



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.

Corrigendum

In einer früheren Version dieses Reports war eine Korrektur des Flächenverbrauchscoeffizienten für Freiflächenphotovoltaik nicht konsistent umgesetzt. Diese Fehler sind nun behoben und betreffen Angaben zum Flächenverbrauch in der Zusammenfassung (Abschnitt Z.6) und in Kapitel 9 (Abschnitte 9.6 und 9.7). Ebenso wurden die Abbildungen Z.15, 9.8, 9.9 und 9.10 korrigiert. Weiterhin wurden Angaben zu Bruttoinlandsprodukt in Kapitel 1.3 und Tabelle 1.2 korrigiert.

Herausgegeben von

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

Oktober 2021

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

Bildnachweise

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

1. Gesamtsystemtransformation und Emissionspfade zur Klimaneutralität

1.1	Zusammenfassung	18
1.2	Pariser Klimaziele erfordern eine massive Beschleunigung der Energiewende	19
1.3	Integration von Gesamtsystem- und Sektorenperspektive: Das Modell- und Szenarien-Ensemble	22
1.4	Zielpunkt 2045: Ein nahezu vollständig Erneuerbares Energiesystem	33
1.5	Transformation der Energiebereitstellung	37
1.6	Die Transformation der Energiebedarfe für Verkehr, Industrie und Gebäude	40
1.7	Meilensteine 2030 auf dem Weg zur Klimaneutralität	42
1.8	Politikimplikationen	51
1.9	Fazit: Weitere Forschungsbedarfe	55
	Literatur	57

Autorinnen und Autoren

Gunnar Luderer, Claudia Günther, Dominika Sörgel, Christoph Kost, Markus Blesl, Markus Haun, Felix Kattelmann, Robert Pietzcker, Marianna Rottoli, Felix Schreyer, Vera Sehn, Luisa Sievers



1.1 Zusammenfassung

Klimaneutralität, das bedeutet: Sämtliche Treibhausgas (THG)-Emissionen von der Energiewirtschaft über die Industrie bis hin zu Gebäuden, Verkehr und Landwirtschaft weitestgehend zu reduzieren, während nicht vermeidbare Emissionen durch natürliche und technische Treibhausgas-Senken ausgeglichen werden. Mögliche Transformationspfade zur Klimaneutralität Deutschlands im Jahr 2045 stellt die vorliegende Szenarienanalyse im Detail vor – im umfassenden Modellvergleich von sechs integrierten Gesamtsystem und Sektormodellen, ergänzt durch nachgeschaltete Wirkungsanalysen. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Implikationen der Energiewende robust zu beschreiben. Durch die Modellvielfalt und Szenarienvariationen können Bandbreiten plausibler Entwicklungen abgeleitet werden. Dabei zeigt sich: Die Klimaziele erfordern nahezu eine Verdreifachung des Emissionsminderungstempos im Vergleich zum Trend der letzten zwei Dekaden, die nur mit einer massiven Beschleunigung des Transformationsfortschritts in allen Sektoren erreicht werden kann.

Kostenoptimale Klimaschutzpfade zeichnen sich durch eine frühe und tiefgreifende Dekarbonisierung der Stromerzeugung aus. Bis 2030 erreichen alle Zielszenarien eine Reduktion der CO₂-Intensität der Stromerzeugung auf 30-75 gCO₂/kWh, im Vergleich zu etwa 400 gCO₂/kWh in 2019 (UBA, 2021b). Kernelemente der Stromtransformation sind ein nahezu vollständiger Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2030 sowie ein beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windenergie, der etwa einer Verdreifachung der Ausbaugeschwindigkeit der vergangenen Dekade entspricht.

Neben Verbesserungen der Energieeffizienz spielt die direkte Elektrifizierung der Endenergienachfrage eine zentrale Rolle für die Minderung der Emissionen aus den Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie. Je nach Technologieorientierung und Modellrealisierung steigt der Anteil der Elektrizität an der Endenergie bis 2045 auf 40-69 %. Zusätzlich zu dieser direkten Elektrifizierung trägt die indirekte Elektrifizierung über Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe zu 8-37 % zur Endenergie bei. Auch die leitungsgebundene Wärmebereitstellung wird zu großen Teilen elektrifiziert. Bereits bis 2030 haben E-Pkw im motorisierten Individualverkehr, Wärmepumpenheizsysteme bei der Gebäudewärme und elektrische Kessel bei der industriellen Dampferzeugung bei den Neuanschaffungen eine wichtige oder dominante Stellung.

Der Ausstieg aus der fossilen Energienutzung erfordert einen massiven Ausbau Erneuerbarer Energien in Deutschland. In den Zielszenarien werden 2045 etwa 630-1.480 TWh einheimischer erneuerbarer Stromerzeugung aus Sonnen- und Windenergie erforderlich. Die Bandbreite wird hierbei maßgeblich durch die Energienachfrage, aber auch die Menge an importiertem Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen bestimmt.

Die Klimaneutralität erfordert CO₂-Entnahmen von 41-74 MtCO₂ im Jahr 2045. Selbst bei einem vollständigen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energie verbleiben CO₂-Emissionen aus Industrieprozessen sowie Methan- und Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft. In den Gesamtsystemmodellen verbleiben Restemissionen von 41-56 MtCO₂; diese könnten auf 74 MtCO₂ steigen, wenn weniger optimistische Annahmen zu fossilen Prozessemissionen und der Viehzucht getroffen werden. Diese Restemissionen müssen durch negative Emissionen – beispielweise aus der Kombination von Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und Speicherung – kompensiert werden müssen. In den Zielszenarien wird die CO₂-Neutralität bereits 2040-43 und damit einige Jahre vor der THG-Neutralität erreicht.

1.2 Pariser Klimaziele erfordern eine massive Beschleunigung der Energiewende

Im Pariser Klimaabkommen hat sich die Bundesrepublik gemeinsam mit den anderen Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention auf das Ziel verständigt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C zu beschränken und Anstrengungen zu unternehmen, die Temperaturgrenze von 1.5°C zu halten (UNFCCC, 2015). Diese Klimastabilisierungsziele sind eine wichtige Voraussetzung, um eine weitere Verschärfung der Klimakrise sowie das Risiko des Auslösens von Kipppunkten im Erdsystem zu begrenzen (Schellnhuber et al., 2016).

Weil die globale Erwärmung proportional mit den seit Beginn der Industrialisierung kumulierten CO₂-Emissionen steigt, bleibt ab 2021 nur noch ein sehr geringes globales Restbudget von ca. 460 GtCO₂ für die Einhaltung der 1.5°C-Grenze (IPCC, 2021). Wenn man die im Paris-Abkommen genannte Begrenzung auf "deutlich unter 2°C" in eine Wahrscheinlichkeit von 2/3 übersetzt, mit der eine Erwärmung von 1.8°C nicht überschritten werden soll (UNEP, 2019), ergibt sich ein globales Restbudget von etwa 850 GtCO₂. Unabhängig vom genauen Klimaziel erfordert eine Stabilisierung des Klimas das Absenken der CO₂-Emissionen auf netto-null. Auf alle Treibhausgase ausgeweitet wird entsprechend die Klimaneutralität mit einer ausgeglichenen oder negativen Treibhausgasbilanz

gleichgesetzt. Verbleibende positive Emissionen müssen entsprechend durch CO₂-Entnahme und natürliche Senken ausgeglichen werden. Nahezu alle globalen Klimaschutzszenarien zeigen allerdings eine zumindest temporäre Überziehung des CO₂-Restbudgets (Rogelj et al., 2018), was auch zu eines zeitweisen Überschreitens der 1.5°C-Grenze führt. Negative Emissionen werden deshalb langfristig vermutlich auch zum Ausgleich dieser Budgetüberschreitung gebraucht.

Angesichts des geringen Restemissionsbudgets ist klar, dass die bisherige europäische und deutsche Klimapolitik nicht ausreicht, um einen angemessenen Beitrag zur Erreichung der international vereinbarten Ziele zu leisten. Die Forderung zivilgesellschaftlicher Organisationen – insbesondere der Fridays-for-Future Bewegung – nach ernsthafteren Klimaschutzbemühungen wurde in den letzten Jahren zunehmend lauter. In einem wegweisenden Beschluss im April 2021 hat das Bundesverfassungsgericht angemahnt, dass die kurzfristigen Ziele der Klimapolitik ambitioniert genug sein müssen, um zu vermeiden, dass später notwendige Anstrengungen zur Erreichung des 1.5°C-Ziels nicht unverhältnismäßig die Freiheiten künftiger Generationen einschränken.

Im Rahmen des European Green Deal (European Green Deal, 2019) und der jüngsten Novelle des Klimaschutzgesetzes (KSG, 2021) wurde entsprechend das Ziel der Klimaneutralität - also eines vollständigen Ausgleichs verbleibender positiver THG-Emissionen durch THG-Senken - der Europäischen Union für 2050 und Deutschlands für 2045 festgelegt. Entsprechend beschlossene Zwischenziele für 2030 sind eine Minderung der Treibhausgas-Emissionen um mindestens 55% (EU) bzw. 65% (Deutschland) gegenüber 1990.

Die durch das KSG2021 implizierten kumulierten deutschen Emissionen von 2020 bis 2045 entsprechen dabei etwa 90 tCO₂ pro Kopf. Die Ziele sind damit mit einer globalen Klimastabilisierung deutlich unter 2°C konsistent, überschreiten aber das verbleibende durchschnittliche globalen pro-Kopf-Budget für die 1.5°C-Grenze um ca. 50 %.

Trotz der energie- und klimapolitischen Maßnahmen der letzten Jahrzehnte ist die deutsche Klimapolitik laut Sachverständigenrat für Umweltfragen durch eine Ambitions- und Umsetzungslücke gekennzeichnet (Hornberg et al., 2020). Vor der Corona-Krise, im Jahr 2019, betragen die pro-Kopf-CO₂-Emissionen Deutschlands 8.3 t und überstiegen damit den Durchschnittswert der EU um 30 % und die durchschnittlichen globalen pro-Kopf-Emissionen um circa 80 % (Friedlingstein et al., 2020). Im Durchschnitt der Jahre 2010-2019 verringerten sich die THG-Emissionen Deutschlands um weniger als 15 MtCO₂äq pro Jahr (Abbildung 1.1; UBA, 2021a). Im Vergleich dazu erfordern die

Klimaziele für 2030 eine Minderung der THG-Emissionen um jährlich 34 MtCO₂äq im Mittel für die Jahre 2019-2030. Die weitestgehende Erreichung der Emissionsminderungsziele in Deutschland im Jahr 2020 stellt für sich genommen noch kein Zeichen einer Trendwende dar, sondern ist auf den verminderten THG-Ausstoß während der COVID-19-Pandemie zurückzuführen (siehe auch Box zur Pandemie; BMU, 2021a).

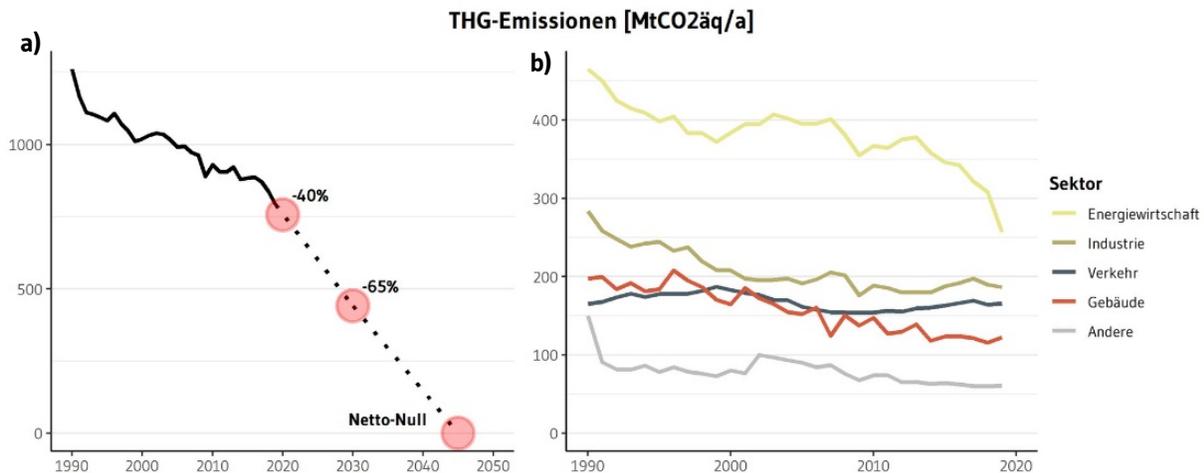


Abbildung 1.1: Entwicklung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA, 2021a): (a) Gesamtemissionen von 1990-2019 im Vergleich zu den Klimazielen 2020, 2030 und 2045; (b) Emissionen von 1990-2019 nach Hauptsektoren aufgeschlüsselt.

Angesichts des eher zähen Energiewendefortschritts im vergangenen Jahrzehnt ist in den nächsten Jahren eine massive Stärkung der Klimaschutzanstrengungen in allen Bereichen nötig, um die Minderungsziele für 2030 zu erreichen und den Weg zur Klimaneutralität zu ebnen. Mögliche Energiewendepfade zur Klimaneutralität für Deutschland werden deshalb hiermit einem neuen Ansatz exploriert. Eine Reihe von vorherigen Studien hat bereits untersucht, wie die bisherigen Zielkorridore einer 80-95 % Minderung der THG bis 2050 unter einem gleichzeitigen Ausstieg aus der Kernenergie erreicht werden können (Ausfelder et al., 2017; Benndorf et al., 2013; BMWi, 2019a; dena, 2018; Gerbert et al., 2018; Sterchele et al., 2020). Bisher gibt es jedoch nur sehr wenige modellbasierte Analysen, die zusätzliche Emissionsminderungsanstrengungen bis 2030 und das verschärfte Ziel der Klimaneutralität in den Blick nehmen (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2021; Sensfuß et al., 2021; Sterchele et al., 2020). Lediglich Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021) berücksichtigt die im Rahmen der Novelle des KSG2021 vorgesehene Klimaneutralität im Jahr 2045.

Anders als in vielen bisherigen Studien verfolgt das Ariadne-Projektteam in der Szenarienanalyse einen integrierten Multimodellansatz, in dem die Modellierung des Gesamt-Energiesystems mit hochaufgelöster Detailmodellierung der Sektoren verknüpft wird. Das ermöglicht es einerseits, die Transformationsdynamik in den Einzelsektoren Verkehr, Gebäude und Industrie und deren Subsektoren in großer Detailtiefe zu studieren. Andererseits werden auch relevante systemische Wechselwirkungen, z. B. in Bezug auf die Konkurrenz um Biomasse, Wasserstoff, Elektrizität oder die Sektorenkopplung abgebildet. Des Weiteren ermöglicht der Einsatz dreier Gesamtsystemmodelle (REMIND, REMod, TIMES PanEU) eine bessere Einschätzung von Unsicherheiten von Modellergebnissen sowie die Identifikation robuster Aussagen. Die hier genutzte Methodik des Modellvergleichs hat sich bereits auf internationaler Ebene im Kontext des seit Jahrzehnten aktiven Stanford Energy Modelling Forums (EMF) (z. B. Kriegler et al., 2015) und der Szenarienanalysen des Weltklimarates IPCC bewährt (IPCC, 2014; Rogelj et al., 2018). Der Wert der Szenarien erweist sich dabei insbesondere in ihrer Funktion als Diskursinstrument: Durch das systematische Ausbuchstabieren verschiedener alternativer Pfade werden notwendige Annahmen und Voraussetzungen für bestimmte Entwicklungen explizit gemacht. So können Unterschiede zwischen den verschiedenen Perspektiven herausgearbeitet und untersucht werden.

Erneuerbar dominierte Energiesysteme zeichnen sich dadurch aus, dass erneuerbarer Strom entweder direkt durch Elektrifizierung bisher nicht-elektrischer Energienachfragen (z. B. durch den Einsatz von E-Pkw im Verkehr oder Wärmepumpen in der Gebäudewärme) oder durch indirekte Elektrifizierung via Umwandlung in erneuerbaren Wasserstoff und strombasierte Kohlenwasserstoffe (E-Fuels) genutzt wird. Eine zentrale Frage ist dabei die der relativen Bedeutung von direkter und indirekter Elektrifizierung. Dementsprechend untersuchen die Technologievariationen der Ariadne-Szenarien die Spielräume für direkte Elektrifizierung, Wasserstoffnutzung und Einsatz von E-Fuels in spezifischen Szenarienvarianten. Zudem analysieren sie die Bedeutung des Importes erneuerbarer Energieträger aus dem Ausland.

1.3 Integration von Gesamtsystem- und Sektorenperspektive: Das Modell- und Szenarien-Ensemble

Um einerseits eine Gesamtsystemperspektive auf Pfade zur Klimaneutralität im Jahr 2045 und andererseits ein hohes Sektordetail der Analyse zu ermöglichen, wurde für die vorliegende Studie ein Ensemble von Gesamtsystem-, Sektor- und Wirkungsmodellen genutzt (Abbildung 1.2). Für spezifische

Forschungsfragen fungieren einzelne Modelle jeweils als Leitmodell, weil sie in besonderem Maße zu deren Beantwortung geeignet sind.



Abbildung 1.2: Übersicht über die im Ariadne-Projekt für die Szenarianalyse verwendeten Modelle. Die Leitmodelle für die jeweiligen Analysen werden zuerst genannt, die ergänzenden Modelle sind in kleinerer Schrift darunter angegeben.

Als Gesamtsystemmodelle beschreiben REMIND, TIMES PanEU und REMod sowohl die Energiebereitstellung, den Umwandlungssektor als auch die Energienutzung in den Sektoren Industrie, Verkehr und Gebäude. Ergänzend dazu untersucht FORECAST die Transformation der Industrie und ihrer Subsektoren in hohem Detail, während DEMO die Personen- und Güterverkehrsnachfrage, und VECTOR21 die Entwicklung des Fahrzeugbestands beschreiben. FORECAST fungiert entsprechend als Leitmodell für den Industriesektor (Kapitel 3), während DEMO und VECTOR21 Leitmodelle für den

Verkehrssektor sind (Kapitel 2). Das Gesamtsystemmodell REMod fungiert auch als Leitmodell für den Gebäudesektor (Kapitel 4). Für Gesamtsystemanalysen des Berichtes sind die Ergebnisse der nachfrageseitigen Leitmodelle FORECAST, DEMO/VECTOR21 und REMod mit der Angebotsdynamik aus REMIND zu einem hybriden Gesamtdatensatz (in den Abbildungen als *Hybrid* gezeigt) kombiniert.

Die wichtigsten Charakteristika der beteiligten Modelle sind in Tabelle 1.1 aufgeführt. Eine weitergehende Beschreibung der Modelle und ihrer strukturellen Annahmen findet sich im Appendix dieses Berichtes. Durch einen groben Abgleich (a) der CO₂-, Strom- und Brennstoffpreisentwicklung sowie der Minderungsvorgaben (Informationsfluss von den Gesamtsystemmodellen an die Sektormodelle), und (b) der Entwicklung von Nachfrage nach Energiedienstleistungen konnte eine verbesserte Konsistenz zwischen Gesamtsystem und Sektormodellen erreicht werden. Aufgrund von strukturellen Unterschieden zwischen den Modellsystemen verbleiben aber relevante Differenzen in den Ergebnissen. Diese vermitteln Anhaltspunkte zu relevanten Unsicherheiten in der Systemdynamik.

Modell	Sektorale Abdeckung	Zeitliche und räumliche Abdeckung	Weitere Eigenschaften	Leitmodell für
REMIND	<ul style="list-style-type: none"> • Integriertes Energie-Ökonomie-Klima-Modell • Energiesektoren: Energiewirtschaft; Verkehr, Industrie, Gebäude mit preiselastischer Nachfrage (beschränkter Detailgrad) • Vereinfachte Abbildung anderer THG-Emissionssektoren (z. B. Landwirtschaft, Abfallwirtschaft) • Breites Spektrum von Technologien zur CO₂-Entnahme 	<ul style="list-style-type: none"> • Betrachtung Deutschlands eingebettet in die europäische und globale Entwicklung (21 Regionen) • Intertemporale Optimierung; Zeithorizont bis 2100 	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht-lineare Effekte, z. B. zu technologischem Lernen oder begrenzter Substitution zwischen Energieträgern • Flexibilitätsbedarfe zur Integration von variabler Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie parametrisiert, keine stundenscharfe Abbildung des Stromsystems 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtsystem-dynamik • Stromsektor und Sektorenkopplung
REMod	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtsystemmodell der Energiebereitstellung und -nachfrage, exkl. stofflicher Nutzung in der Industrie • Detaillierte Beschreibung des Gebäudesektors mit endogener Berechnung des stündlichen Nachfrageprofils für Raumwärme • Abbildung der Sektoren Verkehr und Industrie mit exogener, stündlicher Energienachfrage • Endogene Abbildung energiebedingter CO₂-Emissionen • Nicht abgebildet: Abfall- und LULUCF-Sektoren, nicht-CO₂-Treibhausgase, prozessbedingte Emissionen, Technologien zur CO₂-Entnahme 	<ul style="list-style-type: none"> • Geographische Abdeckung: Deutschland, 1-Knoten Modell • Intertemporale Optimierung der Systemzusammensetzung; Zeithorizont aller Jahre und Stunden bis 2050 • Gleichzeitige Kostenoptimierung aller Sektoren in einem Modell 	<ul style="list-style-type: none"> • Detaillierte technologische Abbildung der Speicher- und Umwandlungstechnologien und der Verbraucher in den Sektoren Verkehr, Industrie und Gebäude • Stundenscharfe Simulation des Betriebs Endogene Abbildung von Sektorkopplung in der Betriebsführung 	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäudesektor • Stromsektor und Sektorenkopplung
TIMES Pa-nEU	<ul style="list-style-type: none"> • Partialmodell des Energiesystems • Sektorale Abdeckung: alle THG, relevanter Technologien und Potenziale für CO₂-Senken; keine Abbildung der Abfall- und LULUCF-Sektoren. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betrachtung Deutschlands eingebettet in die europäische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> • Gleichzeitige Kostenoptimierung aller Sektoren in einem Modell • Unterjährliche zeitliche Auflösung im Stromsystem und bei den Endenergieverbrauchern in 12 Zeitschritte pro Jahr 	

Modell	Sektorale Abdeckung	Zeitliche und räumliche Abdeckung	Weitere Eigenschaften	Leitmodell für
	<ul style="list-style-type: none"> • Explizite Darstellung von (exogenen) Energiedienstleistungs- und Materialverbräuchen in den Sektoren Verkehr, Haushalte, GHD, Industrie und Landwirtschaft 	<ul style="list-style-type: none"> • Intertemporale lineare Optimierung mit perfect foresight; Zeithorizont bis 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • Detaillierte Abbildung von Effizienztechnologien 	
FORECAST	<ul style="list-style-type: none"> • Partialmodell des Industriesektors • Abbildung der industriellen Energienachfrage und CO₂-Emissionen für 11 Sektoren (kalibriert auf AGEBA) • 5 Submodule (Energieintensive Prozesse, Öfen, Dampf- und Warmwasser, Elektr. Motoren/Beleuchtung, Raumwärme/-kühlung) • Modellierung der relevanten Technologien je Submodul (z. B. über 70 energieintensive Prozesse mit über 200 Einsparoptionen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Geographische Abdeckung: Deutschland und alle Länder der Europäischen Union • Zeithorizont bis 2050 (jährlich) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bottom-up Simulationsmodell • Hoher technologischer Detaillierungsgrad • Explizite Berücksichtigung von Technologiediffusion u. Bestandsumwälzung • Berücksichtigung aller wichtigen Dekarbonisierungsstrategien (Beste verfügbare Technologien, CO₂-arme/-neutrale Herstellungsverfahren, Brennstoffwechsel, CCU/S, Recycling und Materialeffizienz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie
VECTOR21	<ul style="list-style-type: none"> • Partialmodell des Verkehrssektors • Erstellung von Szenarien zur Marktentwicklung von Fahrzeugtechnologien des deutschen Pkw- und Lkw-Markts • Modellierung von Indikatoren wie Energieverbrauch und CO₂-Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geographische Abdeckung: Deutschland • Zeithorizont bis 2050 (jährlich) 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulationsmodell (keine Optimierungen) • Agentenbasiert • Berücksichtigung von unterschiedlichen technisch-ökonomischen Eigenschaften der Fahrzeuge, differenziert nach Antriebsstrangkonfiguration und Fahrzeugsegment 	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrssektor (Markthochlauf alternativer Antriebe)

Modell	Sektorale Abdeckung	Zeitliche und räumliche Abdeckung	Weitere Eigenschaften	Leitmodell für
DEMO	<ul style="list-style-type: none"> • Partialmodell des Verkehrssektors • Abbildung des einheimischen Personen- und Güterverkehrs • Multi-modales Modell (Betrachtung aller relevanten Verkehrsträger und -modi) Multi-modales Modell (Betrachtung aller relevanten Verkehrsträger und -modi) 	<ul style="list-style-type: none"> • Geographische Abdeckung: Deutschland und Teilräume Deutschlands (Verkehrszellen) • Zeithorizont bis 2050 Zeithorizont bis 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulationsmodell (keine Optimierungen) • Modelliert Entscheidungsverhalten auf Basis empirisch abgeleiteter Präferenzen (Personenverkehr) bzw. Zeitreihenanalysen (Wirtschaftsverkehr) • Sensitiv gegenüber Veränderungen in Bevölkerung, Wirtschaftsentwicklung, Energiepreisen, Transportinfrastruktur usw. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrssektor (Verkehrsnachfrage)
E2M2s	<ul style="list-style-type: none"> • Partialmodell des Stromsektors • Wechselwirkungen mit anderen Sektoren über Schnittstelle mit TIMES PanEU 	<ul style="list-style-type: none"> • Lineare Optimierung, Zeithorizont bis 2050 • Geographische Abdeckung: Deutschland 	<ul style="list-style-type: none"> • Detaillierte Modellierung des Stromsektors in zweistündlicher Auflösung und mit blockscharfer Kraftwerksdatenbank • Demand-side management konventioneller Stromnutzung abgebildet • Keine Flexibilisierung neuer Strombedarfe für Power-to-Heat und Power-to-Fuel 	
energy-ANTS	<ul style="list-style-type: none"> • Partialmodell für die regionale Verteilung sowie die zeitlich aufgelöste Einspeisung von Windkraftanlagen für Onshore und Offshore sowie Photovoltaikanlagen für Dach- und Freiflächen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geographische Abdeckung: Deutschland und Europäische Union • Zeithorizont bis 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe regionale Auflösung • Berücksichtigung von Bestandsanlagen • Berücksichtigung von Potenzialflächen • Basiert auf georeferenzierten Daten • Technologieentwicklungen werden mit abgebildet 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau von Windkraft und Photovoltaik • Zeitreihenmodelle für Windkraft und Photovoltaik

Modell	Sektorale Abdeckung	Zeitliche und räumliche Abdeckung	Weitere Eigenschaften	Leitmodell für
NEWAGE	<ul style="list-style-type: none"> • Energiewirtschaftsmodell • Einbettung des Energiesystems mit –angebot und –nachfrage in den gesamtwirtschaftlichen Kontext • Erfassung der Effekte auf Beschäftigung und Wettbewerbsfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Betrachtung Deutschlands eingebettet in die europäische und globale Entwicklung (18 Regionen) • Rekursiv dynamische Simulation bis 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • Endogene Energienachfrageentwicklung in Abhängigkeit von Marktentwicklungen und politischen Rahmenbedingungen • Technologisch fundierte Abbildung der Stromerzeugung • Erfassung der Verteilungswirkungen zwischen 5 Einkommensgruppen (Quintile) 	
Hybrid			<ul style="list-style-type: none"> • Integration der nachfrageseitigen Szenariendaten aus DEMO/VECTOR21, FORECAST, REMod mit der Energieangebotsdynamik aus REMIND. 	

Tabelle 1.1: Übersicht der Gesamtsystem- und Sektormodelle.

Den Berechnungen der Gesamtsystem- und Sektormodelle nachgeschaltet sind die Modelle für die Wirkungsanalysen. Hierbei werden die Auswirkungen der Energiewende auf die neben dem Klimaschutz relevanten Handlungsfelder Luftverschmutzung, Verbrauch kritischer Materialien und Landschaftsverbrauch untersucht (Kapitel 9). Die Verteilungswirkungen eines zur Erreichung der Minderungsziele erhöhten CO₂-Preises, analysiert mit einem CO₂-Verbrauchsmodell, stehen im Fokus von Kapitel 11. Über die Umwelt- und Verteilungswirkung hinaus sollen in künftigen Analysen die makroökonomischen Auswirkungen der Energiewende auf Basis der Modelle ISI-Macro und NEWAGE untersucht werden (siehe Box zur makroökonomischen Perspektive).

Box: Makroökonomische Perspektive auf die Energiewende

Der Umbau des deutschen Energiesystems, welcher in den Zielszenarien modelliert wird, geht mit einer Vielzahl an sozioökonomischen Effekten einher – von Veränderungen in Beschäftigung über Wertschöpfung, verfügbare Einkommen und den Staatshaushalt. Gründe hierfür sind primär die hohen Investitionen in Erzeugungs- und Infrastrukturanlagen, die Verschiebung der Nachfrage von fossilen Brennstoffen hin zu klimaneutralen Energieträgern sowie die resultierenden Veränderungen der Energieimportstruktur und Handelsströmen.

Das Ziel der makroökonomischen Untersuchung der Energiewende in Ariadne ist es, die aus den verschiedenen Technologiepfaden resultierenden direkten, indirekten und induzierten gesamtwirtschaftlichen Effekte zu simulieren und bewerten. Zur Abschätzung dieser zukünftigen Veränderungen werden die Ariadne-Zielszenarien mithilfe des makroökonomischen ISI-Macro und des Allgemeinen Gleichgewichtmodells NEWAGE analysiert. Folgende Fragestellungen stehen dabei im Mittelpunkt:

- Gesamtwirtschaftliche Effekte der unterschiedlichen Transformationspfade – Vergleich und Synthese auf der Basis unterschiedlicher Modellierungsansätze
- Strukturwandel durch die Energiewende: Wirkung unterschiedlicher Transformationspfade auf Höhe und Struktur von End- und Vorleistungsnachfrage und Verteilung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte auf Wirtschaftsbereiche
- Wirkungen der Energiewende auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft – Rolle von technologischem Fortschritt und Politikinstrumenten im globalen Kontext

Die Veröffentlichung der Ergebnisse der makro-ökonomischen Wirkungsanalyse ist für 2022 geplant.

Größe	Annahmen
THG-Minderungsziele	<ul style="list-style-type: none"> • THG-Minderungsziele 2030: mindestens –65 % ggü. 1990 • THG-Minderungsziele 2045: mindestens –100 % ggü. 1990 • Kumulierte CO₂-Emissionen 2020-2045 (excl. internationale Luft- und Schifffahrt) auf 7.500 MtCO₂ +/- 200 MtCO₂ begrenzt;
Nutzung von Biomasse	Die Biomassenutzung wurde auf 410 TWh (Primärenergie) begrenzt. Diese Setzung orientiert sich an der Bioenergienutzung im Szenario 95 %-Reduktion mit 1 MHa Flächenbegrenzung in Thrän et al. (2019)
Geologische Speicherung von CO ₂ (inkl. Industrieprozesse und fossile Emissionen)	Maximal 50 MtCO ₂ pro Jahr
Realisiertes Potenzial der CO ₂ -Entnahme (inkl. Landsenken)	44-60 MtCO ₂ pro Jahr
Wirtschaftsentwicklung	Anstieg Bruttoinlandsprodukt (BIP) um etwa 40 % ggü. 2019 bis 2050
Bevölkerung	Weitestgehend stabile Bevölkerungsentwicklung mit 80-83 Millionen Einwohnern in 2050

Tabelle 1.2: Exogene Vorgaben und Rahmendaten für die Gesamtsystemmodelle.

Wichtige exogene Annahmen der Gesamtsystemmodelle sind in Tabelle 1.2 zusammengefasst. In den Zielszenarien setzen die Gesamtsystemmodelle die den Minderungsvorgaben aus dem KSG2021 entsprechend THG Minderungsziele von mindestens 65 % gegenüber 1990 in 2030 und mindestens 100 % in 2045 um. Daraus ergeben sich aggregierte CO₂-Emissionen für 2020-2045 von 7,5 +/- 0.2 GtCO₂. Als weitere Vorgabe wurden zusätzlich die weitestgehende Defossilisierung der Kraftstoffbedarfe für den internationale Flug- und Schiffsverkehr und der Energie für die stofflichen Nutzung der Industrie bis 2045 festgesetzt. Bei gleichzeitiger Minderung anderer THG (insbesondere Methan und Lachgas in der Land- und Abfallwirtschaft) führt das zu einer THG-Minderung in den Szenarien von etwa 67-68 % bis 2030 und 101 % bis 2045, und damit einer leichten Übererfüllung der KSG2021-Klimaziele.

Der Erreichung dieser Minderungsziele wird jeweils ein effizienter Mix an Politikinstrumenten zugrunde gelegt, dessen detaillierte Ausgestaltung jedoch den Modellen freigestellt wurde. Die weitere Forschung in Ariadne wird verschiedenen Optionen der Instrumentierung explizit berücksichtigen und im Systemkontext bewerten.

Ergänzend zu den mit den KSG-Zielen konsistenten Szenarien wurde auch ein Trendszenario mit schwacher Klimapolitik berechnet, entsprechend einer Weiterführung aktuell implementierter Politiken. Dieses dient vor allem als Referenzpunkt, der den Klimaschutzszenarien gegenübergestellt werden kann, um die nötigen Transformationen sichtbar zu machen.

Zusätzlich zu den CO₂-Minderungsambitionen sind auch die Menge an zur Verfügung stehender Biomasse und CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) wichtige Treiber der Transformation. Deshalb wurden auch diese über die Modelle hinweg auf 50 MtCO₂ harmonisiert. Diese Menge entspricht ca. 7 % der deutschen CO₂-Emissionen von 2019, und der 20-fachen CO₂-Speichermenge des derzeit in Entwicklung befindlichen CCS-Hubs PORTHOS in Rotterdam (Porthos, 2021).

Zusätzlich wurde die Nutzung der Biomasse auf eine Primärenergiemenge von 410 TWh begrenzt. Diese Setzung orientiert sich an der nachhaltigen Bioenergiebereitstellung im Szenario 95 %-Reduktion mit einer stringenten Flächenbegrenzung von 1 Mio. ha für Anbaubiomasse (im Vergleich zu aktuell 2,4 MHa) aus der TATBIO Studie (Thrän et al., 2019).

Die sozioökonomische Langfristentwicklungen sind über die Modelle hinweg vergleichbar: Als Referenzannahme wurde ein Anstieg des Bruttoinlandsprodukts (BIP) um etwa 40 % gegenüber 2019 bis 2050 gesetzt, während mit 80-83 Millionen Einwohnern in 2050 die Bevölkerung vergleichbar zum aktuellen Niveau bleibt. Mit der Ausnahme des Industriemodells FORECAST wurde der Effekt der Corona-Pandemie nicht berücksichtigt (siehe Box zur Abbildung der Pandemie in den Szenarien).

Box: Abbildung der COVID-19-Pandemie in den Modellszenarien

In Deutschland lagen die THG-Emissionen in 2020 um etwa 8,7 % niedriger als 2019 (UBA, 2021a). Zu großen Teilen ist diese Entwicklung auf Sondereffekte durch die COVID-19-Pandemie zurückzuführen, die weltweit tiefgreifende Folgen auf die Mobilität, Industrieproduktion und andere Energieverbräuche hatte. Aktuelle Entwicklungen weisen darauf hin, dass sich die Emissionsdynamik in Richtung des Vorkrisenniveaus erholt. Das impliziert, dass die Herausforderungen der Zielerreichung 2025 und 2030 vom COVID-19-Effekt weitgehend unbeeinflusst sind (Hein et al., 2021).

In den hier vorgestellten Szenarienanalysen ist der COVID-19-Effekt noch nicht berücksichtigt. Dies liegt (a) an den noch immer hohen Unsicherheiten bezüglich der wirtschaftlichen Auswirkungen der Pandemie sowie der Geschwindigkeit und Dynamik der wirtschaftlichen Erholung, und (b) an der vergleichsweise groben zeitlichen Auflösung der Modelle, die eine detaillierte Repräsentation konjunktureller Schwankungen und kurzfristiger Krisen erschweren. Künftige Szenarienanalysen in Ariadne werden die Wirkung von COVID-19 in stilisierter Form abbilden.

Tabelle 1.3 gibt einen Überblick über die Technologieszenarien. Vor dem Hintergrund begrenzter Potenziale nachhaltiger Biomasse sowie begrenzter Effektivität und Akzeptanz von CCS sind Art und Umfang der Elektrifizierung das wichtigste Merkmal der Szenarien. Entsprechend werden Varianten mit unterschiedlichen Technologieorientierungen untersucht und gegenübergestellt: (1) Gemischtes Technologieportfolio (*Technologiemix*), (2) Priorisierung der direkten Elektrifizierung (*Elektrifizierung*), (3) verstärkte direkte Nutzung von Wasserstoff (*Wasserstoff*), sowie (4) verstärkte Nutzung von synthetischen erneuerbaren Brennstoffen (*E-Fuels*).

Hierbei wurden die Wasserstoff- sowie Angebots- und Nutzungspotenzialen grob zwischen den Gesamtsystem- und Sektormodellen abgeglichen. Als weitere Gestaltungsdimension wurden in den Elektrifizierungs- und Wasserstoffszenarien Varianten mit Fokus auf einheimischer Produktion und alternativ stärkere Importmöglichkeiten für erneuerbaren Strom, Wasserstoff und E-Fuels festgelegt (siehe rechte Spalte in Tabelle 1.3).

Ziel der Technologievariation ist dabei, plausible Bandbreiten erfolgreicher Energiewendepfade zur Klimaneutralität auszuloten. Die Technologievarianten sind folglich nicht als Extremszenarien zu sehen.

	Technologieausrichtung	Szenariename [Abkürzung]	Beschreibung	Importe von Erneuerbarer Energie
Zielszenarien Klimaneutralität 2045	1 Ausgewogener Technologiemix	Technologiemix [Mix]	Nutzung eines gemischten Energieträgerportfolios (Wasserstoff, Elektrifizierung und synthetische Kraftstoffe) in der Endenergienutzung	Gesamtimportpotenzial für EE-basierte Energieträger von 250-350 TWh in 2045
	2 Direkte Elektrifizierung	Elektrifizierung (inländisch) [Elek. DE]	Priorisierung der Direktelektrifizierung in den Endnutzungssektoren	Beschränkte Import-Poten- ziale (130-200 TWh in 2045) führen zu hoher ein- heimischen EE-Erzeugung
		Elektrifizierung (Im- port) [Elek. Imp]		Gesamtimportpotenzial für EE-basierte Energieträger von ca. 230-360 TWh in 2045, davon 50-100 TWh Strom
	3 Wasserstoff	Wasserstoff (inlän- disch) [H2 DE]	Verstärkte direkte Nutzung von Wasserstoff in Bereichen, deren direkte Elektrifizierung schwierig ist	Beschränkte Importpoten- ziale (150-190 TWh in 2045, davon 100 TWh Wasser- stoff) führen zu hoher ein- heimischer EE-Erzeugung
		Wasserstoff (Im- port) [H2 Imp]		Gesamtimport-Potenzial für EE-basierte Energieträ- ger von 350-580 TWh in 2045, davon 250-400 TWh Wasserstoff
4 E-Fuels	E-Fuels [E-Fuel]	Nutzung von erneuerbaren synthetischen Kraftstoffen, z.B. von <i>green E-Fuels</i> ; zusätz- lich wichtige Rolle von direk- ter Elektrifizierung	Gesamtimport-Potenzial für EE-basierte Energieträ- ger von ca. 480-620 TWh in 2045, davon ca. 500 TWh E-Fuels	
	Trend	Trend	Fortschreibung der Politikam- bition vor dem KSG2019	

Tabelle 1.3: Überblick über die für die Modellanalyse erarbeiteten Kernszenarien. Im Trend-Szenario wer- den die Politikambitionen vor dem KSG2019 fortgeschrieben (KSG, 2019)

1.4 Zielpunkt 2045: Ein nahezu vollständig Erneuerbares Energiesystem

In allen hier untersuchten Zielszenarien ist die Energieversorgung im Jahr 2045 fast ausschließlich auf Erneuerbare Energieträger umgestellt. Dies ergibt sich direkt aus der angenommenen begrenzten Verfügbarkeit der geologischen Speicherung von CO₂ sowie dem Ausstieg aus der Kernenergie. Technische Senken zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre – maßgeblich über die Nutzung von Biomasse mit CCS – werden nahezu vollständig zur Kompensation von Methan und Lachgas aus der Landwirtschaft gebraucht. Entsprechend besteht kein weiterer Spielraum für Restemissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger.

Weil unter den Erneuerbaren Energieträgern für die Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenergie das größte Potenzial besteht, spielen im EE-basierten Energiesystem die direkte und indirekte Elektrifizierung (über Wasserstoff und E-Fuels) eine Schlüsselrolle.

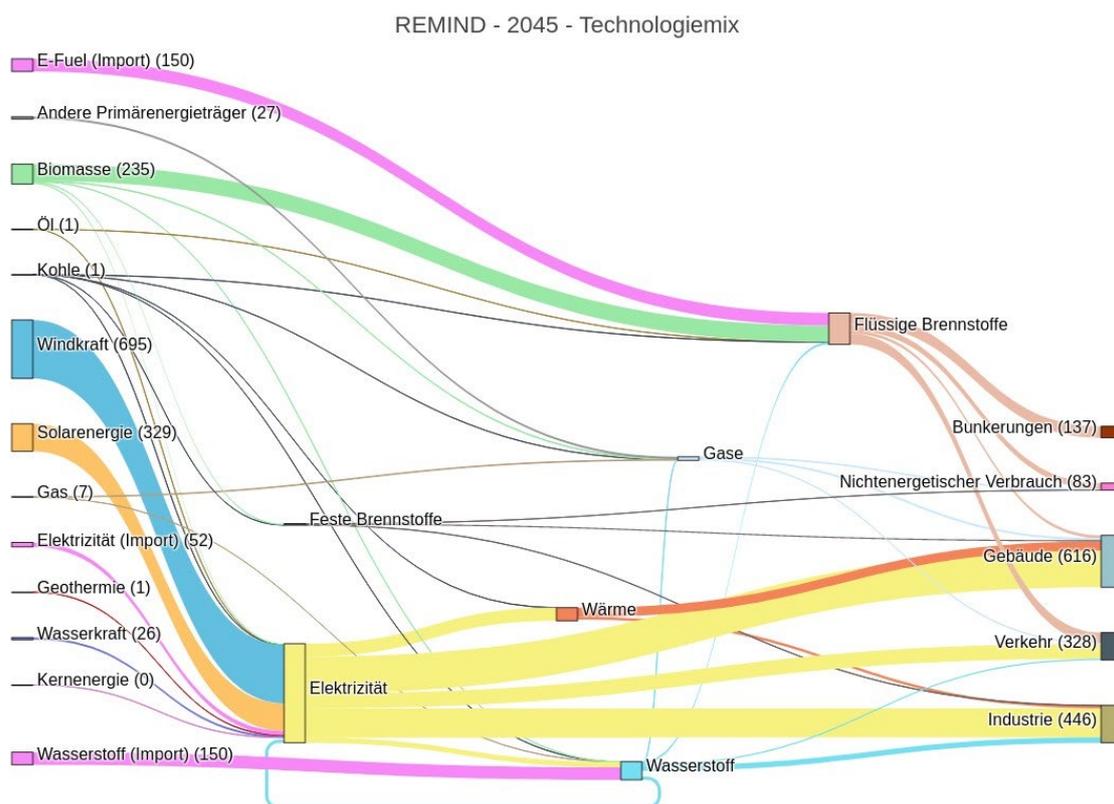


Abbildung 1.3: Beispielhaftes Flussdiagramm der Energieflüsse im Jahr 2045 im Technologiemix-Zielszenario im REMIND Modell. Die Energiemengen sind in TWh Sekundärenergieeinheiten angegeben.

Dies wird auch in Abbildung 1.3 deutlich, die beispielhaft die Energieflüsse im Jahr 2045 im *Technologiemix*-Szenario (REMIND) zeigt: Erneuerbarer Strom wird im Jahr 2045 in allen Sektoren der Hauptenergieträger. Zusätzlich zur Bioenergie decken Wasserstoff und E-Fuels verbleibende Brennstoffbedarfe. Deutlich wird auch, dass langfristig alle Sektoren zur Erreichung der Klimaneutralität beitragen müssen - wenn auch mit unterschiedlichen zeitlichen Verläufen (Abbildung 1.4). Eine robuste Eigenschaft von kostenoptimalen Klimaschutzpfaden ist die rasche Dekarbonisierung des Stromsektors. Dies ist einerseits dadurch begründet, dass die Ablösung von kohle- und gasbasierter Stromerzeugung durch erneuerbaren Strom vergleichsweise günstig bewerkstelligt werden kann.

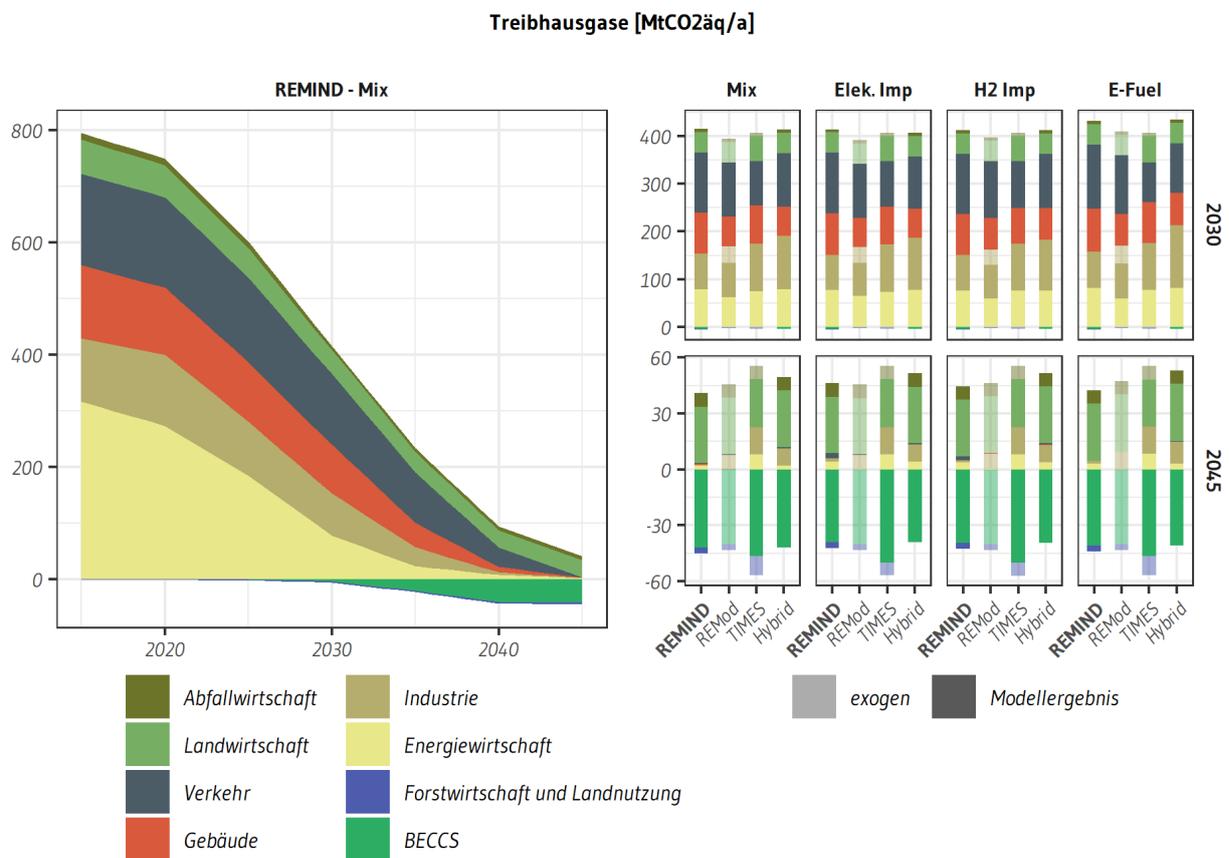


Abbildung 1.4: Sektorale Treibhausgasemissionen in Deutschland. Links: Zeitlicher Verlauf sektorspezifischer THG-Emissionen am Beispiel des Technologiemix-Szenarios in REMIND. Rechts: Vergleich der THG-Emissionen in den Gesamtsystemmodellen und dem Hybridmodell für die Jahre 2030 und 2045¹.

¹ TIMES PanEU und REMod berichten nicht die Emissionen aller Sektoren, weshalb hier folgende Ergänzungen zur Komplementierung der Emissionsbilanz vorgenommen wurden: Da REMod unter Industrie die Emissionen für Energierohstoffe („Feedstocks“) nicht einbezieht, wurde dieser Teil der Industrieemissionen vom Industrieleitmodell FORECAST übernommen. Die Emissionen für Abfall- und Landwirtschaft wurden für REMod aus REMIND übernommen. Für TIMES Pan EU wurden die Emissionen für Abfallwirtschaft aus REMIND übernommen.

Andererseits ist die Dekarbonisierung der Stromversorgung eine wichtige Voraussetzung für Emissionsminderungen durch Elektrifizierung der Energienachfrage in den Sektoren Verkehr, Industrie und Gebäudewärme, die ab den 2030er-Jahren eine zunehmend wichtige Rolle spielt. Im Jahr 2030 liegt die Kohlenstoffintensität der Stromerzeugung 30-75 gCO₂/kWh, im Jahr 2040 unter 25 g/kWh (Abbildung 1.5). Dies ist ein robustes Bild, dass sich über alle Gesamtsystemmodelle und Szenarien hinweg konsistent zeigt. Im Gegensatz hierzu sinkt die CO₂-Intensität der in den Nachfragesektoren eingesetzten Brennstoffe deutlich später und langsamer. Dementsprechend erfolgt der Rückgang der fossilen CO₂-Emissionen der Endnutzungssektoren Verkehr, Industrie und Gebäude zwar später als in der Energiewirtschaft, dennoch wird auch hier die Klimaneutralität durch einen nahezu vollständigen Übergang auf Erneuerbare Energieträger erreicht.

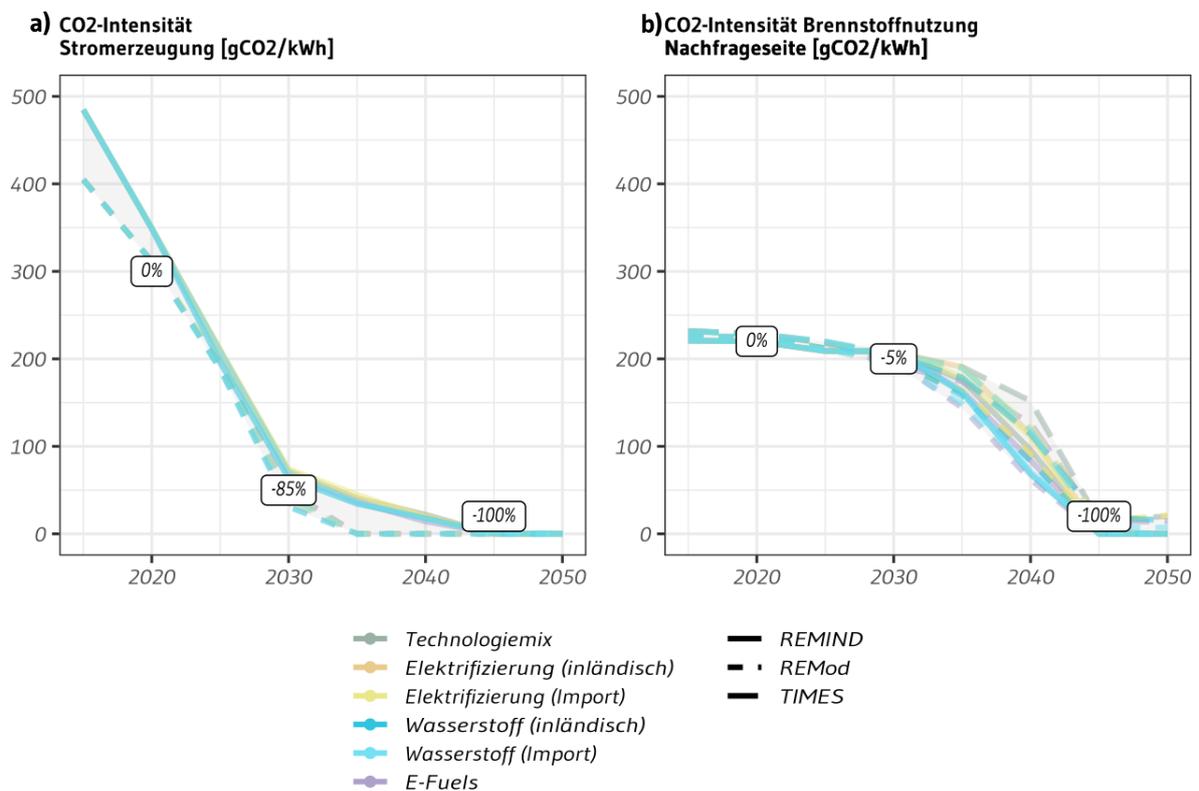


Abbildung 1.5: (a) Fossile CO₂-Intensität der Stromerzeugung und (b) durchschnittliche fossile CO₂-Intensität nachfrageseitig genutzter Brennstoffe in den verschiedenen Szenarien in den Gesamtsystemmodellen REMIND, REMod und TIMES PanEU.

1.5 Transformation der Energiebereitstellung

Der Übergang zu einem auf Erneuerbaren Energien basierten Energiesystem geht naturgemäß mit einer fundamentalen Transformation der Energiebereitstellung einher.

Die Transformation des Stromerzeugungssektors ist in Abbildung 1.6 dargestellt. Die für die Minderungsziele benötigten CO₂-Preise führen bis 2030 zu einem weitestgehenden Ausstieg aus der Kohleverstromung, deutlich früher als durch die Kapazitätsstillegungen gemäß Kohleausstiegsgesetz impliziert (siehe Abschnitt 1.6). Gleichzeitig könnte die zunehmende Elektrifizierung der Endnutzung in Verkehr und Gebäudewärme bereits 2030 zu einem deutlichen Anstieg des Strombedarfs führen. In REMIND, REMod und dem aus den Sektormodellen abgeleiteten Hybrid-Modell ergibt sich ein Bruttostrombedarf für die Zielszenarien von 710-775 TWh für 2030, im Vergleich zu einem mittleren Bruttostromverbrauch von 594 TWh in 2015-2019 (BMWi, 2021). Lediglich im TIMES PanEU-Modell, welches sehr hohe Effizienzverbesserungspotenziale in allen Sektoren annimmt, ergeben sich geringere Strombedarfe von 530-550 TWh. Für 2045 ergibt sich ein deutlich uneinheitlicheres Bild mit einer Bandbreite der Bruttostrombedarfe von 780-1.580 TWh über alle Modelle hinweg.

Die Unterschiede hängen maßgeblich von mehreren Faktoren ab und bestehen sowohl über Szenarien als auch über Technologien hinweg: (a) den angenommenen Importpotenzialen von erneuerbarem Strom, Wasserstoff und E-Fuels, (b) der relativen Bedeutung der effizienteren direkten Elektrifizierung und der energieintensiven indirekten Elektrifizierung, (c) dem Einsatz von Bioenergie und (d) modellspezifischen Unterschieden zur Entwicklung von nachfrageseitigen Effizienzpotenzialen. Entsprechend bestehen die größten EE-Bedarfe im Szenario *Wasserstoff (inländisch)*, das von hoher einheimischer Wasserstoffherzeugung bei geringeren Importpotenzialen charakterisiert ist. In REMod sind die Bedarfe tendenziell höher, weil geringere Mengen an Biokraftstoffen eingesetzt werden, was wiederum den Bedarf an EE-Stromerzeugung für die einheimische E-Fuel-Produktion erhöht. Auf der anderen Seite ergeben sich für TIMES PanEU niedrigere Strombedarfe, weil hier in höherem Maße Effizienzmaßnahmen umgesetzt werden und deutlich weniger einheimische Power-to-X-Produktion notwendig wird. Die Importe von Wasserstoff und E-Fuels induzieren zusätzliche erneuerbare Stromerzeugungsbedarfe im Ausland von bis zu 900 TWh (*Wasserstoff (Import)*-Szenario) und 1.500 TWh (*E-Fuel*-Szenario), wie in Kapitel 6.4 beschrieben.

Strombereitstellung und -nutzung [TWh/a]

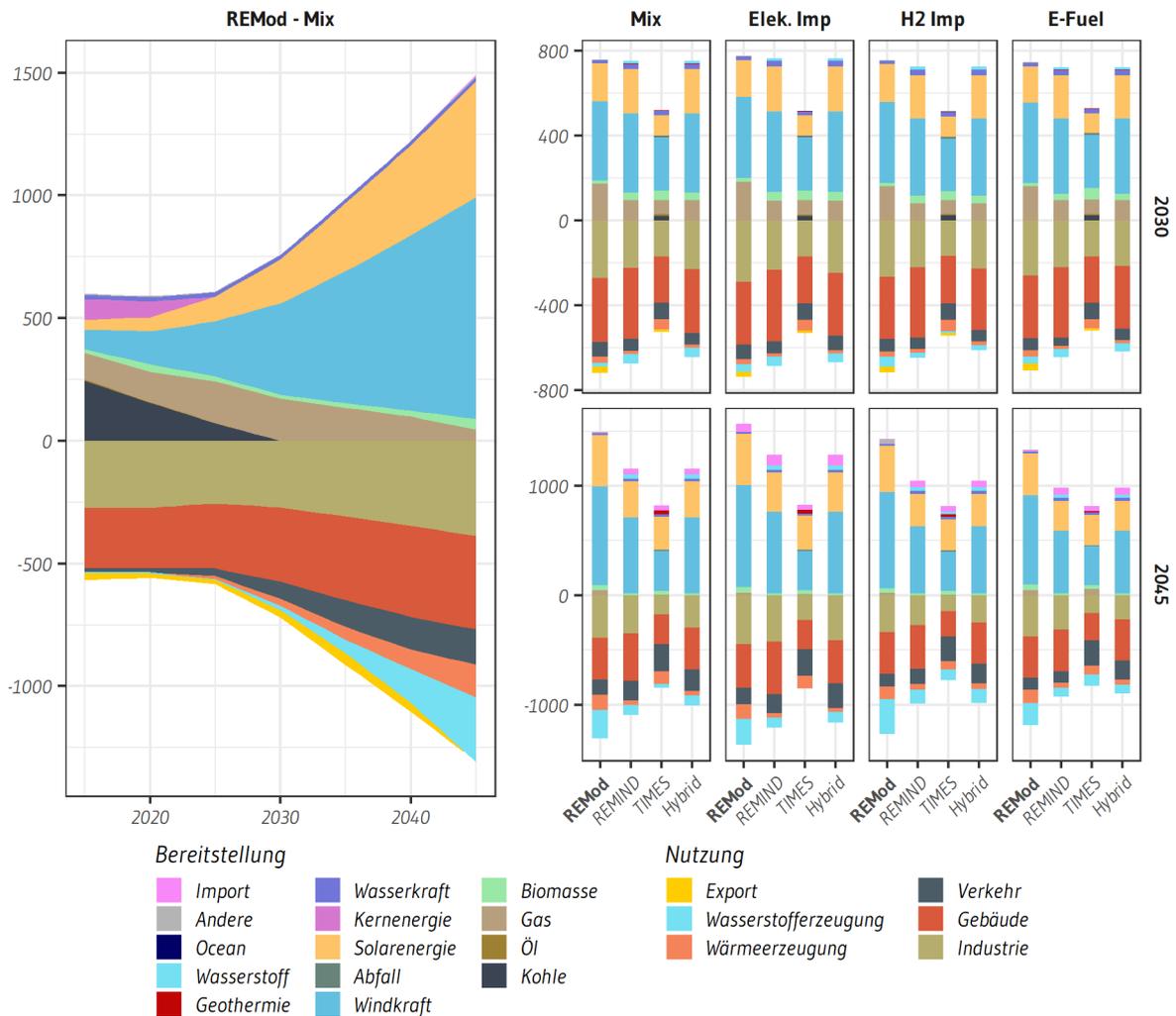


Abbildung 1.6: Strombereitstellung (positive Achse) und Stromnutzung (negative Achse) in den Zielszenarien in den Gesamtsystemmodellen und dem Hybridmodell.

Das entsprechende Bild für die Bereitstellung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen sowie von Wasserstoff ist in Abbildung 1.7 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Umstellung von fossilen auf CO₂-neutrale Brennstoffe größtenteils im Zeitraum 2030-2045 vollzogen wird. 2045 decken Bioenergie und importierte E-Fuels den größten Teil der Bedarfe an Kohlenwasserstoffen. Wasserstoff wird langfristig fast ausschließlich aus einheimischer Elektrolyse und Importen bereitgestellt. In Übereinstimmung mit der Szenariendefinition weist das E-Fuel Szenario die höchsten verbleibenden Bedarfe an Kohlenwasserstoffen auf, wobei die Modellsysteme verschieden stark zwischen gasförmigen und flüssigen Brennstoffen gewichten.

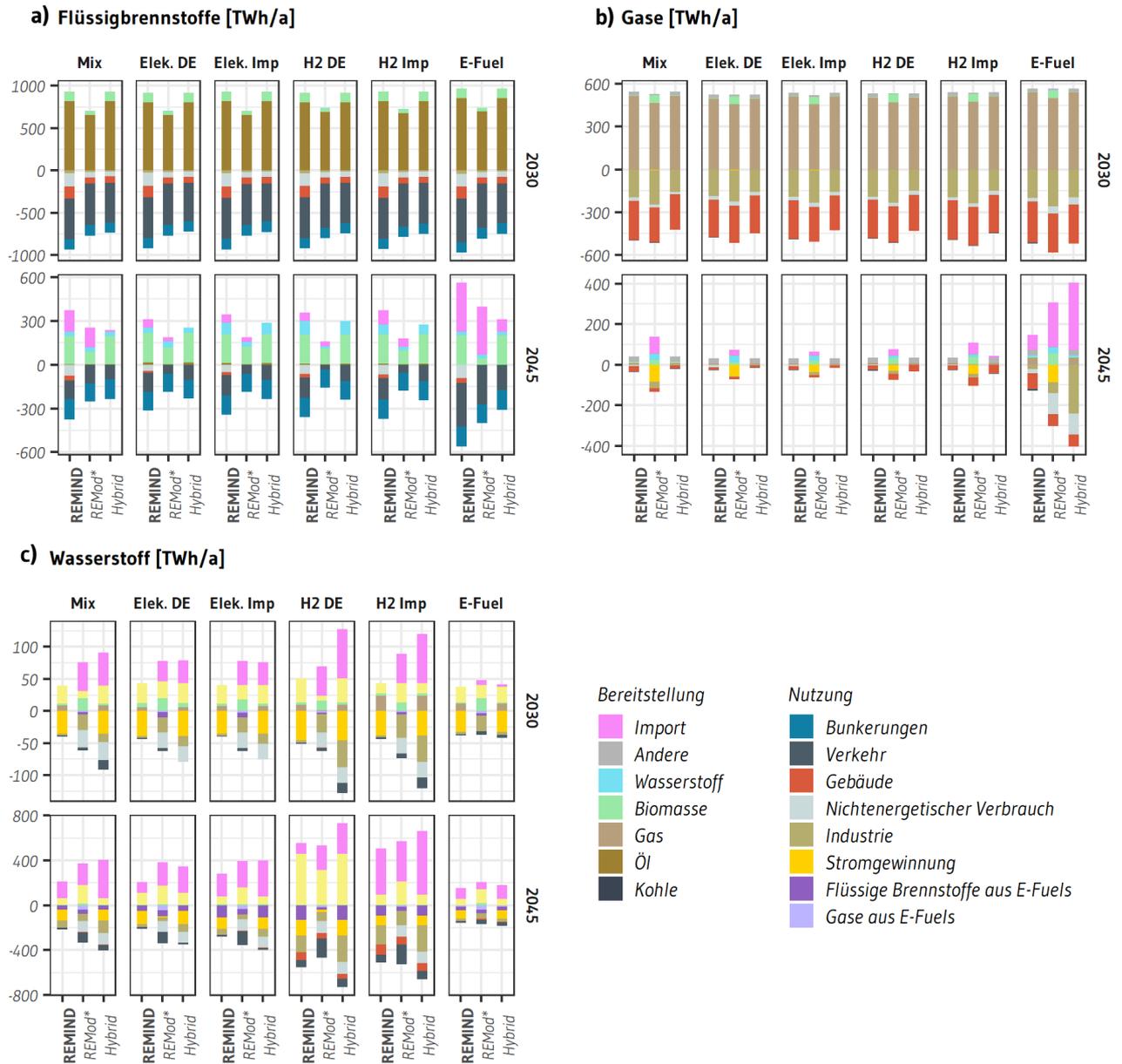


Abbildung 1.7: Bereitstellung (positive Achse) und Nutzung (negative Achse) von (a) flüssigen und (b) gasförmigen Kohlenwasserstoffen sowie von (c) Wasserstoff in den Jahren 2030 und 2045.²

² Bei REMod* wurden REMod-Ergebnisse durch Nachfragen zur stofflichen Nutzung auf Basis von FORECAST ergänzt. Für TIMES Pa-nEU stehen die Szenariendaten nicht im notwendigen Detailgrad zur Verfügung.

1.6 Die Transformation der Energiebedarfe für Verkehr, Industrie und Gebäude

Während die Stromerzeugung vergleichsweise einfach und kostengünstig auf Erneuerbare Energien umgestellt werden kann, müssen Brenn- und Kraftstoffbedarfe von Anwendungen, die nicht elektrifiziert werden, entweder über die knappe Biomasse oder das zumindest mittelfristig ebenfalls knappe und teure Power-to-X (grüner Wasserstoff oder strombasierte E-Fuel, siehe Kapitel 6) bereitgestellt werden (Abbildung 1.8). Diese nicht-elektrischen Energieverbräuche sind somit "Bottlenecks" für die Erreichung der Klimaneutralität und eines vollständig Erneuerbaren Energiesystems im Jahr 2045.

Im Transportsektor tragen kurzfristig vor allem Verbesserungen der Energieeffizienz und die Elektrifizierung des Pkw-Verkehrs zu Emissionsminderungen bei, dennoch verbleibt ein Restbedarf an größtenteils fossilen Kraftstoffen von etwa 500 TWh im Jahr 2030 (Kapitel 2). Je nach Szenario beträgt der Bedarf an Kohlenwasserstoffen des Straßenverkehrs in 2045 100-240 TWh, maßgeblich aufgrund von Restbeständen von Pkw und Lkw mit Verbrennermotoren. Hinzu kommen weitere Bedarfe von etwa 120-140 TWh für den internationalen Luft- und Schiffsverkehr.

Im Industriesektor bestehen substantielle Bedarfe an kohlenstoffbasierten Energieträgern und Grundstoffen. In den Zielszenarien werden für die energetische und stoffliche Nutzung der Industrie in 2030 noch 500-600 TWh kohlenstoffbasierte Energie benötigt. Bis 2045 wird in FORECAST, REMod und REMIND der Energieverbrauch der Industrie in den Zielszenarien (mit Ausnahme des *E-Fuels*-Szenarios) zu 85-98% von Elektrizität, Wasserstoff und netzgebundener Wärme gedeckt. Somit werden verbleibende Bedarfe an kohlenstoffhaltigen Energieträgern von der stofflichen Nutzung dominiert, die auf Basis von Biomasse und Power-to-X-Energieträgern bereitgestellt werden.

Auch für den Gebäudesektor erfordert die Klimaneutralität einen vollständigen Ausstieg aus der Nutzung von fossilem Öl und Gas. Bis 2030 sinkt die Nutzung kohlenstoffbasierter Energie in den Zielszenarien auf 400 TWh – im Vergleich zu 600 TWh im Durchschnitt der Jahre 2015-2019. Bis 2045 zeigen alle Zielszenarien einen weitgehenden Umstieg auf dezentrale Wärmepumpen und netzgebundene Wärme. In den *Elektrifizierungs*-Szenarien decken diese fast vollständig den Gebäudewärmebedarf ab. In den *Wasserstoff*-Szenarien kommen hingegen 45-150 TWh Wasserstoff bei der Gebäudewärme zum Einsatz, während im *E-Fuels*-Szenario ein Restbedarf von bis zu 60-110 TWh/a durch E-Fuels und biogene Brennstoffe gedeckt wird.

Über die Defossilisierung der Energieversorgung hinaus spielt auch die Verbesserung der Energieeffizienz eine sehr wichtige Rolle für die Minderung der CO₂-Emissionen. Diese ist insbesondere im mittelfristigen Zeithorizont bis 2030 und für nicht-elektrische Energieverbräuche sehr wichtig, weil bis dahin nur in begrenztem Umfang erneuerbare Brennstoffe und Wasserstoff bereitgestellt werden können (siehe Abschnitt 1.7). Bis 2045 reduziert sich der Endenergieverbrauch um 34-59 % gegenüber 2019. Dabei trägt auch die Elektrifizierung maßgeblich zum Rückgang der Endenergienachfrage bei, weil die Nutzung von Strom bei vielen Anwendungen – beispielsweise in Form von E-Mobilität oder Wärmepumpen - eine deutlich bessere Umwandlungseffizienz hat als die Nutzung von Brennstoffen.

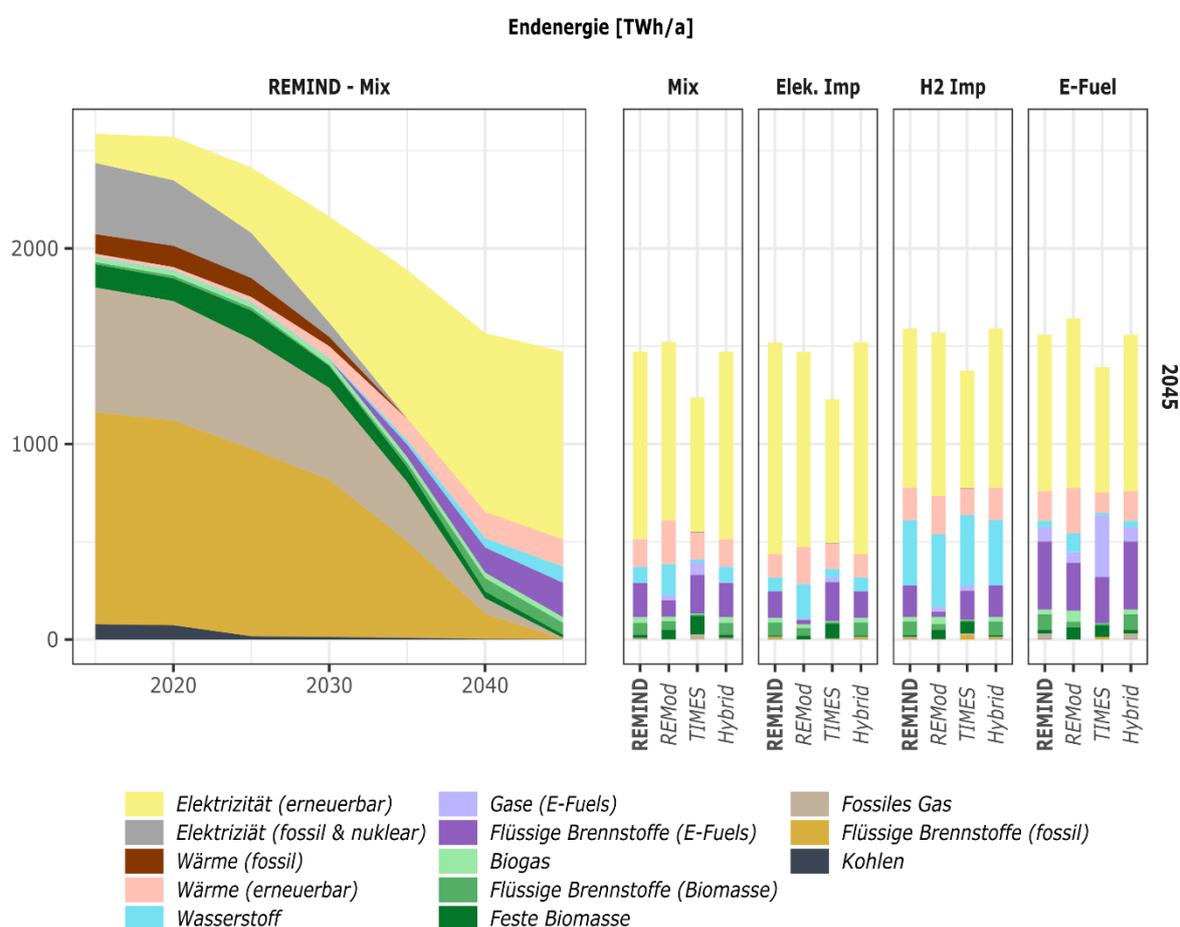


Abbildung 1.8: Endenergienachfrage inklusive stofflicher Nutzung aufgeschlüsselt nach Sektoren und Energieträgern in den verschiedenen Szenarien. Links: REMIND-Ergebnisse für den Zeitraum 2015 bis 2045 im Technologiemix-Szenario. Rechts: Ergebnisse der Gesamtsystemmodelle und dem Hybrid-Modell für verschiedene Technologieszenarien in 2030 und 2045.

1.7 Meilensteine 2030 auf dem Weg zur Klimaneutralität

In der nächsten Dekade sind im Vergleich zum letzten Jahrzehnt enorm erhöhte Klimaschutzanstrengungen in allen Sektoren notwendig, um die Emissionsminderungsziele des KSG2021 zu erreichen. Die Beschleunigung der Energiewende in den kommenden Jahren ist dabei in zweierlei Hinsicht relevant: Einerseits ist die stark beschleunigte Transformation des gesamten Energiesystems notwendig, um die für 2030 anvisierten Emissionsminderungsziele des KSG2021 zu erreichen. Andererseits müssen die Dekarbonisierungs- und Infrastrukturmaßnahmen im nächsten Jahrzehnt den Weg für das Langfristziel der Klimaneutralität ebnen.

In der Gesamtschau gehen in den Ariadne-Zielszenarien die Treibhausgasemissionen in allen Sektoren bis 2030 deutlich zurück. Das laut KSG2021 anvisierte Gesamtziel für 2030, einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von 65 % gegenüber 1990, ist in allen Szenarien erreichbar (Abbildung 1.9). Allerdings werden die sektoralen Ziele des Verkehrs- und Gebäudesektors in vielen Szenarien verfehlt und durch stärkere Emissionsminderungen in der Energiewirtschaft ausgeglichen. Das im KSG2021 festgelegte Ziel für den Gebäudesektor in 2030 ist nur unter sehr großen Anstrengungen erreichbar und in den meisten Szenarien nicht Teil des kostenoptimalen Transformationspfads. Im Verkehrssektor wird das 2030-Sektorziel in nahezu allen Szenarien verfehlt.

Bis 2030 gibt es deutliche Effizienzverbesserungen zu verzeichnen. Gegenüber 2019 geht die Endenergienachfrage von 2.514 TWh (AGEB, 2020a) um 16-28 % auf 1.820-2.110 TWh zurück. Die Primärenergienachfrage sinkt in den Zielszenarien gegenüber 2019 (3564 TWh, AGEB2020b) um 23-28 % und beträgt 2.551-2.755 TWh. Somit liegen selbst jene Zielszenarien mit hohen Primärenergieverbräuchen unter dem in der Energieeffizienzstrategie 2050 anvisierten Ziel von 2.796 TWh (Energieeffizienzstrategie 2050, 2019)³. Die Reduzierung des Endenergiebedarfs wird nachfrageseitig durch Effizienzsteigerungen in allen Endnutzungssektoren erreicht, wie zum Beispiel durch den Einsatz von E-Mobilität oder Wärmepumpen.

³ Die Energieeffizienzstrategie 2050 legt ein Reduktionsziel von 30 % gegenüber dem Basisjahr 2008 vor. Da der **Primärenergieverbrauch** 4.380 PJ im Jahr 2008 betrug, entspricht das 2030-Ziel umgerechnet 2.796 TWh (Energieeffizienzstrategie 2050, 2019).

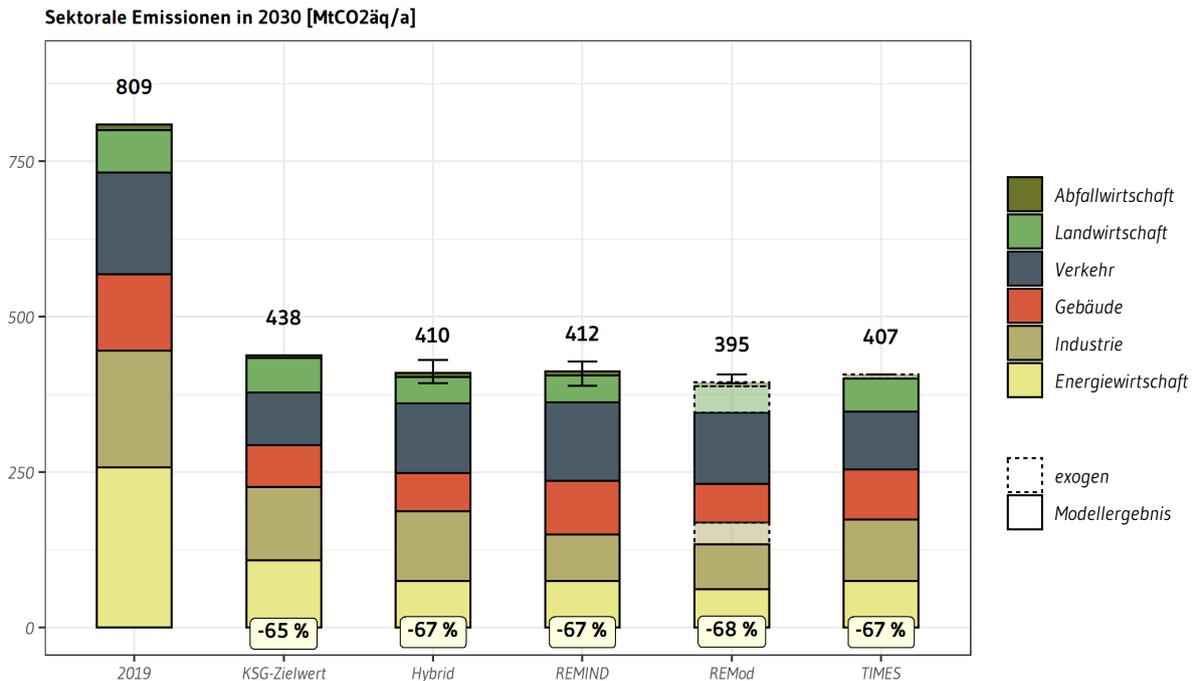


Abbildung 1.9: Sektorale THG-Emissionen im Technologiemix-Szenario (Hauptdiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (Fehlerbalken). Die prozentuale Degression gibt die Veränderung der Emissionen gegenüber 1990 an. Die dargestellte sektorale Unterteilung dient der Illustration.⁴

Die Energiewirtschaft erfährt in allen Szenarien eine rasche Dekarbonisierung bis 2030 und erreicht stärkere als im KSG2021 vorgesehene Emissionsminderungen. Hier ist bis 2030 laut REMIND und REMod eine Steigerung der Wind- und PV-Erzeugung auf 550-615 TWh notwendig (Abbildung 1.10c) – das liegt erheblich über den derzeit im EEG2021 vorgesehenen Strommengen (2029: 376 TWh). Die dafür erforderlichen Kapazitäten und jährlichen Zubauraten für Wind und PV sind überaus herausfordernd und entsprechen etwa einer Verdreifachung der Ausbaugeschwindigkeit gegenüber der vergangenen Dekade.

⁴ Die Unterteilung der Sektoren in den verschiedenen Modellen orientiert sich an der Aufteilung des KSG2021, ist allerdings nicht vollkommen identisch. TIMES PanEU und REMod berichten nicht alle im KSG2021 berücksichtigten Sektoren, weshalb hier Annahmen getroffen wurden: Da REMod unter Industrie die Emissionen für Energierohstoffe (Feedstocks) nicht einbezieht, wurde dieser Teil der Industrieemissionen vom Industrieleitmodell FORECAST übernommen. Die Emissionen für Abfall- und Landwirtschaft wurden für REMod aus REMIND übernommen. Für TIMES Pan EU wurden die Emissionen für Abfallwirtschaft aus REMIND übernommen.

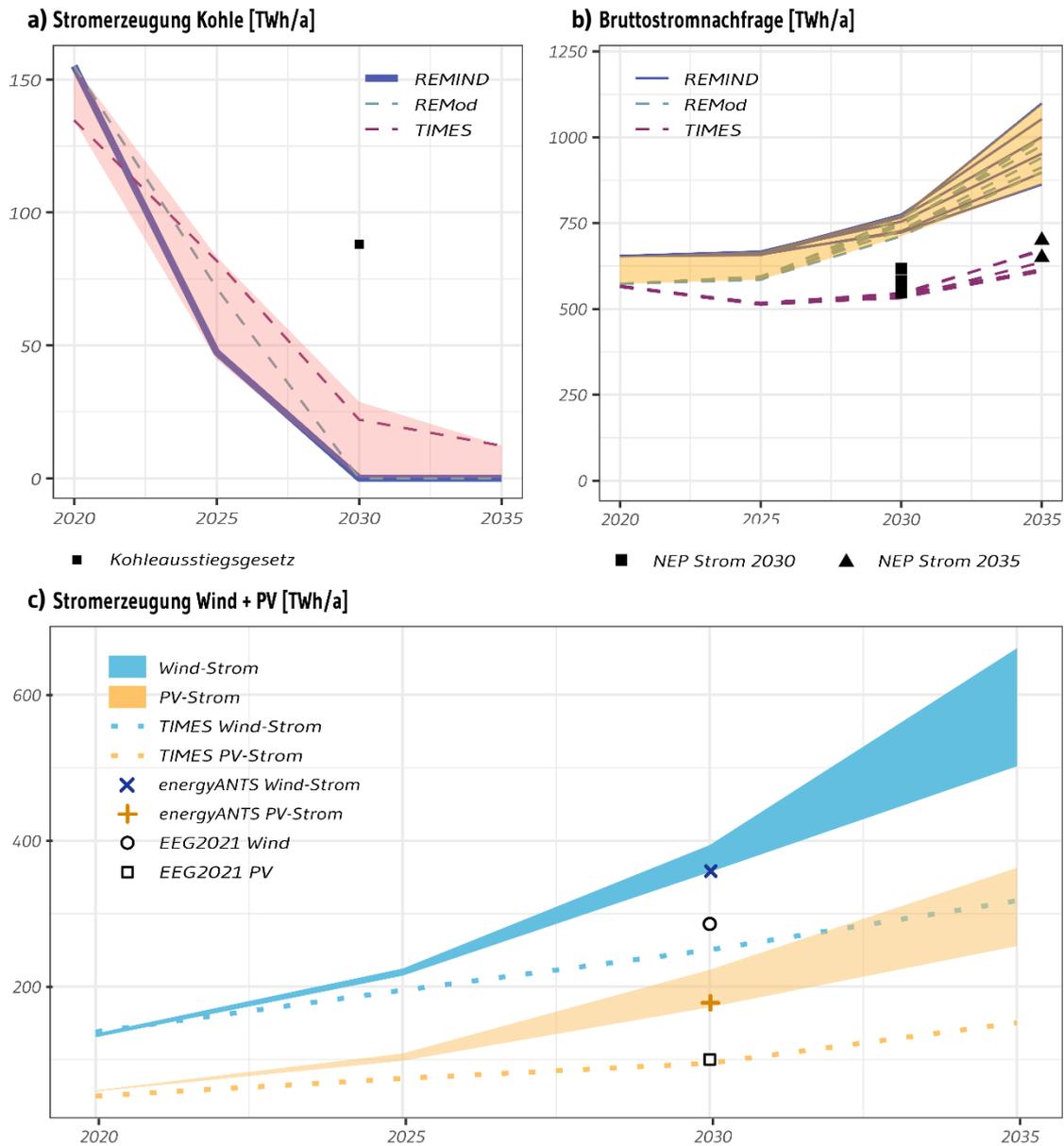


Abbildung 1.10: Ausgewählte Indikatoren für die Energiewirtschaft: (a) Stromerzeugung aus Kohle im Technologiemit-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche); (b) Bruttostromnachfrage in den Gesamtsystemmodellen in allen Zielszenarien⁵; (c) Spannbreite der Stromerzeugung von Wind und PV in allen Szenarien in den Leitmodellen REMod und REMIND sowie in TIMES PanEU im Technologiemit-Szenario. Die Indikationen “energyANTS” spiegeln die Erzeugungsanalyse aus Kapitel 5 wider. (Quellen: EEG, 2021; NEP2030, 2019; NEP2035, 2021).

⁵ Der NEP2030 für Strom berichtet in seinen Szenarien die Nettostromnachfrage inklusive der Netzverluste im Verteilnetz. Für die vorliegende Darstellung wurde in Anlehnung an den NEP2035 angenommen, dass der Bruttostromverbrauch 7 % über dem Nettostromverbrauch liegt.

Die geographische Analyse des Zubaus mit dem Modell energyANTS ergibt eine sehr hohe PV-Aufdachdichte, insbesondere in großen Ballungszentren, PV-Freiflächen in fast jeder deutschen Gemeinde, einen hohen Anteil von Offshore-Anlagen in der Nordsee und einen starken Onshore-Wind-Zubau in den Bundesländern mit hohen Flächenanteilen, insbesondere auch in Baden-Württemberg und Bayern (Kapitel 5). Dies ist nötig, um die in Kapitel 5 untersuchten 120 GW Wind und 185 GW PV in 2030 zu erfüllen, welche die notwendigen Erzeugungsmengen für die Zielszenarien von REMIND und REMod liefern. Die TIMES PanEU- Szenarien zeigen, dass bei enormen Energieeffizienzgewinnen ein niedrigerer Zubau notwendig wäre. Darüber hinaus zeigen alle Szenarien einen vollständigen oder nahezu vollständigen Kohleausstieg bis 2030 (Abbildung 1.10a). Daher müssen sowohl ausreichend Backup-Lösungen für die von fluktuierenden Erneuerbaren Energien dominierte Stromerzeugung bereitgestellt als auch ein beschleunigter Strukturwandel angegangen werden. Der stark erhöhte Anteil an Erneuerbaren Energien am Strommix (2030: 76-89 %) sowie die steigende Stromnachfrage machen zudem einen beschleunigten Ausbau der Übertragungs- und Verteilnetze unerlässlich.

Im Verkehrssektor spielt die direkte Elektrifizierung des Personenverkehrs eine prioritäre Rolle in der nächsten Dekade. Im Sektorleitmodell VECTOR21 übersteigen E-Pkw mit mindestens 14 Mio. im Jahr 2030 in allen Szenarien den oberen Zielwert des noch aktuellen Klimaschutzprogramms 2030 (KSP, 2019) von 7-10 Mio. E-Pkw um mindestens 40-% (Abbildung 1.11c). Um diesen großen elektrischen Fuhrpark zu ermöglichen, muss die jährliche Anzahl an Neuzulassungen jener Fahrzeuge gegenüber heute stark ansteigen. Im Durchschnitt der Jahre 2020-2030 sind laut Sektorleitmodell VECTOR21 ca. 1,3-1,7 Mio Neuzulassungen von E-Pkw pro Jahr notwendig. In allen Szenarien dominieren bis spätestens 2030 E-Pkw die neuzugelassenen Fahrzeuge, wobei hier der Großteil rein batterieelektrische Pkw (battery electric vehicles, BEV) sind. Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrs steigt die Effizienz in vielen Verkehrsbereichen bis 2030 an. So werden je Personenkilometer in 2030 ca. 26 % weniger Endenergie gegenüber 2020 benötigt (kumulierter Energieaufwand). Die vom KSG2021 gesetzten Emissionsziele für 2030 werden in den Zielszenarien im Rahmen der modellierten Antriebswende nicht erreicht, da der hierfür notwendige Elektrifizierungsgrad aufgrund von begrenzter Diffusionsgeschwindigkeit nicht erreicht wird. Für ein Erreichen des Sektorziels sind neben einer Transformation der Antriebe und Energieträger auch neue Mobilitätskonzepte nötig. Im Weiteren ist daher zu untersuchen, inwiefern beispielsweise eine Verschiebung des modalen Splits hin zu öffentlichen Verkehrsmitteln sowie effizientere Stadt- und Raumplanung mit kürzeren Wegen zur Schließung der Zielerreichungslücke beitragen können.

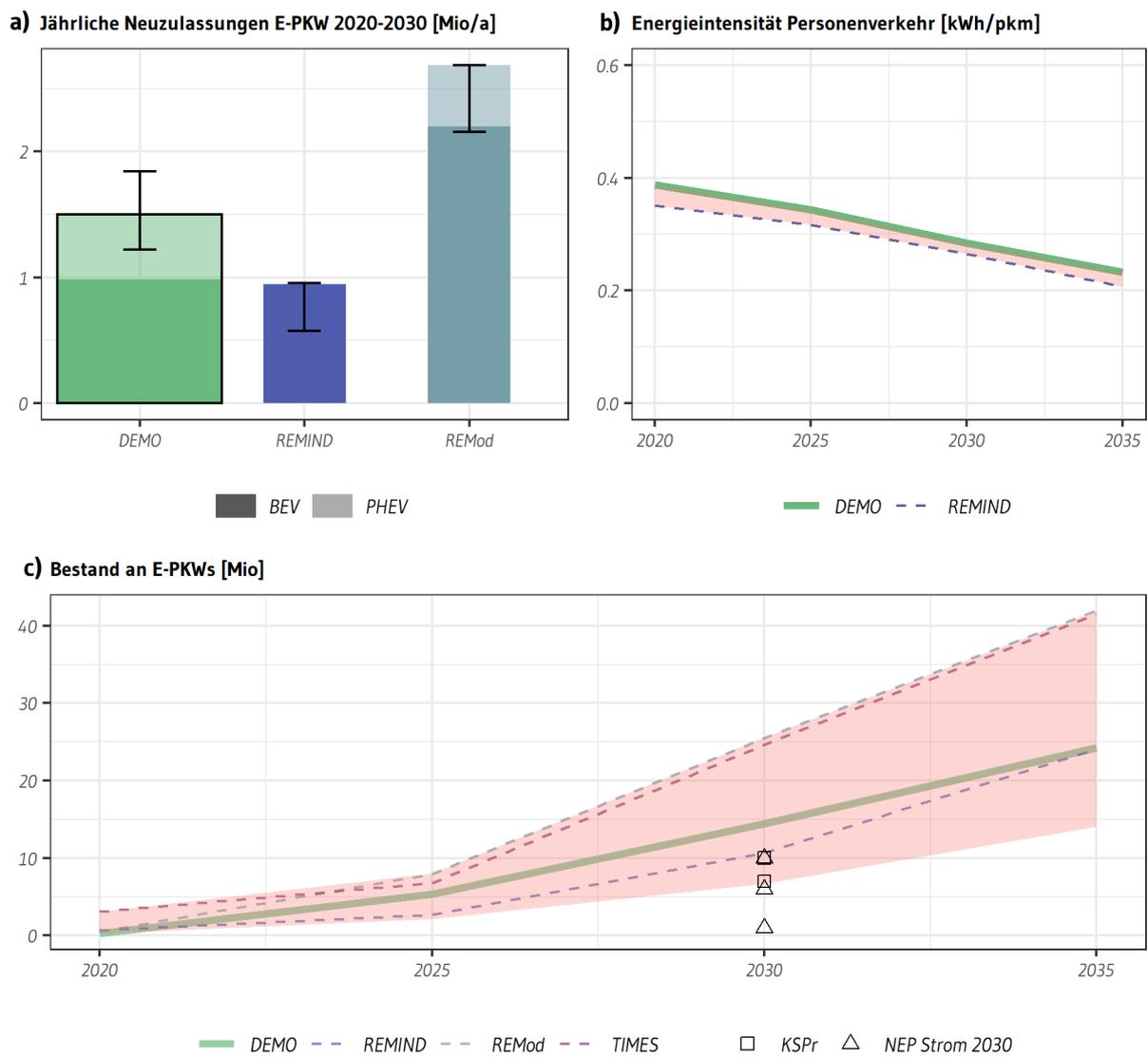


Abbildung 1.11: Ausgewählte Indikatoren für den Verkehrssektor: (a) durchschnittliche jährliche Neuzulassungen von E-Pkw im Zeitraum 2020-2030 im Technologiemix-Szenario (Hauptdiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (Fehlerbalken); (b) kumulierter Energieaufwand des Passagierverkehrs im Technologiemix-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche); (c) Bestand an E-Pkw im Technologiemix-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche).⁶ (Quellen: KSPr, 2019; NEP2030, 2019).

⁶ Die FCEC-Nutzung in 2030 ist in allen Szenarien und Modellen vernachlässigbar klein.

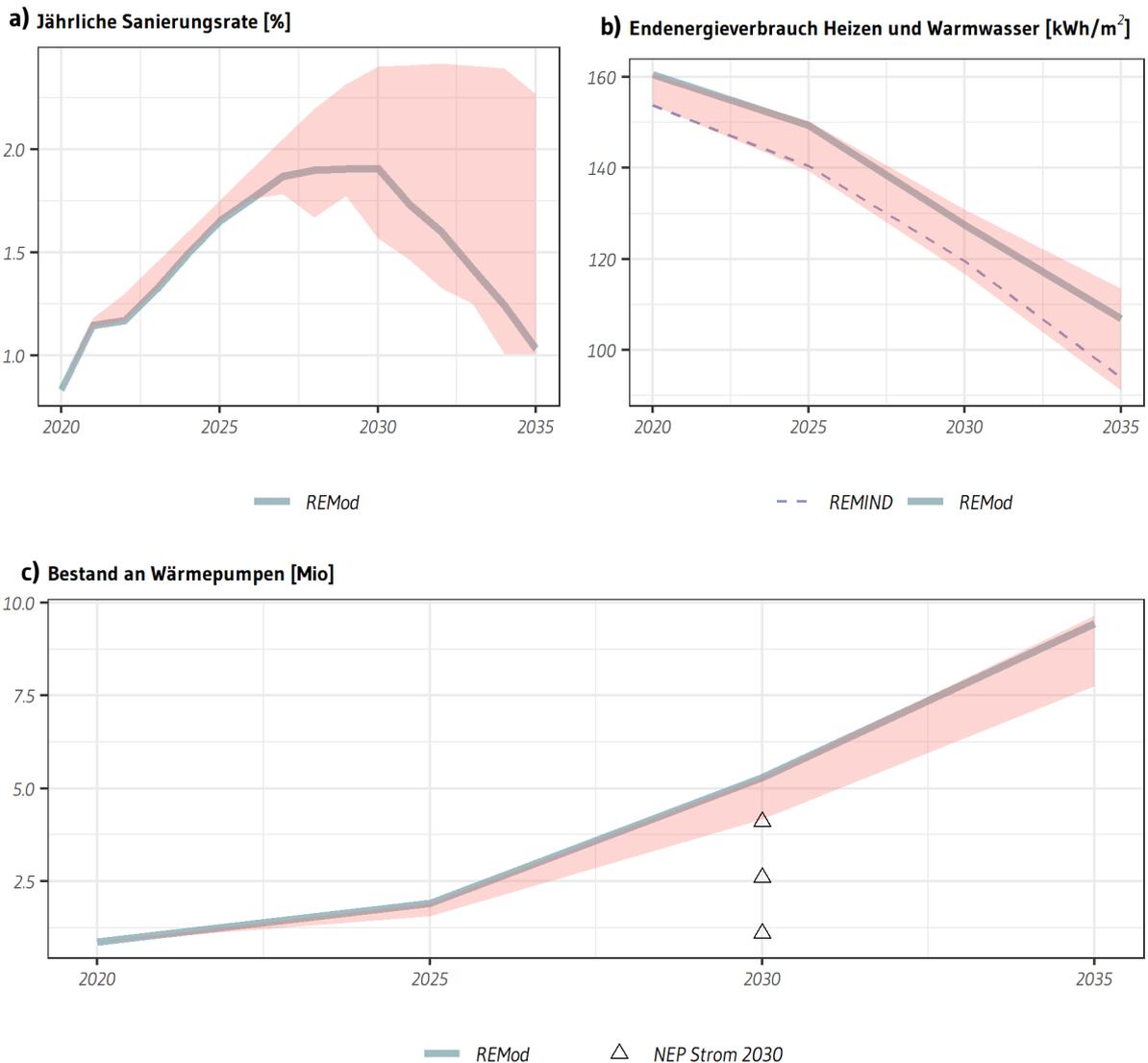


Abbildung 1.12: Ausgewählte Indikatoren für den Gebäudesektor: (a) Jährliche Sanierungsrate im Technologiemix-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche) im Leitmodell REMod; (b) kumulierter Energieaufwand für Gebäudewärme und Warmwasser im Technologiemix-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche); (c) Bestand an Wärmepumpen im Technologiemix-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche). (Quelle: NEP2030, 2019)

Die Wärmeversorgung im Gebäudesektor erfährt ebenfalls eine beschleunigte Dekarbonisierung bis 2030. Die zwei Säulen bis 2030 sind der konsequente Energieträgerwechsel und eine gesteigerte Sanierungsrate. Im Bereich Energieträgerwechsel sind für 2021-2030 laut Sektorleitmodell REMod die Installation von durchschnittlich ca. 400.000 Wärmepumpen pro Jahr notwendig, sowohl in Neubauten als auch in Bestandsgebäuden. Diese Installationszahlen bedeuten fast eine Vervierfachung der aktuellen Absatzzahlen (BWP, 2020) und würden den Gesamtbestand an Wärmepumpen bis 2030 auf ca. 5 Mio. ansteigen lassen. Zudem ist der Neuanschluss von ca. 1,6 Mio. Gebäuden an das Fernwärmenetz (ca. 160.000 jährlich), verbunden mit der Defossilisierung

der Fernwärme, notwendig. Die jährliche Sanierungsrate sollte sich gegenüber heute bis 2030 möglichst auf 2 % verdoppeln, mindestens aber auf 1,5 % ansteigen (Abbildung 1.12a). In allen Szenarien wird das Sanierungspaket mit dem Standard KfW-70 bis KfW-55 aus Kosten-Nutzen-Sicht präferiert. Eine tiefere Sanierung ist nicht Teil des kostenoptimalen Transformationspfades. Allerdings führt sie zu weiteren Emissionseinsparungen und könnte somit Verzögerungen bei der Dekarbonisierung anderer Sektoren ausgleichen. Durch die Veränderungen im Rahmen der Wärmewende steigt die Effizienz im Bereich der Gebäudewärme deutlich an. So werden 2030 etwa 19-24 % weniger Nutzenergie für Heizung und Warmwasser je m² als heute benötigt (Abbildung 1.12b).

Im Industriesektor müssen bis 2030 CO₂-neutrale Verfahren vom Pilot- und Demonstrationsmaßstab auf industrielles Niveau skaliert und wirtschaftlich betrieben werden können. Laut Sektorleitmodell FORECAST entfällt die höchste Minderung bis 2030 mit mehr als 30 MtCO₂ auf den Brennstoffwechsel (Dampf und Öfen) hin zu Strom, Wasserstoff und Gas, deren Bereitstellung entsprechend gewährleistet werden sollte. In allen Szenarien verändert sich der Anlagenpark der Dampferzeugung stark⁷ und ist durch den Rückgang der Dampferzeugung aus Erdgas um etwa 50 TWh gekennzeichnet, welcher durch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen, Biomasse, Elektrodenkessel sowie Wasserstoff kompensiert wird (Abbildung 1.13c). Entsprechend steigt die Industrienachfrage nach Wasserstoff sowie Strom für Power-to-Heat-Anwendungen stark an und erreicht 2030 bis zu 66 TWh und 55 TWh in den verschiedenen Szenarien (Abbildung 1.13b). Gleichzeitig steigt die Effizienz in den verschiedenen Industriezweigen. So sinkt die eingesetzte Endenergie je Tsd. Euro Wertschöpfung zwischen 2020 und 2030 um ca. 11 % (Abbildung 1.13a).

Der erhöhte Wasserstoffbedarf in 2030, insbesondere im Bereich der Industrie, erfordert den Aufbau von Elektrolyseurkapazität sowie der Wasserstoff-Transportinfrastruktur. Bis 2030 sind laut der Leitmodelle in den verschiedenen Szenarien 6-14 GW an Elektrolyseurkapazität notwendig, wobei der Zubau nach 2030 deutlich rascher erfolgen muss (Abbildung 1.14b).

⁷ Das E-Fuel-Szenario, in welchem gasbasierte Dampferzeugung größtenteils erhalten bleibt, ist die einzige Ausnahme.

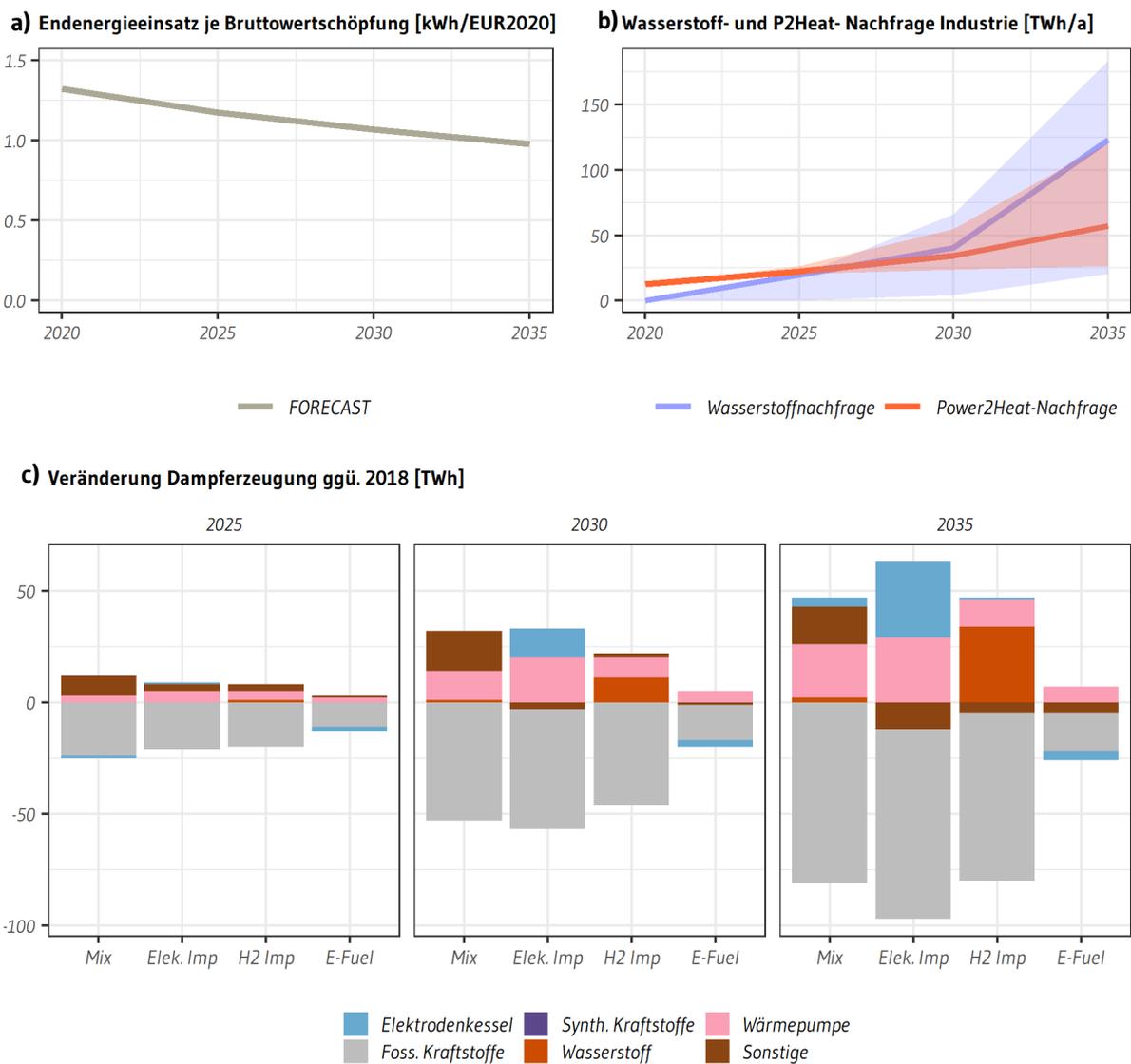


Abbildung 1.13: Ausgewählte Indikatoren für den Industriesektor: (a) Kumulierter Endenergieeinsatz je Bruttowertschöpfung der Industrie im Technologiemix-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche) im Leitmodell FORCAST; (b) Power-to-Heat- und Wasserstoffnachfrage der Industrie im Leitmodell FORCAST im Technologiemix-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche)⁸; (c) Veränderung der industriellen Dampferzeugung gegenüber 2018 im Technologiemix-Szenario aufgeteilt nach Energieträgern im Leitmodell FORCAST.

⁸ Die aktuelle Wasserstoffnutzung in Höhe von 55 TWh wird beinahe ausschließlich durch die Dampfreformierung von Erdgas bereitgestellt und ist in der energetischen und stofflichen Erdgasnutzung inkludiert.

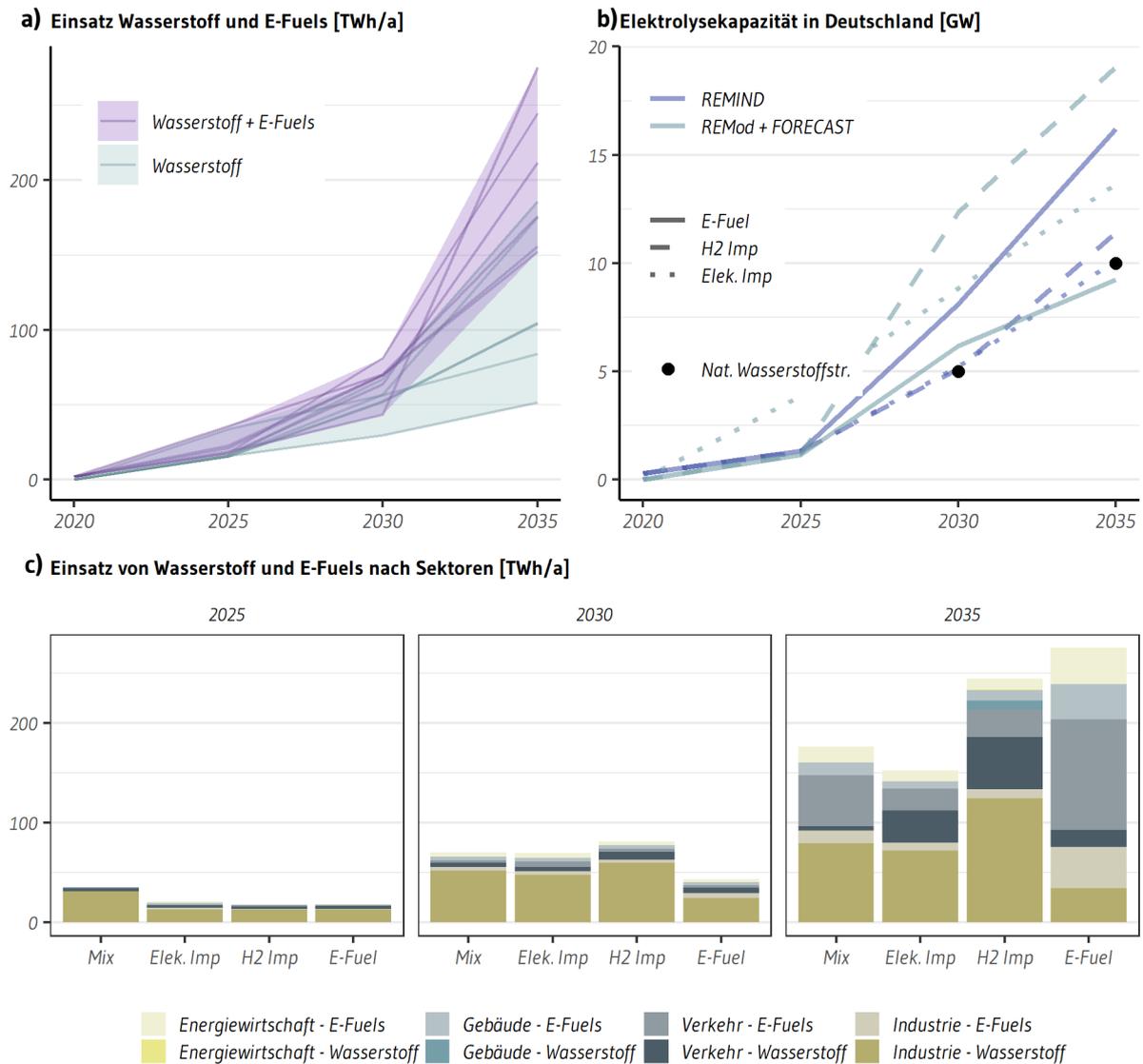


Abbildung 1.14: Ausgewählte Indikatoren für Wasserstoff und E-Fuels: (a) Bandbreite des Einsatzes von Wasserstoff und E-Fuels in den verschiedenen Modellen und Szenarien; (b) Elektrolysekapazität aufgeteilt nach Szenarien und Modellen (c) Einsatz von Wasserstoff und E-Fuels nach Sektoren im Modell RE-Mod* in ausgewählten Szenarien. (Quelle: BMWi, 2020a)⁹.

In der Mehrzahl der Szenarien liegen die inländischen Elektrolysekapazitäten deutlich über den Zielen der Nationalen Wasserstoffstrategie (Abbildung 1.14b; BMWi, 2020a). Für 2030 ergibt sich in den Zielszenarien eine Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels in Höhe von 43-81 TWh (Abbildung 1.14a), wobei der Großteil dieser Nachfrage auf Wasserstoffeinsatz in der Industrie zurück-

⁹ Bei REMod* wurden REMod-Ergebnisse durch Nachfragen zur stofflichen Nutzung auf Basis von FORECAST ergänzt. Für TIMES PaNEU stehen die Szenariendaten nicht im notwendigen Detailgrad zur Verfügung.

geht (Abbildung 1.14c). Aufgrund des bis mindestens 2030-2035 knappen Angebots für Wasserstoff und E-Fuels sollten No-regret-Anwendungen, insbesondere Stahl und Ammoniak (Wasserstoff) sowie Petro-Chemie, Flug- und Schiffsverkehr (E-Fuels), prioritär versorgt werden.

1.8 Politikimplikationen

Die vorliegende Szenarienanalyse verdeutlicht, wie tiefgreifend und umfassend die zur Erreichung der Klimaziele erforderliche Transformation ist. Die Klimaneutralität erfordert fundamentale Veränderungen in allen Energiesektoren: Energiewirtschaft, Industrie, Gebäudewärme und Verkehr. Rasches und entschlossenes Handeln in der kommenden Legislaturperiode sollte nicht nur die jährlichen Minderungsvorgaben bis 2030 im Blick haben, sondern auch Langfristinvestitionen in neue Technologien und Infrastrukturen für die Klimaneutralität im Jahr 2045 auf den Weg bringen.

Der Vergleich der sektorspezifischen Transformationswegmarken in den modellierten Szenarien mit den gegenwärtigen Politikzielen (Abschnitt 1.7) weist jedoch auf erhebliche Diskrepanzen hin. Ohne zusätzliche Maßnahmen in allen Sektoren werden die Klimaschutzziele für 2030 und 2045 aller Voraussicht nach verfehlt. Politiken und Maßnahmen sind zwar nicht explizit in den Szenarien abgebildet, dennoch lassen sich bereits folgende Erkenntnisse bzgl. politischer Handlungsbedarfe aus den Szenarienanalysen ableiten:

- **Stärkung der sektorübergreifenden CO₂-Bepreisung:** Die Lenkungswirkung eines deutlichen CO₂-Preissignal ist entscheidend, um effiziente Emissionsminderungspotenziale zu nutzen und Anreize für klimaneutrale Investitionen zu schaffen. Ein zunehmend über die Sektoren hinweg harmonisierter CO₂-Preis kann zudem eine Flexibilisierung der Sektorziele ermöglichen, die angesichts der Diskrepanz zwischen den sektoralen Minderungszielen des KSG2021 für 2030 und der sektoralen Lastenteilung in kostenoptimalen Szenarien geboten scheint.
- **Massiver Ausbau Erneuerbare Energien:** Die hohe zukünftige Stromnachfrage erfordert einen enormen Ausbau von Windkraft und PV. Bis 2030 ist voraussichtlich ein Zubau nötig, der etwa einer Verdreifachung der Ausbaugeschwindigkeit der vergangenen Dekade entspricht und somit über dem Ausbaupfad des EEG liegt. Daher ist eine Überarbeitung des EEG sowie die Neuordnung und Beschleunigung von Genehmigungsverfahren nötig. Zusätzlich müssen weitere Gesetze wie beispielsweise das Energiewirtschaftsgesetz

(EnWG2021) mit den Anforderungen einer auf Erneuerbaren Energien basierenden Versorgung in Einklang gebracht werden.

- **Schnelleren Kohleausstieg gestalten:** Der zur Erreichung der Klimaziele notwendige CO₂-Preis macht die weitere Kohleverstromung zunehmend unwirtschaftlich. Es scheint daher hochgradig unplausibel, dass bei gleichzeitiger Einhaltung der Klimaziele Kohlekraftwerke noch über 2030 hinaus substantiell zur Stromversorgung beitragen. Der Strukturwandel in den betroffenen Regionen wird sich entsprechend beschleunigen und muss gestaltet werden. Zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit werden zusätzliche gas- oder wasserstoffbefeuerte Spitzenlastkraftwerke benötigt.
- **Sektorale Transformationsprioritäten:** Zusätzlich zu einem CO₂-Preis sind sektorspezifische Politiken und Maßnahmen essentiell, um spezifische Hemmnisse der Transformationen der Nachfragesektoren zu beseitigen: Beispielsweise ist der Ausbau der Ladeinfrastruktur für den Verkehr wichtige Voraussetzung für den Hochlauf der E-Mobilität. In der Industrie müssen Anreize geschaffen werden, sodass Neuinvestitionen schon jetzt weitestgehend mit dem Ziel der Klimaneutralität kompatibel sind. Im Gebäudebereich ist ein breiter Instrumentenmix notwendig, um eine Beschleunigung der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden zu erreichen. Details zu sektorspezifischen Chancen und Herausforderungen werden in den Kapiteln 2-4 diskutiert.
- **Zügiger Ausbau der Infrastruktur:** Die modellierten Mengen an Strom, Fernwärme und Wasserstoff sowie relevanter Kenngrößen für die Sektorenkopplung wie E-Fahrzeuge und Wärmepumpen liegen über den Mengen, die in der aktuellen Infrastrukturplanung vorgesehen sind. Die Infrastruktur droht damit zum Engpass in allen Sektoren zu werden. Eine rasche Anpassung der Infrastrukturplanung und ihrer Umsetzung ist daher notwendig.
- **Priorisierte Anwendung von Erneuerbarer Wasserstoff und E-Fuels:** Ihre Verfügbarkeit wird zumindest mittelfristig bis in die 2030er-Jahre beschränkt bleiben. Entsprechend sollte ihr Einsatz für No-regret-Anwendungen, wie Wasserstoff für Stahl- und Ammoniakproduktion sowie E-Fuels für Flug- und Schiffsverkehr und die Grundstoffchemie, priorisiert werden.
- **Ganzheitliche Strategie für CO₂-Entnahmen:** Das Ziel der deutschen Klimaneutralität ist ohne CO₂-Entnahmen nicht erreichbar. Daher sollte eine nationale CO₂-Entnahme-Strategie erarbeitet werden. Diese sollte auch die Nutzung von CCS beispielsweise für Industrieprozesse umfassen und Fragen des Infrastrukturaufbau, der Speicherung und des Technologiehochlaufs in die Mitte der gesellschaftlichen Debatte rücken.

- **Innovationen für die Klimaneutralität fördern:** Das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 wird ohne weitere Innovationen nicht erreichbar sein. Diese brauchen gezielte Förderung. Wichtig sind auch in Zukunft technische Innovationen für Erneuerbare Energieträger, Energiespeicher und Wasserstofftechnologien, die zu Kostendegression und verbesserter Energie- und Materialeffizienz führen. Auch die Umstellung von Industrieprozessen auf Elektrizität und Wasserstoff erfordert anwendungsnahe Forschung. Neben dieser technischen Dimension besteht in Zukunft verstärkter systemischer Forschungsbedarf, da Klimaneutralität ein hohes Maß an Vernetzung zwischen den Sektoren und beteiligten Akteuren verlangt. Der dezentralen und flexiblen Steuerung von Energieangebot und –nachfrage kommt eine Schlüsselrolle für die Integration variabler erneuerbarer Stromerzeugung zu, was technische, digitale und sozioökonomische Innovationen erfordert.

Box: CO₂-Grenzvermeidungskosten in den Szenarien

Die Grenzvermeidungskosten bezeichnen die Kosten für die letzte und damit teuerste CO₂-Vermeidungsmaßnahme zu einem gegebenen Zeitpunkt. Sie sind damit ein Maß für den Handlungsdruck, um die Minderungsziele zu erreichen. Über die Höhe der Grenzvermeidungskosten für 2030 besteht Unsicherheit: Je nach Modell betragen diese für 2030 im Zielerreichungsszenario *Technologiemix* 140 Euro/tCO₂ (TIMES PanEU), 270 Euro/tCO₂ (NEWAGE) oder 370 Euro/tCO₂ (REMIND) (siehe Abbildung 1.15). Der Grund für diese Unterschiede liegt (1) in unterschiedlichen Technologie-Annahmen, (2) Annahmen zu Trägheiten in der Transformation, z. B. zum Hochlauf neuer Technologien und Infrastrukturen, (3) Annahmen zur Realisierbarkeit von stringenten Energieeffizienzmaßnahmen, und (4) Annahmen zu zusätzlichen umgesetzten Politikmaßnahmen, z. B. Flottengrenzwerten im Verkehr.

Die Ergebnisse deuten auf die Notwendigkeit höherer CO₂-Preise hin: Selbst die niedrigsten abgeschätzten Grenzvermeidungskosten sind mehr als doppelt so hoch wie die aktuellen CO₂-Preise im EU-ETS und im Bundesemissionshandelsgesetz; im Durchschnitt sind sie mehr als vier Mal so hoch.

Allerdings können die zur Zielerreichung notwendige CO₂-Preise geringer ausfallen als die Grenzvermeidungskosten, wenn zusätzliche Politikmaßnahmen umgesetzt werden, die auf anderem Weg die Nutzung von Minderungsoptionen mit hohen Grenzvermeidungskosten induzieren (Bertram et al., 2015; Stiglitz, 2019). Beispiele hierfür sind Emissionsgrenzwerte für die Neuwagen-

flotte, eine stärkere Regulierung und Subventionierung von Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich oder Differenzkontrakte für Emissionsminderungen der Industrie (Richstein and Neuhoff, 2019). Die detaillierte Analyse der Auswirkungen verschiedener Politikansätze mit jeweils unterschiedlicher Gewichtung von CO₂-Bepreisung und anderen Maßnahmen in Bezug auf Effektivität, Kosteneffizienz und Verteilungswirkung ist Gegenstand weiterer Forschung in Ariadne.

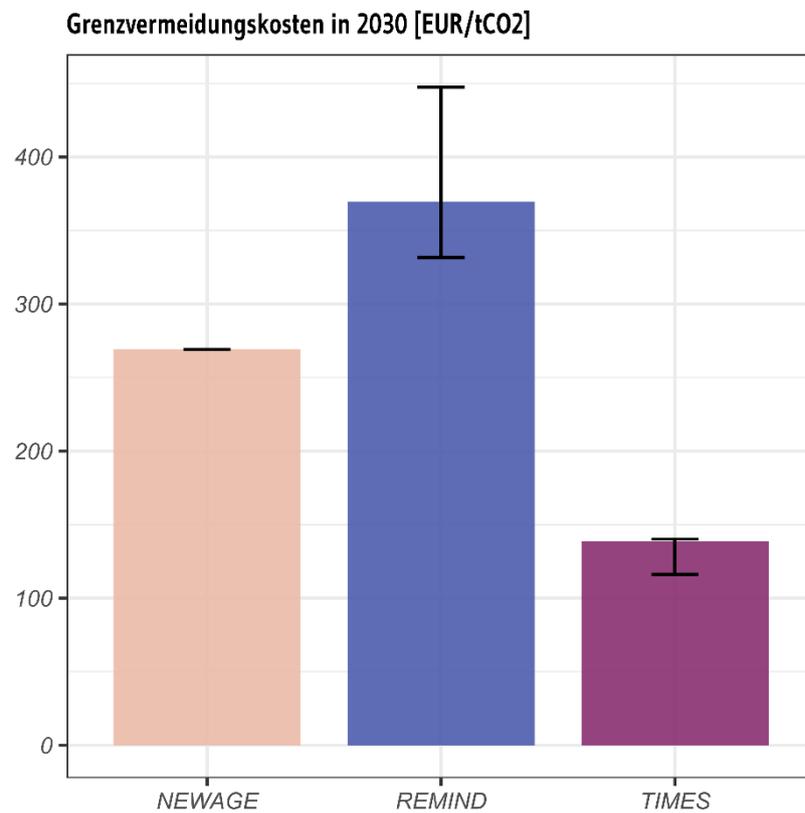


Abbildung 1.15: CO₂-Grenzvermeidungskosten in 2030 für das Technologiemix-Szenario (Balken) und die anderen Zielerreichungsszenarien (Bandbreiten).

1.9 Fazit: Weitere Forschungsbedarfe

Angesichts der zunehmenden Vielfalt von Klimaneutralitätsszenarien wird die Notwendigkeit eines strukturierten Vergleichs von Modellergebnissen immer deutlicher. Die hier vorgelegten Analysen untersuchen erstmals auf Basis eines Ensembles von Energiesystem- und Sektormodellen Pfade zur Erreichung der Klimaneutralität Deutschlands 2045. Die Studie zeigt, wie durch Integration von Gesamtsystemmodellen mit Sektormodellen einerseits relevante Wechselwirkungen zwischen den Sektoren berücksichtigt und andererseits Details der sektoralen Transformation ausbuchstabiert werden können.

Der in dieser Studie vorgestellte Modellvergleich sollte in dieser Hinsicht als "proof-of-concept" gesehen werden. Allerdings verbleiben eine Reihe von weiteren Forschungsbedarfen, die teilweise bereits durch andere Ariadne-Forschungsaktivitäten abgedeckt sind, teils in Folgestudien angegangen werden müssen:

- **Erweiterung des Lösungsraums:** Die hier vorgestellten Szenarien zeigen eine plausible Bandbreite künftiger Entwicklungen bezüglich direkter und indirekter Elektrifizierung. Gleichzeitig können sie nicht den Anspruch auf eine vollständige Abdeckung des Lösungsraums erheben. Weitere Szenarien sollten beispielsweise die Möglichkeiten und Grenzen einer stärker auf Energieeffizienz und Lebensstiländerungen ausgerichteten Klimaschutzstrategie beleuchten oder das Potenzial einer weitergehenden Nutzung von CCS und technischen CO₂-Senken untersuchen.
- **Granularität der Systemtransformation:** Spezifische Aspekte der Energiewende müssen im Szenarienkontext konkreter ausbuchstabiert werden, um den damit einhergehenden Herausforderungen begegnen zu können. Prominent zu nennen sind der Infrastrukturausbau für Stromübertragungs- und Verteilnetze, Wasserstoffnetze, Wärmenetze und CO₂-Transport. Zudem wird durch eine tiefere Integration zwischen Sektormodellen und Gesamtsystemmodellen eine insgesamt realistischere Abbildung der Systemdynamik sowie relevanter Chance und Herausforderungen erreicht.
- **Vertiefende Modellvergleiche:** Durch eine breitere Abdeckung kann ein strukturierter Vergleich nicht nur basierend auf den Ariadne-Modellen, sondern auch unter Einbezug weiterer in prominenten Szenarienstudien genutzten Modellsysteme erreicht werden. Dadurch werden Unterschiede in Annahmen und Implikationen verschiedener Klimapfadepfade deutlich (ESYS et al., 2019; Wietschel et al., 2021).

- **Politiken und Maßnahmen:** Angesichts der durch die Szenarien aufgezeigten enormen Herausforderungen bezüglich der systemischen Transformation stellt sich nun in verschärftem Maße die Frage nach geeigneten Politiken und Maßnahmen, um den Weg zur Klimaneutralität zu ebnen. Die Untersuchung von geeigneten Politikinstrumenten ist bereits Gegenstand der Forschung in Ariadne und anderen Projekten (Berneiser et al., 2021; Edenhofer et al., 2019; Fahl et al., 2021; Perino et al., 2021; Richstein and Neuhoff, 2019). Die weitere Integration dieses Forschungsstrangs mit der Szenarienanalyse zur Klimaneutralität ist ein wichtiger Schwerpunkt künftiger Forschung.

Literaturangaben

- AGEB, 2020a. Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2018 und 2019 sowie zusammenfassende Zeitreihen zum Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken für Jahre von 2009 bis 2019. AGENB [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_19_v3.pdf.
- AGEB, 2020b. Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019. Stand: März 2020. AGENB [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2019_20200325_d t.pdf.
- Ausfelder F, Drake F-D, Erlach B, Fishedick M, Henning HM, Kost CP, Münch W, Pittel K, Rehtanz C, Sauer J, et al., 2017. „Sektorkopplung“ - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. acetech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V, München (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Analyse_Sektorkopplung.pdf.
- Benndorf R, Bernicke M, Bertram A, Butz W, 2013. Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf.
- Berneiser J, Burkhardt A, Alexander R, Köhler B, Meyer R, Sommer S, Yilmaz Y, Herkel S, 2021. Maßnahmen und Instrumente für eine ambitionierte, klimafreundliche und sozialverträgliche Wärmewende im Gebäudesektor – Teil 1: Analyse der Herausforderungen und Instrumente im Gebäudesektor. Ariadne-Hintergrund. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/herausforderungen-und-instrumente-im-gebauedesektor/>.
- Bertram C, Luderer G, Pietzcker RC, Schmid E, Kriegler E, Edenhofer O, 2015. Complementing carbon prices with technology policies to keep climate targets within reach. Nature Climate Change, 5(3):235–239 DOI: 10.1038/nclimate2514.
- BMU, 2021a. Treibhausgasemissionen sinken 2020 um 8,7 Prozent. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/treibhausgasemissionen-sinken-2020-um-87-prozent>.
- BMWi, 2021. Zahlen und Fakten: Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung. Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi. Stand 27.09.2021. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=135.
- BMWi, 2020a. Die Nationale Wasserstoffstrategie. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>.
- BMWi, 2019a. Langfrist- und Klimaszenarien. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html>.
- BWP, 2020. Branchenstudie 2021: Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen. Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bcpagflip/BWP_Branchenstudie2021_Update.pdf.
- dena, 2018. dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf.

- Edenhofer O, Flachsland C, Kalkuhl M, Knopf B, Pahle M, 2019. Optionen für eine CO₂-Preisreform. MCC-PIK-Expertise für den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Working%20Paper/2019_MCC_Optionen_f%C3%BCr_eine_CO2-Preisreform_final.pdf.
- EEG, 2021. EEG 2021 - Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. [Aufruf am: 05.09.2021] URL: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html.
- Energieeffizienzstrategie 2050, 2019. Energieeffizienzstrategie 2050. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.html>.
- ESYS, BDI, dena, 2019. Expertise bündeln, Politik gestalten – Energiewende jetzt! Essenz der drei Grundsatzstudien zur Machbarkeit der Energiewende bis 2050 in Deutschland. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/impulspapier-studienvergleich>.
- European Green Deal, 2019. EUR-Lex - 52019DC0640 - EN - EUR-Lex. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.
- Fahl U, Hufendiek K, Kittel L, et al., 2021. Kurzdossier: Industriegewende - Wettbewerbseffekte und Carbon Leakage. Neue Politikmaßnahmen im Zuge des Europäischen Green Deal. | Ariadne. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/kurzdossier-carbonleakage/>.
- Friedlingstein P, O’Sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Hauck J, Olsen A, Peters GP, Peters W, Pongratz J, Sitch S, et al., 2020. Global Carbon Budget 2020. Earth System Science Data, 12(4):3269–3340 DOI: 10.5194/essd-12-3269-2020.
- Gerbert P, Herhold P, Burchardt J, Schönberger S, Rechenmacher F, Kirchner A, Kemmler A, Wunsch M, 2018. Klimapfade für Deutschland. Studie von The Boston Consulting Group und Prognos AG im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie. BCG, The Boston Consulting Group [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://web-assets.bcg.com/e3/06/1c25c60944a09983526ff173c969/klimapfade-fuer-deutschland.pdf>.
- Hein F, Litz P, Graichen P, 2021. Abschätzung der Klimabilanz Deutschlands für das Jahr 2021. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.agora-energiawende.de/veroeffentlichungen/abschaetzung-der-klimabilanz-deutschlands-fuer-das-jahr-2021/>.
- Hornberg C, Niekisch M, Calliess C, Kemfert C, Lucht W, Messari-Becker L, Rotter VS, 2020. Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.html.
- IPCC, 2014. Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press DOI: 10.1017/CBO9781107415416.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf.
- Kriegler E, Petermann N, Krey V, Schwanitz VJ, Luderer G, Ashina S, Bosetti V, Eom J, Kitous A, Méjean A, et al., 2015. Diagnostic indicators for integrated assessment models of climate policy. Technological Forecasting and Social Change, 90:45–61 DOI: 10.1016/j.techfore.2013.09.020.
- KSG, 2021. Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl121s3905.pdf.

- KSG, 2019. Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>.
- KSP, 2019. Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>.
- NEP2030, 2019. Bestätigung Netzentwicklungsplan 2019-2030. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP2019-2030_Bestaetigung.pdf.
- NEP2035, 2021. Netzentwicklungsplan Strom 2035 Version 2021, zweiter Entwurf. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2035_V2021_2_Entwurf_Zahlen-Daten-Fakten_0.pdf.
- Perino G, Willner M, Pahle M, 2021. Analyse: Den EU-Emissionshandel zukunftsfähig gestalten. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-emissionshandel-zukunftsfahig-gestalten/>.
- Porthos, 2021. Porthos Project. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.porthosco2.nl/en/project/>.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2021. Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf.
- Richstein JC, Neuhoﬀ K, 2019. CO₂-Differenzverträge für innovative Klimalösungen in der Industrie. DIW Berlin [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.679524.de/diw_aktuell_23.pdf.
- Rogelj J, Shindell D, Jiang K, Fifita S, Forster P, Ginzburg V, Handa C, Kheshgi H, Kobayashi S, Kriegler E, et al., 2018. Chapter 2: Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. In: Global Warming of 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.ipcc.ch/report/sr15/>.
- Schellnhuber HJ, Rahmstorf S, Winkelmann R, 2016. Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Clim Change*, 6(7):649–653 DOI: 10.1038/nclimate3013.
- Sensfuß F, Lux B, Bernath C, et al., 2021. Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/LFS_Kurzbericht.pdf.
- 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>.
- Stiglitz JE, 2019. Addressing climate change through price and non-price interventions. *European Economic Review*, 119:594–612 DOI: 10.1016/j.eurocorev.2019.05.007.
- Thrän D, Lauer M, Dotzauer M, Oehmichen K, Majer S, Millinger M, Jordan M, 2019. Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/technoekonomische-analyse->

- und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- UBA, 2021a. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2019. Climate Change 23/2020. [Aufruf am: 30.09.2021] URL:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_23-2020_nir_2020_en_0.pdf.
- UBA, 2021b. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid - Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020. Climate Change, 45/2021. [Aufruf am: 30.09.2021] URL:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021_0.pdf.
- UNEP, 2019. The Emissions Gap Report 2019. UNEP, Nairobi, Kenya.
- UNFCCC, 2015. Paris Agreement. [Aufruf am: 30.09.2021] URL:
http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php.
- Wietschel M, Zheng, L., Arens, M., Hebling, C., Ranzmeyer, O., Schaadt, A., Hank, C., Sternberg, A., Herkel, S., Kost, C., et al., 2021. Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. [Aufruf am: 30.09.2021] URL:
https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/Metastudie_Wasserstoff_Abschlussbericht.pdf.



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