstoffzelle: 58 Euro/kW	Batterie: 54 Euro/kWh bis 2030 (Henbest et al., 2020); Brennstoffzelle: 58 Euro/kW	Batterie: 90 Euro/kWh bis 2030 (Avicenne Energy, 2020); Brennstoffzelle: 58 Euro/kW	Batterie: 90 Euro/kWh bis 2030 (Avicenne Energy, 2020); Brennstoffzelle: 58 Euro/kW

	Mix	Elek.	H2	E-Fuel
	stoff-zellensystem: 58 Euro/kW bis 2050 (James et al., 2018; eigene Annahmen) Lkw endogen	stoff-zellensystem: 58 Euro/kW bis 2050 (James et al., 2018; eigene Annahmen) Lkw endogen	stoff-zellensystem: 58 Euro/kW bis 2030 (James et al., 2018; eigene Annahmen) Lkw endogen	bis 2050 (James et al., 2018; eigene Annahmen) Lkw endogen
Strompreis (Pkw Heimlander) (EUR2020/kWh)	Konstant: 0,35 Euro/kWh (Annahme)	Reduktion auf 0,29 Euro/kWh bis 2045	Konstant: 0,35 Euro/kWh (Annahme)	Konstant: 0,35 Euro/kWh (Annahme)
Strompreis (Lkw, Großabnehmer, ohne MwSt.) (EUR2020/kWh)	Konstant: 0,25 Euro/kWh (Annahme)	Reduktion auf 0,23 Euro/kWh bis 2045	Konstant: 0,25 Euro/kWh (Annahme)	Konstant: 0,25 Euro/kWh (Annahme)
Ölpreis (Euro2020/barell)	Anstieg bis 2045 auf 95 Euro/barell (REMIND-EU)	Anstieg bis 2045 auf 87 Euro/barell (REMIND-EU)	Anstieg bis 2045 auf 90 Euro/barell (REMIND-EU)	Anstieg bis 2045 auf 102 Euro/barell (REMIND-EU)
H₂ (grün) Tankstellenpreis (Euro2020/kg)	2030: 7,80 Euro/kg; 2050: 5,70 Euro/kg (basierend auf Prognos, 2020)	2030: 7,80 Euro/kg; 2050: 5,70 Euro/kg (basierend auf Prognos, 2020)	2030: 7,80 Euro/kg; 2050: 5,70 Euro/kg (basierend auf Prognos, 2020)	2030: 7,80 Euro/kg; 2050: 5,70 Euro/kg (basierend auf Prognos, 2020)
Umweltprämie	Gemäß Stand 2021 (z. B. 9.000 Euro für kleine und mittlere BEVs/FCEVs)	Gemäß Stand 2021	Gemäß Stand 2021	Gemäß Stand 2021
Förderkulisse Lkw	Kfz-Steuer-Befreiung, Kaufprämie und Mautbefreiung für BEV und FCEV bis 2025, anschließend reduzierter Mautsatz bis 2035	Kfz-Steuer-Befreiung, Kaufprämie und Mautbefreiung für BEV und FCEV bis 2025, anschließend reduzierter Mautsatz bis 2035	Kfz-Steuer-Befreiung, Kaufprämie und Mautbefreiung für BEV und FCEV bis 2025, anschließend reduzierter Mautsatz bis 2035	Kfz-Steuer-Befreiung, Kaufprämie und Mautbefreiung für BEV und FCEV bis 2025, anschließend reduzierter Mautsatz bis 2035

Tabelle A.1: Annahmen-Übersicht VECTOR21.

E. DEMO

Das Deutschlandmodell (DEMO) des DLR-Instituts für Verkehrsforschung ist eine Modelllandschaft, die aus mehreren Teilmodellen besteht, die die Verkehrsentwicklung in allen Bereichen (Personenverkehr, Wirtschaftsverkehr) und für alle Verkehrsträger (Straße, Schiene, Binnenschiff, Luft) in Deutschland maßnahmensensitiv und prognosefähig abbilden.

Im Personenverkehr kommt ein räumlich hoch aufgelöstes, multimodales synthetisches Verkehrsmodell zur Anwendung (Winkler and Mocanu, 2017). Modelliert werden die Verkehrserzeugung (Gesamtanzahl der Wege), Verkehrsverteilung (Zielwahl, Entfernung der Wege) und Verkehrsaufteilung (Moduswahl). Zwei Teilmodelle differenzieren anhand der Entfernung (Grenze bei 100 km) nach Nah- und Fernverkehr und dort jeweils nach Wegezwecken. Neben dem innerdeutschen Binnenverkehr kann der auch der Quell-, Ziel- und Transitverkehr (vereinfacht) abgebildet werden.

Wichtige Outputs im Personenverkehr sind die Gesamtanzahl der Wege und Verkehrsleistung je Verkehrsmodus, sowie eine räumlich fein aufgelöste Verortung dieser Wege, das heißt eine Verkehrsumlegung (Routenwahl und Berechnung von Verkehrsströmen auf einzelne Straßen).

Die wichtigsten Eingangsgrößen sind die räumlich differenzierte Bevölkerungszahl (nach Altersgruppen, Erwerbstätigkeit, Pkw-Besitz) und die Verkehrsangebotskenngrößen (Reisezeiten und –kosten je Verkehrsmodus). Diese Kenngrößen werden aus detaillierten Netz- und Angebotsmodellen modusspezifisch generiert. Außerdem werden soziale Trends, technische Entwicklungen und politische Maßnahmen berücksichtigt.

Die Annahmen für den Personenverkehr sind in Tabelle A.2 hinterlegt.

	Quelle	Mix	Elek.	H2	E-Fuel
Bevölkerungs-entwicklung	Eurostat (Gesamtsumme), BBSR, Destatis (räumliche Verteilung)	2030: 83,5 Mio. 2050: 82,7 Mio.			
BIP	Eurostat	2030: 3.309 Mrd. Euro 2050: 4.159 Mrd. Euro			
Pkw-Dichte	VECTOR21 + eigene Annahmen	2030: 588 2050: 606	2030: 588 2050: 616	2030: 587 2050: 607	2030: 583 2050: 613
Energiekosten Pkw pro km	VECTOR21	2030: 15 ct/km	2030: 14 ct/km	2030: 14 ct/km	2030: 15 ct/km

	Quelle	Mix	Elek.	H2	E-Fuel
		2050: 10 ct/km	2050: 8 ct/km	2050: 10 ct/km	2050: 11 ct/km
Parkkosten Pkw	Eigene Annahmen	Erhöhung um 50 % (2030) bzw. 100 % (2050)			
Kosten ÖPNV	Eigene Annahmen	Stagnation			
Reisezeiten ÖPNV und Bahn	Eigene Annahmen	leichte Beschleunigung (bis zu 12 % schneller in 2050 im Vergleich zu 2020)			
Attraktivierung Radverkehr	Eigene Annahmen	leichte Beschleunigung (bis zu 15 % schneller in 2050 im Vergleich zu 2020)			

Tabelle A.2: Annahmen-Übersicht Personenverkehr.

Für den Güterverkehr wird die Entwicklung der Transportnachfrage mithilfe eines zusätzlichen Zeitreihenmodells auf Basis der Berechnungsmethode chain-linked volumes mit „Verkehr in Zahlen 2020/2021“ (BMVI, 2021) sowie der zurückliegenden und prognostizierten Entwicklung des deutschen Bruttoinlandsprodukts ermittelt. Eine Ausnahme bildet der wasserstraßengebundene Güterverkehr, dessen Transportleistung mit Hinblick auf die verringerten Infrastrukturausbauten in diesem Bereich als konstant angenommen wird. Die Annahmen für den Güterverkehr sind Tabelle A.3 zu entnehmen.

	Quelle	Mix	Elek.	H2	E-Fuel
BIP	Eurostat	2030: 3.309 Mrd. Euro 2050: 4.159 Mrd. Euro			
Flottenzusammensetzung Lkw	Gesamtverkehrsleistung: Eigene Berechnungen, Anteile der jeweiligen Antriebe: VECTOR 21				
Antriebsenergie Schiene	Eigene Annahmen	Linearer Anstieg des elektrischen Antriebs bis 2050 auf 100 %			
Antriebsenergie Wasserstraße	Eigene Annahmen	Linearer Anstieg des Wasserstoff- bzw. E-Fuelanteils bis 2050 auf 100 %			

Tabelle A.3: Annahmen-Übersicht Güterverkehr.

Daneben kommen Kohorten-Modelle zur Entwicklung des Bestands hinzu, welche die Brücke zwischen Neufahrzeugverkäufen und der Nutzung von Fahrzeugen schlagen. Diese Logik gilt sowohl für Pkw als auch für Lkw.

Sowohl auf der Seite der Modelleingangsgrößen (z. B. Berücksichtigung der antriebspezifischen Kraftstoffkosten) als auch auf der Seite der Modellergebnisse (z. B. differenzierte Verkehrsleistung nach Antriebsarten) besteht eine enge Kopplung zwischen DEMO und VECTOR21.

Aufbauend auf den Modellergebnissen werden Energienachfrage und Emissionen mittels prognostizierter spezifischer Emissions- und Energieverbrauchsfaktoren berechnet.

F. FORECAST

FORECAST als Sektormodell für die Industriesimulation

Zur Berechnung der Szenarien für den Industriesektor wird das Modell FORECAST eingesetzt (siehe Fleiter et al., 2018). Es ermöglicht detaillierte Tiefenanalysen hinsichtlich der Struktur von Vermeidungskosten und -Potenzialen im Industriesektor.

Modellstruktur

FORECAST ist ein bottom-up Energienachfragemodell. Es bildet die Technologiestruktur der Industrie ab und berechnet Energieverbrauch und Emissionen sowie Kosten auf Prozessebene. Eingangsdaten für die Modellierung sind übergreifende Aktivitätsgrößen wie die Wirtschaftsleistung je Branche, Energie- und CO₂-Preise, Annahmen zu Instrumenten, Strukturdaten wie Energie- und THG-Bilanzen sowie techno-ökonomische Daten der abgebildeten Technologien (Abbildung A.6). Zur Parametrisierung wird auf statistische Daten, empirische Studien, Literatur und Expertenschätzungen zurückgegriffen. FORECAST ist hierarchisch aufgebaut und unterteilt die Industrie anhand von Energiebilanzen in einzelne Wirtschaftszweige beziehungsweise Subsektoren. Diesen sind Prozesse zugeordnet, welche durch einen spezifischen Energieverbrauch und eine Aktivitätsgröße beschrieben werden. Weiterhin werden Technologiebereiche wie Elektromotoren, Industrieöfen, Raumwärme und Dampferzeugung separat modelliert.

Dekarbonisierungsstrategien

Für die Berechnung von Dekarbonisierungsszenarien/-pfaden kann eine große Bandbreite an unterschiedlichen Dekarbonisierungsstrategien berücksichtigt werden:

- Inkrementelle Verbesserung der **Energieeffizienz durch beste verfügbare Technik** der bestehenden Anlagen: Hohe Auflösung bei Prozessen und umfassende Datenbank zu Einspartechiken erlaubt möglichst genaue Bewertung des vorhandenen Effizienz-Potenzials.
- **Prozesswechsel auf neue CO₂-arme beziehungsweise CO₂-neutrale Herstellungsverfahren**: Hohe Auflösung bei Produktionsrouten und Prozessen erlaubt konkrete Annahmen zum Wechsel auf neue Herstellungsverfahren je Produktionsroute. Neue Verfahren sind gegebenenfalls auch mit dem Wechsel auf einen anderen Energieträger verbunden (z. B. Wasserstoff oder Strom).

- **Brennstoffwechsel:** Bestandsmodell der Dampferzeuger inklusive Discrete-Choice-Modellierung der Investitionsentscheidung erlaubt endogene Simulation des Brennstoffwechsels entsprechend Wirtschaftlichkeit und Technologiebestand der verschiedenen Dampferzeuger. Ein vereinfachter Discrete-Choice-Ansatz wird für die Modellierung des Brennstoffwechsels bei Industrieöfen verwendet (Rehfeldt et al. 2018). Dabei ist ein Wechsel auf Biomasse, Strom (Elektrokessel, Wärmepumpen), Wasserstoff oder PtG (Power-To-Gas) möglich.
- **CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) sowie –Nutzung (CCU):** Hohe Prozessaufklärung erlaubt Zuordnung von CCS zu ausgewählten Prozessen, z. B. um verbleibende prozessbedingte Emissionen zu mindern.

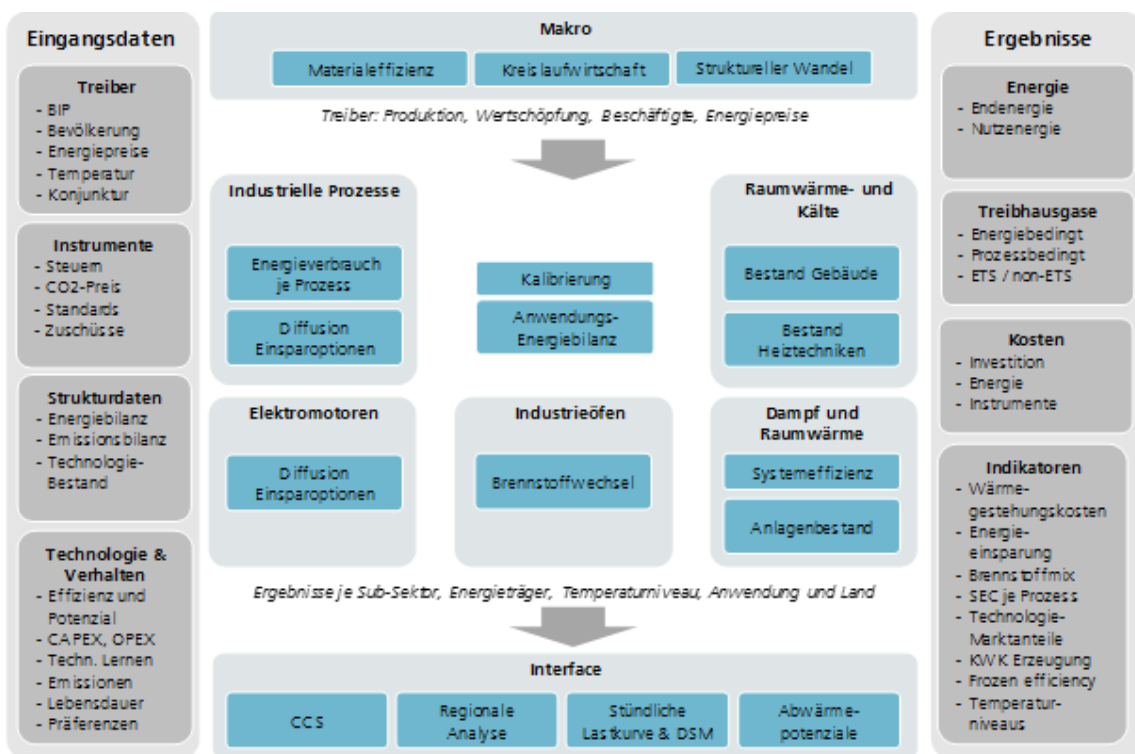


Abbildung A.6: Übersicht Modell FORECAST-Industry.

Recycling und Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungskette

Eine große Anzahl berücksichtigter Produkte und separate Modellierung von Primär- und Sekundärrouten erlaubt je Szenario spezifische Annahmen zum Fortschritt bei Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft.

FORECAST umfasst aktuell alle Länder der EU27 (zusätzlich das Vereinigte Königreich, Norwegen und die Schweiz) und verfügt für diese über eine ausgeprägte und regelmäßig aktualisierte Datenbasis. Es wurde in verschiedenen Beratungsprojekten z. B. für die Europäische Kommission im EU-Kontext eingesetzt und ist kompatibel sowohl mit den deutschen (AGEB, 2020b) als auch den Eurostat Energiebilanzen. Der methodische Ansatz (Darstellung der Industrie auf Prozessebene) erlaubt es, landestypische Besonderheiten der industriellen Struktur abzubilden (Rehfeldt et al., 2018a, 2018b).

Simulation von Technologiediffusion und Investitionsentscheidungen

FORECAST Industry legt besonderen Schwerpunkt auf die Abbildung von Transformationspfaden mit hohem technischem Detailgrad. So wird die Dampferzeugung mit einem Bestandsmodell abgebildet. Dieses ermöglicht es, anhand der Altersstruktur der bestehenden Anlagen, der an die technische Lebensdauer der Anlagen geknüpften Austauschgeschwindigkeit und (abstrahierten) Annahmen zu Markteigenschaften (z. B. die Transparenz des Marktes) die Trägheit der Reaktion auf Preissignale abzubilden. Insbesondere im Kontext begrenzter Zeithorizonte lassen sich so Gelegenheitsfenster für den Technologieaustausch beschreiben. Ergänzend sind Anlagen der energieintensiven Industrie von erheblicher Bedeutung (u. a. Hochöfen, Dampfspaltöfen, Papiermaschinen). Diese sind auf Standortebene und mit ihrer Altersstruktur individuell erfasst. Die mit der Dekarbonisierung ihrer Branchen verbundenen zeitlichen Restriktionen (Infrastruktur, Preissignale, Modernisierungszyklen...) können so detailliert berücksichtigt werden. Im Rahmen der Szenariotechnik werden verschiedene Optionen verglichen.

Modelldatenbank

FORECAST Industry nutzt eine Vielzahl verschiedener Datenquellen, welche in einer Modelldatenbank strukturiert und gebündelt sind. Maßgebliche, jährlich aktualisierte Daten umfassen die Energiebilanzen (z. B. AGEB, 2020b; Eurostat, 2021), Produktionsmengen (verschiedene Quellen, Verbände, nationale/europäische Statistiken) und Emissionsmengen (UNFCCC, 2021). Hinzu kommen techno-ökonomische Daten zu den Prozessen, Prozesswärmeerzeugungstechnologien und innovative Technologieoptionen (CCU/S, H₂-Direct-reduced iron (DRI), neue Zementsorten...) und ökonomische Daten (Energieträgerpreise, CO₂-Preise). Weiterhin ist eine EU-weite Datenbank mit den Standorten der Grundstoffindustrie an das Modell angebunden.

Simulation von Politikinstrumenten

FORECAST Industry ermöglicht an vielen Stellen der Modellierung Interventionen in den simulierten Ablauf. Diese werden zur Integration politischer Maßnahmen genutzt. Dazu gehören Preissignale und ordnungsrechtliche Maßnahmen ebenso wie eher weiche Hebel (z. B. Zugang zu Informationen). Der Grad der Abstrahierung variiert dabei stark, abhängig von der Verfügbarkeit empirischer Daten. An verschiedenen Stellen spielen Verhaltensaspekte eine Rolle, insbesondere wenn die Reaktion auf Preissignale bewertet wird. Das EU-ETS als zentrales Instrument der Dekarbonisierungsbemühungen der EU wird auf Prozess- oder Subsektorebene (entsprechend der ETS-Aktivitäten) abgebildet. Entsprechend werden nicht im EU-ETS vertretene Brennstoffbedarfe nationalen (z. B. BEHG) Bepreisungssystemen zugeordnet.

Ausgewählte Referenzen

FORECAST Industry wird in vielen nationalen und europäischen Projekten und zur Beantwortung unterschiedlicher inhaltlicher Fragestellungen eingesetzt. Darunter sind Projekte, die die Transformation des deutschen (Langfrist- und Klimaszenarien) und europäischen Industriesektors in verschiedenen ausgeprägten Szenarien untersuchen (Fleiter et al., 2019), aber auch fokussierte Betrachtungen der Wirkung von ETS-Preissignalen auf die Industrie. Weiterhin wird das Modell in der langjährigen Projektreihe der Politiksznarien zur Modellierung der Wirkung der Klimaschutzmaßnahmen der Bundesregierung eingesetzt.

G. NEWAGE

Das NEWAGE-Modell (National European Worldwide Applied General Equilibrium) ist ein globales, rekursiv-dynamisches Allgemeines Gleichgewichtsmodell mit besonderem Fokus auf den Energiesektor, insbesondere der Elektrizitätserzeugung. Es dient der gesamtwirtschaftlichen Analyse von Energie- und Klimapolitikstrategien im Hinblick auf ihre volkswirtschaftlichen Kosten. Aufgrund des totalanalytischen Rahmens des Allgemeinen Gleichgewichtsansatzes kann die Interaktion von Akteuren auf Märkten der Volkswirtschaft in einem geschlossenen Einkommenskreislauf beschrieben werden. Dadurch können sowohl direkte Effekte in einzelnen Sektoren (z. B. Energiewirtschaft) als auch indirekte Rückkopplungseffekte in der gesamten Volkswirtschaft erfasst werden, die durch preisinduzierte Angebots- und Nachfrageverschiebungen hervorgerufen werden. Neben einer technologisch fundierten Abbildung der Stromerzeugung liegen Schwerpunkte in der Modelltiefe bei der Abbildung verschiedener Haushaltsgruppen sowie der detaillierten Darstellung des staatlichen Steuer- und Transfersystems und der Abbildung verschiedener Umverteilungsvarianten im Zuge einer CO₂-Bepreisung.

NEWAGE wurde am IER entwickelt und bereits in zahlreichen nationalen und internationalen Projekten (zuletzt Kopernikus „ENavi“ und Horizon2020 „REEEM“) mit Fokus „Energiewende“ angewendet (siehe z. B. Beestermöller, 2017; Geres et al., 2016; Roland Montenegro et al., 2019; Roland Montenegro and Ulrich Fahl, 2017; Ulrich Fahl et al., 2019). Anwendungsbeispiele finden sich zudem in (Beestermöller et al., 2013; Beestermöller and Fahl, 2013; Küster, 2009; Küster et al., 2009, 2007; Marcel Zürn, 2010).

H. E2M2s

Das European Electricity Market Model (E2M2) ist ein fundamentalanalytisches Elektrizitätsmarktmodell, das unter der Zielsetzung der Systemkostenminimierung die Einsatzplanung und die Investitionsentscheidung im europäischen wettbewerblichen Strommarkt optimiert. Mittels E2M2 ist die Identifikation sinnvoller Maßnahmen für die kosteneffiziente und langfristig zuverlässige Integration hoher Anteile Erneuerbarer Energien in das Elektrizitätssystem möglich. Das „s“ im Modellnamen steht für die Möglichkeit der Modellierung von Unsicherheiten mittels eines stochastischen Ansatzes, welcher im Rahmen dieses Berichts aber nicht zur Anwendung kommt.

Aufgrund der Wechselwirkungen im Strommarkt ist die integrale Betrachtung der zur Verfügung stehenden Technologien notwendig, um effiziente Kombinationen von Integrations- und Flexibilisierungsoptionen zu ermitteln. Daher umfasst E2M2 die detaillierte Abbildung von anlagen- und blockscharfen thermischen Kraftwerken, Erneuerbaren Energieerzeugern und Flexibilitätsoptionen, wie Speichertechnologien oder Lastmanagement. Neben reinen Kondensationskraftwerken wird der Betrieb der verschiedenen Typen der KWK-Anlagen zur Stromerzeugung unter Berücksichtigung der Wärmenachfrage in die Optimierung mit einbezogen. Die Vorhaltung von Regelenergie unterscheidet zwischen den unterschiedlichen Regelenergiearten und berücksichtigt dabei die betriebliche Flexibilität der Kraftwerke.

E2M2 ist als lineares Optimierungsmodell mit optionalen gemischt-ganzzahligen Variablen für die Kraftwerkseinsatzplanung in bis zu stündlicher Auflösung formuliert, wodurch detaillierte Restriktionen wie Mindestbetrieb- oder Mindeststillstandzeiten berücksichtigt werden können.

Eine Übersicht über das Elektrizitätsmarktmodell E2M2 und seine typischen Modellcharakteristika ist in Abbildung A.7 dargestellt.

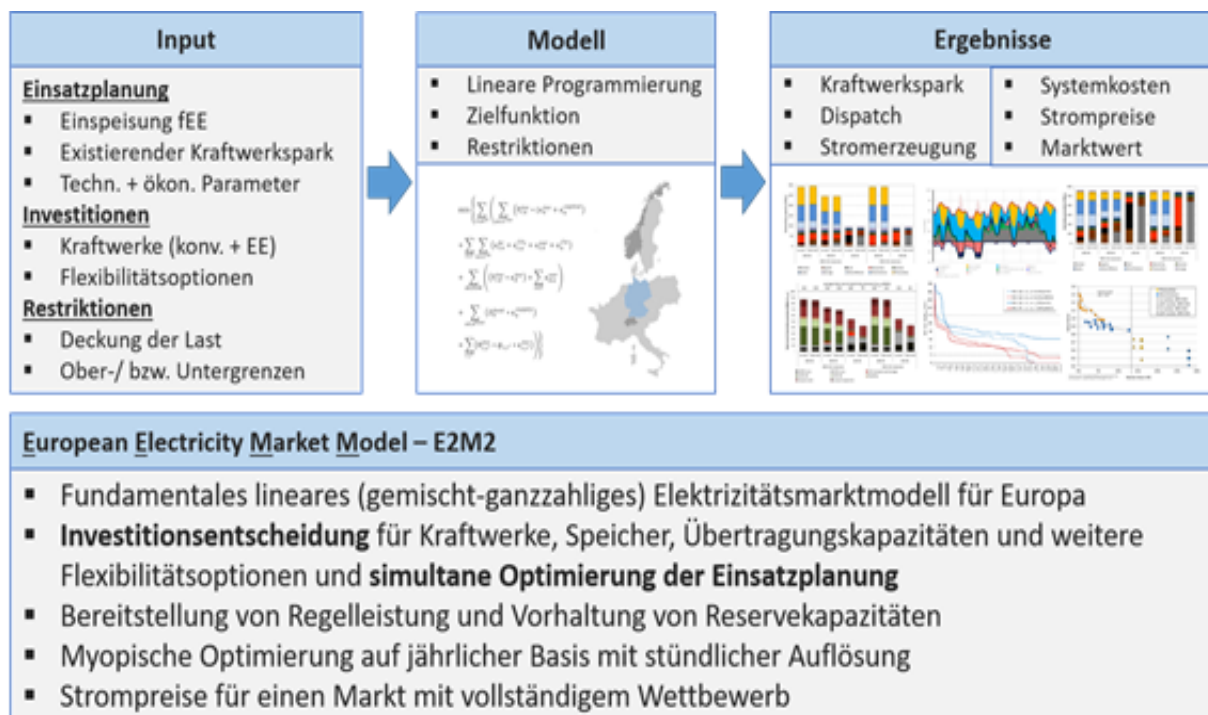


Abbildung A.7: Aufbau E2M2.

Zielfunktion

Als Zielfunktion werden die Systemkosten zur Deckung der exogen vorgegebenen Nachfrage in einem durch technische und regulatorische Restriktionen (installierte Kapazitäten, Anlagenverfügbarkeit, maximale CO₂-Emissionen und so weiter) begrenzten Lösungsraum minimiert. Die Systemkosten bestehen aus den annuisierten Investitionskosten und den jährlichen Fixkosten der neu installierten Kapazitäten sowie aus den variablen Kosten. Bei der Berechnung der variablen Kosten werden die Betriebs- und Wartungskosten sowie die Brennstoffkosten über die betrachteten Zeitschritte summiert.

Restriktionen

Die zu deckende Strom- und Wärmenachfrage ist der entscheidende Treiber des Elektrizitätsmarktmodells E2M2. Zu jedem Zeitpunkt muss eine vollständige Nachfragedeckung gewährleistet werden. Dafür können bestehende und neue Kapazitäten sowie Flexibilitätsoptionen, die dazu beitragen, die durch fluktuierende Erneuerbare Energien generierten Schwankungen auszuglei-

chen und damit das Residuallastprofil zu glätten, unter bestimmten technisch bedingten Restriktionen eingesetzt werden.

Strommarktpreise und CO₂-Preise

Neben den direkt berechneten primalen Variablen (z. B. die kostenoptimale Einsatz- und Investitionsplanung) des linearen Optimierungsproblems, können im Modell die dualen Variablen als marginale Kosten interpretiert werden. Die duale Variable der Gleichung zur Stromnachfragedeckung bildet die stündlichen Day-Ahead-Strompreise als Angebotspreis des Grenzkraftwerkes für einen Markt mit vollständigem Wettbewerb ab. Bei der Definition einer CO₂-Obergrenze können analog die Preise der CO₂-Zertifikate, bei dem sich diese CO₂-Emissionen am Markt einstellen würden, ermittelt werden.

Referenzen

Das Strommarktmodell E2M2 wird seit über zehn Jahren in verschiedenen Forschungsprojekten zur Analyse zukünftiger volkswirtschaftlich kostenminimaler Entwicklungen des Strommarktes bei hohen CO₂-Reduktionszielen und gleichbleibendem Niveau der Versorgungssicherheit angewendet. Der grundlegende Aufbau des Modells ist in Sun (2013) beschrieben, sowie Erweiterungen bezüglich der Abbildung von Flexibilität in Bothor et al. (2015) und Fahl et al. (2015). Anwendungen des Modells neueren Datums finden sich z. B. in Gillich et al. (2020) und Schick et al. (2020).

I. energyANTS

Mit dem Modell energyANTS (**energy** system **AN**alyses using **T**emporal and **S**patial **S**imulation) des Fraunhofer IEE werden die Simulationen für den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung vorgenommen. Die energyANTS setzen sich aus den hier relevanten Teilmodellen regioANTS, windANTS und pvANTS zusammen.

Wind Onshore

Die Simulationen für den Wind Onshore Ausbau werden in zwei Schritten vorgenommen. Es werden zuerst die Anlagen standortscharf platziert (regioANTS) und anschließend werden für die Anlagen die Zeitreihen berechnet (windANTS).

Modellierung des regionalen Zubaus

Damit eine Platzierung vorgenommen werden kann, müssen die Potenzialflächen bekannt sein. Die Potenzialflächen werden bestimmt, indem Flächen wie Siedlungsgebiete mit einem Puffer, geschützte Gebiete und Weitere ausgeschlossen werden. Für diese Analyse wurden die Flächen ausgeschlossen, wie in Schäfer (2015) dargelegt. Für das *Fokus Wind*-Szenario wurde die Karte mit Restriktionen verwendet, für das *Fokus PV*-Szenario sollte Naturschutz stärker gewichtet werden. Dies wurde umgesetzt, indem eine Potenzialkarte in der auch die restriktionsfreien Gebiete wie unter anderem Wald und Naturparke ausgeschlossen werden. Anschließend wurde die Eignung der Flächen mittels eines Analytic Hierarchy Process (AHP) bestimmt. Für die AHP wurden Experten des Fraunhofer IEE und der Wirtschaft befragt, welche Gewichtung elf verschiedene Kriterien (Tabelle) zueinander erhalten sollen, damit eine „Bewertung eines Standortes für Windenergieanlagen“ vorgenommen werden kann. Die Ergebnisse der Gewichtung sind in Tabelle A.4 zu finden. Für die Flächenbewertung werden zusätzlich zur Gewichtung fünf Kategorien verwendet, die die finale Bewertung bestimmen (Tabelle). Aus der AHP mit den Kategorien ergeben sich Potenzialflächen die Werte zwischen null und fünf haben können, von nicht geeignet (0) zu besonders geeignet (5). Die Flächenbewertung wird auf einem 25 mal 25 m Raster durchgeführt. Es werden für alle Potenzialflächen iterativ Anlagen platziert, wobei von einer Ellipsenform ausgegangen wird, um Abschattungseffekte mit zu betrachten. Die Ellipse definiert den Rotordurchmesser, wobei ein Verhältnis zwischen Höhe und Breite von drei zu fünf angenommen wird. Der Rotordurchmesser, sowie die Nabenhöhe und die installierte Leistung sind von den Wetterjahren sowie der Technologie (Stark- und Schwachwind) abhängig (Tabelle A.5). Die Einteilung nach Stark- oder Schwachwind hängt am Winddargebot in 150 m Höhe. An allen Standorten mit einer

Windgeschwindigkeit > 8 m/s wird von Starkwind ausgegangen und alle anderen Standorte werden als Schwachwind gewertet. Für das Jahr 2045 wird zwischen 2030 und 2050 interpoliert. Die Richtung der Ellipse orientiert sich an der Hauptwindrichtung, die hier als 230° (Südwest) angenommen werden. Sind alle Anlagen platziert, werden in Abhängigkeit der Flächenbewertung mittels einer Wahrscheinlichkeitsverteilung zufällig Anlagen ausgewählt. Durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung werden die Anlagen, die auf besonders geeigneten Potenzialflächen stehen, häufiger gewählt. Ausgehend von der gezogenen Anlage werden bis zu 10 weitere Anlagen auf der Fläche platziert, da in der Regel mehrere Anlagen gleichzeitig gebaut werden.

AHP Ergebnis als Reihenfolge	Kriterium	Kat.5	Kat.4	Kat.3	Kat.2	Kat.1	Einheit
1	Abstand zu FFH (Fauna-Flora-Habitatrichtlinie) Gebieten	1000	500	200	50	0	m
2	Abstand zu Vogelschutzgebieten	1000	500	200	50	0	m
3	Abstand zu Ortslagen	2000	1500	1000	800	600	m
4	Standortgüte Wind	8	7,5	7	6	5,5	m/s
5	Abstand zu Wohngebäuden	1000	850	700	550	400	m
6	Abstand zu Landschaftsschutzgebieten	1000	500	200	50	0	m
7	Abstand zu Waldstandorten	1000	500	200	50	0	m
8	Hangneigung	10	15	20	25	30	%
9	Südregion	0	1	2	3	5	m
10	Bevölkerungsdichte	20	60	120	200	1000	Anzahl
11	Abstand zum 110 kV Netz	1	3	6	10	20	km

Tabelle A.4: Kriterien für die Flächenbewertung eines Standortes für Windenergieanlagen für das Fokus Wind Szenario.

Jahr	Anlagentyp	Rotordurchmesser [m]	Nabenhöhe [m]	Installierte Leistung [MW]
2020	Starkwind	149	116	4,2
2020	Schwachwind	149	164	4,5
2030	Starkwind	165	132	5,8
2030	Schwachwind	165	180	4,9
2040	Starkwind	180	140	6,9
2040	Schwachwind	180	200	5,6
2050	Starkwind	195	150	7,9
2050	Schwachwind	195	220	6,3

Tabelle A.5: Technologieparameter für Wind Onshore für verschiedene Jahre.

Zeitreihenmodellierung

Die platzierten Anlagen werden dann an die windANTS übergeben und dort werden Winderzeugungszeitreihen berechnet. Basis für die Simulation der Windenergie an Land mit windANTS bilden die Gitter in ca. 2,8 km Auflösung der COSMO-Wettermodelle des Deutschen Wetterdienstes (Baldauf et al., 2011). Es werden stündlich aufgelöste Windgeschwindigkeiten verwendet. Die Windgeschwindigkeiten werden durch logarithmische Höheninterpolation auf die Nabenhöhe für die einzelnen COSMO Planflächen berechnet. Abschattungseffekte werden berechnet, indem eine windgeschwindigkeitsabhängige Windeffizienz die Windgeschwindigkeiten reduziert. Für jeden Anlagentyp steht eine Leistungskennlinie zur Verfügung, damit werden aus den Zeitreihen der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe die Leistungszeitreihen berechnet. Die Windgeschwindigkeiten aus dem COSMO-Wettermodell sind zeitliche und räumliche Mittelwerte. Um die Leistungsabgabe der einzelnen Windkraftanlagen zu bestimmen, ist eine Glättung der Leistungskennlinie erforderlich (Nørgård and Holttinen, 2004). Diese wird durch rekursive Faltung der Leistungskennlinie mit einer Gauss-Verteilung vorgenommen. Anschließend werden mechanische und elektrische Verluste sowie die Verfügbarkeit der Anlagen durch einen Faktor reduziert.

Parallel dazu werden Bestandsanlagen als für die nächsten 20 Jahre in Betrieb angenommen und für das Szenariojahr 2030, die dann noch sich in Betrieb befindenden Anlagen, selektiert. Diese finden ebenfalls Eingang in die windANTS, um die Zeitreihen für den Bestand zu berechnen. Die Daten Bestandsanlagen stammen aus dem Marktstammdatenregister (MaStR), vom Umweltbundesamt und Daten der einzelnen Bundesländer.

Für die Jahre 2021 bis 2025 wird die Mittelfristprognose der Übertragungsnetzbetreiber(enervis energy advisors GmbH, 2020) als Grundlage verwendet (Tabelle A.6), für alle folgenden Jahre wird von einem linearen Anstieg ausgegangen. Bei den Anlagen, die nach 2020 gebaut werden, wird davon ausgegangen, dass die Windenergieanlagen länger im Bestand sind. Hier wird von 25 Jahren ausgegangen, wobei ab dem 21. Jahr nur noch 80 % des Vorjahres im Bestand bleiben. Der Bestand wird mit dem Zubau verrechnet, um auf die passenden installierten Leistungen, die für das Ziel-Szenariojahr vorgegeben sind, zu kommen.

Szenario	2021	2022	2023	2024	2025
Fokus Wind	56.110	58.028	60.000	63.200	68.000
Fokus PV ³⁵	56.110	58.028	59.533	61.528	63.941

Tabelle A.6: Annahmen zum Ausbau der Onshore Windenergie bis 2025 in Anlehnung an die Mittelfristprognose in MW.

Wind Offshore

Die Abbildung der Einspeisung durch Offshore-Windenergie erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird ein zukünftiger Ausbau der Windenergie auf See unter Berücksichtigung von Bestands-Windparks modelliert. Anschließend werden unter Berücksichtigung des Zubaus Leistungszeitreihen für die Offshore-Windenergie simuliert. Basis für die Simulation der Offshore-Windenergie bildet das REA6-Modell des Deutschen Wetterdienstes mit einer räumlichen Auflösung von ca. 6 x 6 km.

³⁵ „Oberes Szenario“ der Mittelfristprognose

Modellierung des regionalen Zubaus

Der Zubau der Offshore Windenergieanlagen wird ebenfalls mittels regioANTS vorgenommen. Zur Abbildung des Zubaus wurden Vorranggebiete und Vorbehaltsgebiete für die Windenergie auf See aus Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat und Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2020) verwendet. Die Informationen zu den verwendeten Bestands-Windparks resultieren aus DG Mare (n.d.). Der Zubau erfolgte unter Berücksichtigung von Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2020), Deutsche WindGuard GmbH (2020) und – für Vorranggebiete ohne konkrete Ausbauplanung - mittels eines Kostenmodells. Das Kostenmodell bildet die Stromgestehungskosten in Abhängigkeit vom Energieertrag (mit Basisjahr 2012), der Wassertiefe und dem Abstand zur Küste ab. Die Investitionskosten basieren auf dem Kostenmodell von NREL und OREC und sind zusätzlich um einen Faktor zur Berücksichtigung der Wassertiefe korrigiert. Die Betriebskosten werden insbesondere zur Berücksichtigung von leitungsbundenen Kosten in Abhängigkeit der Küstenentfernung berechnet. Die so ermittelten Kosten werden verwendet, um eine Zubaureihenfolge der verfügbaren Flächen von günstig nach teuer festzulegen, bis die Zielleistung erreicht wird. Nach der Ermittlung der Zubaureihenfolge wird auch eine Abschätzung der möglichen Ausbaumenge durchgeführt. Dabei ist relevant, wie dicht die Anlagen auf den zur Verfügung stehenden Flächen platziert werden können. Zwischen den Anlagen soll ein Abstand von fünf Rotordurchmessern liegen. Um Verzerrungen durch die Größe und Form der einzelnen Flächen zu berücksichtigen (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2020), werden die Flächen mit dem Rotordurchmesser und dem Faktor 2,8 gepuffert und zur Berechnung einer korrigierten Leistungsdichte angesetzt. Als Kompromiss zwischen Anlagendichte und erwartetem Kapazitätsfaktor wurde eine korrigierte Leistungsdichte von 8 bis 10 MW/km² ermittelt, je nach Standort wie in Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2020) beschrieben.

Zeitreihenmodellierung

Die Modelle für die Erstellung von Leistungszeitreihen der Windenergie an Land und auf See nutzen grundsätzlich dieselben Rechenalgorithmen der windANTS. Lediglich die Parameter zur Anlagenverfügbarkeit sowie die Modellierung der Anlagenverschattung und der Glättungseffekte werden an die jeweilige Anlagenkonfiguration angepasst. Dazu werden vordefinierte Verschattungsmodelle für 5 MW, 7 MW und 9 MW Turbinen für einen vorgegebenen Abstand in Haupt- und Nebenwindrichtung vom fünf-, sieben- oder neunfachen des Rotordurchmessers benutzt. Die dazugehörigen Technologieparameter sind in Tabelle A.7 abgebildet.

Jahr	Installierte Leistung [MW]	Rotordurchmesser [m]	Spezifische Flächenleistung [W/m ²]	Nabenhöhe [m]
2020	6,8	148	400	104
2030	14	211	400	136
2045	18,5	243	400	151

Tabelle A.7: Technologieparameter für Wind Offshore.

PV auf Dachflächen

Modellierung des regionalen Zubaus

Um den PV-Dachflächen Ausbau zu bestimmen, wurde zuerst mittels des Modells regioANTS die räumliche Verteilung der installierten Leistung pro Jahr und Gemeinde ermittelt. Der Zielwert pro Bundesland wurde ausgehend von einem Ausbauziel für ganz Deutschland anhand der potenziell zur Verfügung stehenden Dachflächen berechnet. In dem Algorithmus wird die Ausbaugeschwindigkeit pro Gemeinde ermittelt, indem ausgehend auf der historischen installierten Leistung pro Gemeinde die bisherige Ausbaugeschwindigkeit ins Verhältnis zur Ausbaugeschwindigkeit des jeweiligen Bundeslandes gesetzt wird. Dabei wird das maximale Ausbaupotenzial jeder Gemeinde berücksichtigt, das sich aus den verfügbaren und genutzten Dachflächen einer Gemeinde ergibt. Der Ausbau wird bis zu einem gesetzten Wert im Zieljahr durch eine logistische Funktion für jede Gemeinde abgebildet. Entlang der Kurve wird für jede Gemeinde zugebaut, solange ein weiterer Ausbau möglich ist (Begrenzung durch das Dachflächenpotenzial), bis der Zielwert erreicht ist. Das Dachflächenpotenzial wird durch die Fläche der Hausumringe angenähert mit der Annahme, dass eine PV-Anlage auf Schrägdächern für ein kW_{Peak} etwa 5,5 m² benötigt werden. Auf Flachdächern wird von 13 m²/kW ausgegangen. Allerdings stehen bei Schrägdächern nur 30 % und bei Flachdächern 50 % der Fläche für PV-Anlagen zur Verfügung. Der aktuelle Anlagenbestand stammt aus dem Marktstammdatenregister. Für jede Einzelanlage wird die zugehörige Postleitzahl angegeben. Ein Postleitzahlengebiet kann in mehreren Gemeinden liegen, sowie eine Gemeinde mehrere Postleitzahlen umfassen kann. Die installierte Leistung pro Postleitzahl wird anhand der Fläche, die in einer Gemeinde liegt, aufgeteilt. Die Zielwerte für das Szenario werden anhand der potenziell zur Verfügung stehenden Dachfläche auf die Bundesländer verteilt.

Zeitreihenmodellierung

Die Ergebnisse der Regionalisierung (installierte Leistung pro Gemeinde im Zieljahr) werden anschließend an das Modell pvANTS übergeben. Dieses Modell berechnet die Leistungseinspeisung einer PV-Anlage. Dazu werden als Eingangsdaten Wetterdaten (hier REA6 Daten) verwendet. Das Modell besteht aus drei Teilen: i) dem Solaranteilmodell ii) dem Kollektormodell und iii) dem Wechselrichtermodell. Im Solaranteilmodell wird die Globalstrahlung in direkte und diffuse Strahlung zerlegt. Zusammen mit Temperaturdaten und räumlichen Daten zur Position, Ausrichtung und Neigung eines PV-Moduls werden diese Informationen an das Kollektormodell weitergegeben. Die räumlichen Daten stammen aus dem Marktstammdatenregister, wobei für jede Gemeinde die Mittelwerte aus den Einzelanlagen berechnet werden. Das Kollektormodell berechnet daraus Gleichstrom-Leistungszeitreihen. Das Wechselrichtermodell multipliziert die Gleichstrom-Leistungszeitreihen des Kollektormodells mit der installierten Nennleistung und generiert die Netzeinspeisung der PV-Anlagen.

Freiflächen-PV

Modellierung des regionalen Zubaus

Für PV Freiflächenanlagen wird mittels regioANTS der Zubau gerechnet, indem zuerst die Flächen bestimmt werden, wo Anlagen gebaut werden können (Potenzialflächen). Die Potenzialflächen bestehen zum einen aus Randstreifen von 185 m Breite neben Autobahnen und Schienenwegen aus Open Street Map (OSM) Daten. Per Gesetz sind 200 m Randstreifen vorgesehen, wobei allerdings 15 m zur Fahrbahn hin frei bleiben müssen. Die OSM Daten werden als Linienvektor abgebildet und dementsprechend ist die Fahrbahnfläche nicht mit abgebildet. Ein Puffer von 15 m um die Linie würde so zu einer Scheingenauigkeit führen, zumal alle folgenden Analysen auf Gemeindeebene betrachtet werden und Einzelanlagen nicht von Relevanz sind. Weitere Potenzialflächen sind Konversionsflächen. Diese setzen sich aus Landwirtschafts- und Heideflächen zusammen. Bei den landwirtschaftlichen Flächen werden nur Flächen mitberücksichtigt, deren Bodenqualität keine guten Landwirtschaftlichen Erträge zulassen, dies wird durch ein Soil Quality Rating < 40 bestimmt. Von diesen Flächen werden wiederum weitere Ausschlussflächen entfernt. So kann z. B. der Randstreifen von Schienenwegen in Ortslagen nicht mit PV Freiflächenanlagen bebaut werden. Die Ausschlussflächen beinhalten: Naturschutzgebiete, Flora Fauna Habitat Gebiete, Vogelschutzgebiete, Ramsar-Flächen (Feuchtgebiete von internationaler Bedeutung für den Lebensraum von Wasser- und Watvögeln), Nationalparks, Biosphärenreservate der Kern-

und Pflegezone, Naturparke, Wasserschutzgebiete der Zone 1, Überflutungsgebiete, Oberflächengewässer, Wälder und Gebäude. Anschließend werden auf die Potenzialflächen zufällig Anlagen platziert. Die Anlagengröße wird mittels einer Wahrscheinlichkeitsverteilung aus dem EEG-Erfahrungsbericht bestimmt. Ausrichtung und Neigung sind für Freiflächenanlagen immer optimal mit 30° Neigung und Ausrichtung nach Süden angenommen.

Zeitreihenmodellierung

Diese regionalen Informationen werden an das Modell pvANTS übergeben, wobei die Berechnung der Erzeugungszeitreihen für PV-Freiflächenanlagen identisch zur Berechnung für PV-Dachflächen erfolgt.

J. RWI-Modell (CO₂-Verbrauchsmodell)

Das Modell zur Berechnung von Verteilungseffekten stützt sich auf eine Verrechnung privater Konsumausgaben mit Input-Output-Berechnungen, mit dessen Hilfe die CO₂-Intensität des Konsums ermittelt werden kann (vgl. Grainger & Kolstad (2010) für die USA sowie Gill & Möller (2018) und Preuß et al. (2019) für Deutschland). Ausgangspunkt dieser Analyse ist die Verknüpfung der direkten und indirekten CO₂-Emissionen, die beim Konsum bestimmter Güter und Dienstleistungen anfallen, mit den Konsumausgaben der privaten Haushalte für die entsprechenden Gütergruppen. Dazu werden die aktuelle Welle der Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) für das Jahr 2015 (Destatis, 2019) und die Konsumausgaben für das Jahr 2015 aus der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) (Destatis, 2020b) genutzt. Die UGR fasst die indirekten CO₂-Emissionen des inländischen Konsums sowie die direkten Emissionen durch Heizen und Verkehr in einer Input-Output-Rechnung zusammen, während die VGR für die gleichen Gütergruppen die Konsumausgaben der privaten Haushalte erfasst. Die Verknüpfung der beiden Datensätze ergibt für jede Gütergruppe die CO₂-Intensität, das heißt die Emissionen je verausgabtem Euro (Vektor g).

Im nächsten Schritt wird die CO₂-Intensität mit den Ausgaben, a , der privaten Haushalte für jeden Verwendungszweck kombiniert. Dazu wird die aktuelle Welle der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) für das Jahr 2018 (Destatis, 2020a) genutzt. Die EVS erfasst detailliert die Ausgaben für verschiedene Verwendungszwecke von circa 50.000 deutschen Haushalten. Aus der Verknüpfung der Konsumausgaben aus der EVS mit der CO₂-Intensität der Ausgaben ergeben sich die Gesamtemissionen der Haushalte, $e = g*a$, für einen durchschnittlichen Warenkorb. Schließlich können die CO₂-Emissionen jeden Haushalts mit einem CO₂-Preis, τ , multipliziert werden und so die Mehrkosten der Haushalte durch einen CO₂-Preis ergeben: $\tau*e$.

K. Luftverschmutzung

Die Analyse der durch Luftverschmutzung verursachten Schäden für die öffentliche Gesundheit bedürfen der Modellierung der gesamten Wirkungskette, von den Schadstoffemissionen und deren Treibern, bis zur Gesundheitswirkung auf den Menschen und deren Gesellschaftskosten. Hierfür ist die Kopplung komplexer Modelle aus verschiedenen Forschungsdisziplinen nötig. In einem ersten Schritt wird das Energieökonomiemodell REMIND für die Modellierung von Schadstoffemissionen ertüchtigt. Hierzu liefert das GAINS Modell (Amann, 2012) des International Institute for Applied Systems Analysis sektorspezifische Emissionsfaktoren für alle relevanten Luftschadstoffe. Nun werden die Szenarien aus dem Portfolio von Ariadne um für die Schadenbewertung relevante sozioökonomische Parameter ergänzt. Um die angestrebte Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Modellansätze sicherzustellen wird hier besonders Wert auf Kohärenz gelegt. Die räumlich und zeitlich aufgelösten Szenarienergebnisse werden dann in ein chemisches Transportmodell eingespeist, welches die sich einstellende Atmosphärenzusammensetzung vereinfacht darstellt. Im ersten Schritt werden hierfür die gröber aufgelösten, aber erprobten Modelle TM5-FASST (Van Dingenen et al., 2018) verwendet. Die sich ergebenden Gesundheitsschäden und Kosten hängen stark von sozioökonomischen Trends wie der Urbanisierung und dem demographischen Wandel ab. Deshalb werden die sich einstellenden Luftschadstoffkonzentrationen mit räumlich hoch aufgelösten sozioökonomischen Daten verschnitten. Durch demographiespezifische Schadensfunktionen lassen sich nun die assoziierte Mortalität und auch vorzeitige Gesundheitseinschränkungen errechnen. Die monetarisierten volkswirtschaftlichen Schäden werden nun in einem letzten Schritt in die ökonomische Analyse integriert und lassen sich so ins Verhältnis zu den Kosten der Transformation des Energiesystems setzen.

Um die räumlichen Analysen der Emissionsverteilung zu ermöglichen wurde das am Hereon neu entwickelten Emissionsmodell HiMEMO (Highly Modular Emission MOdel) eingesetzt. Hierfür wurden Gesamtemissionen aus dem REMIND Modell verarbeitet und auf ein Gitter verteilt. Die räumliche und zeitliche Verteilung ist sektorabhängig: Emissionen aus dem Verkehrssektor werden anhand der Straßendichte verteilt, Landwirtschaftsemissionen anhand von Landnutzungsdaten und alle anderen Sektoren (wie z. B. Industrie und Wärmeerzeugung) anhand der Bevölkerungsdichte.

L Lebenszyklusanalyse des Mobilitätssektors

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine ganzheitliche Methode zur Berechnung der Umwelt- oder Ökobilanz von Produkten oder Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg, das heißt, einschließlich Rohstoffgewinnung, Transport, Herstellung, Nutzung und Verwertung von Abfallprodukten. Alle relevanten Stoff- und Energieflüsse werden dabei hinsichtlich ihrer Umweltwirkung bewertet. Eine detaillierte Erklärung der Methode bietet die Internationale Organisation für Normung (ISO) unter dem Aktenzeichen 14040/14044 (The International Standards Organisation, 2006). Im Einklang mit den Vorgaben aus ISO 14040/14044 folgt eine Beschreibung des Umfangs und Ziels („goal and scope“) sowie der Systemgrenzen der durchgeführten Analyse.

Ziel und Umfang

Die Ergebnisse in Kapitel 9 beruhen auf einer LCA für Personenkraftwagen mit Wärmekraftmaschinen (Otto- oder Dieselmotoren) oder elektrischem Antrieb. Als Kraftstoffe für die Verbrennung werden Benzin, Diesel und ihre synthetischen Äquivalente verwendet. Das Ziel der Untersuchung ist einerseits die Bestimmung der technologie- beziehungsweise fahrzeugspezifischen Umweltwirkungen für 2020 und 2045 und andererseits der Vergleich der Umweltwirkungen der Flottenszenarien, die die genannten Fahrzeuge zu verschiedenen Anteilen enthalten.

Systemgrenzen

Die Systemgrenzen umfassen alle relevanten Prozesse zur Bereitstellung Pkw-basierter Mobilität. Im Einzelnen sind dies die Konstruktion und Wartung der Straßen, die Herstellung der Fahrzeugkomponenten, die Produktion der Fahrzeuge, die Bereitstellung der Energieträger inklusive Tankstellen, Raffinerien, Kraftwerke und Leitungen, die Fahrzeugwartung und Reparatur und die Verschrottung und Wiederverwertung. Umweltwirkungen aus Recycling werden im verwendeten Modell nicht dem Ausgangsmaterial zugeschrieben - Recycling ist also aus Sicht des Abfallprodukts ohne Umweltwirkungen - sondern den Recyclingprodukten, die für andere Prozesse wiederverwendet werden. Für die Recyclingprodukte werden wiederum nur die Umweltwirkungen aus dem Recycling betrachtet, nicht die Herstellung des recycelten Produkts („cut-off system model“, siehe Abschnitt 2.13).

Funktionseinheit

Im Rahmen einer LCA werden alle Stoffflüsse und die damit verbundenen Umweltwirkungen auf ein bestimmtes Produkt oder eine bestimmte Dienstleistungseinheit normiert, die Funktionseinheit („functional unit“). Für die Ergebnisse in Kapitel 9 ist die Funktionseinheit „ein Fahrzeugkilometer“, das heißt, ein Kilometer gefahren mit einem Fahrzeug durchschnittlicher Größe. Das Geschwindigkeitsprofil basiert auf dem Worldwide Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP)-Fahrzyklus. Die Besetzungszahl und die Größenverteilung der Flotte wurde der TRACCS Datenbank entnommen (European Commission, DG Climate Action, 2013).

Verwendete Inventare

ecoinvent

Als statisches Hintergrundinventar wird die „cut-off system“ Variante der ecoinvent 3.7.1 Datenbank verwendet. ecoinvent enthält die Stoffflüsse zwischen etwa 20000 „Aktivitäten“ (Fertigungs- und Verarbeitungsprozesse, Produkte, Dienstleistungen und Märkte) aus verschiedenen Ländern. Alle Prozesse, für die keine expliziten Projektionen vorliegen, sind statisch und werden für Zeitschritte in der Zukunft nicht angepasst. Eine Beschreibung des „cut-off system“ Modells findet sich in der ecoinvent Dokumentation (ecoinvent, n.d.). Im Folgenden werden die zeitabhängigen Bestandteile des Inventars aufgelistet.

carculator

Die LCA Modelle der verschiedenen Pkw Technologien basieren auf der Python Bibliothek carculator (Sacchi et al., in review). carculator wurde am Paul-Scherrer Institut entwickelt ausgehend von Arbeiten von Cox et al. (2020) und stellt LCA Fahrzeugmodelle für verschieden Antriebstechnologien und Fahrzeuggrößen im Zeitraum 2000 bis 2050 zur Verfügung. Verbesserungen der Motoren, des Getriebes, der Aerodynamik, der Batterietechnik und des Chassis werden berücksichtigt. Die resultierenden Inventare sind nicht vollständig, sondern bauen auf der Hintergrunddatenbank ecoinvent auf (carculator beschreibt nur das Fahrzeug und die beim Betrieb anfallenden Stoffflüsse).

PREMISE und REMIND

Ein wichtiger Bestandteil der vorliegenden Analyse ist die Kopplung zwischen dem REMIND Modell (siehe oben) und ecoinvent. Wie bereits erwähnt, stellt ecoinvent ein statisches Prozessinventar dar. Mit Hilfe der Python Bibliothek premise (Sacchi et al., submitted) können Resultate aus den REMIND Szenarien in ecoinvent übernommen werden. Das Ergebnis sind szenario- und zeit-spezifisch angepasste Versionen der ecoinvent Datenbank, die als Grundlage für LCAs verwendet werden können.

Für die vorliegenden Ergebnisse wurden folgende Änderungen an ecoinvent im Einklang mit Resultaten aus REMIND vorgenommen:

Modifizierte Strommärkte bilden die steigenden Anteile Erneuerbarer Energien ab. Neue Kraftwerkstypen, z. B. Kraftwerke mit Kohlenstoffabscheidung, werden hinzugefügt. Die Effizienz von Kraftwerken und ihr Emissionsprofil wird nach Ergebnissen aus dem GAINS Modell angepasst (Amann et al., 2011). Die Anteile von wiederverwertetem Stahl werden übernommen. Für einige stark emittierende Prozesse aus der Stahlindustrie, für die Verkokung und das Sintern von Stahl und für die Bereitstellung von Wärme, wurden Anpassungen an den Emissionsfaktoren aus dem GAINS Modell übernommen.

Die Fahrzeugmodelle aus carculator werden schließlich mit den modifizierten Hintergrunddatenbanken verknüpft. Schlussendlich können Pkw-LCAs für bestimmte Szenarien und Zeitschritte erstellt werden. Für diesen Schritt wird die LCA Software Brightway2 (Mutel, 2017) verwendet.

Charakterisierung der Umwelteinflüsse

Zur Charakterisierung der Stoffflüsse bezüglich ihrer Umweltwirkungen wird die Methode ReCiPe 2008 (Goedkoop et al., 2009) in der aktualisierten Version von 2014 (Goedkoop et al., 2014) angewandt. Mithilfe der Methode können Stoffflüsse auf der Ebene von 18 Stoffflussäquivalenten (Midpoint-Ebene) oder auf der Ebene von Auswirkungen auf Mensch, Natur und Ressourcen (Endpoint-Ebene) charakterisiert werden. In der vorliegenden Analyse werden lediglich die Auswirkungen auf den Menschen untersucht. Die Einheit in dieser Kategorie ist die Anzahl verlorener gesunder Lebensjahre.

Kritische Materialien:

In Abbildung A.8 ist der Workflow der Berechnungen zur Materialkritikalität schematisch dargestellt.

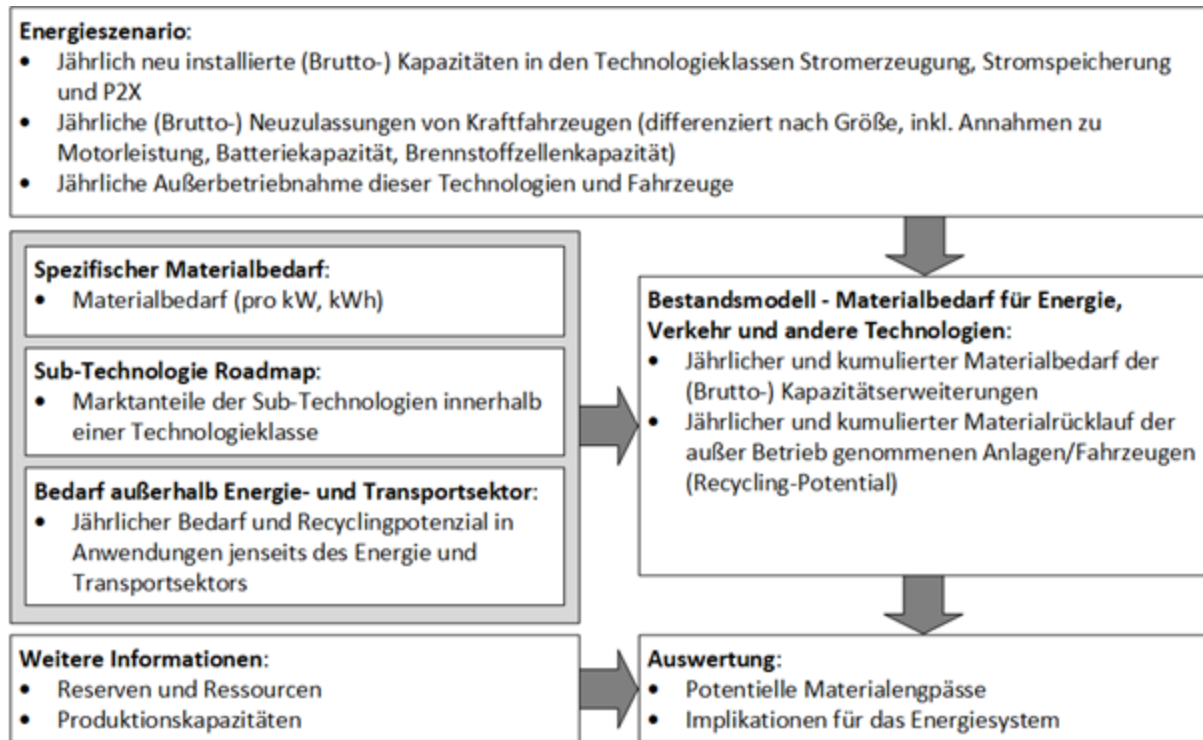


Abbildung A.8: Workflow der Berechnungen zur Materialkritikalität.

Ausgangsbasis der Analysen zum Ressourcenbedarf sind zwei Datenbanken, die am DLR auf Basis umfassender Literaturlauswertungen und Experteninterviews aufgebaut wurden: Die „Datenbank spezifischer Materialbedarf“ umfasst Daten zur Entwicklung des spezifischen Bedarfs (das heißt z. B. pro kW installierte Leistung, pro kWh Speicherkapazität, ...) für 26 Materialien und über 50 Technologien in verschiedenen Technologieklassen im Zeitraum bis 2050. Die Datenbank berücksichtigt somit schon Annahmen zur Änderung der Materialintensität beziehungsweise zur Steigerung der Materialeffizienz. In den verschiedenen Technologieklassen (z. B. stationäre Batterien oder Windkraftanlagen (WKA) an Land) werden dabei in der Regel mehrere Sub-Technologien differenziert (z. B. verschiedene Batterie-Typen, verschiedene Typen von WKAs mit und ohne Getriebe etc.), da der Materialbedarf zum Teil deutlich von der Subtechnologie abhängt.

In einer zweiten Datenbank „Subtechnologie-Roadmaps“ wird in verschiedenen Szenarien dargestellt, wie sich die Marktanteile verschiedener Subtechnologien innerhalb einer Technologieklasse bis 2050 entwickeln können. Auf diese Art und Weise kann der Effekt von Technologie-

Substitution innerhalb einer Technologiekategorie auf den Materialbedarf untersucht werden. Für diese Studie wurden Roadmaps der verschiedenen Technologiekategorien zu zwei übergeordneten Roadmaps (*RM1* und *RM2*) kombiniert. *RM1* und *RM2* umfassen dabei weitgehend jene Roadmaps, die bezüglich kritischer Materialien zu einem höheren (*RM1*) beziehungsweise niedrigeren (*RM2*) Materialbedarf führen.

Die Kombination beider Datenbanken liefert Abschätzungen zur Entwicklung des Materialbedarfs auf der Ebene von Technologie-Kategorien (d.h. der technischen Granularität der meisten Energiesystem-Modelle) in Abhängigkeit von den definierten Roadmaps. Multiplikation des spezifischen Materialbedarfs auf Ebene der Technologie-Kategorien mit den Ergebnissen für neu installierten Leistungen der verschiedenen Technologiekategorien (bzw. Neuzulassungen bei den Kraftfahrzeugen (KFZ)) aus den REMIND-Szenarien ergibt den (Brutto-)Bedarf der verschiedenen Materialien pro Zeitschritt. Nach Ende der technischen Lebensdauer der Anlagen können die verbauten Materialmengen prinzipiell recycelt werden. Die Differenz zwischen Brutto-Materialbedarf und potentiell recycelbaren Materialmengen beschreibt die Mindest-Mengen an (Primär)-Material, die zur Realisierung der Szenarien nötig sind.

Für die vorliegende Analyse wurde neben dem Materialbedarf in Energie- und Transport-Technologien (E&T) auch der Materialbedarf für Anwendungen jenseits E&T grob abgeschätzt. Dabei wurde der heutige Verbrauch der Materialien als Differenz zwischen den Produktionszahlen und dem errechneten Bedarf im Energie- und Transportsektor der jeweiligen Materialien definiert und mittels Annahmen zur Bruttoinlandsprodukt (BIP)-Entwicklung bis ins Jahr 2045 extrapoliert.

Zur Abschätzung der Kritikalität der einzelnen Materialien wird der kumulierte Bedarf mit globalen Werten für Ressourcen und Reserven 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.

Zur besseren Veranschaulichung der Berechnungen sind nachfolgend beispielhaft die notwendigen Daten zur Berechnung des Materialbedarfs einer Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) 622 Lithium-Ionen-Batterie dargestellt.

Spezifischer Bedarf:

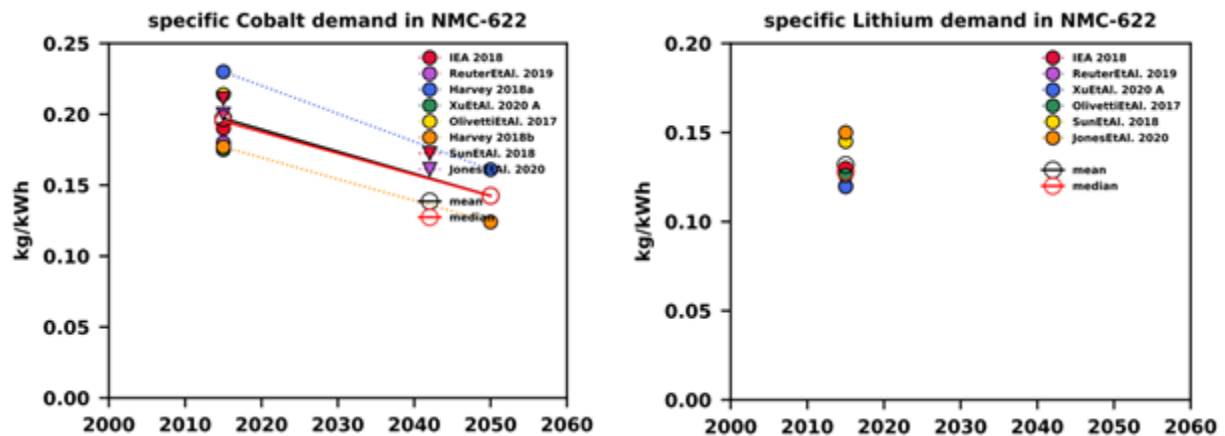


Abbildung A.9 Spezifischer Materialbedarf (Kobalt & Lithium) einer NMC-622 Lithium-Ionen-Batterie.

Der verwendete Mittelwert des spezifischen Bedarfs errechnet sich aus einer Vielzahl an verschiedenen Literaturquellen, ebenso wie die Prognosen zur Reduzierung des spezifischen Materialbedarfs.

Abbildung

Abbildung A.9 zeigt die Literatursauswertung zum spezifischen Bedarf an Cobalt und Lithium in Lithium-Ionen-Batterien vom Typ NMC-622. Für Cobalt liegen verschiedene Werte für circa 2010 sowie zwei Abschätzungen für das Jahr 2050 vor. Werte für 2010 streuen moderat. Für die Berechnungen hier wurde jeweils der Mittelwert verwendet. Für Lithium liegen für das Jahr 2010 ebenfalls verschiedene Werte aus der Literatur vor, allerdings keine für 2050. In diesem Fall wurde ein konstanter Lithium-Bedarf in NMC-622-Batterien bis 2050 angenommen. Eine potenzielle Erklärung für unterschiedliche Annahmen zum spezifischen Bedarf aus der Literatur sind manchmal unterschiedliche Systemgrenzen der analysierten Systeme. Daher stellt es eine zusätzliche Herausforderung dar, bei der Sammlung von Daten zu gewährleisten, dass sich alle verwendeten Daten auf dieselbe / vergleichbare Systemgrenzen beziehen.

Roadmaps:

Die Marktanteile der Subtechnologien der letzten circa 10 Jahre werden aus der Literatur entnommen; die Fortschreibungen basieren auf unterschiedlichen Prognosen zur potenziellen Marktentwicklung. Diese Prognosen sind ebenfalls aus der Literatur entnommen und zum Teil anhand von Experteninterviews ergänzt. Abbildung A.10 und Abbildung A.11 zeigen die beiden Roadmaps RM1 und RM2 für mobile Batterien wie sie in die Berechnungen in die Studie eingeflossen sind.

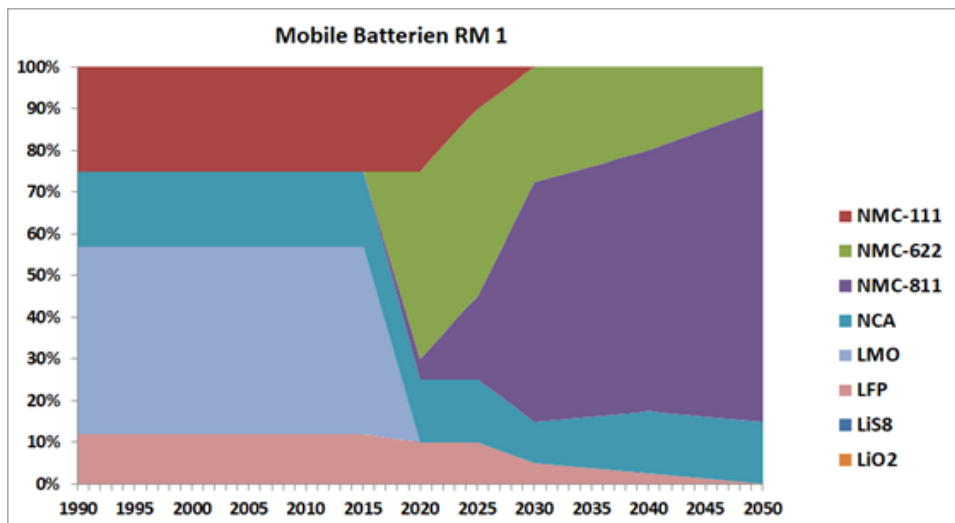


Abbildung A.10: Marktanteile verschiedener mobiler Batterietypen in der Roadmap 1.

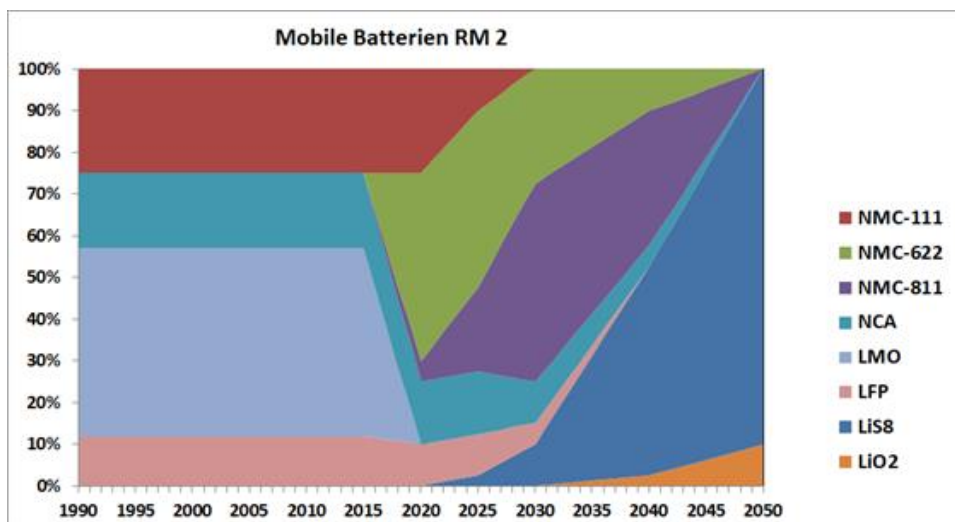


Abbildung A.11: Marktanteile verschiedener Batterietypen in der Roadmap 2.

Roadmap 1 für mobilen Batterien (Nutzung in Elektrofahrzeugen) stellt einen Markt dar, in dem sich der Trend hin zu sogenannten NMC-Lithium-Ionen-Batterien fortsetzt. Dabei setzt sich die NMC-811 Variante immer mehr durch. Für Roadmap 2 wird ein drastischer Umschwung hin zu Lithium-Schwefel und Lithium-Luft Batterien angenommen, die bis 2050 den gesamten Markt übernehmen. Die Sub-Technologien LMO (Lithium-Mangan-Oxid) und LFP (Lithium-Eisen-Phosphat), die in der Vergangenheit noch signifikante Marktanteile aufwiesen, werden in beiden Roadmaps aus dem Markt verdrängt.

Reserven / Ressourcen:

In Tabelle A. 8 sind die globalen Reserven und Ressourcen der verwendeten Materialien aufgelistet. Die Umrechnung auf die Deutschland zur Verfügung stehenden Reserven und Ressourcen basiert auf Deutschlands Anteil am globalen BIP (Stand 2015, International Monetary Fund (2021)).³⁶

Material	Reserven [Mt]	Ressourcen [Mt]	Quelle
Kobalt	7	25	U. S. Geological Survey (2020)
Dysprosium	0,54	1,26	U. S. Geological Survey (2020), Zhou et al (2017)
Iridium	0,00044	0,00064	Sverdrup and Ragnarsdottir (2016), U. S. Geological Survey (2020)
Lithium	17	80	U. S. Geological Survey (2020)
Nickel	89	130	U. S. Geological Survey (2020)
Vanadium	22	63	U. S. Geological Survey (2020)

Tabelle A.8: Reserven und Ressourcen der betrachteten Materialien.

³⁶ Verteilt man die globalen Reserven und Ressourcen anhand Deutschlands Anteil an der Weltbevölkerung (Stand 2020) auf Deutschland, so erhält man einen Verteilungsfaktor von ca. 0,11 (83 Mio. / 7795 Mio.), d.h. ca. einen Faktor 3 niedriger als bei der Verteilung nach BIP (United Nations, 2019).

Literaturangaben

- AGEB, 2020b. Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019. Stand: März 2020. AGEB [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2019_20200325_d_t.pdf.
- Amann M, 2012. Greenhouse gas and air pollution interaction and synergies (GAINS). EC4MACS Modelling Methodology. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: http://www.ec4macs.eu/content/report/EC4MACS_Publications/MR_Final%20in%20pdf/GAINS_Methodologies_Final.pdf.
- Amann M, Bertok I, Borken-Kleefeld J, Cofala J, Heyes C, Höglund-Isaksson L, Klimont Z, Nguyen B, Posch M, Rafaj P, et al., 2011. Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications. *Environmental Modelling & Software*, 26(12):1489–1501 DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.07.012.
- Avicenne Energy, 2020. Worldwide Rechargeable Battery Market 2019-2030 2020 edition. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: http://www.avicenne.com/reports_energy.php.
- Baldauf M, Seifert A, Förstner J, Majewski D, Raschendorfer M, Reinhardt T, 2011. Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. *Monthly Weather Review*, (139):3887–3905 DOI: 10.1175/MWR-D-10-05013.1.
- Bauer N, Edenhofer O, Kypreos S, 2008. Linking energy system and macroeconomic growth models. *Computational Management Science*, 5(1–2):95–117 DOI: 10.1007/s10287-007-0042-3.
- Baumstark L, Bauer N, Benke F, Bertram C, Bi S, Gong CC, Dietrich JP, Dirnaichner A, Giannousakis A, Hilaire J, et al., 2021. REMIND2.1: Transformation and innovation dynamics of the energy-economic system within climate and sustainability limits. *Geoscientific Model Development Discussions*:1–50 DOI: 10.5194/gmd-2021-85.
- Beestermöller R, 2017. Die Energienachfrage privater Haushalte und ihre Bedeutung für den Klimaschutz - Volkswirtschaftliche Analysen zur deutschen und europäischen Klimapolitik mit einem technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodell. Eigenverlag, Stuttgart (Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung; ISSN 0938-1228) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-9123>.
- Beestermöller R, Blesl M, Kuder R, Fahl U, 2013. Energie- und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf die Nutzung von Erdgas in Deutschland. Studie für das Zentrum für Energieforschung Stuttgart (ZfES). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-2167>.
- Beestermöller R, Fahl U, 2013. Impacts of German energy policies on the competitiveness of national energy intensive industries. Full paper at the EcoMod2013 International Conference on Economic Modeling, Czech University of Life Sciences. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ideas.repec.org/p/ekd/004912/5653.html>.
- Blesl M, Kober T, Bruchhof D, Kuder R, 2010. Effects of climate and energy policy related measures and targets on the future structure of the European energy system in 2020 and beyond. *Energy Policy*, 38(10):6278–6292 DOI: 10.1016/j.enpol.2010.06.018.
- BMVI, 2021. Verkehr in Zahlen 2020/2021. 49. Jahrgang. Herausgegeben durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Korrekturversion vom 13.04.2021. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-xls.xlsx?__blob=publicationFile.
- BMW, 2019b. Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi. Stand Oktober 2019. [Aufruf am: 30.09.2021] URL:

- <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.html>.
- Bothor S, Steuerer M, Eberl T, Brand H, Voß A, 2015. Bedarf und Bedeutung von Integrations- und Flexibilisierungsoptionen in Elektrizitätssystemen mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien. In: Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. IEWT 2015.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2020. Entwurf Flächenentwicklungsplan 2020 für die deutsche Nord- und Ostsee. [Aufruf am: 30.09.2020] URL: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Fortschreibung/_Anlagen/Downloads/Entwurf_FEP_2020.pdf;jsessionid=5DCA851708938090EDE1968C558784E2.live21303?__blob=publicationFile&v=6.
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2020. Entwurf Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nord- und Ostsee. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresraumplanung/Fortschreibung/_Anlagen/Downloads/Entwurf_Raumordnungsplan.pdf;jsessionid=71DEE7A4E265548FE4BE1654B0A4ABFC.live21322?__blob=publicationFile&v=8.
- 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.
- Destatis, 2019. CO₂-Gehalt der Güter der Endverwendung - 2008 - 2015. Datensatz des Statistisches Bundesamt. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Publikationen/Downloads/co2-gehalt-gueter-endverwendg-pdf-5851101.html>.
- Destatis, 2020a. Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2018 Grundfile 3 (AAGSHB). Datensatz des Statistisches Bundesamt. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Einkommen-Einnahmen-Ausgaben/Methoden/einkommens-verbrauchsstichprobe.html>.
- Destatis, 2020b. VGR des Bundes - Input-Output-Rechnung - 2015 (Revision 2019, Stand: August 2019). (Fachserie 18, Reihe 2) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Input-Output-Rechnung/input-output-rechnung-2180200157005.html>.
- Deutsche WindGuard GmbH, 2020. Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland – Erstes Halbjahr 2020. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.windguard.de/id-1-halbjahr-2020.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2020/Status%20des%20Offshore-Windenergieausbaus_Halbjahr%202020.pdf.
- Dietrich JP, Bodirsky BL, Humpenöder F, Weindl I, Stevanović M, Karstens K, Kreidenweis U, Wang X, Mishra A, Klein D, et al., 2019. MAGPIE 4 – a modular open-source framework for modeling global land systems. *Geoscientific Model Development*, 12(4):1299–1317 DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1299-2019>.
- DIN e.V., 2008. Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 3790:2008). Deutsche Fassung EN ISO 13790:2008.
- Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries, 2021. European Marine Observation and Data Network (EMODnet). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://emodnet.ec.europa.eu/en>.
- ecoinvent, 2021. Cut-off system model. ecoinvent [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>.
- Edenhofer O, Lessmann K, Bauer N, 2006. Mitigation Strategies and Costs of Climate Protection: The Effects of ETC in the Hybrid Model MIND. *Energy Journal*, Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation, Special Issue:207–222 DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI1-10.

- enervis energy advisors GmbH, 2020. Mittelfristprognose zur deutschlandweiten Stromerzeugung aus EEGgeförderten Kraftwerken für die Kalenderjahre 2021 bis 2025. Erstellt im Auftrag der 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.netztransparenz.de/portals/1/Content/EEG-Umlage/EEG-Umlage%202021/2020-10-07%20Endbericht%20enervis.pdf>.
- ETSAP, 2021. Energy Technology Systems Analysis Program, „ETSAP“. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://iea-etsap.org/>.
- Europäische Kommission, 2013. Grünbuch - Ein Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. Europäische Kommission, Brüssel [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0169&from=EN>.
- European Commission, DG Climate Action, 2013. TRACCS –Transport data collection supporting the quantitative analysis of measures relating to transport and climate change. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://traccc.emisia.com/>.
- Eurostat, 2021. Energy balances. Datensatz des Statistische Amt der Europäischen Union. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>.
- Fahl U, Gaschnig H, Hofer C, Hufendiek K, Maier B, Pahle M, Pietzcker R, Quitzow R, Rauner S, Sehn V, et al., 2019. Das Kopernikus-Projekt ENavi – Die Transformation des Stromsystems mit Fokus Kohleausstieg. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-10519>.
- Fahl U, Welsch J, Eberl T, Steurer M, Bothor S, 2015. Systemanalyse Energiespeicher. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Stuttgart [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb16/864594895.pdf>.
- Fleiter T, Herbst A, Rehfeldt M, Arens M, 2019. Industrial innovation: Pathways to deep decarbonisation of industry. Pt.2: Scenario analysis and pathways to deep decarbonisation. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/industrial_innovation_part_2_en.pdf.
- Fleiter T, Rehfeldt M, Herbst A, Elstrand R, Klingler A-L, Manz P, Eidelloth S, 2018. A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. Energy Strategy Reviews, 22:237–254 DOI: 10.1016/j.esr.2018.09.005.
- Gargiulo M, 2009. Getting started with TIMES-VEDA. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://iea-etsap.org/index.php/documentation>.
- Gargiulo M, Vaillancourt K, De Miglio R, 2016. Documentation for the TIMES Model, Part IV. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://iea-etsap.org/index.php/documentation>.
- Geres R, Kohn A, Nickel F, Scholz D, Mühlpointner T, Sternhardt M, Beestermöller R, Blesl M, Brunke J-C, Fahl U, et al., 2016. Ausgestaltung des EU-Emissionshandels nach 2020 und seine Auswirkungen – insbesondere auf die industrielle Wettbewerbsfähigkeit und die Energiewirtschaft – unter Berücksichtigung von Optionen zur Vermeidung von Carbon Leakage. FutureCamp Holding GmbH; FutureCamp Climate GmbH; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Schlussbericht zum Vorhaben 06/15.
- Gill B, Moeller S, 2018. GHG Emissions and the rural-urban divide. A carbon footprint analysis based on the German official income and expenditure survey. Ecological Economics, 145:160–169 DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.09.004.
- Gillich A, Hufendiek K, Klemp N, 2020. Extended policy mix in the power sector: How a coal phase-out redistributes costs and profits among power plants. Energy Policy, 147:111690 DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111690.

- Goedkoop M, Heijungs R, De Schryver A, Struijs J, van Zelm R, 2009. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf.
- Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, de Schryver A, Struijs J, van Zelm R, 2014. ReCiPe 2008 (version 1.08)—report I: characterisation (updated May 2013). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.rivm.nl/documenten/a-lcia-method-which-comprises-harmonised-category-indicators-at-midpoint-and-endpoint>.
- Grainger CA, Kolstad CD, 2010. Who pays a price on carbon? *Environmental and Resource Economics*, 46(3):359–376 DOI: 10.1007/s10640-010-9345-x.
- Hansen N, 2016. The CMA Evolution Strategy: A Tutorial. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://arxiv.org/pdf/1604.00772v1>.
- Henbest et al. S, 2020. New Energy Outlook 2020. BloombergNEF [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook-2020/>.
- Huppmann D, Gidden M, Fricko O, Kolp P, Orthofer C, Pimmer M, Kushin N, Vinca A, Mastrucci A, Riahi K, et al., 2019. The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development. *Environmental Modelling & Software*, 112:143–156 DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.11.012.
- International Monetary Found, 2021. World Economic Outlook Database: April 2021 Edition. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2021/April>.
- James BD, Huya-Kouadio JM, Houchins C, DeSantis DA, 2018. Mass Production Cost Estimation of Direct H2PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/02/f71/fcto-sa-2018-transportation-fuel-cell-cost-analysis-2.pdf>.
- Kober T, 2013. Energiewirtschaftliche Anforderungen an neue fossil befeuerte Kraftwerke mit CO₂-Abscheidung im liberalisierten europäischen Elektrizitätsmarkt. DOI: 10.18419/opus-2327.
- Küster R, 2009. Klimaschutz, Volkswirtschaft und Beschäftigung - Analysen zur deutschen und europäischen Klimaschutzpolitik mit einem berechenbaren allgemeinen Gleichgewichtsmodell. Mensch und Buch Verlag, Berlin.
- Küster R, Ellersdorfer I, Fahl U, 2007. A CGE-Analysis of Energy Policies Considering Labor Market Imperfections and Technology Specifications. Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Nota di Lavoro, 7.2007. CCMP – Climate Change Modelling and Policy. DOI: 10.4197/74212.
- Küster R, Ellersdorfer I, Voß A, 2009. Economic Impacts of EU Climate Policy Targets Accounting for No-Regret Options – Scenario Analyses with NEWAGE-W. Eine Studie für die BASF AG. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.ier.uni-stuttgart.de/en/research/models/NEWAGE/>.
- Leimbach M, Schultes A, Baumstark L, Giannousakis A, Luderer G, 2017. Solution algorithms for regional interactions in large-scale integrated assessment models of climate change. *Annals of Operations Research*, 255(1–2):29–45 DOI: 10.1007/s10479-016-2340-z.
- Loulou R, Goldstein G, Lettila A, Remme U, 2016. Documentation for the TIMES Model, Part II. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-II_July-2016.pdf.
- Loulou R, Kanudia A, Lethila A, Goldstein G, 2016. Documentation for the TIMES Model, Part I. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf.
- Luderer G, Bauer N, Baumstark L, Bertram C, Leimbach M, Pietzcker R, Strefler J, Aboumahboub T, Auer C, Bauer N, et al., 2020. REMIND - REgional Model of INvestments and Development. Zenodo DOI: 10.5281/zenodo.3899869.

- Manne A, Mendelsohn R, Richels R, 1995. MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. *Energy Policy*, 23(1):17–34 DOI: 10.1016/0301-4215(95)90763-W.
- Meinshausen M, S. C. B. Raper, T. M. L. Wigley, 2011. Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6–Part 1: Model description and calibration. *Atmos Chem Phys*, 11(4):1417–1456 DOI: 10.5194/acp-11-1417-2011.
- Mercel Zürn, 2010. Auswirkungen des technologischen Fortschritts und des Klimaschutzes auf die Stromerzeugung - Analysen mit einem allgemeinen Gleichgewichtsmodell. Josef Eul Verlag, Köln.
- Montenegro R, Fahl U, 2017. Carbon leakage and competitiveness: Socio-economic impacts of greenhouse gas emissions decrease on the European area until 2050. 14th International Conference on the European Energy Market (EEM), Dresden. DOI: 10.1109/EEM.2017.7981970.
- Montenegro R, Lekavičius V, Brajković J, Fahl U, Hufendiek K, 2019. Long-Term Distributional Impacts of European Cap-and-Trade Climate Policies: A CGE Multi-Regional Analysis. *Sustainability*, 11(23):6868 DOI: 10.3390/su11236868.
- Mutel C, 2017. Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment. *The Journal of Open Source Software*, 2(12):236 DOI: 10.21105/joss.00236.
- Nordhaus WD, Yang Z, 1996. A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies. *The American Economic Review*, 86(4):741–765.
- Nørgård P, Holttinen H, 2004. A Multi-Turbine Power Curve Approach. Proc. Nordic Wind Power Conference, Gotenburg, Sweden, 2004. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/2453/article4.pdf?isAllowed=y&sequence=5>.
- Palzer A, 2016. Sektorübergreifende Modellierung und Optimierung eines zukünftigen deutschen Energiesystems unter Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Dissertation [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-408742.html>.
- Preuß M, Reuter WH, Schmidt CM, 2019. Verteilungswirkung einer CO2-Bepreisung in Deutschland. Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Wiesbaden [Aufruf am: 30.07.2021] URL: https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/Arbeitspapiere/Arbeitspapier_08_2019.pdf.
- Rehfeldt M, Fleiter T, Toro F, 2018. A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry. *Energy Efficiency*, 11(5):1057–1082 DOI: 10.1007/s12053-017-9571-y.
- Rehfeldt M, Fleiter T, Worrell E, 2018. Inter-fuel substitution in European industry: A random utility approach on industrial heat demand. *Journal of Cleaner Production*, 187:98–110 DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.179.
- Remme U, 2006. Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell. Universität Stuttgart, Stuttgart [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-1703>.
- Rodrigues R, Pietzcker R, Fragkos P, Price J, McDowall W, Siskos P, Fotiou T, Luderer G, Capros P, 2022. Narrative-driven alternative roads to achieve mid-century CO2 net neutrality in Europe. *Energy*, 239:121908 DOI: 10.1016/j.energy.2021.121908.
- Rottoli M, Dirnhaichner A, Kyle P, Baumstark L, Pietzcker R, Luderer G, 2021. Coupling a Detailed Transport Model to the Integrated Assessment Model REMIND. *Environ Model Assess* DOI: 10.1007/s10666-021-09760-y.
- Sacchi R, Bauer C, Cox B, Mutel CL, in review. carculator: an open-source tool for prospective environmental and economic life cycle assessment of vehicles. When, Where and How can battery-electric vehicles help reduce greenhouse gas emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.psi.ch/en/media/57994/download>.

- Sacchi R, Dirnaichner A, Mutel CL, Bauer C, Cox BL, Daioglou V, Terlouw T, Siala K, Luderer G, submitted. Prospective EnvironMental Impact asSEment (premise): a streamlined approach to producing databases for prospective Life Cycle Assessment using Integrated Assessment Models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Schäfer K, 2015. Entwicklung einer GIS-basierten Analyse zur Bestimmung des technisch nutzbaren Flächenpotenzials der Windenergie an Land unter Verwendung von frei verfügbaren Geodaten. Hochschule Nordhausen, Bachelorarbeit.
- Schick C, Klemp N, Hufendiek K, 2020. Role and impact of prosumers in a sector-integrated energy system with high renewable shares. *IEEE Trans Power Syst*:1–1 DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3040654.
- Scholz Y, Gils HC, Pietzcker RC, 2017. Application of a high-detail energy system model to derive power sector characteristics at high wind and solar shares. *Energy Economics*, 64(Supplement C):568–582 DOI: 10.1016/j.eneco.2016.06.021.
- Sterchele P, 2019. Analysis of Technology Options to Balance Power Generation from Variable Renewable Energy. 1. Auflage. Shaker, Düren (Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung).
- Sterchele P, Brandes J, Heilig J, Wrede D, Kost C, Schlegl T, Bett A, Henning H-M, 2020. Studie: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-23-2021.html>.
- Sun N, 2013. Modellgestützte Untersuchung des Elektrizitätsmarktes: Kraftwerkseinsatzplanung und -investitionen. Universität Stuttgart, Stuttgart [Aufruf am: 20.09.2021] URL: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-2159>.
- Sverdrup HU, Ragnarsdottir KV, 2016. A system dynamics model for platinum group metal supply, market price, depletion of extractable amounts, ore grade, recycling and stocks-in-use. *Resources Conservation and Recycling*, 114:130–152 DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.07.011.
- The International Standards Organisation, 2006. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- U. S. Geological Survey, 2020. Mineral commodity summaries 2020. DOI: 10.3133/mcs2020.
- Ueckerdt F, Pietzcker R, Scholz Y, Stetter D, Giannousakis A, Luderer G, 2017. Decarbonizing global power supply under region-specific consideration of challenges and options of integrating variable renewables in the REMIND model. *Energy Economics*, 64(Supplement C):665–684 DOI: 10.1016/j.eneco.2016.05.012.
- UNFCCC, 2021. Inventarbericht und CRF-Tabellen für Deutschland. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2021>.
- United Nations, 2019. World Population Prospects 2019. [Aufruf am: 05.08.2021] URL: <https://population.un.org/wpp/DataQuery/>.
- Van Dingenen R, Dentener F, Crippa M, Leitao J, Marmer E, Rao S, Solazzo E, Valentini L, 2018. TM5-FASST: a global atmospheric source–receptor model for rapid impact analysis of emission changes on air quality and short-lived climate pollutants. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(21):16173–16211 DOI: 10.5194/acp-18-16173-2018.
- Wilson C, Grubler A, Bauer N, Krey V, Riahi K, 2013. Future capacity growth of energy technologies: are scenarios consistent with historical evidence? *Climatic Change*, 118(2):381–395 DOI: 10.1007/s10584-012-0618-y.
- Winkler C, Mocanu T, 2017. Methodology and Application of a German National Passenger Transport Model for Future Transport Scenarios. In: Proceedings of the 45th European Transport Conference. European Transport Conference, 4.-6. Okt. 2017. , Barcelona, Spanien.
- Wright E, Kanudia A, Loulou R, Goldstein G, 2016. Documentation of the TIMES Model PART V. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://iea-etsap.org/docs/Part5_FINAL.pdf.

Zhou BL, Li ZX, Chen CC, 2017. Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals*, 7(11) DOI: 10.3390/min7110203.



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