

Kopernikus-übergreifende AG Szenarien

KOPERNIKUS-
SZENARIENVERGLEICH –
ROBUSTE EIGENSCHAFTEN VON
KLIMASCHUTZPFADEN ZUR
TREIBHAUSGASNEUTRALITÄT 2045
UND RELEVANTE UNSICHERHEITEN



GEFÖRDERT VOM

KOPERNIKUS
>>PROJEKTE
Die Zukunft unserer Energie



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Der vorliegende Bericht (Produkt 3) fasst die Kernergebnisse des Szenarienvergleichs der Kopernikus-übergreifenden AG Szenarien zusammen.

Autorinnen und Autoren:

Koordinierende Autorinnen und Autoren

Ariadne: **Dominika Sörgel**¹ (PIK, Potsdam), **Gunnar Luderer** (PIK, Potsdam)

ENSURE: Polina Emelianova (EWI, Köln), Matthias Koch (Öko-Institut, Freiburg), Christof Timpe (Öko-Institut, Freiburg)

P2X: Franz Bauer (OTH Regensburg), Michael Sterner (OTH Regensburg)

Modelliererinnen und Modellierer

Ariadne: Fhg-ISE, Freiburg: Julian Brandes, Markus Kaiser, Christoph Kost

Fhg-ISI, Karlsruhe: Andrea Herbst, Marius Neuwirth, Matthias Rehfeldt

IER Stuttgart: Markus Blesl, Alexander Burkhardt, Ulrich Fahl

PIK, Potsdam: Frederike Bartels, Falk Benke, Chris Gong, Robin Hasse, Johanna Hoppe, Adrian Odenweller, Michaja Pehl, Robert Pietzcker, Felix Schreyer, Falko Ueckerdt, Pascal Weigmann

ENSURE: EWI Köln: Julian Keutz

Öko-Institut, Freiburg: Malte Bei der Wieden

P2X: TU München: Julia Gawlick

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Szenariendaten stehen zur Verfügung unter:

<https://data.ece.iiasa.ac.at/kopernikus-public>

Ort:	Potsdam
Datum:	13.11.2023

¹ E-Mail: dsoergel@pik-potsdam.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	4
Einleitung	5
Übersicht über die gezeigten Szenarien und Modelle	7
Detailansicht Indikatoren	14
1. <i>Gesamtsystem</i>	14
1.1. Fossiler Primärenergieverbrauch.....	15
1.2. Primärenergieverbrauch Kohle.....	16
1.3. Primärenergieverbrauch fossiles Erdgas.....	17
1.4. Primärenergieverbrauch fossiles Erdöl.....	18
1.5. Endenergienachfrage.....	19
1.6. Elektrifizierung der Endenergie.....	20
2. <i>Energiewirtschaft</i>	22
2.1. Emissionsintensität der Stromerzeugung.....	22
2.2. Stromerzeugung (gesamt).....	23
2.3. Erneuerbare Stromerzeugung (aus Photovoltaik und Wind).....	24
2.4. Stromerzeugung aus Wind (auf See und an Land).....	26
2.5. Stromerzeugung aus Photovoltaik (PV).....	27
2.6. Kohleverstromung.....	28
3. <i>Verkehrssektor</i>	30
3.1. Benzin- und Dieserverbrauch im Verkehrssektor.....	30
3.2. Bestand an vollelektrischen Pkw.....	32
3.3. Anteil von vollelektrischen Autos am Pkw-Bestand.....	33
4. <i>Industriesektor</i>	34
4.1. Fossiler Erdöl-, Kohle- und Erdgasverbrauch des Industriesektors.....	34
5. <i>Gebäudesektor</i>	36
5.1. Endenergieverbrauch des Gebäudesektors.....	36
5.2. Erdöl-, Kohle- und Erdgasverbrauch im Gebäudesektor.....	37
6. <i>Wasserstoff und E-Fuels</i>	39
6.1. Nachfrage nach Wasserstoff und Wasserstoffderivaten.....	39
6.2. Wasserstoffnachfrage.....	40
6.3. Einheimische Wasserstoffproduktion via Elektrolyse.....	41
6.4. Wasserstoffimporte.....	43
6.5. Importe von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten.....	44
Fazit	45
Quellen	46
Anhang – zusätzliche Indikatoren	47
A.1 <i>Installierte Netto-Leistung von Windenergieanlagen auf See und an Land</i>	48
A.2 <i>Installierte Netto-Leistung von Photovoltaik</i>	49
A.3 <i>Kohle in der Endnutzung</i>	50
A.4 <i>Stromverbrauch der Endnutzungssektoren</i>	51
A.5 <i>Anzahl von Wärmepumpen im Gebäudesektor</i>	52
A.6 <i>Wasserstoffangebot</i>	53
A.7 <i>Angebot an Wasserstoff und Wasserstoffderivaten</i>	54

Zusammenfassung

Im Rahmen der vier Kopernikus-Projekte – Ariadne, ENSURE, P2X und SynErgie – wird die Transformation des deutschen Energiesystems hin zur Klimaneutralität analysiert. Im vorliegenden Bericht werden hierbei robuste Kernaussagen und relevante Unsicherheiten derjenigen Szenarien der Kopernikus-Schwesterprojekte dargestellt, die zur Zielsetzung die Klimaneutralität 2045 haben. Hierbei liegt der Fokus auf Indikatoren, die eine besonders hohe klimapolitische Relevanz haben. Ein hohes Maß an Robustheit zeigt sich in folgenden Bereichen:

- Die **Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien wird bis 2045 um einen Faktor ~4-8 gegenüber 2020 vervielfacht**. In allen Szenarien sinkt die Emissionsintensität der Stromerzeugung auf unter 100 g CO₂/kWh in 2030 und erreicht Null um ca. 2040. In fast allen Szenarien geht diese Entwicklung mit einem **kompletten Ausstieg aus der Kohleverstromung** bis 2035 einher.
- In allen Szenarien erfordert die Erreichung der Klimaneutralität den **fast vollständigen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger über alle Sektoren hinweg bis 2045**.
- Die **direkte Elektrifizierung der Energienutzung hat in allen Szenarien und Sektoren eine zentrale Bedeutung**. Von aktuell 20% steigt der Anteil des Stroms an der Endenergie bis 2045 auf 46-73%.
- Über alle Szenarien hinweg zeigt sich ein **deutlicher Rückgang des Endenergieverbrauchs**. Bis 2045 sinkt dieser sowohl durch klassische Effizienzmaßnahmen als auch durch Effizienzeffekte der Elektrifizierung um ~40 bis 50%.
- Alle Szenarien zeigen einen hohen Bedarf an **Wasserstoff und Wasserstoffderivaten, der bis 2045 auf 330-670 TWh ansteigt**. Allerdings bestehen **Unterschiede zwischen den Szenarien bezüglich der Verwendung** (In welcher Form? In welchen Sektoren?), **der Herkunft** und auch **der mittelfristigen Verfügbarkeit während der 2030er Jahre**.
- **Ausschlaggebende Annahmen** sind unter anderen die **Höhe der Nachfrage** (Fortschreibung aktueller Trends vs. Suffizienz) und die **Herkunft Erneuerbarer Energien** (heimische Nutzung vs. Import).

Insgesamt zeigt sich an folgendem Bericht der große Wert von Szenarienvergleichen: Neben den robusten Eigenschaften der Zielszenarien lassen sich auch Bereiche mit größeren Unsicherheiten identifizieren, die auf die Notwendigkeit adaptiver Politikansätze und weiteren Forschungsbedarf hinweisen.

Einleitung

Zur Erreichung der im Klimaschutzgesetz 2021 (Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), 2021) festgelegten Treibhausgasneutralität Deutschlands bis zum Jahr 2045 bedarf es einer grundlegenden und tiefgreifenden Transformation des gesamten Energiesystems. Diese wird in den vier Kopernikus-Projekten aus unterschiedlichen Blickwinkeln beleuchtet:

- Im Projekt **Ariadne** liegt der Fokus auf dem Gesamtsystem. In einem gemeinsamen Lernprozess zwischen Wissenschaft und Gesellschaft wird die Wirkung von politischen Maßnahmen sowohl in den einzelnen Sektoren als auch im Gesamtsystem analysiert.
- Im Projekt **ENSURE** wird Technik für die zukünftigen Stromnetze entwickelt und erprobt. Die sozio-technische Transformation mit breiter gesellschaftlicher Trägerschaft ist gerade hier ein zentraler Baustein für den Erfolg der Energiewende.
- Das Projekt **P2X** fokussiert sich auf die Rolle von synthetischen Energieträgern und -stoffen und untersucht hierbei die Umwandlung von Kohlendioxid, Wasser und erneuerbarem Strom in Gase, Kraftstoffe, Chemikalien und Kunststoffe.
- Im Projekt **SynErgie** liegt der Fokus auf der Industrie. Es wird insbesondere analysiert, wie energieintensive Industrieprozesse flexibilisiert und an die variable Verfügbarkeit von Erneuerbaren Energien angepasst werden können.

In den vier Schwesterprojekten gibt es dabei **unterschiedliche Bedarfe für Szenarien und Szenariarbeiten**: Während für einige Kopernikus-Projekte Szenarien als Instrument zur Bewertung von Technologien oder Technologieportfolios verwendet werden, nutzen andere Kopernikus-Projekte Szenarien als ein Instrument zur (gesellschaftlichen und politischen) Entscheidungsunterstützung. **In der Kopernikus-übergreifenden AG Szenarien erfolgt die Abstimmung der den Szenarien in den Einzelprojekten zugrundeliegenden Storylines und deren Gegenüberstellung.**

Da die Entwicklung quantitativer Transformationspfade sowohl für das Gesamtsystem als auch einzelne Teilbereiche beziehungsweise Sektoren ein zentraler Bestandteil des Projekts Ariadne ist, wurden diese Pfade den anderen Projekten zur Verfügung gestellt, ENSURE und P2X entwickeln zudem eigene Szenarien. Dabei liegt ein Fokus insbesondere auf der Langfristperspektive bis 2045, um potenzielle „Lock-in“-Effekte, die sich aus kurzfristig sinnvoll erscheinenden Maßnahmen ergeben könnten, zu identifizieren. Im vorliegenden Bericht werden dementsprechend Zielszenarien betrachtet, die die Klimaneutralität Deutschlands im Jahr 2045 gemäß KSG zum Ziel haben. Dies hat dann wiederum Auswirkungen auf die Ausprägung der Storylines für das Jahr 2030. Hierbei liegt der Fokus insbesondere auf dem Vergleich der in den Projekten erarbeiteten Szenarien.

Im Jahr 2022 wurde im Rahmen der AG Szenarien ein *Mapping-Dokument* entwickelt (Timpe & Fahl, 2022). Dort erfolgten ein Vergleich der entwickelten Projektionen und der getroffenen Annahmen in den jeweiligen Einzelprojekten auf Basis eines abgestimmten Sets an Kenngrößen und Charakteristika eines umfassenden Sets an Szenarien sowie eine erste Einordnung der Ergebnisse.

Für eine harmonisierte Erfassung und Auswertung der Szenariendaten in den Schwesterprojekten wurde dafür eine gemeinsame **Kopernikus-Szenariendatenbank**² aufgesetzt. Dort können die eingestellten Daten eingesehen und im Kopernikus-Szenarienexplorer visualisiert werden.

Im hier **vorliegenden Bericht (Produkt 3 der AG Szenarien)** werden aus der Vielzahl der Szenarien der Kopernikus-Projekte diejenigen ausgewählt, die zur Zielsetzung die Klimaneutralität 2045 haben. Dabei wurden insbesondere **robuste Kernaussagen und relevante Unsicherheiten** herausgearbeitet. Der Fokus liegt also auf einer Auswahl von Indikatoren, die sich durch besonders hohe klimapolitische Relevanz auszeichnen. Bei zahlreichen dieser Indikatoren ergibt sich über die verschiedenen Kopernikus-Szenarien hinweg ein hohes Maß an Robustheit. Bei einigen anderen Indikatoren deutet eine größere Bandbreite der Modellergebnisse darauf hin, dass die Unsicherheit bezüglich der Systementwicklung besonders hoch ist.

In einem **zweiten Produkt der AG Szenarien** wird ein vollumfänglicher Blick auf die Szenarienergebnisse der Schwesterprojekte geworfen. Dort werden die **Ergebnisse der Berechnungen vergleichend und im Detail nebeneinander gestellt** (Fahl et al., in prep.). Zielgruppe ist hier insbesondere die wissenschaftliche Fachwelt, da einzelne Indikatoren im Detail untersucht werden. Durch seinen vertieften Detailblick in die Modellergebnisse ergänzt dieses Produkt den hier vorliegenden Bericht.

² <https://data.ece.iiasa.ac.at/kopernikus-public>

Übersicht über die gezeigten Szenarien und Modelle

Tabelle 1: Überblick über die Modelle und Szenarien der Kopernikus-Projekte im vorliegenden Bericht.

Ariadne			
Szenarien			
KN2045_Ref		KN2045_EnSov	
Modelle			
REMIND	REMod+FORECAST		TIMES PanEU
ENSURE			
Szenarien			
Szenario B „Ambitionierter Klimaschutz“	Szenario C „Europa“		Szenario D „Dezentral“
Modelle			
DIMENSION + PowerFlex + Building Star			
P2X			
Szenarien			
ImportMENA	Klimaziele Deutschland Basis	Speicher	Suffizienz
Modelle			
SPIKE + urbs			

In **Ariadne** wurden mehrere Szenarien entwickelt – in dem hier vorliegenden Dokument liegt der Fokus auf dem Referenzszenario Technologiemix (KN2045_Ref) und auf dem Energiesouveränitätsszenario (KN2045_EnSov). Hierbei erfolgten die Szenarienarbeiten im Modellvergleich, d.h. es wurden die gleichen Szenarien mit mehreren Modellen (REMIND, REMod+FORECAST, TIMES PanEU) gerechnet. Diese Berechnungen bilden dann einen Ergebniskorridor, der einen Modellvergleich ermöglicht.

Im Projekt **ENSURE** wurden zusammen mit einer Stakeholdergruppe insgesamt vier Szenarien partizipativ entwickelt. Von den aktuellsten Szenarien (entwickelt bis Oktober 2022) erfüllen drei das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 (*Szenario B „Ambitionierter Klimaschutz“, Szenario C „Europa“, Szenario D „Dezentral“*). In der Szenarienanalyse wurden drei Modelle verwendet (*DIMENSION, Building Star, PowerFlex*). Bei den ENSURE-Szenarien ergibt sich im Vergleich zu den Szenarien der beiden anderen Projekte die Besonderheit, dass ausschließlich die Stützjahre 2030 und 2045 abgebildet wurden. In den Grafiken im weiteren Verlauf wurden die zeitlichen Verläufe interpoliert dargestellt, um die Vergleichbarkeit mit den anderen Szenarien zu verbessern. Die Grundlage für die Szenarienmodellierung im Projekt ENSURE bildet das sektorübergreifende Investitionsmodell DIMENSION. Damit gekoppelt kommen zudem die Modelle Building Star (Gebäudesektor) und PowerFlex (Stromerzeugung) für eine detailliertere sektorspezifische Szenarienberechnung zum Einsatz.

Im **P2X**-Projekt wurden diverse Szenarien modelliert, die im Laufe des Vorhabens stetig aktualisiert wurden. Nachfolgend werden lediglich die vier Szenarien betrachtet, die mit dem novellierten deutschen Klimaschutzgesetz (KSG 2021) kompatibel sind (*Klimaziele Deutschland Basis, ImportMENA, Speicher, Suffizienz*). Für die Modellierung der Szenarien wurden zwei miteinander gekoppelte Energiemodelle verwendet (*SPIKE, urbs*).

In **ENSURE** und **P2X** wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Modelle gemeinsam eingesetzt, um die Ergebnisse zu erzielen.

In **SynErgie** wurden keine eigenen Szenarien entwickelt, sondern Ergebnisse von ENSURE und Ariadne verwendet.

Mehr Details zu den Szenarien und eingesetzten Modellen finden sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Detailinformationen zu den Szenarien und Modellen der Kopernikus-Schwesterprojekte.

Ariadne		
Szenarien		
<p style="text-align: center;">KN2045_Ref</p> <p>Referenzszenario Technologiemix:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einsatz eines gemischten Technologieportfolios mit direkter Elektrifizierung, Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen • Importe erneuerbar erzeugter Energien auf mittlerem Niveau • Klimaneutralität 2045, Erreichung des sektorübergreifenden Minderungsziels von -65% ggü. 1990 bis 2030 • Mehr Details in Luderer et al. (2021) 	<p style="text-align: center;">KN2045_EnSov</p> <p>Szenario mit Beendigung der Abhängigkeit von Energieimporten aus Russland unter gleichzeitiger Einhaltung der Klimaziele in 2030 und der Klimaneutralität in 2045:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausgewogener Mix an Technologien, breites Energieträgerportfolio und mittlere Energieimporte • Energiekrise: kurzfristig sehr hohe, längerfristig erhöhte Preise für fossile Energie, insbesondere für Erdgas • Begrenzte Verfügbarkeit von Erdgas bis Mitte der 2020er Jahre • Maßnahmen zur kurzfristigen Reduktion des Erdgaseinsatzes (etwa -30% bis 2025 und -50% bis 2030) • Mehr Details in Luderer et al. (2022) 	
Modelle		
<p style="text-align: center;">REMIND</p> <p>Das Modell REMIND modelliert Deutschlands Energieökonomie im Kontext der europäischen und globalen Energietransformation und Wirtschaft. Es verbindet ein intertemporales makro-ökonomisches Wachstumsmodell mit einer detaillierten Darstellung des Energiesystems und der Nachfragesektoren Verkehr, Gebäude und Transport. Die Modelldokumentation findet sich unter https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/transformation-pathways/models/remind und in Baumstark et al. (2021)</p>	<p style="text-align: center;">TIMES PanEU</p> <p>TIMES PanEU ist ein 30 Regionen umfassendes pan-europäisches Energiesystemmodell, das auf einzelstaatlicher Ebene alle an der Energieversorgung und -nachfrage beteiligten Sektoren enthält. Das Modell unterstellt bei Berücksichtigung von Restriktionen einen vollständigen Wettbewerb zwischen verschiedenen Technologien bzw. Energieumwandlungspfaden. Mehr Informationen finden sich hier: https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/modelle/times/ und in Blesl et al. (2014) und Korkmaz et al. (2020)</p>	<p style="text-align: center;">REMod+FORECAST</p> <p>REMod ist ein sektorübergreifendes Energiesystemmodell, das technisch umsetzbare und kostengünstige Klimaschutzpfade des deutschen Energiesystems bis 2050 berechnet. Die stündliche Auflösung ermöglicht eine detaillierte Modellierung von EE-Integration und Sektorenkopplung. Mehr Details finden sich hier: https://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/leistungselektronik-netze-und-intelligente-systeme/energiesystemanalyse/energiesystemmodelle-am-fraunhofer-ise/remod.html</p> <p>FORECAST ist ein „bottom-up“ Energienachfrage- und Technologiemodell des Industriesektors. Energiever-</p>

		<p>brauch, Emissionen und Kosten werden für acht Einzel-sektoren auf Prozessebene modelliert. Es ermöglicht detaillierte Analysen hinsichtlich der Struktur von Vermeidungskosten und -potenzialen im Industriesektor. Mehr Details finden sich hier: https://www.forecast-model.eu/forecast-en/index.php</p> <p>REMod+FORECAST: Das Gesamtsystemmodell REMod bildet die nicht-energetische Nutzung (Feedstocks) als einen exogen angenommenen Energiebedarf ab, der vom Energiesystem bereitgestellt werden muss. Als Annahme dienen hier die Ergebnisse zu den Feedstocks des Sektormodells FORECAST.</p>
--	--	--

ENSURE		
Szenarien		
<p style="text-align: center;">Szenario B „Ambitionierter Klimaschutz“</p> <p>Szenario B ist ein mit dem 1,5°C-Ziel kompatibles Szenario und weist dementsprechend das höchste klimapolitische Ambitionsniveau auf. Das für Deutschland im Zeitraum 2020 bis 2045 zur Verfügung stehende CO₂-Emissionsbudget beträgt 5,9 Gt CO₂. Die hieraus abgeleiteten zulässigen Treibhausgasemissionen für Deutschland im Jahr 2030 liegen bei 266 Mio. t CO₂-äq, so dass die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung übererfüllt werden.³</p>	<p style="text-align: center;">Szenario C „Europa“</p> <p>Szenario C erreicht sektorübergreifend die Klimaschutzziele und setzt dafür den Fokus auf eine europäische Integration und eine stärkere Nutzung von Wasserstoff und seinen Derivaten. Das für Deutschland im Zeitraum 2020 bis 2045 zur Verfügung stehende CO₂-Emissionsbudget beträgt 8,0 Gt CO₂. Die zulässigen Treibhausgasemissionen für Deutschland im Jahr 2030 liegen bei 424 Mio. t CO₂-äq.</p>	<p style="text-align: center;">Szenario D „Dezentral“</p> <p>Szenario D erreicht sektorübergreifend die Klimaschutzziele und setzt den Schwerpunkt auf Elektrifizierung und eine verbrauchernahe Energieversorgung. Das für Deutschland im Zeitraum 2020 bis 2045 zur Verfügung stehende CO₂-Emissionsbudget beträgt 8,0 Gt CO₂. Die zulässigen Treibhausgasemissionen für Deutschland im Jahr 2030 liegen bei 424 Mio. t CO₂-äq.</p>
Modelle		
<p style="text-align: center;">DIMENSION + PowerFlex + Building Star</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das europäische sektorübergreifende Investitionsmodell DIMENSION des EWI berechnet die kostenminimale Transformation in allen Sektoren für die Stützjahre 2030 und 2045 unter Einhaltung der Klimaziele basierend auf Typtagen (https://www.ewi.uni-koeln.de/de/methoden/dimension/). Die mit dem sektorübergreifenden Investitionsmodell DIMENSION berechneten Ergebnisse für die Stützjahre 2030 und 2045 sind in Kapitel 1 (Gesamtsystem), Kapitel 3 (Verkehrssektor), Kapitel 4 (Industriesektor) und Kapitel 6 (Wasserstoff und E-Fuels), sowie im Anhang in den Abbildungen Abb. A 1, Abb. A 2, Abb. A 3, Abb. A 4, Abb. A 6, und Abb. A 7 zu finden. Für den Stromsektor (Kapitel 2) liefert das Modell DIMENSION die Ergebnisse für das Stützjahr 2030. • Das Gebäudemodell Building Star des Öko-Instituts modelliert die Transformation des Gebäudesektors bis 2045 und berücksichtigt dabei unterschiedliche Aktivitäten bei der Sanierung der Gebäudehülle und dem Austausch der Heizungstechnologien. (https://www.oeko.de/expertise/methoden/) Die mit dem Gebäudemodell Building Star berechneten Ergebnisse für die Stützjahre 2030 und 2045 sind im Hauptteil in Kapitel 1.5 (Gebäudesektor), sowie im Anhang in Abb. A 5 zu finden. Der Strombedarf für Beleuchtung, Informations- und Kommunikationstechnik und mechanische Energie fließt in die Auswertung für den gesamten Endenergiebedarf (Abb. 5. 1) als exogene Inputgröße⁴ ein. 		

³ Daher wird dieses Szenario auch nicht als Teil der grau hinterlegten Bandbreite in den Abbildungen gezeigt, da die restlichen Szenarien alle zur Zielsetzung die Klimaneutralität 2045 haben.

⁴ Für das Stützjahr 2030 wird dabei ein Stromverbrauch in Höhe von 196 TWh und für das Stützjahr 2045 in Höhe von 167 TWh angenommen.

- Das Strommarktmodell **PowerFlex** berechnet den kostenminimalen Dispatch im europäischen Stromsystem für das Szenarienjahr 2045 in stündlicher Auflösung und unter Berücksichtigung intertemporaler Nebenbedingungen für die verschiedenen Flexibilitätsoptionen. (<https://www.oeko.de/expertise/methoden/>) Die mit dem Strommarktmodell PowerFlex berechneten Ergebnisse für das Stützjahr 2045 sind im Hauptteil in Kapitel 2 (Energiewirtschaft) zu finden.

P2X			
Szenarien			
<ul style="list-style-type: none"> In allen Szenarien wird neben den sektoralen Treibhausgasminderungszielen ein aus dem KSG 2021 abgeleitetes Emissionsbudget von maximal 10,5 Gt CO₂-äq, im Zeitraum 2019 bis 2050 für das gesamte Energiesystem vorgegeben. Zudem wird das zur Verfügung stehende Biomassepotenzial im Jahr 2050 auf das Potenzial von Abfall- und Reststoffen beschränkt und eine Steigerung des Senkenpotenzials des Sektors LULUCF von 40 Mt CO₂ pro Jahr bis zum Jahr 2045 angenommen. Weitere Details können der P2X-Roadmap 4.0 (Ausfelder & Tran, 2022) entnommen werden. Die Nachfragen in den Verbrauchssektoren Industrie, Verkehr und Gebäuden in den Szenarien „Klimaziele Deutschland Basis“, „Import MENA“ und „Speicher“ wurden als identisch vorgegeben und lediglich die Erzeugung variiert. Im Szenario „Suffizienz“ erfolgt hingegen eine Senkung der Nachfrage durch Verhaltensänderungen. 			
<p style="text-align: center;">Klimaziele Deutschland Basis</p> <p>Szenario mit den Klimaschutzzielen nach KSG 2021 mit maximaler Steigerung der Effizienz und Importen ausschließlich aus dem europäischen Ausland.</p>	<p style="text-align: center;">Import MENA</p> <p>Szenario mit den Klimaschutzzielen nach KSG 2021 mit maximaler Steigerung der Effizienz und PtX-Importen aus der MENA-Region („Middle East and Northern Africa“, d.h. Staaten Nordafrikas sowie des Nahen Ostens).</p>	<p style="text-align: center;">Speicher</p> <p>Szenario mit den Klimaschutzzielen nach KSG 2021 mit maximaler Steigerung der Effizienz, Importen ausschließlich aus dem europäischen Ausland und Beschränkung des Stromnetzausbaus.</p>	<p style="text-align: center;">Suffizienz</p> <p>Szenario mit den Klimaschutzzielen nach KSG 2021 mit maximaler Steigerung der Effizienz, Importen ausschließlich aus dem europäischen Ausland und Verhaltensänderungen.</p>
Modelle			
SPIKE + urbs			
<ul style="list-style-type: none"> Mit dem Bottom-Up-Energiesystemmodell SPIKE wird der jährliche Endenergiebedarf der Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr in Deutschland anhand einer linearen Optimierung so bestimmt, dass sich minimale volkswirtschaftliche Gesamtsystemkosten ergeben. Der berechnete Verbrauch von Strom und Wasserstoff wird nachfolgend an das Modell <i>urbs</i> übergeben. Fokus und Stärke des Modells liegen in der höchst detaillierten Abbildung der Industriezweige Deutschlands und dem daraus resultierenden Energiebedarf (v.a. Strom, Wasserstoff und Power-to-X). Der grundsätzliche Aufbau und die Funktionsweise des Energiesystemmodells ist detailliert in Ausfelder und Dura (2021) beschrieben. Beim Energiemodell urbs handelt es sich ebenfalls um ein lineares Optimierungsmodell, mit dem vor allem die Einsatz- und Ausbauplanung des Stromsystems erfolgt. Hier erfolgt die Modellierung der Kraftwerke zur Stromerzeugung, der Elektrolyseure sowie der Speicher- und Transportoptionen innerhalb Europas bzw. der MENA-Region. Die Modelldokumentation ist unter https://urbs.readthedocs.io/en/extremos/ zu finden. Weitere Informationen siehe Ausfelder und Dura (2021). 			

Detailansicht Indikatoren

Im folgenden Kapitel werden ausgewählte Indikatoren im Detail beleuchtet und die Ergebnisse der Kopernikus-Projekte dazu vergleichend nebeneinandergestellt.⁵

1. Gesamtsystem

Die Primärenergieverbräuche von Kohle, Öl und Gas zeigen die **Struktur des Ausstiegs aus fossilen Energieträgern in Deutschland**. Ein detaillierterer Blick zeigt, welche fossilen Energieträger besonders schnell durch Effizienzsteigerungen oder erneuerbare Energieträger ersetzt werden können. Außerdem wird die Endenergienachfrage des Gesamtsystems sowie deren Elektrifizierung aufgeführt.

⁵ In den meisten Abbildungen sind zusätzlich zu den Modellergebnissen, wo vorhanden, auch historische Ist-Daten eingezeichnet (schwarze Linie). Die Modellergebnisse werden auf Basis der Ist-Daten kalibriert: Im Normalfall werden die Ergebnisse der Modelle für 2020 auf den Mittelwert aus den Ist-Daten für 2019-21 angepasst. Die Harmonisierung läuft im Regelfall bis 2025 aus. Die Modelldaten wurden entsprechend für die Abbildungen harmonisiert.

1.1. Fossiler Primärenergieverbrauch

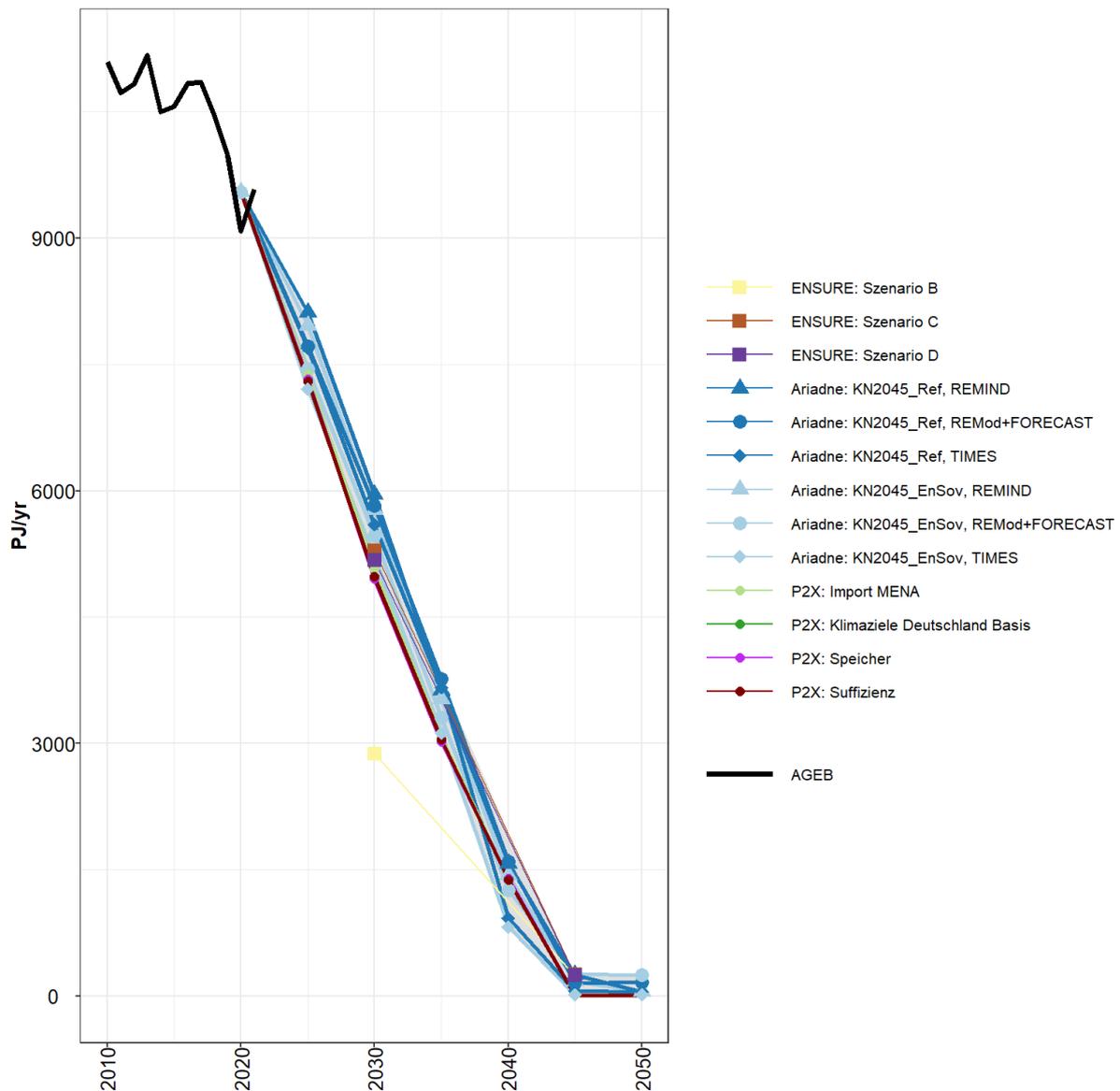


Abb. 1. 1: Fossiler Primärenergieverbrauch (Kohle, fossiles Erdgas und Erdöl).

Als robustes Bild zeigt sich über alle Szenarien hinweg ein **nahezu vollständiger Ausstieg aus den fossilen Energieträgern bis 2045**. Für einen Blick in die einzelnen fossilen Energieträger (Kohle, Erdgas und Erdöl) wird auf die folgenden Abbildungen (Abb. 1. 2, Abb. 1. 3, Abb. 1. 4) verwiesen.

1.2. Primärenergieverbrauch Kohle

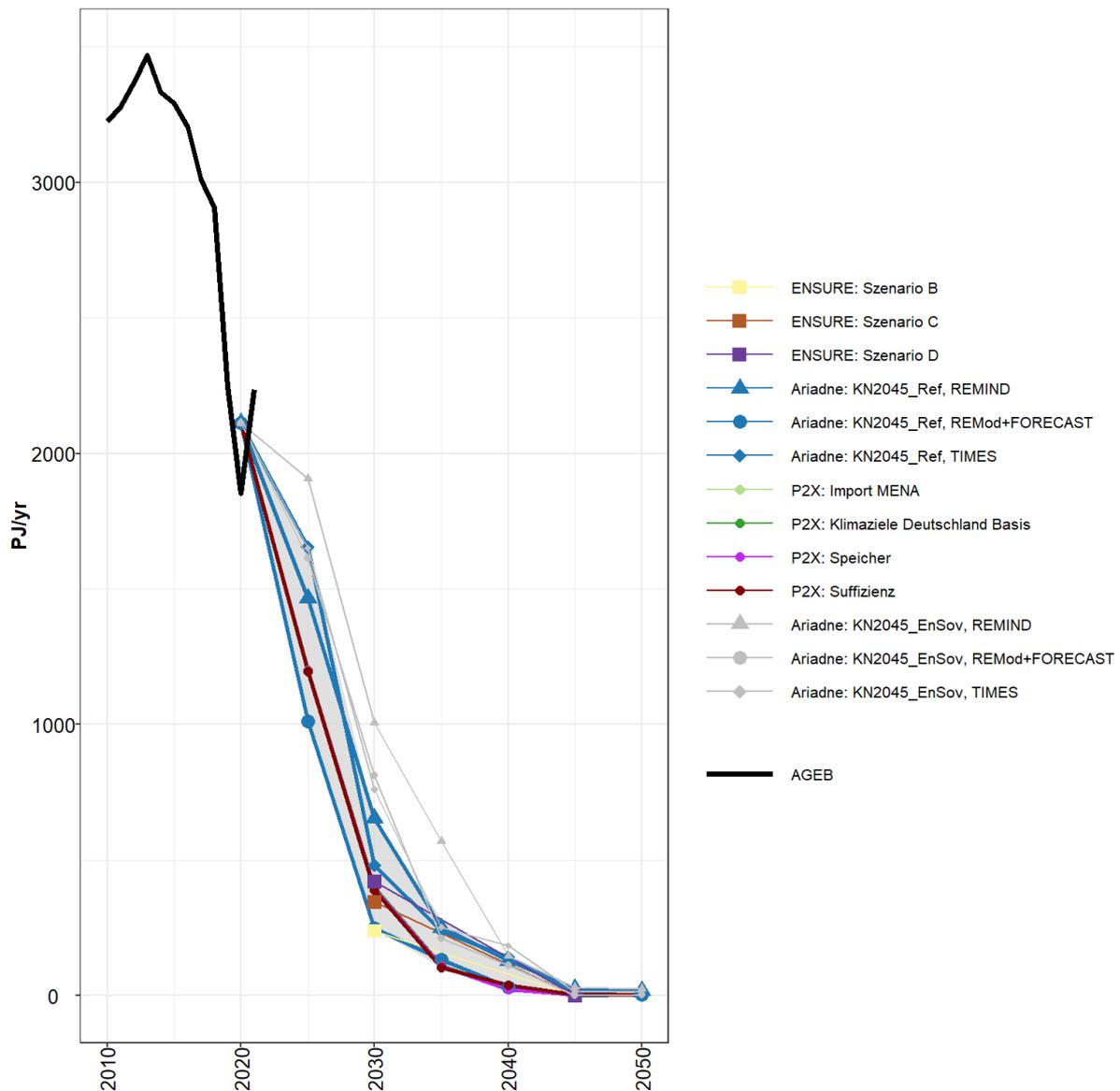


Abb. 1. 2: Primärenergieverbrauch von Kohle.

Über alle Kopernikus-Szenarien hinweg zeigt sich beim Primärenergieverbrauch von Kohle ein klares Bild: **Die Kohlenutzung wird in allen Szenarien stark zurückgefahren und bis spätestens im Jahr 2045 vollständig beendet.** Während die Kohleverstromung bis 2030 größtenteils – in manchen Szenarien auch vollständig – beendet ist (s. Abb. 2. 6), ist ein Großteil des verbleibenden Restbedarfs an Kohle auf Verbräuche in der Industrie, insbesondere Koks Kohle für die Stahlproduktion, zurückzuführen (s. Abb. A 3, mind. 90 TWh in 2020). Allerdings ist auch bei der industriellen Kohlenutzung ein deutlicher Rückgang zu verzeichnen, wobei fossile Energieträger in der Industrie entweder durch Biomasse oder Wasserstoff ersetzt oder Prozesse elektrifiziert werden müssen. Einzig im Szenario KN2045_EnSov von Ariadne verläuft der Rückgang der Kohlenutzung bis 2025 langsamer, da dort die Gaseinsparungen teilweise durch erhöhten Einsatz von Kohle kompensiert wer-

den. Die historischen Werte zeigen solch einen krisenbedingten Anstieg für das Jahr 2022. Aufgrund des striktesten Treibhausgasbudgets weist das ENSURE Szenario B „Ambitionierter Klimaschutz“ den stärksten Rückgang der Nutzung von Kohle im Jahr 2030 auf.

1.3. Primärenergieverbrauch fossiles Erdgas

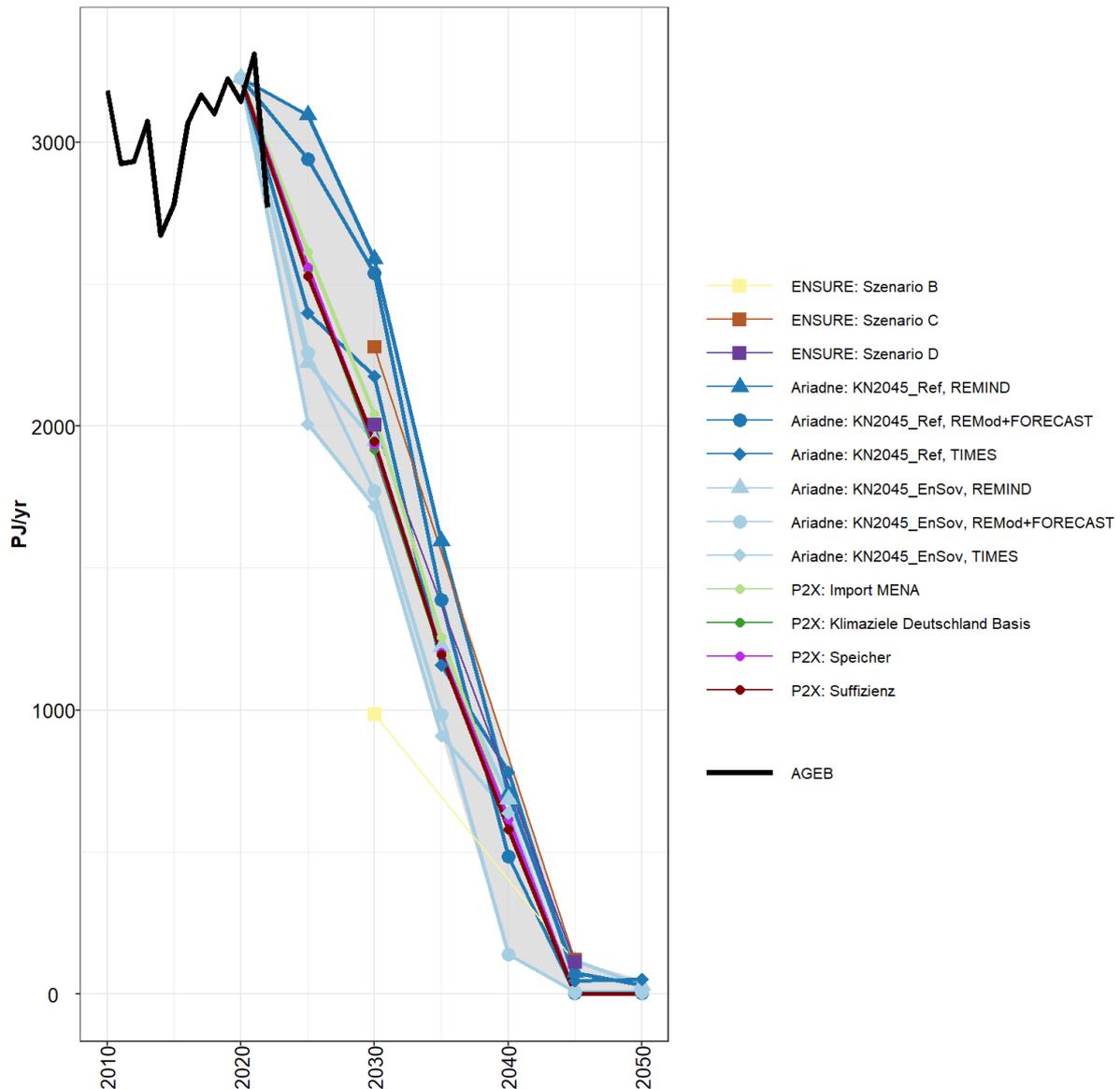


Abb. 1. 3: Primärenergieverbrauch von fossilem Erdgas.

In allen Szenarien zeigt sich auch ein **Rückgang der Erdgasnutzung**. Dieser vollzieht sich im allgemeinen langsamer als der Ausstieg aus der emissionsintensiveren Kohle. Im Szenario KN2045_EnSov von Ariadne führt die Annahme eines krisenbedingt nachhaltig erhöhten Gaspreises zu einem beschleunigten Gasanstieg. Aufgrund der sehr ambitionierten Klimaziele im Jahr 2030 im ENSURE Szenario B „Ambitionierter Klimaschutz“ zeigt dieses Szenario den stärksten Rückgang der Nutzung von fossilem Gas.

1.4. Primärenergieverbrauch fossiles Erdöl

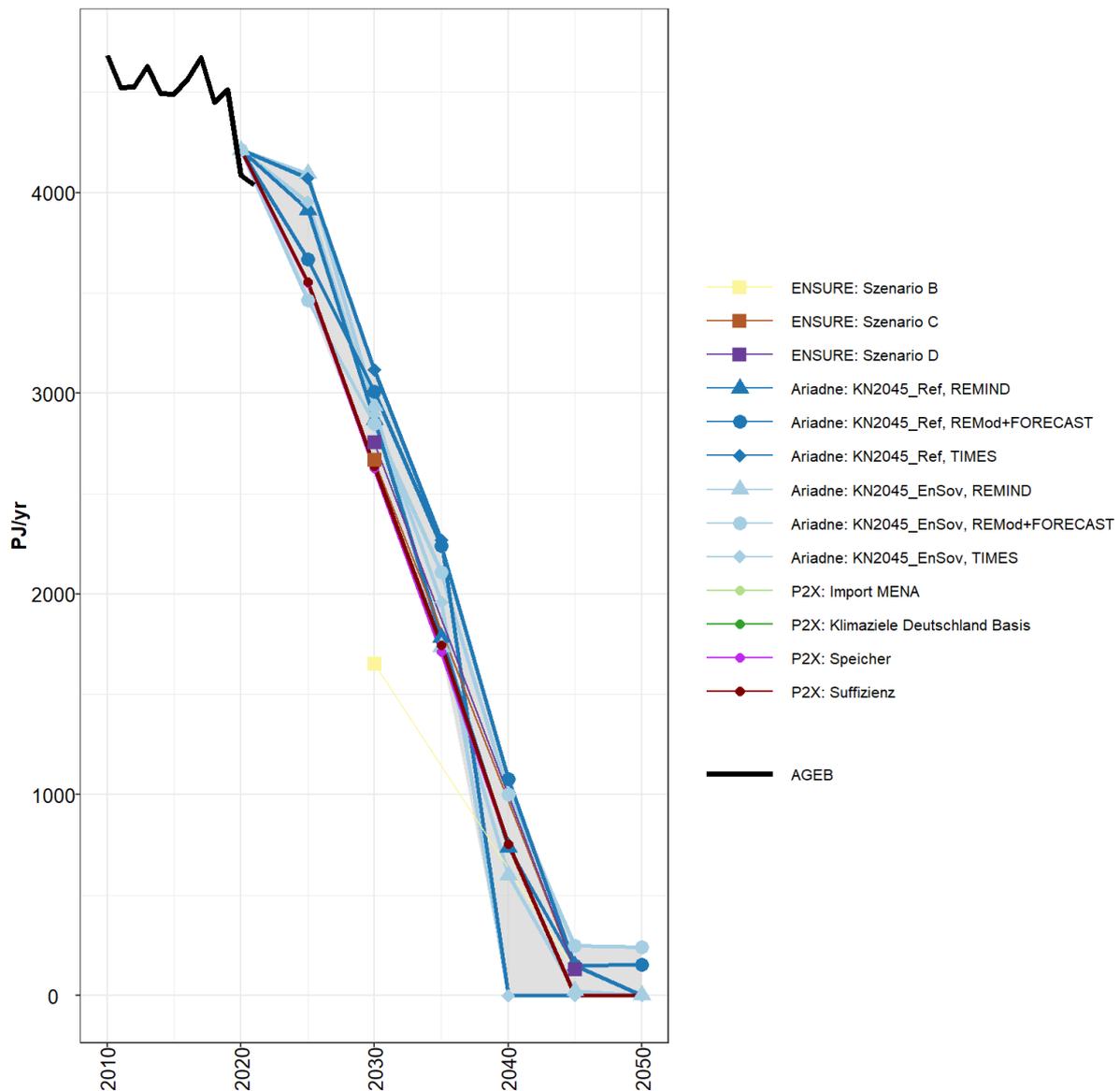


Abb. 1. 4: Primärenergieverbrauch von fossilem Erdöl.

Auch der **Primärenergieverbrauch von fossilem Erdöl geht in allen Szenarien deutlich zurück**, allerdings langsamer als die Kohlenutzung. Wesentlicher Grund dafür ist u.a., dass sich im Verkehrssektor aufgrund ihrer Lebensdauer noch längere Zeit eine vergleichsweise große Anzahl an Autos mit Verbrennungsmotor und damit fossilen Verbräuchen hält (s. Abb 3. 3 für den Anteil von Elektroautos am Pkw-Bestand – der Rest sind größtenteils Verbrenner). Zudem erfolgt vor allem in der chemischen Industrie eine vergleichsweise langsame Substitution von fossilen Mineralölprodukten durch synthetische Kohlenstoffträger auf Basis von erneuerbarem Strom. In den meisten Szenarien geht daher der Ölverbrauch erst bis zum Jahr 2045 nahezu auf Null. Einzig in den beiden Szenarien von REMod+FORECAST zeigt sich auch in 2050 noch ein Restverbrauch an fossilem Erdöl, dieses wird für den nicht-energetischen Verbrauch in der Industrie eingesetzt. Den stärksten

Rückgang des Erdölverbrauchs in der mittleren Frist verzeichnet das ENSURE Szenario B „Ambitionierter Klimaschutz“, wo synthetische Brennstoffe bereits im Jahr 2030 eingesetzt werden, um das 1,5-Grad-Ziel einzuhalten.

1.5. Endenergienachfrage

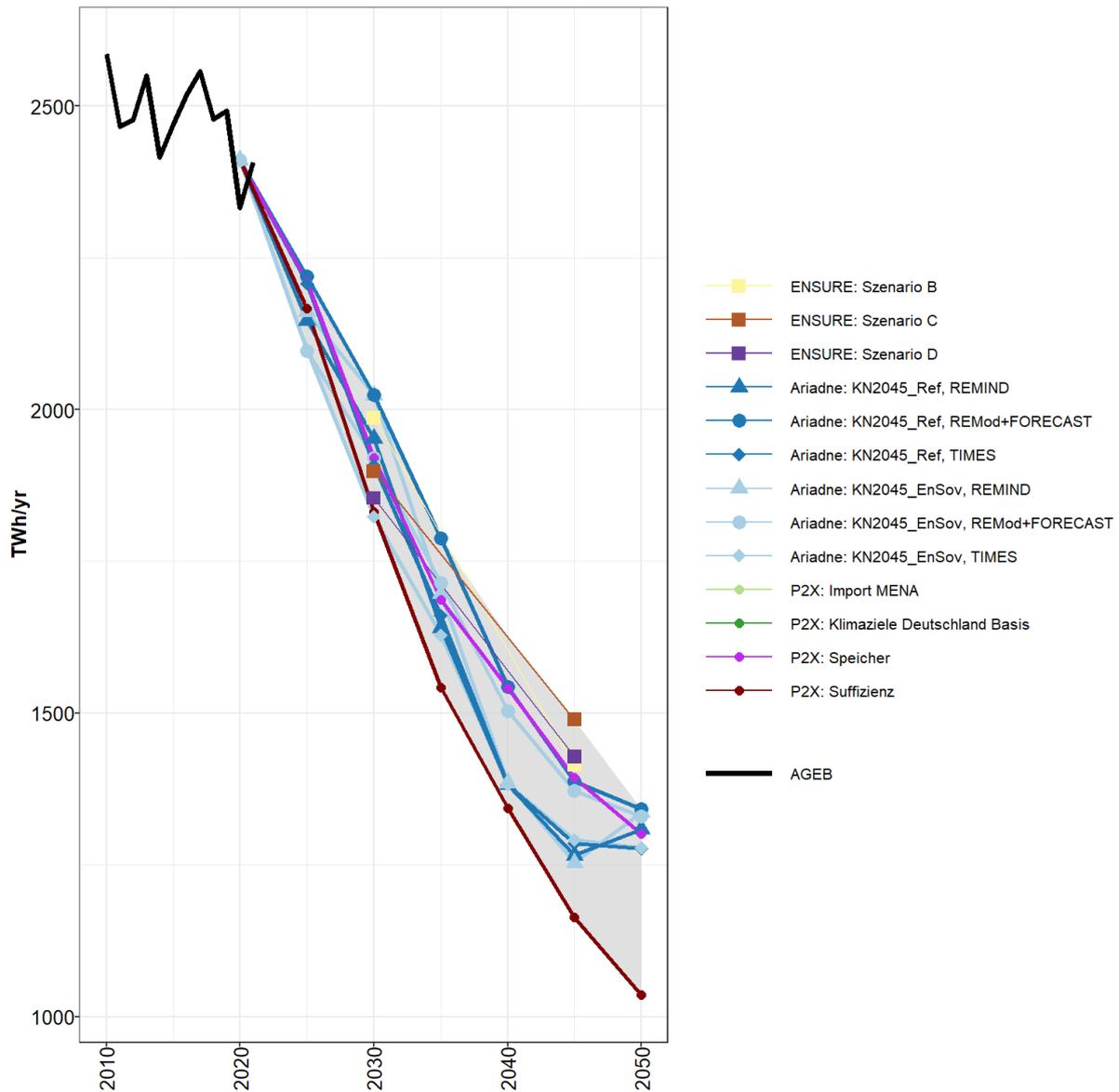


Abb. 1. 5: Endenergienachfrage des Gesamtsystems.⁶

Über alle Szenarien und Modelle hinweg zeigt sich ein **deutlicher Rückgang des Endenergieverbrauchs**. Neben **klassischen Energieeffizienzverbesserungen** führen auch **Effizienzgewinne durch Elektrifizierung** (s. Abb. 1. 6) zu einem deutlichen Rückgang der Energienachfrage. Dies ist in besonderem Maße im Gebäudesektor durch den Einsatz von Wärmepumpen (s. Abb. A 5 für die

⁶ Die historischen AGEB-Daten beinhalten – im Gegensatz zu den Modellergebnissen – auch die Umweltwärme. Allerdings macht diese im Jahr 2021 weniger als 1% der Gesamt-Endenergie aus.

Anzahl von Wärmepumpen und Abb. 5. 1 für den Endenergieverbrauch des Gebäudesektors) und im Verkehrssektor durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen (Abb 3. 3) relevant.

1.6. Elektrifizierung der Endenergie

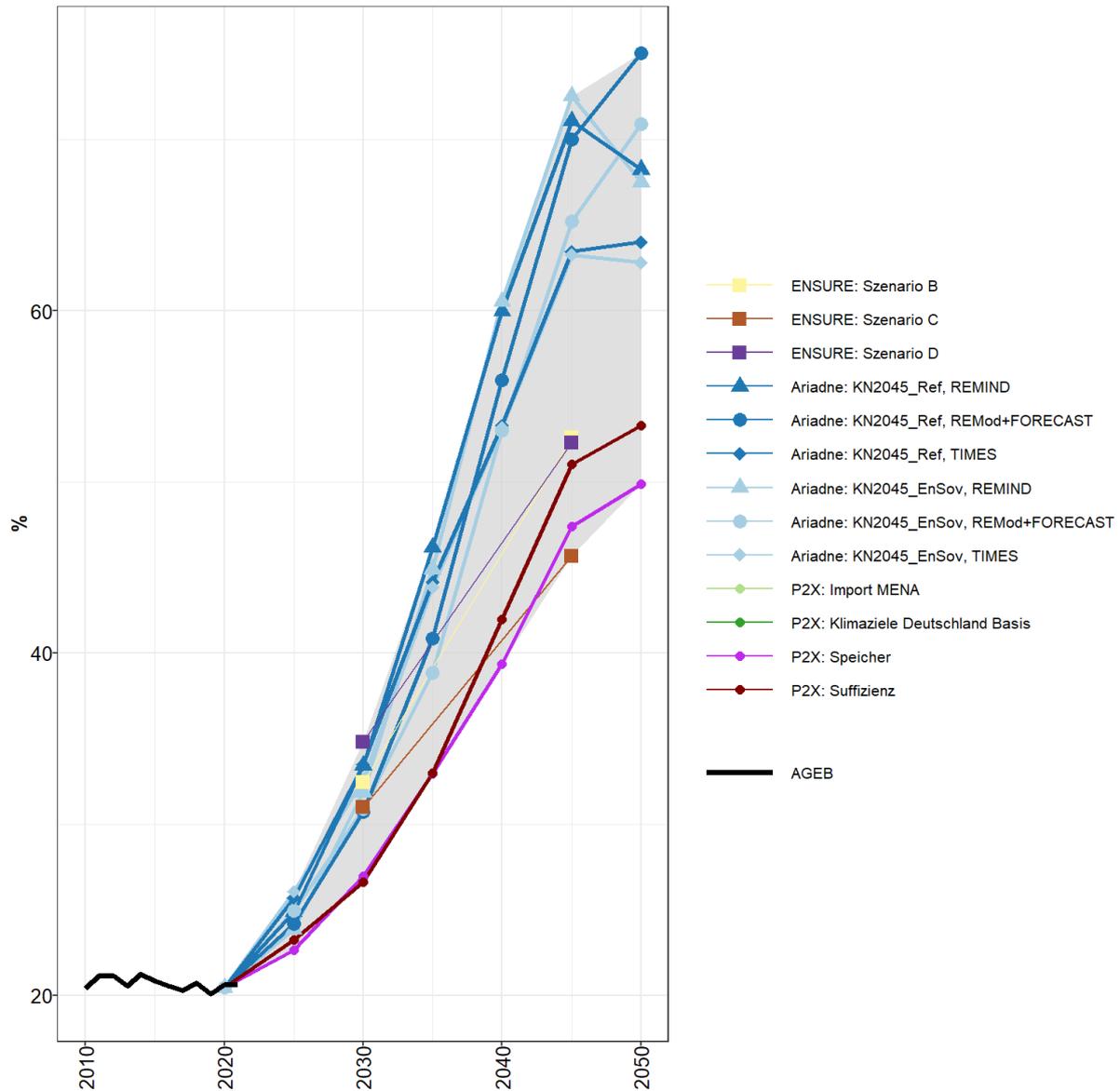


Abb. 1. 6: Elektrifizierungsgrad der Endenergie.⁷

Die Szenarien zeigen übereinstimmend eine **deutliche Steigerung des Anteils von Strom an der Endenergie** – die **Elektrifizierung der Energienachfrage erweist sich somit als zentraler Baustein der Energietransformation zur Klimaneutralität**. Lediglich im Ausmaß der Elektrifizierung unterscheiden sich die Szenarien mit Elektrifizierungsgraden in 2045 von 46-53% in den P2X- und

⁷ Die historischen AGEB-Daten zur Endenergie beinhalten – im Gegensatz zu den Modellergebnissen – auch die Umweltwärme. Allerdings macht diese im Jahr 2021 weniger als 1% der Gesamt-Endenergie aus.

ENSURE-Szenarien, und 63-73% in den Ariadne-Szenarien. Diese Unterschiede erklären sich insbesondere durch Unterschiede in der Durchdringung von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten (s. Abb. 6. 1).

2. Energiewirtschaft

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Transformation des Stromsektors vom Einsatz fossiler Brennstoffe hin zur Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien.

2.1. Emissionsintensität der Stromerzeugung

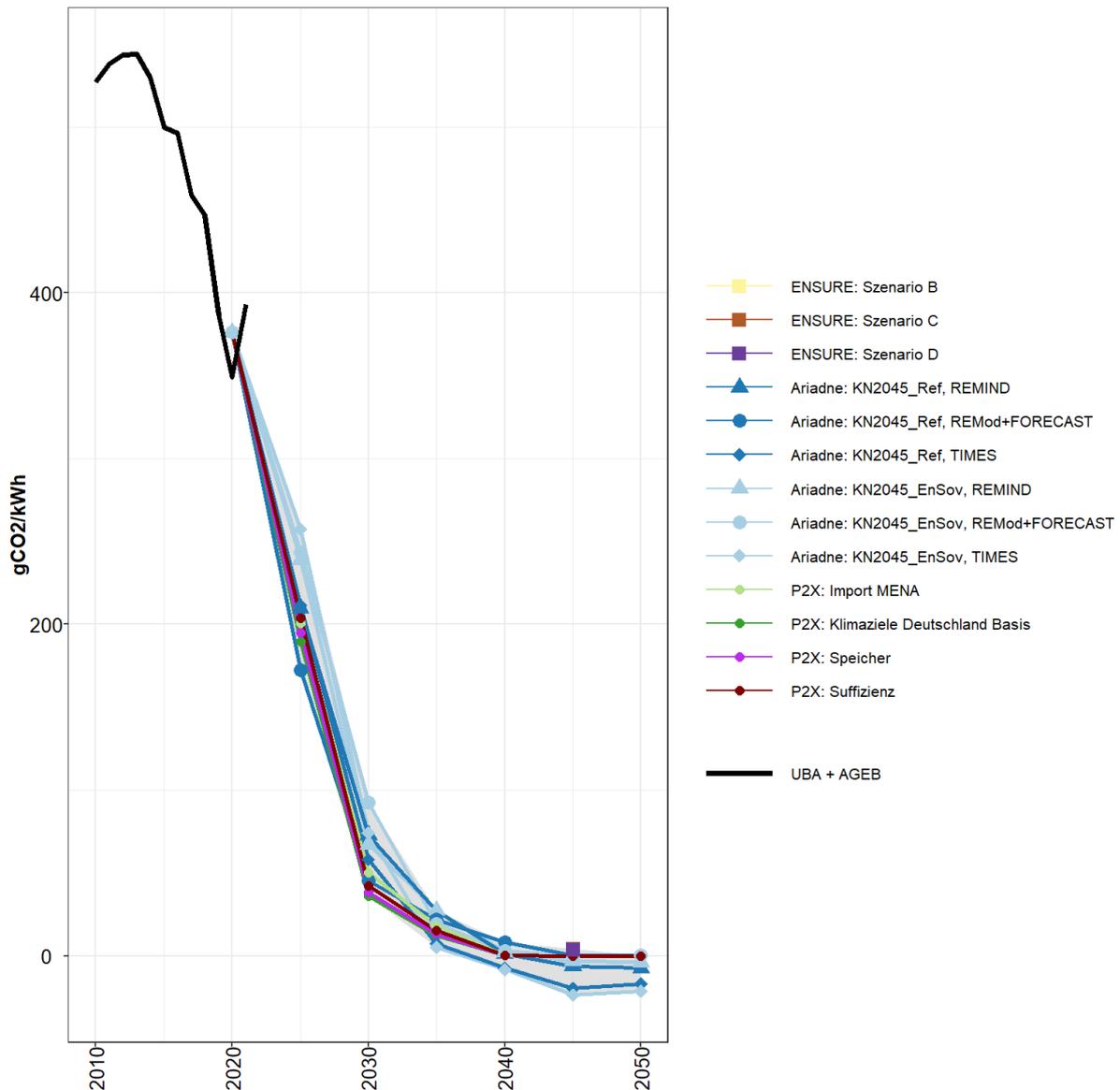


Abb. 2.1: Emissionsintensität der Stromerzeugung.

Ein robustes Bild zeigt sich bei der Betrachtung der CO₂-Emissionen pro erzeugter Einheit Strom: **Die CO₂-Intensität sinkt in allen Szenarien auf <100 g/kWh in 2030 (im Vergleich zu ~350 g/kWh in den letzten Jahren) und erreicht spätestens in 2040 Null.⁸ Damit ist Strom der Energieträger, der am schnellsten und einfachsten dekarbonisiert wird** – dies zeigen die Zielszenarien für Klimaneutralität bis 2045 übereinstimmend. Für eine Minderung der CO₂-Intensität wird dabei ein

⁸ Der Einsatz von Bioenergie mit Carbon Capture and Storage (CCS, also der Abscheidung und Speicherung von CO₂) in manchen Modellen führt zu einem leicht negativen Emissionsfaktor.

beschleunigter Ausbau der Erneuerbaren Energien (s. Abb. 2. 3) bei gleichzeitigem weitgehendem Ausstieg aus der fossilen Stromerzeugung (s. Abb. 2. 6) nötig.

In den historischen Werten ist im Jahr 2022 eine Umkehrung des langfristigen Trends zu geringeren CO₂-Intensitäten zu sehen, dies liegt v.a. am Anstieg der Kohleverstromung in diesem Jahr aufgrund der Gaskrise (und ist also ein kurzfristiger Sondereffekt).

2.2. Stromerzeugung (gesamt)

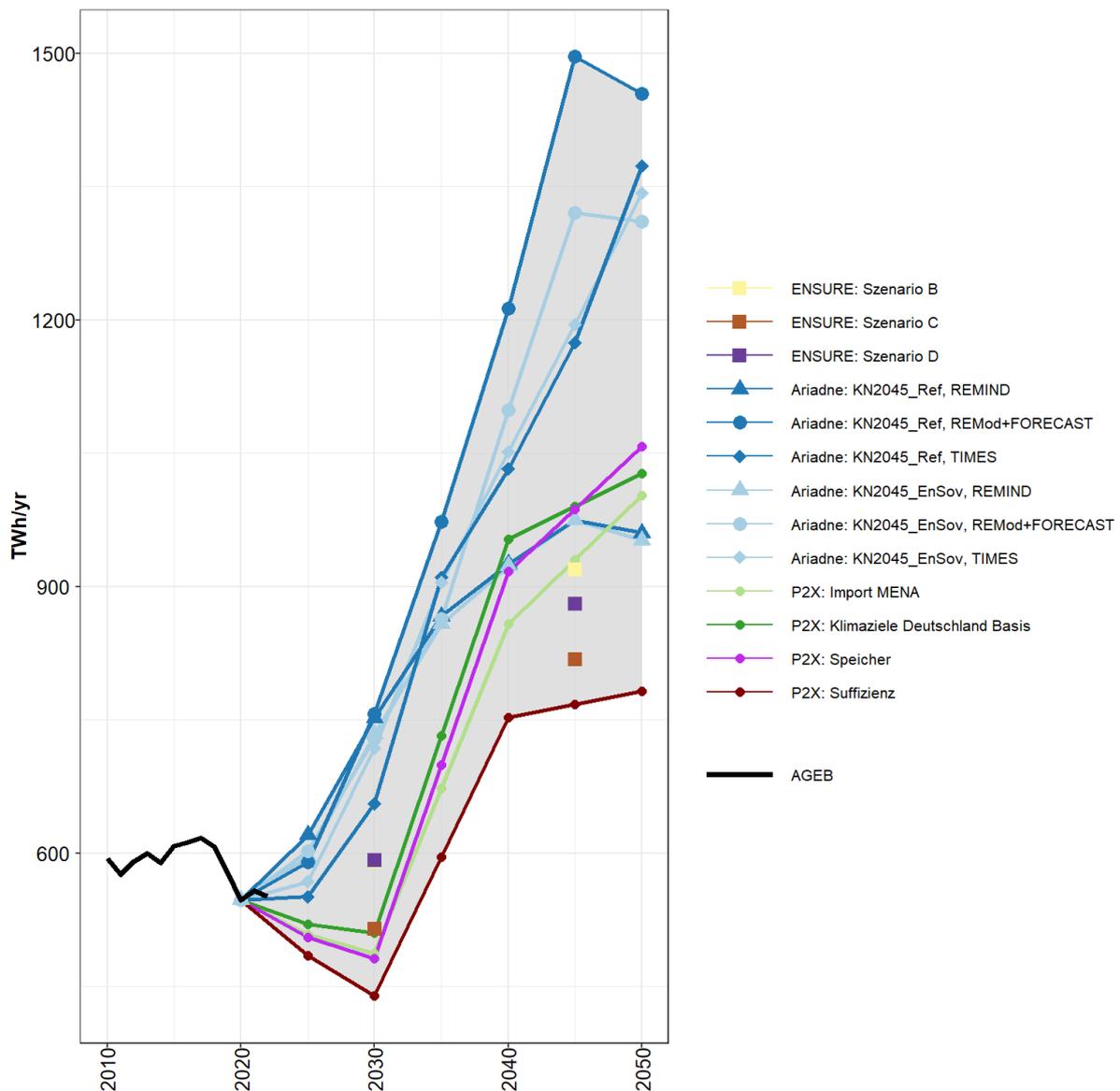


Abb. 2. 2: Gesamt-Stromerzeugung.

In allen Szenarien zeigt sich übereinstimmend eine **deutlich steigende Stromerzeugung bis Mitte des Jahrhunderts** – **allerdings mit einigen Unsicherheiten bezüglich der Geschwindigkeit des Zuwachses und der insgesamt im Inland erzeugten Strommenge**. Alle Szenarien haben dabei gemeinsam, dass insbesondere die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen (Wind und Photovoltaik) stark zunimmt und den Strommix immer mehr dominiert (s. auch nachfolgende Abb. 2. 3). Insgesamt geht der Ausstieg aus den fossilen Energieträgern in den Endnutzungssektoren einher mit einer zunehmenden Elektrifizierung, die sich in einem erhöhten Strombedarf widerspiegelt. Ein

Vergleich mit dem Stromverbrauch der Endnutzungssektoren (s. Abb. A 4 im Anhang) zeigt, dass ein wichtiger Treiber für den steigenden Strombedarf auch die einheimische Wasserstoffherzeugung und der damit einhergehende hohe Stromverbrauch der inländischen Elektrolyse ist. Der Rückgang der heimischen Stromerzeugung bis zum Jahr 2030 in den P2X-Szenarien ist vor allem darauf zurückzuführen, dass ein schneller Ausstieg aus fossilen Stromerzeugungstechnologien stattfindet, der aufgrund der angenommenen maximalen Ausbaugeschwindigkeiten nicht durch erneuerbare Energien kompensiert werden kann. Daher werden hier rund 100 TWh Strom aus dem Ausland importiert, die nicht in der Abbildung enthalten sind.

2.3. Erneuerbare Stromerzeugung (aus Photovoltaik und Wind)

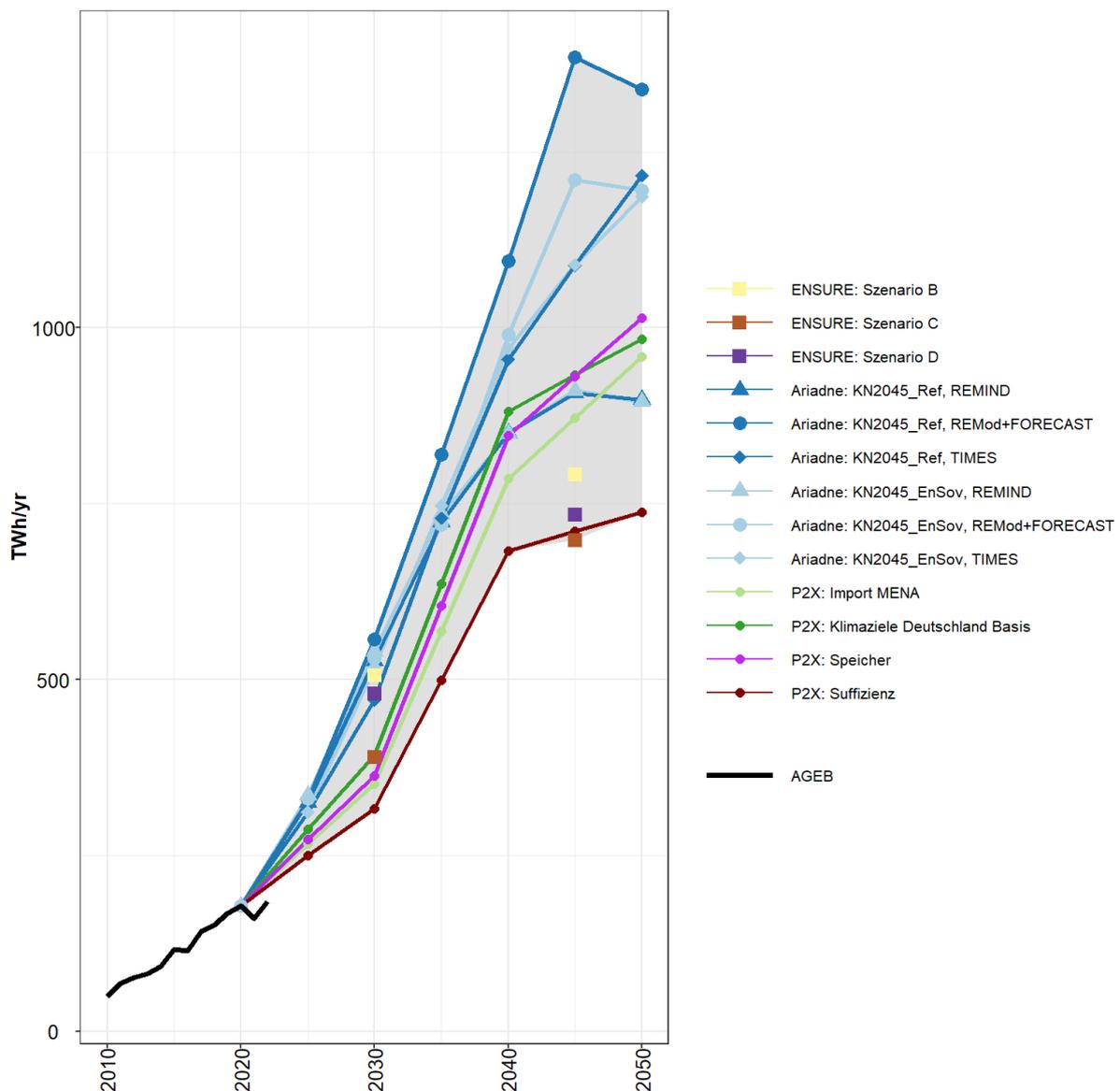


Abb. 2. 3: Erneuerbare Stromerzeugung (Wind auf See und an Land und Photovoltaik).

Über alle Modelle und Szenarien hinweg zeigt sich robust ein **starker Zuwachs an erneuerbarer Stromerzeugung bis 2045**. Die Aufteilung der Erzeugung auf Windkraftanlagen oder Photovoltaik variiert (s. Abb. 2. 4 und Abb. 2. 5).

Im Jahr 2022 betrug der Anteil der Onshore-Windenergie knapp 20% an der öffentlichen Stromerzeugung⁹ in Deutschland, der der Offshore-Windenergie ca. 5% und der von Photovoltaik knapp 11% (Burger, 2023; Statistisches Bundesamt, 2023). **Insgesamt ist die Steigerung des Anteils von erneuerbaren Energieträgern an der Stromerzeugung maßgeblich für die Dekarbonisierung der Energiewirtschaft.** Der Ausbau geht im Wesentlichen auf Windenergieanlagen und Photovoltaik zurück (s. auch Abb. A 1 und A 2 im Anhang). Dies geht Hand in Hand mit einem deutlichen Rückgang und dem schließlichen Ende der Kohleverstromung bis spätestens 2040 (s. Abb. 2. 6). Die in einigen Szenarien angenommene sehr hohe inländische Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien würde eine wesentliche Verbesserung der Akzeptanz von Wind- und Photovoltaik-Freiflächenanlagen in der Bevölkerung gegenüber dem heutigen Stand erfordern.

⁹ Im Unterschied dazu berücksichtigen die Modellergebnisse auch Stromerzeugung aus Kraftwerken und Erzeugungsanlagen, die nicht in das Netz für die allgemeine Versorgung einspeisen, insbesondere Industriekraftwerke.

2.4. Stromerzeugung aus Wind (auf See und an Land)

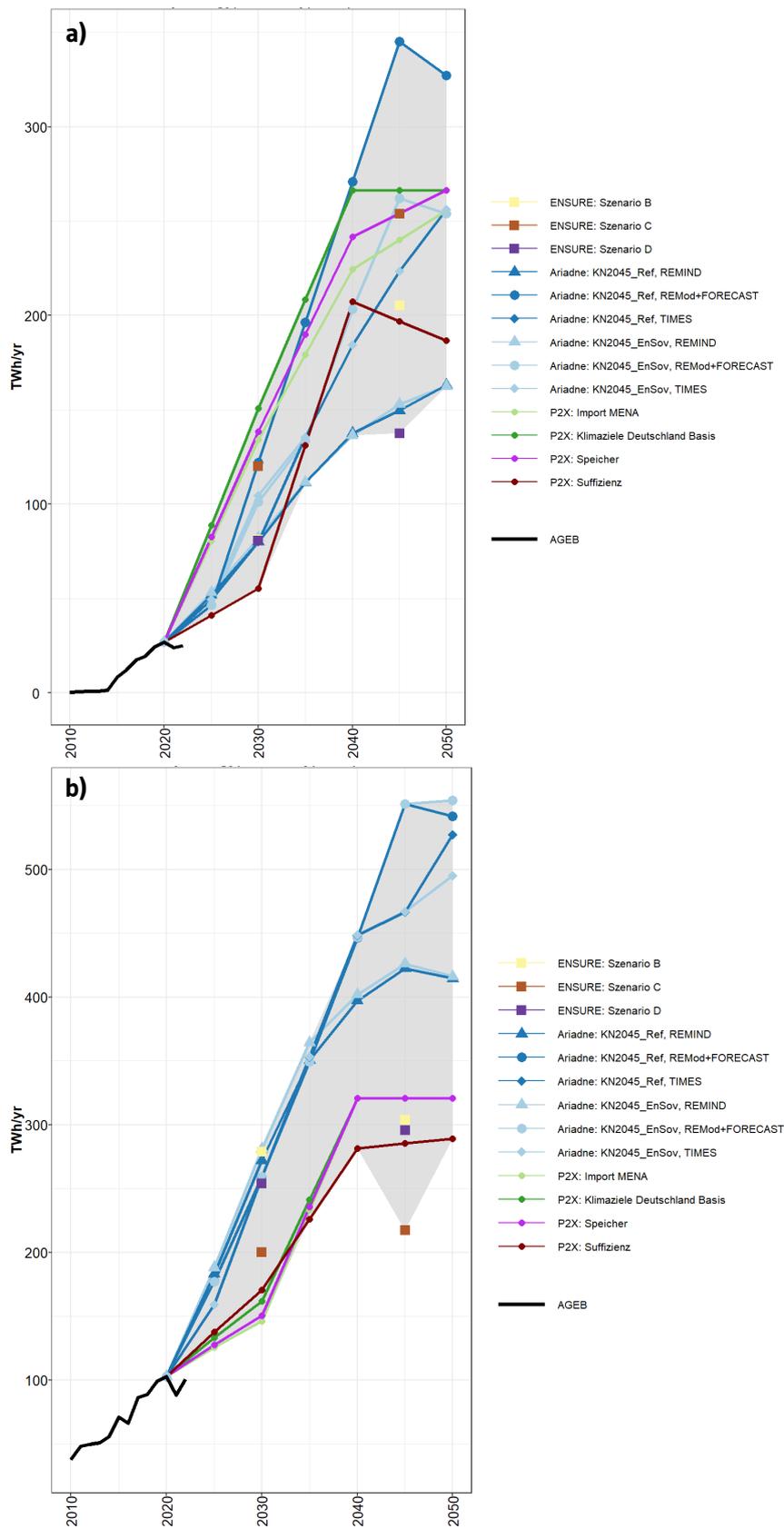


Abb. 2. 4: a) Stromerzeugung aus Wind auf See; b) Stromerzeugung aus Wind an Land.

In allen Szenarien zeigt sich übereinstimmend ein **großer Zuwachs an Stromerzeugung aus Windenergieanlagen an Land und auf See – etwas weniger eindeutig sind allerdings die jeweiligen Anteile**. Dies spiegelt sich auch in den installierten Leistungen wider (s. Abb. A 1 im Anhang): Die politischen Ausbauziele (auf See: 30 GW in 2030, 40 GW in 2035 und 70 GW in 2045; an Land: 115 GW in 2030) werden nicht in allen Szenarien erreicht.

2.5. Stromerzeugung aus Photovoltaik (PV)

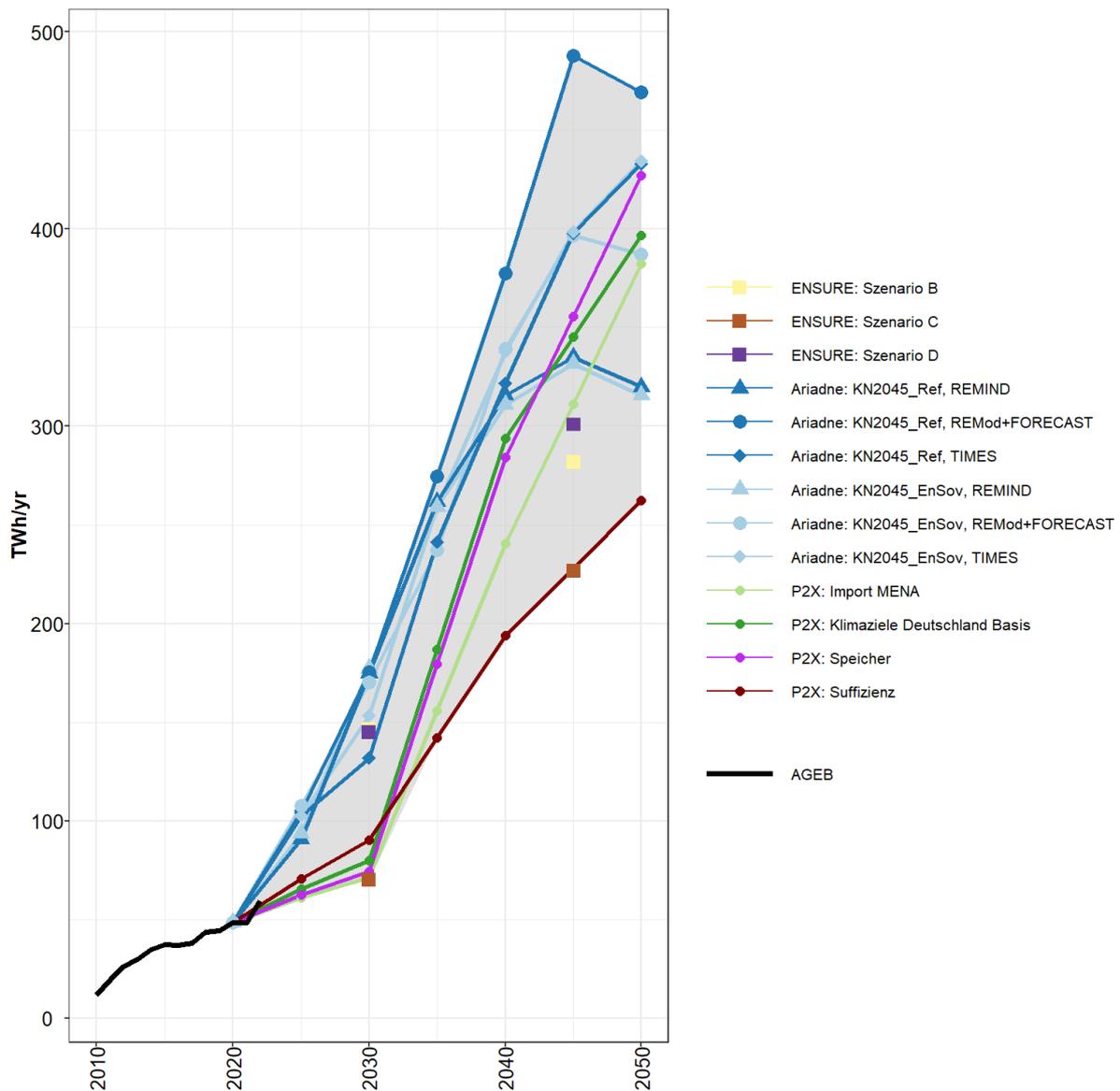


Abb. 2. 5: Stromerzeugung aus Photovoltaik.

Auch bei der **Stromerzeugung aus Photovoltaik zeigt sich der starke Anstieg in allen Szenarien – allerdings mit einiger Spannweite bezüglich der Geschwindigkeit und der gesamten Energiemenge**. Auch die installierte PV-Leistung (s. Abb. A 2 im Anhang) weist eine gewisse Bandbreite über die Modelle und Szenarien hinweg auf. Das politische Ausbauziel von 215 GW in 2030 wird in keinem der Szenarien erreicht.

2.6. Kohleverstromung

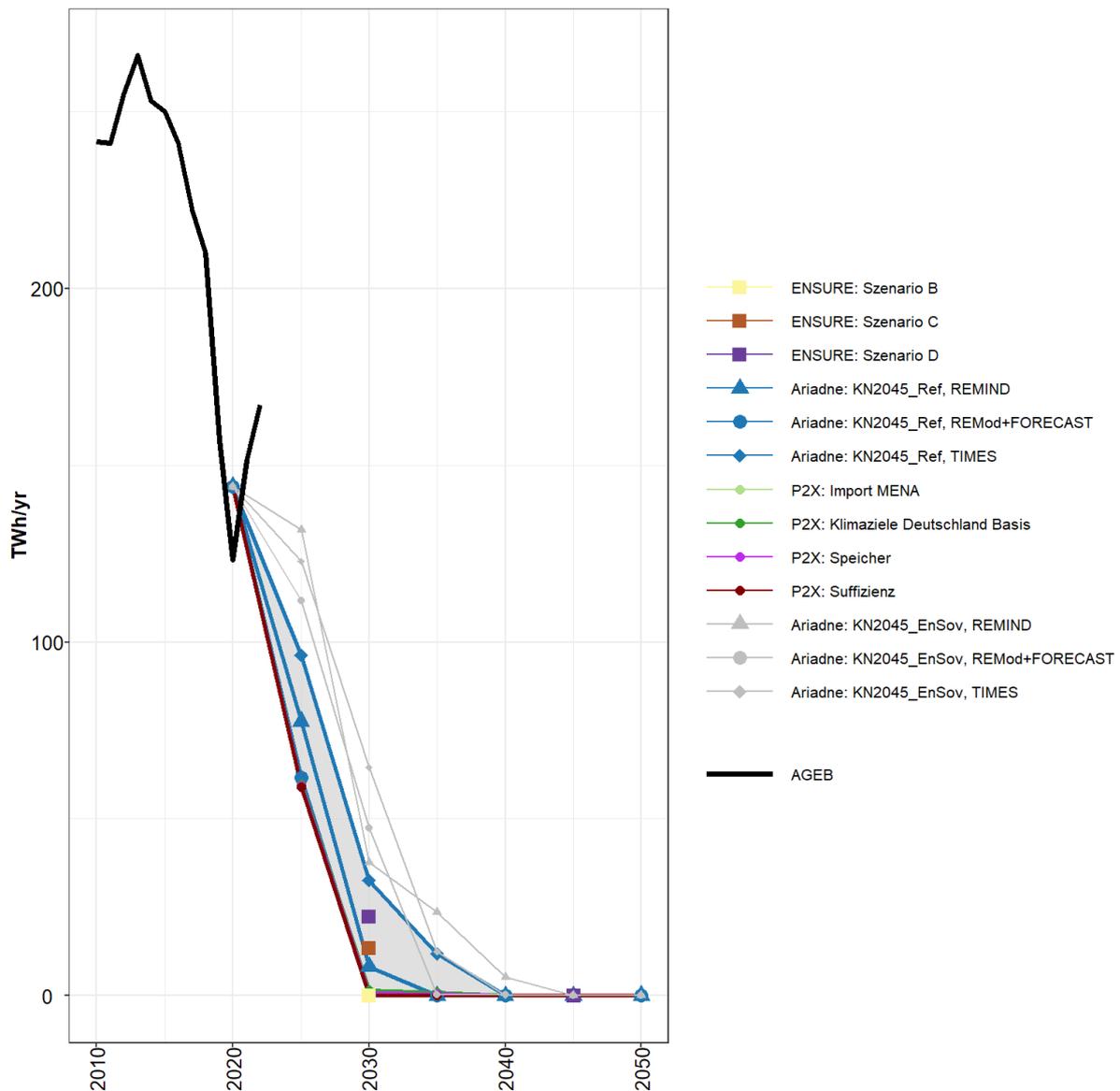


Abb. 2. 6: Kohleverstromung.

Als robustes Bild zeigt sich in allen Szenarien übereinstimmend der **schnelle Rückgang der Kohleverstromung auf nahe Null im Jahr 2035**. Bereits in 2030 liegt die Kohleverstromung bei <50 TWh (außer in einigen Modellen im *Szenario KN2045_EnSov* von Ariadne – dort verbleibt die Kohle als Brücke zur Sicherstellung der Energieversorgung noch etwas länger im System). Im ENSURE *Szenario B* „Ambitionierter Klimaschutz“ erfolgt der Kohleausstieg entsprechend der Szenariodefinition bereits bis zum Jahr 2030.

In den Ist-Daten zeigt sich bereits seit 2013 ein deutlicher Rückgang der Kohleverstromung. Allerdings führte die Erholung der Wirtschaft nach der Corona-Pandemie im Jahr 2021 gegenüber 2020 zu einem Wiederanstieg. Während der Gaskrise ersetzte Kohle knappes und teures Gas, was 2022 als kurzfristiger Sondereffekt zu einem weiteren Anstieg der Kohleverstromung führte.

Insgesamt bestimmt der Ausstieg aus fossilen Energieträgern für die Stromerzeugung – insbesondere aus der Kohle – maßgeblich die Höhe der CO₂-Emissionen aus der Energiewirtschaft.

Dabei führen CO₂-Preise von über 100 €/t CO₂ in 2030 in den Modellen zu einem zügigen Ende der Kohleverstromung.

3. Verkehrssektor

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Transformation des Verkehrssektors und insbesondere den Rückgang des Einsatzes von fossilen Energieträgern, der Hand in Hand mit einer Zunahme an Elektromobilität geht.

3.1. Benzin- und Dieselverbrauch im Verkehrssektor

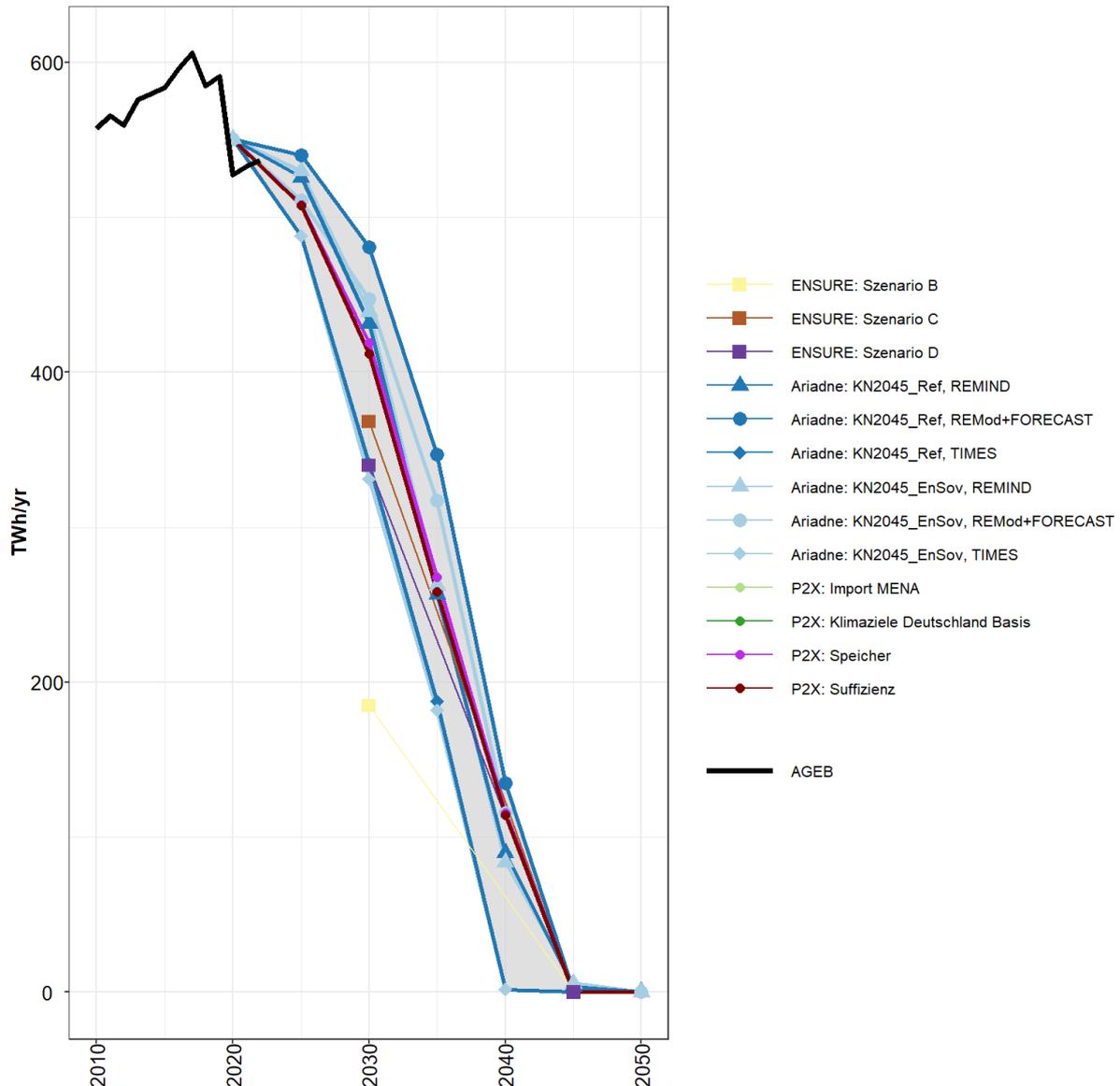


Abb 3. 1: Verbrauch fossiler Kraftstoffe (Diesel und Benzin) im Verkehrssektor.

Momentan werden insbesondere Pkw, Lkw und Busse noch fast ausschließlich durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe angetrieben (s. auch Abb 3. 3). Über alle Szenarien hinweg zeigt sich übereinstimmend, dass **spätestens im Jahr 2045 fast keine fossilen Benzin- und Dieselmotoren mehr im inländischen Verkehr eingesetzt werden.**

Wie schnell der Benzin- und Dieselmotoren reduziert werden kann, hängt dabei maßgeblich davon ab, wie schnell sich Fahrzeuge mit **elektrischem Antrieb** im Fahrzeugbestand durchsetzen (s.

Abb 3. 2 und Abb 3. 3). Auch ein sinkender spezifischer Verbrauch der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor kann den Benzin- und Dieserverbrauch senken.

Außerdem maßgeblich für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist eine **Verlagerung des Personen- und Güterverkehrs auf die Schiene und den öffentlichen Verkehr**, da der Bahnverkehr bereits heute schon stark elektrifiziert ist, bzw. leichter elektrifiziert werden kann. Auch **die Vermeidung von Verkehrswegen** reduziert die Abhängigkeit von fossilen Treibstoffen. In den Ist-Daten ist das beispielsweise im Rückgang des Benzin- und Dieserverbrauchs im Jahr 2020 sichtbar, da aufgrund der Corona-Pandemie sowohl viele Pendelwege zur Arbeit durch Homeoffice entfielen als auch insgesamt die Mobilität deutlich reduziert war.

Somit bietet die direkte Elektrifizierung des Verkehrs einen schnellen und effizienten Weg für die Dekarbonisierung des Sektors. Verkehrsleistungen (bspw. im Luft- und Schiffsverkehr), die nicht direkt elektrifiziert werden können, müssen durch die Verwendung von CO₂-neutralen Kraftstoffen dekarbonisiert werden.

Der starke Rückgang der Nutzung fossiler Brennstoffe im ENSURE *Szenario B* „Ambitionierter Klimaschutz“ wird maßgeblich durch den Einsatz synthetischer Kraftstoffe für die Einhaltung des 1,5-Grad-Zieles bedingt.

3.2. Bestand an vollelektrischen Pkw

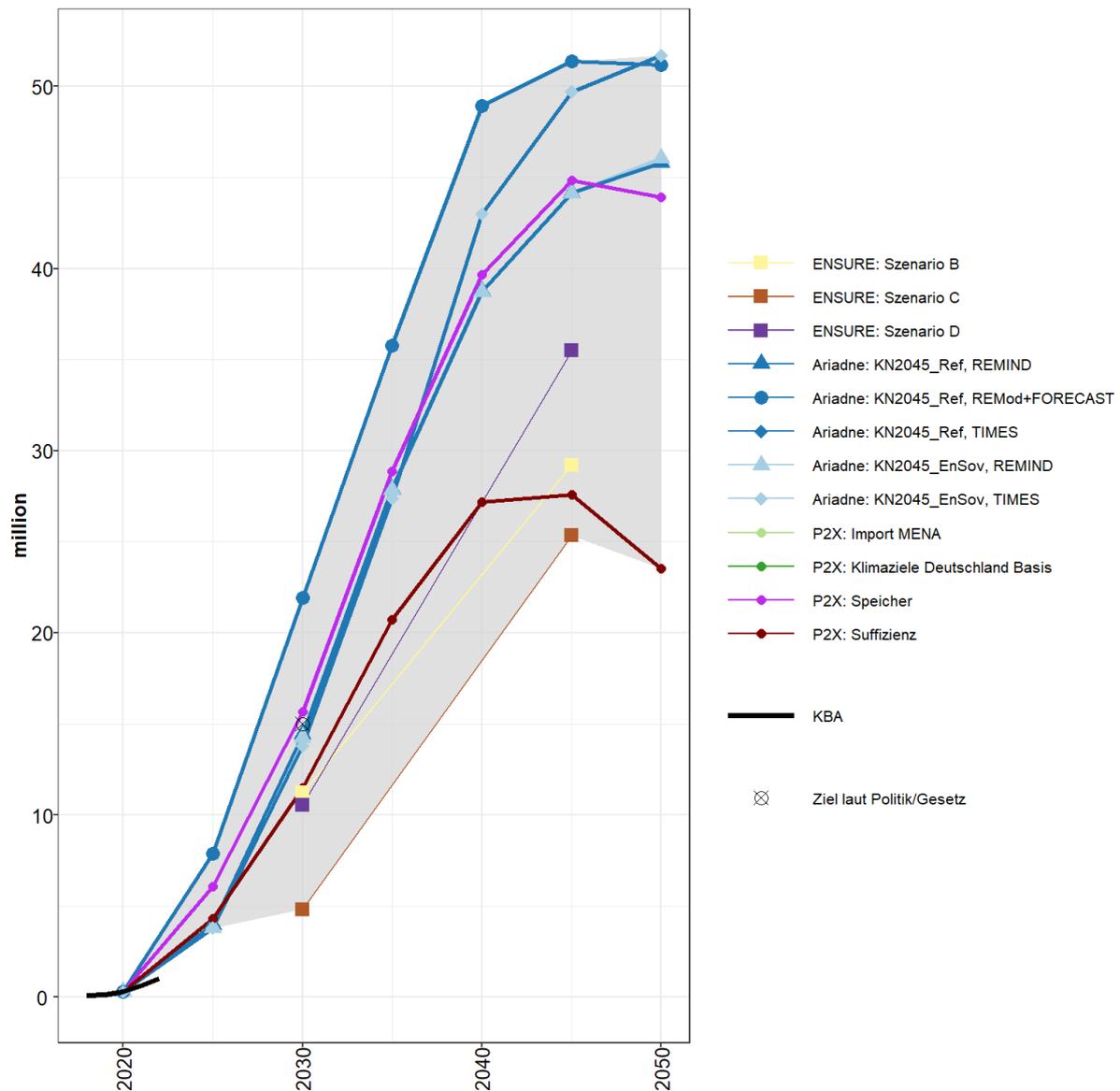


Abb 3. 2: Bestand an vollelektrischen Pkw. Das politische Ziel von 15 Mio. vollelektrischen Pkw im Bestand in 2030 ist mit einem schwarzen Kreuz gekennzeichnet.

Der zentrale Baustein zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist dessen Elektrifizierung. Eine Kennzahl hierfür ist der Bestand an vollelektrischen Pkw, d.h. Elektroautos (ohne Hybride) und Autos mit Brennstoffzelle. Übereinstimmend zeigen hier alle Modelle einen starken Anstieg, allerdings wird nicht in allen Modellen das politische Ziel von ca. 15 Millionen vollelektrischen Pkw im Bestand in 2030 erreicht. Allerdings zeigt sich doch eine erhebliche Bandbreite im Hochlaufpfad, insbesondere in den Jahren ab 2040. Dies spiegelt auch die Unsicherheit wider, wie schnell sich vollelektrische Pkw am Neuwagenmarkt durchsetzen – insbesondere auch aufgrund des aktuell knappen Angebots mit hohen Kaufpreisen und langen Lieferzeiten. Aufgrund der EU-Flottengrenzwerte und verschiedene Förderinstrumente ist allerdings ein Anstieg der Neuzulassungen von E-Autos zu erwarten, was sich dann auch im Fahrzeugbestand nach und nach zeigt.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang aber auch eine Betrachtung des Anteils der vollelektrischen Pkw am Bestand (s. Abb 3. 3), da ein rückläufiger motorisierter Individualverkehr auch zu einem geringeren Fahrzeugbestand führt (s. beispielsweise das P2X-Szenario *Suffizienz* – hier geht der Bestand ab 2045 zurück, allerdings beläuft sich der Anteil von vollelektrischen Pkw dann auch auf 100%).

3.3. Anteil von vollelektrischen Autos am Pkw-Bestand

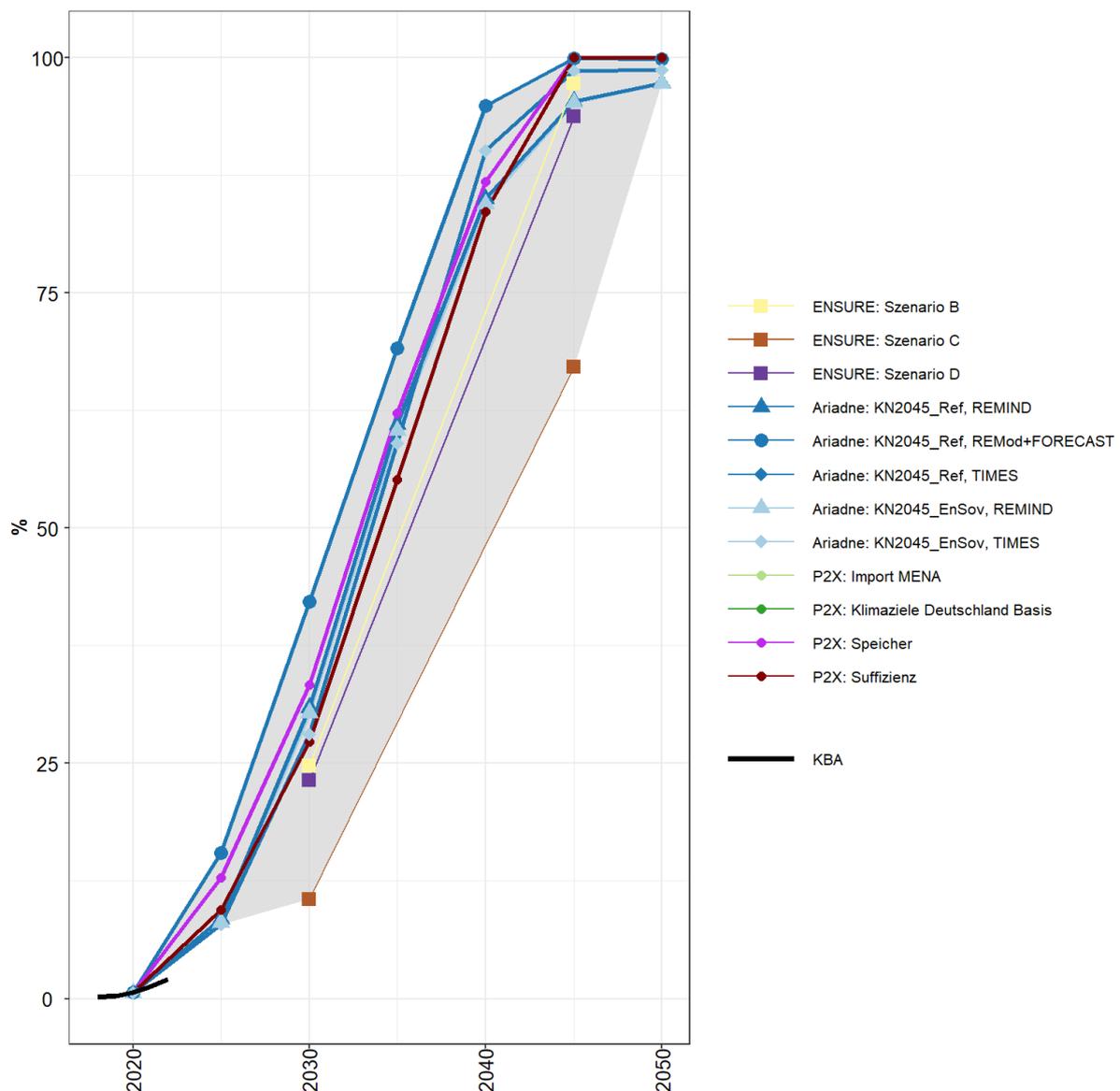


Abb 3. 3: Anteil von vollelektrischen Autos am Pkw-Bestand.

Der Anteil der vollelektrischen Autos am Pkw-Bestand steigt in nahezu allen Szenarien und Modellen übereinstimmend stark an (>25% in 2030) und erreicht nahezu 100% im Jahr 2045. Für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist diese Elektrifizierung maßgeblich – nicht nur der Umstieg auf elektrifizierten Individualverkehr, sondern auch die Verlagerung auf die (elektrifizierte) Schiene (s. Abb 3. 1).

4. Industriesektor

Die nachfolgende Abbildung spiegelt die Transformation des Industriesektors wider, insbesondere den Ausstieg aus fossilen Energieträgern.

4.1. Fossiler Erdöl-, Kohle- und Erdgasverbrauch des Industriesektors

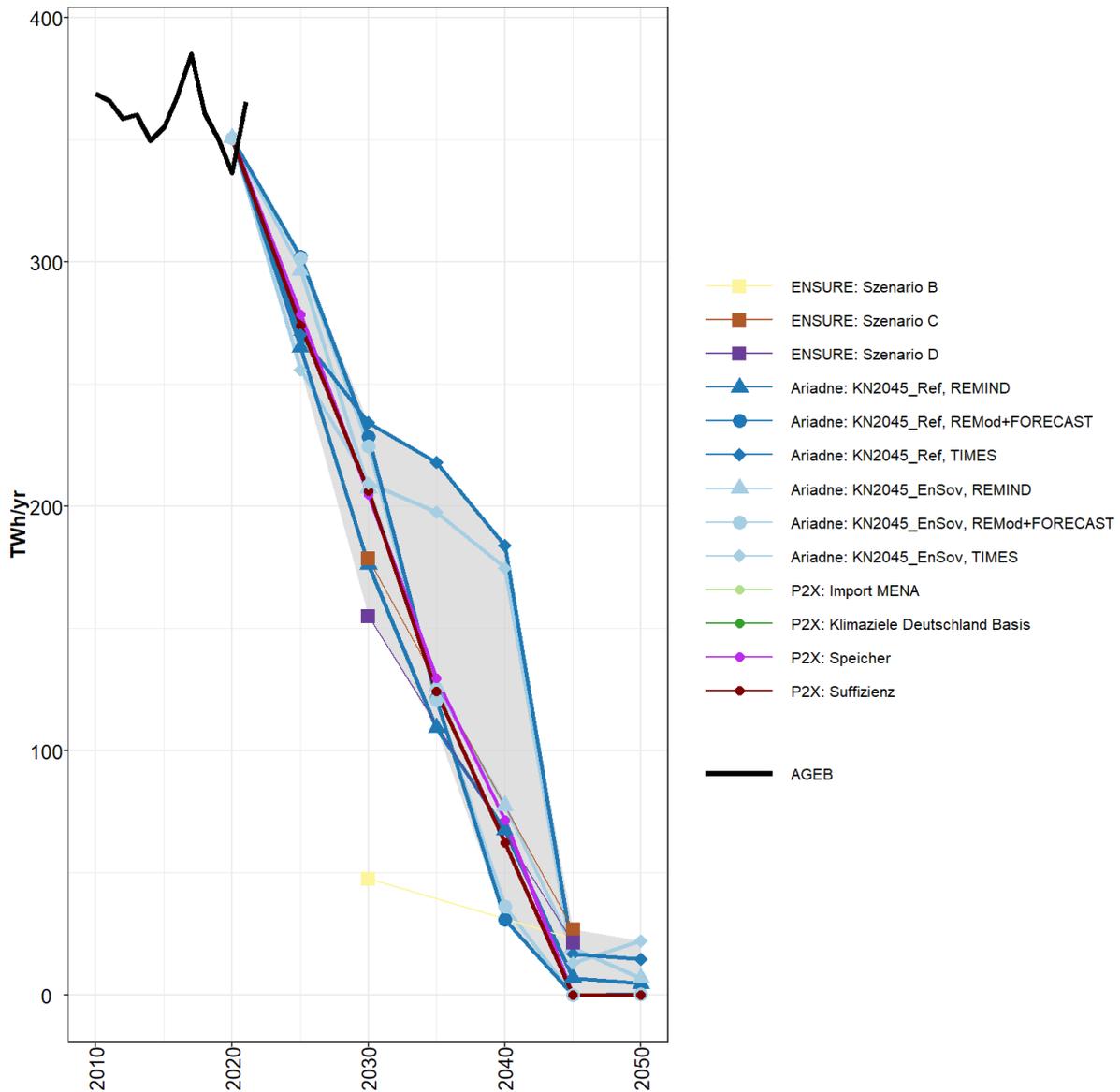


Abb. 4. 1: Fossiler Erdöl-, Kohle- und Erdgasverbrauch in der Industrie (ohne nicht-energetischen Verbrauch).

Im Industriesektor zeigt sich übereinstimmend ein **Rückgang der energetischen Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas**. Insbesondere in der Industrie sind also im Jahr 2030 noch fossile Verbräuche zu erwarten (u.a. wird für die Stahlproduktion noch Kohle eingesetzt, s. auch Abb. 1. 2). Diese kann grundsätzlich technisch weitgehend „de-karbonisiert“ werden, zum Beispiel durch Direktreduktion oder den Einsatz von Wasserstoff. Die vergleichsweise geringe energetische Nutzung fossiler Brennstoffe im Industriesektor im ENSURE Szenario B „Ambitionierter Klimaschutz“ im Jahr 2030 ist auf den Einsatz von PtX-Gas zurückzuführen.

Nicht berücksichtigt ist in dieser Abbildung die stoffliche Nutzung von Kohlenstoff, beispielsweise in der Chemieindustrie – hier sind Kohlenwasserstoffe weiterhin ein wichtiger Input. Für diese Moleküle muss folglich eine „De-Fossilisierung“ erfolgen, um Klimaneutralität zu erreichen.

5. Gebäudesektor

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Transformation des Gebäudesektors auf, insbesondere den Rückgang des Endenergieverbrauchs und der Nutzung von fossilen Energieträgern.

5.1. Endenergieverbrauch des Gebäudesektors

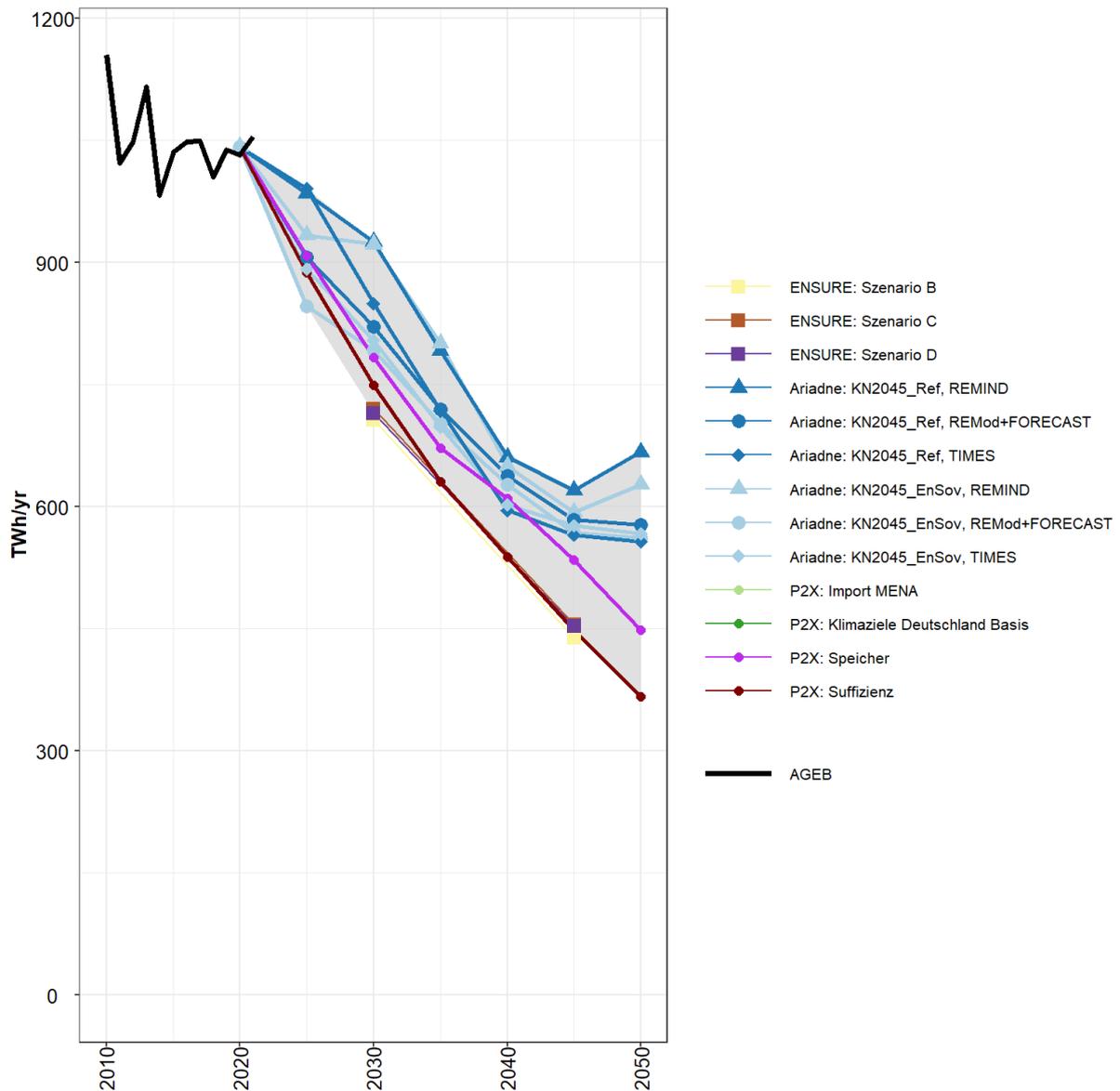


Abb. 5. 1: Gesamter Endenergieverbrauch im Gebäudesektor (Anwendungen in privaten Haushalten und in Gewerbe-Handel-Dienstleistungen, v.a. Raumwärme und Warmwasser, Beleuchtung, Informations- und Kommunikationstechnik und mechanische Energie).¹⁰

¹⁰ Die historischen AGEb-Daten beinhalten – im Gegensatz zu den Modellergebnissen – auch die Umweltwärme. Allerdings macht diese im Jahr 2021 weniger als 2% des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor aus.

Der Endenergieverbrauch im Gebäudesektor setzt sich zusammen aus Anwendungen in privaten Haushalten und in Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (GHD), v.a. zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser, für Beleuchtung, Informations- und Kommunikationstechnik und mechanische Energie. Alle Szenarien zeigen übereinstimmend einen **Rückgang des Endenergieverbrauchs, allerdings gibt es eine gewisse Spannweite bezüglich des verbleibenden Verbrauchs im Jahr 2045** (zwischen ~440 TWh und ~620 TWh). Der Rückgang ist zurückzuführen auf eine Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäude (Sanierung, effizienter Neubau) sowie effiziente und erneuerbare Heizsysteme. Insbesondere führt der Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden gegenüber Öl- und Gasbrennwertthermen zu einem geringeren Endenergieverbrauch, weil die zusätzlich genutzte Umweltwärme nicht als Endenergie bilanziert wird.

5.2. Erdöl-, Kohle- und Erdgasverbrauch im Gebäudesektor

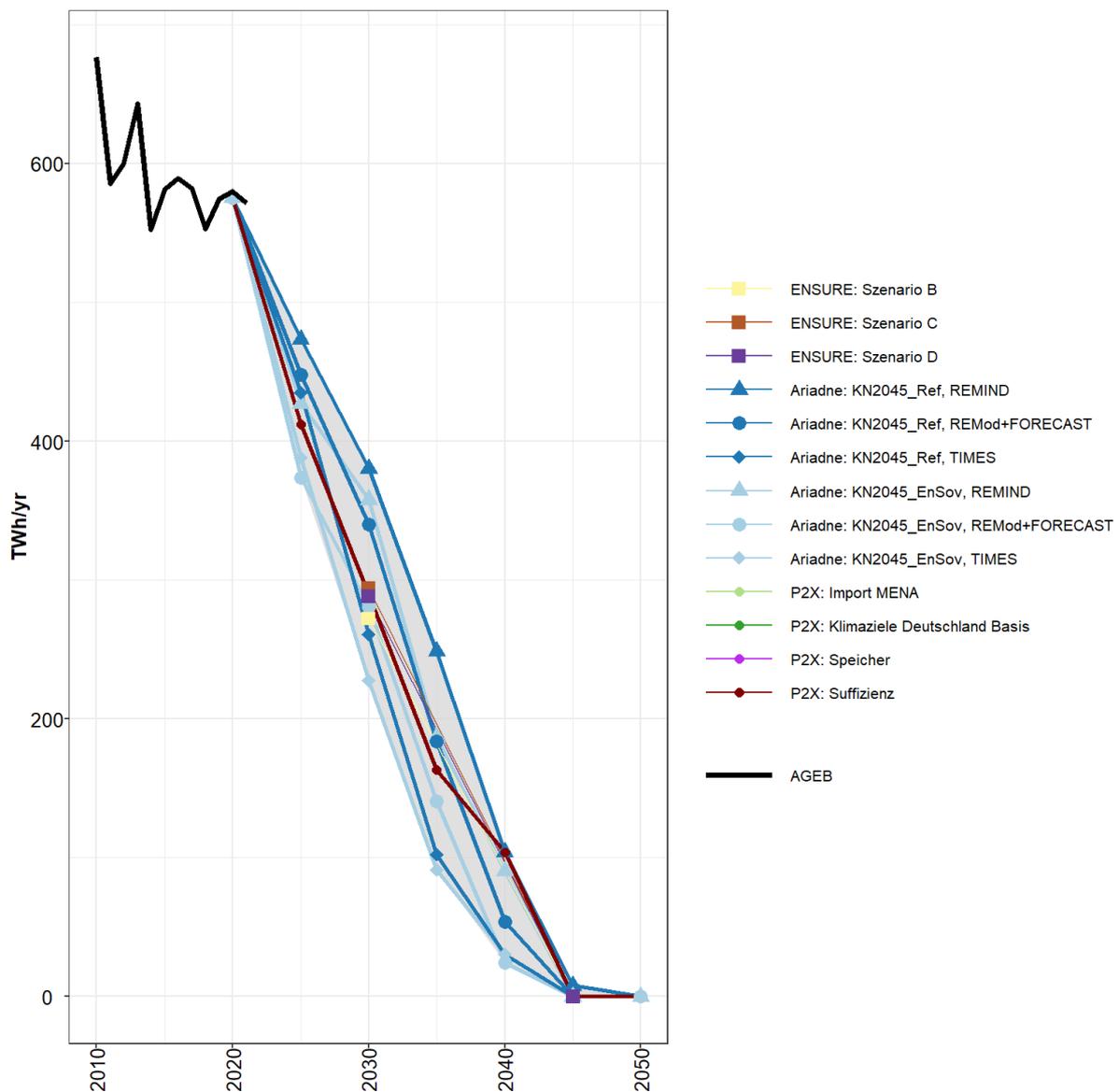


Abb. 5. 2: Fossiler Erdöl-, Kohle- und Erdgasverbrauch im Gebäudesektor.

Der **Bedarf an fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas im Gebäudesektor sinkt in allen Zielerreichungsszenarien übereinstimmend zügig, sodass bis 2045 nahezu keine fossilen Energieträger mehr benötigt werden.**

Zum einen kann, wie oben beschrieben, der Endenergieverbrauch im Gebäudesektor insgesamt durch Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäude und den Einbau technisch effizienterer Heizungen gesenkt werden (s. Abb. 5. 1). Zum anderen führt die Elektrifizierung (insb. durch den Einsatz von Wärmepumpen, s. Abb. A 5 im Anhang) und der Umstieg auf zunehmend erneuerbar erzeugte Fernwärme zu einem sinkenden Bedarf an fossilen Energieträgern.

6. Wasserstoff und E-Fuels

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Nachfrage nach Wasserstoff und Wasserstoffderivaten, sowie die einheimische Wasserstoffproduktion und Importe.

6.1. Nachfrage nach Wasserstoff und Wasserstoffderivaten

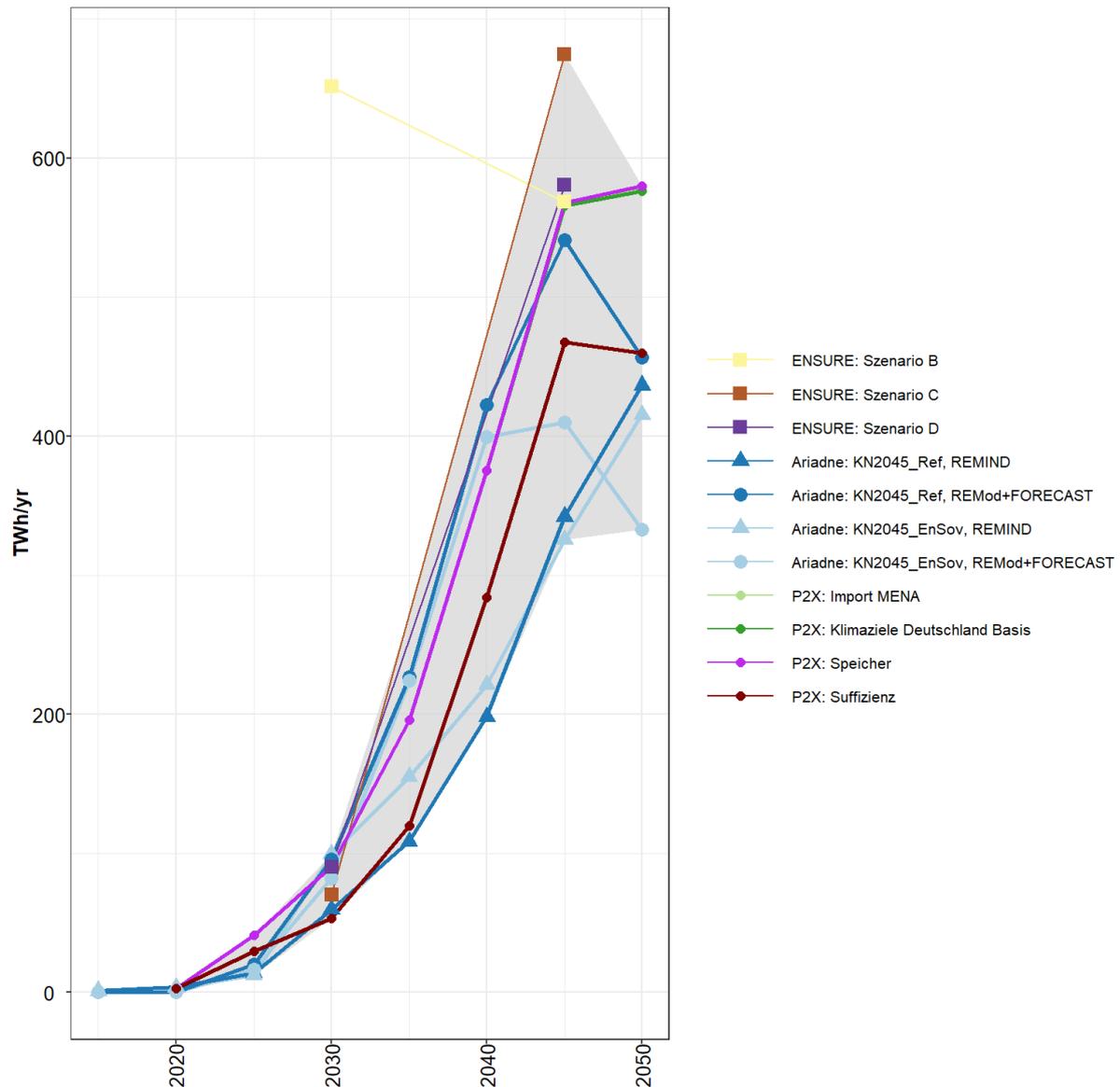


Abb. 6. 1: Nachfrage an Wasserstoff und Derivaten (Endnutzung in Gebäuden, Verkehr und Industrie; nicht-energetische Nutzung; Rückverstromung und im internationalen Flug- und Schiffsverkehr). In dieser Darstellung ist die Nachfrage nach Wasserstoff für die E-Fuel-Produktion nicht enthalten (übereinstimmend mit Abb. A 7 im Anhang, in der der Wasserstoff, der für die E-Fuel-Produktion genutzt wird, nicht dargestellt ist).

Hier wird die Nachfrage nach Wasserstoff und dessen Derivaten via Power-to-X betrachtet (Endnutzung, nicht-energetische Nutzung, Rückverstromung und als Bunkerfuels¹¹). **Es zeigt sich eine**

¹¹ Die Modelle von ENSURE und P2X berichten keine Bunkerfuels. Als Bunkerfuels werden hierbei Brennstoffe für den internationalen Flug- und Schiffsverkehr bezeichnet.

gewisse Spannweite, die jedoch längerfristig geringer erscheint als bei der Betrachtung von elementarem Wasserstoff alleine (s. Abb. 6. 2).

Als minimaler Bedarf lassen sich hier für die Nachfrage nach Wasserstoff und Wasserstoffderivaten ca. 330 TWh in 2045 ausmachen, unter Umständen liegt die Nachfrage aber auch bis zu einem Faktor zwei höher. Die Nutzung von synthetischem Methan sowie synthetischen Kraftstoffen im Jahr 2030 im ENSURE Szenario B „Ambitionierter Klimaschutz“ ist auf die sehr starke Klimaschutzambition in Kombination mit exogener Definition der Transformationspfade für die Endverbrauchssektoren zurückzuführen.

6.2. Wasserstoffnachfrage

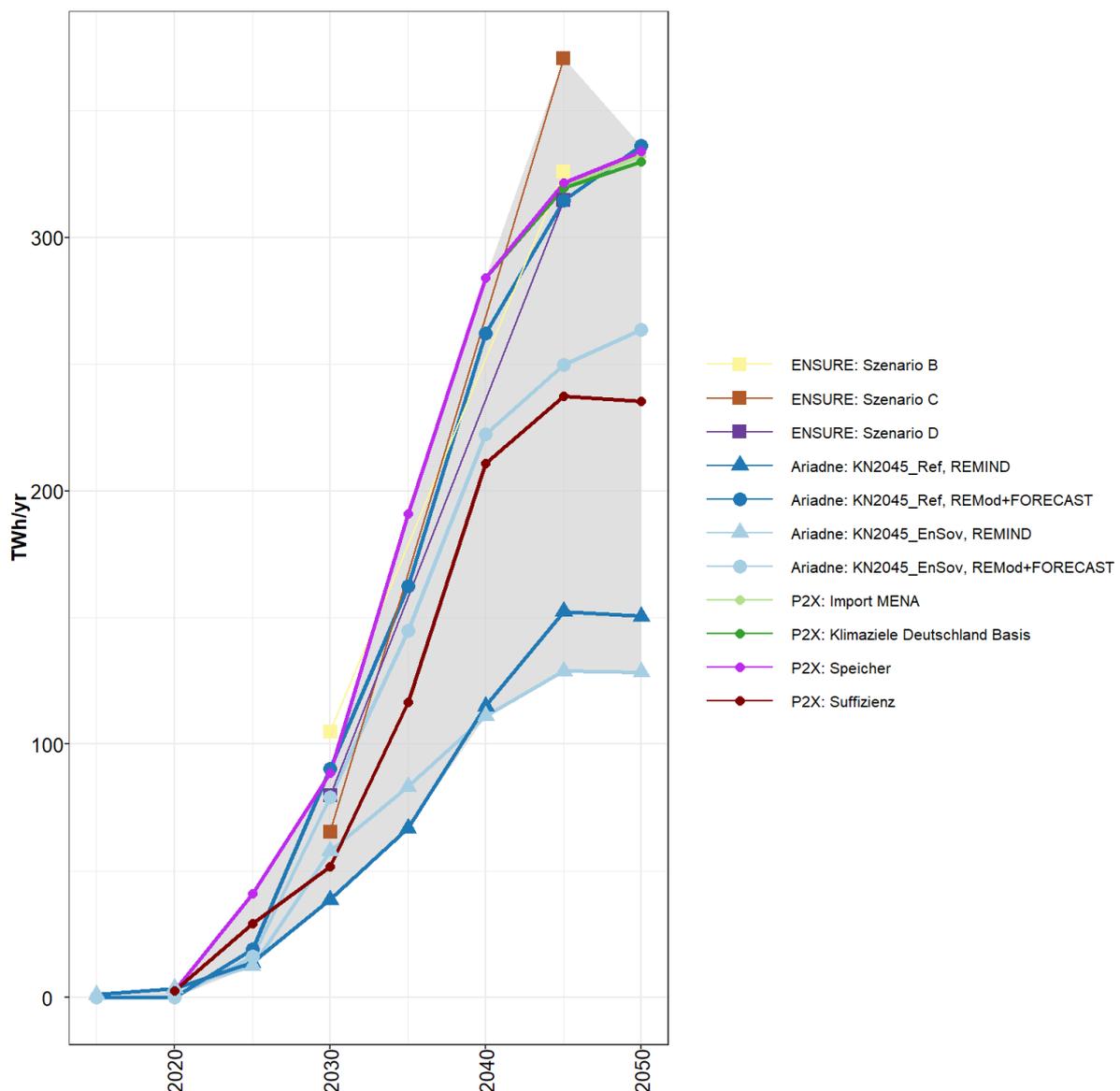


Abb. 6. 2: Wasserstoffnachfrage (Endnutzung, nicht-energetische Nutzung, Rückverstromung, Nutzung als Bunkerfuel).

Insgesamt zeigt die Angebotsseite für Wasserstoff (also einheimische Produktion plus Importe, s. Abb. A 6 im Anhang) eine große **Spannbreite, die sich auch in der Wasserstoffnachfrage (Endnutzung, nicht-energetische Nutzung, Rückverstromung, Nutzung als Bunkerfuel¹²) widerspiegelt** (s. Abb. 6. 2).¹³ Übereinstimmend zeigen allerdings alle Szenarien einen **minimaler Bedarf an Wasserstoff von ~125 TWh in 2045, unter Umständen liegt die Nachfrage jedoch auch noch deutlich höher** (bis zu ~320 TWh in den P2X-Szenarien bzw. sogar ~370 TWh im Szenario C „Europa“ von ENSURE).

6.3. Einheimische Wasserstoffproduktion via Elektrolyse

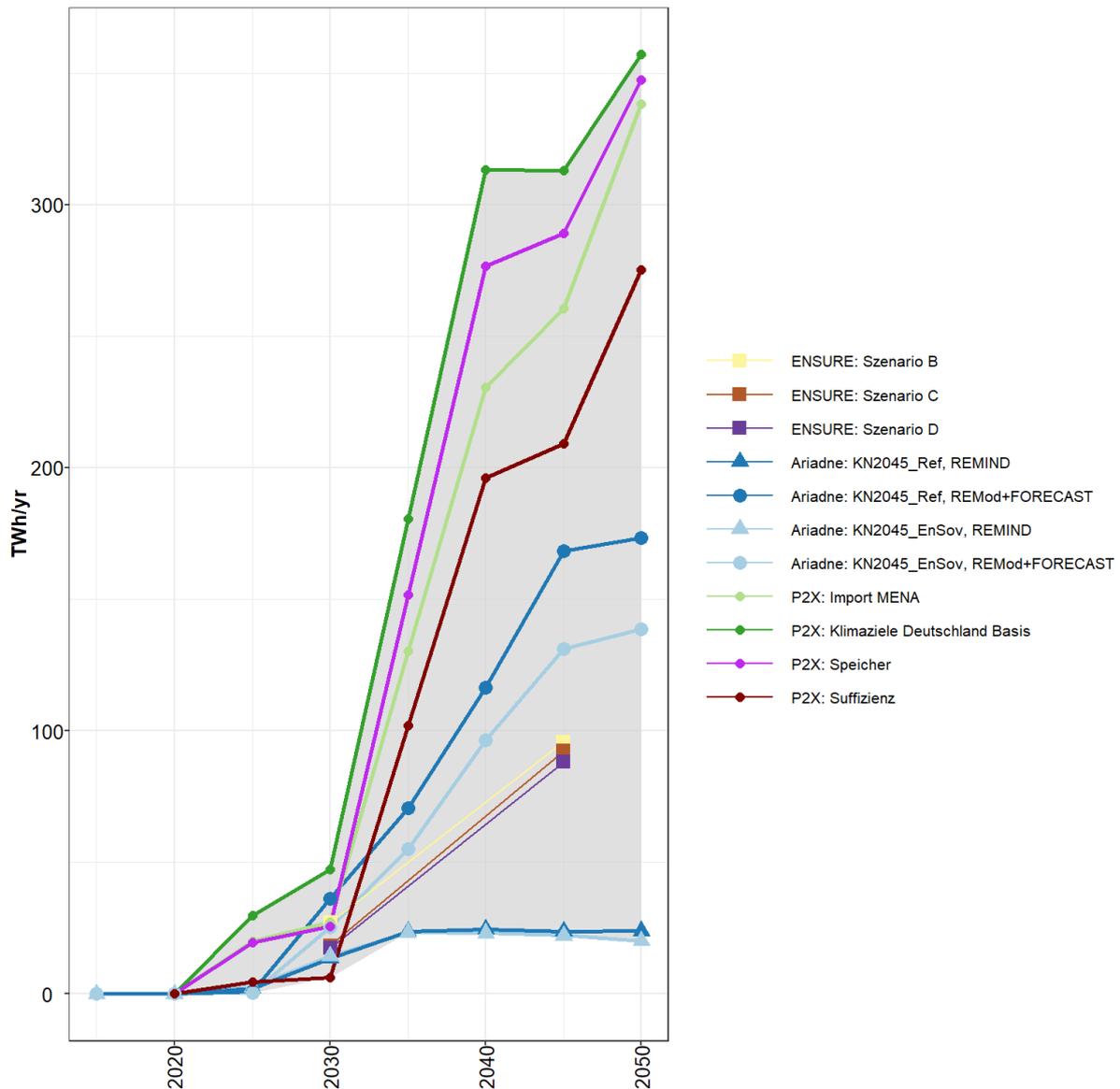


Abb. 6. 3: Einheimische Wasserstoffproduktion aus Elektrolyse.

¹² DIMENSION und SPIKE betrachten keine Bunkerfuels.

¹³ In Abbildung Abb. A 6 im Anhang ist das H₂-Angebot abgebildet – dieses ist höher als die hier gezeigte Nachfrage nach elementarem Wasserstoff, da ein Teil des Wasserstoffs in Wasserstoffderivate geht.

Der Hochlauf der einheimischen Wasserstoffproduktion via Elektrolyse erscheint über die Szenarien und Modelle hinweg hochgradig unsicher. Insbesondere im Jahr 2050 ergibt sich eine erhebliche Bandbreite (~20 TWh - 360 TWh) je nach betrachtetem Szenario, was vor allem an den Annahmen bzgl. Elektrifizierungsgrad der einzelnen Sektoren und dem Ausschöpfen des technischen Potenzials erneuerbarer Energien in Deutschland liegt. Die teilweise hohen Werte in den P2X-Szenarien resultieren zum einen daraus, dass als Randbedingung vorgegeben wurde, die einheimische Wasserstoffproduktion bevorzugt einzusetzen und erst nach dem Ausschöpfen des Potenzials auf Importe zurückzugreifen. Zum anderen ist die Wasserstoffnachfrage in den Szenarien des P2X-Projekts insgesamt höher als in den anderen Projekten (s. Abb. 6. 2). Die niedrigen Werte in den REMIND-Ergebnissen der Ariadne-Szenarien sind auf die Annahme zurückzuführen, dass aus Kosteneffizienzgründen der Wasserstoff zu großen Teilen aus dem Ausland importiert wird.

6.4. Wasserstoffimporte

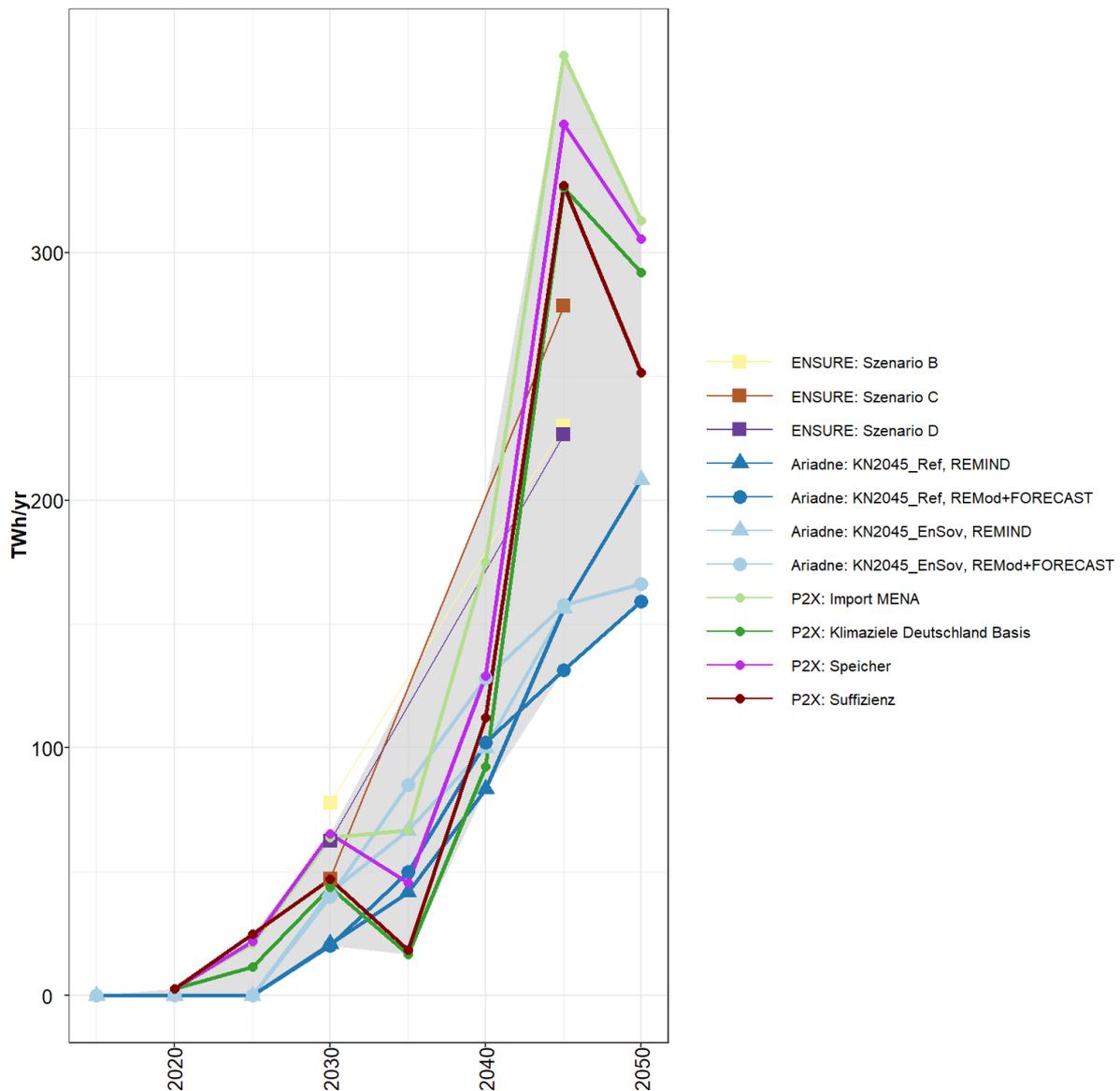


Abb. 6. 4: Wasserstoffimporte.

Auch **die Menge der Wasserstoffimporte variiert je nach betrachtetem Szenario erheblich**: Am höchsten sind die Importe dabei langfristig in den P2X-Szenarien. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass die Wasserstoffnachfrage in den P2X-Szenarien mit Ausnahme des *Suffizienz*-Szenarios insgesamt höher als in den anderen Projekten ausfällt (s Abb. 6. 2).

6.5. Importe von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten

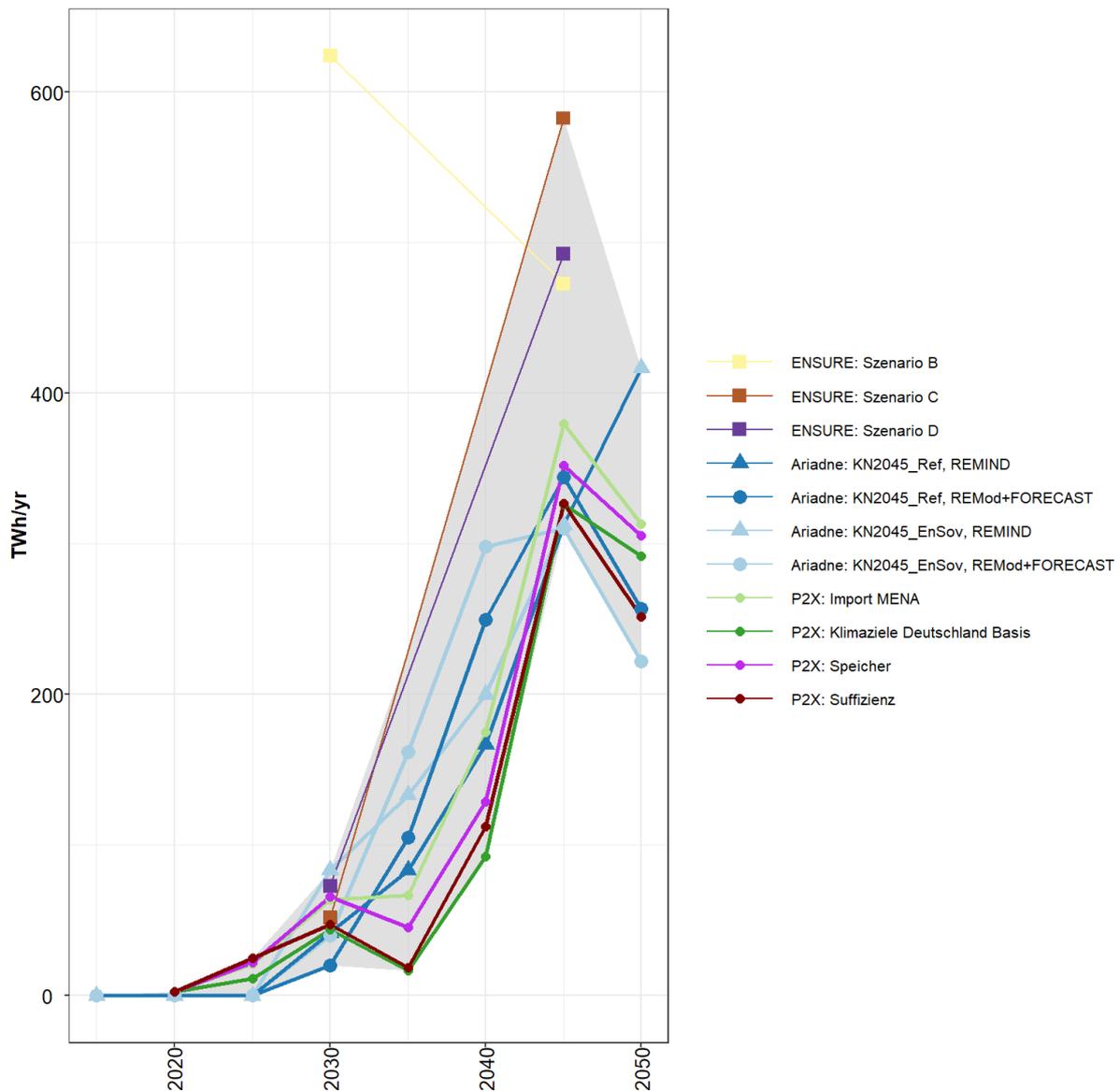


Abb. 6. 5: Importe von Wasserstoff und Derivaten (flüssige und gasförmige E-Fuels).

Ebenso wie die Wasserstoffimporte **weisen auch die Importe von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten eine große Spannweite auf** – beispielsweise im Jahr 2045 zwischen 300 und knapp 600 TWh. In den Szenarien des P2X-Projektes wird angenommen, dass nur Wasserstoff importiert wird und keine E-Fuels – daher sind die Werte hier identisch zu denen in Abb. 6. 4.

Der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen in den Endverbrauchssektoren zur Erreichung des 1,5-Grad-Zieles im ENSURE Szenario B „Ambitionierter Klimaschutz“ ist mit sehr hohen Importbedarfen an Wasserstoff- und Wasserstoffderivaten im Jahr 2030 verbunden.

Fazit

Das Ziel der Klimaneutralität 2045 in Deutschland lässt sich nur mit einer schnellen und tiefgreifenden Transformation in allen Sektoren des Energiesystems erreichen. **Im vorliegenden Bericht wurden robuste Eigenschaften sowie relevante Unsicherheiten über die Kopernikus-Szenarien hinweg herausgearbeitet.** Dabei stellt sich heraus, dass sich in vielen Handlungsfeldern die Transformationsstrategien über die Szenarien hinweg ähnlich sind. **So zeigt sich über alle Szenarien hinweg, dass die Anforderung der Klimaneutralität nur durch einen fast vollständigen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energie erreicht werden kann,** weil CO₂-Senken nur in begrenztem Umfang zur Verfügung stehen. **Sowohl die Minderung des Endenergieverbrauchs als auch die Elektrifizierung bisher nicht-elektrischer Energieverbräuche bei Verkehr, Gebäudewärme und Industrie spielen eine tragende Rolle. Letztlich zeigen alle Modelle, dass Wasserstoff und wasserstoffbasierte Derivate im Umfang von mindestens 330 TWh zum Energiebedarf des klimaneutralen Energiesystems beitragen.**

Während sich die grundlegenden Muster der Dekarbonisierung über die Szenarien hinweg ähneln, emergieren auch Bereiche, in denen größere Bandbreiten bestehen. Diese beziehen sich beispielsweise auf Spielräume zwischen einerseits schneller und starker Elektrifizierung oder andererseits einem vermehrten Einsatz von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten.

Die Differenzen in den Szenarienergebnisse ergeben sich maßgeblich durch unterschiedliche Annahmen und Szenariophilosophien. Dazu zählen auf der Angebotsseite Annahmen zum politisch realisierbaren Potenzial einheimischer Erzeugung von erneuerbarem Strom und Wasserstoff im Vergleich zu angenommenen Potenzialen zu deren Import. Auf der Nachfrageseite bestimmen Annahmen zu Verbraucherverhalten (Fortschreibung aktueller Trends vs. Wandel zu niedrigerem Energieverbrauch und Suffizienz) und Technologiewechsel maßgeblich die Ergebnisse. Daraus lassen sich verschiedene Lösungsansätze für Politik und Entscheidungsträger ableiten, um die Energieversorgung in Deutschland für die Zukunft klimafreundlich und resilient aufzustellen.

Insgesamt zeigt sich, dass zwar **einige Diskrepanzen zwischen den Modellen (und auch getroffenen Annahmen) verbleiben, dass sich jedoch durchaus robuste Kernaussagen ableiten lassen.** Ein übergreifender Szenarienvergleich bietet zudem auch die Möglichkeit, zentrale Unsicherheiten aufzuzeigen. Diese können in zukünftigen Szenarien unter anderem durch aktualisierte und harmonisierte Annahmen und die Weiterentwicklung der Modelle reduziert werden.

Quellen

- Ausfelder, F., & Dura, H. (2021). 3. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II - Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien. <https://elib.dlr.de/147843/>
- Ausfelder, F., & Tran, D. D. (2022). 4. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II - Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien. https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/EC7C18F68BCE7C0DE0537E695E86F60F/live/document/221025_DEC_P2X4_V08_Web.pdf
- Baumstark, L., Bauer, N., Benke, F., Bertram, C., Bi, S., Gong, C. C., Dietrich, J. P., Dirnaichner, A., Giannousakis, A., Hilaire, J., Klein, D., Koch, J., Leimbach, M., Levesque, A., Madeddu, S., Malik, A., Merfort, A., Merfort, L., Odenweller, A., ... Luderer, G. (2021). REMIND2.1: Transformation and innovation dynamics of the energy-economic system within climate and sustainability limits. *Geoscientific Model Development*, 14(10), 6571–6603. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6571-2021>
- Blesl, M. (2014). *Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas: Eine Energiesystem- und Technikanalyse*. <https://doi.org/10.18419/OPUS-2342>
- Burger, P. D. B. (2023). *Energy-Charts*. https://energy-charts.info/post.html?l=de&c=DE&q=nettostromerzeugung_in_deutschland_im_jahr_2022_01102022
- Fahl, U. (in prep.). *Produkt 2 der Kopernikus-übergreifenden AG Szenarien*.
- Korkmaz, P., Cunha Montenegro, R., Schmid, D., Blesl, M., & Fahl, U. (2020). On the Way to a Sustainable European Energy System: Setting Up an Integrated Assessment Toolbox with TIMES PanEU as the Key Component. *Energies*, 13(3), 707. <https://doi.org/10.3390/en13030707>
- Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), (2021). http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl121s3905.pdf
- Luderer, G., Bartels, F., Blesl, M., Burkhardt, A., Edenhofer, O., Fahl, U., Gillich, A., Herbst, A., Hufendiek, K., Kaiser, M., Kittel, L., Koller, F., Kost, C., Pietzcker, R. C., Rehfeldt, M., Schreyer, F., Seibert, D., & Sievers, L. (2022). *Deutschland auf dem Weg aus der Gaskrise: Wie sich Klimaschutz und Energiesouveränität vereinbaren lassen* (S. 40 pages, 5 MB). Potsdam Institute for Climate Impact Research. <https://doi.org/10.48485/PIK.2022.004>
- Luderer, G., Kost, C., & Soergel, D. (2021). *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045—Szenarien und Pfade im Modellvergleich*. 359 pages. <https://doi.org/10.48485/PIK.2021.006>
- Statistisches Bundesamt. (2023). *Stromerzeugung 2022: Ein Drittel aus Kohle, ein Viertel aus Windkraft*. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_090_43312.html
- Timpe, C., & Fahl, U. (2022). *Dokument zu Meilenstein 1: Mapping der Kopernikus-Szenarien* (Kopernikus-übergreifende AG Szenarien).

Anhang – zusätzliche Indikatoren

Zur ergänzenden Erklärung der im Hauptteil dieses Berichts gezeigten Indikatoren werden im Anhang noch zusätzliche Indikatoren aufgeführt.

A.1 Installierte Netto-Leistung von Windenergieanlagen auf See und an Land

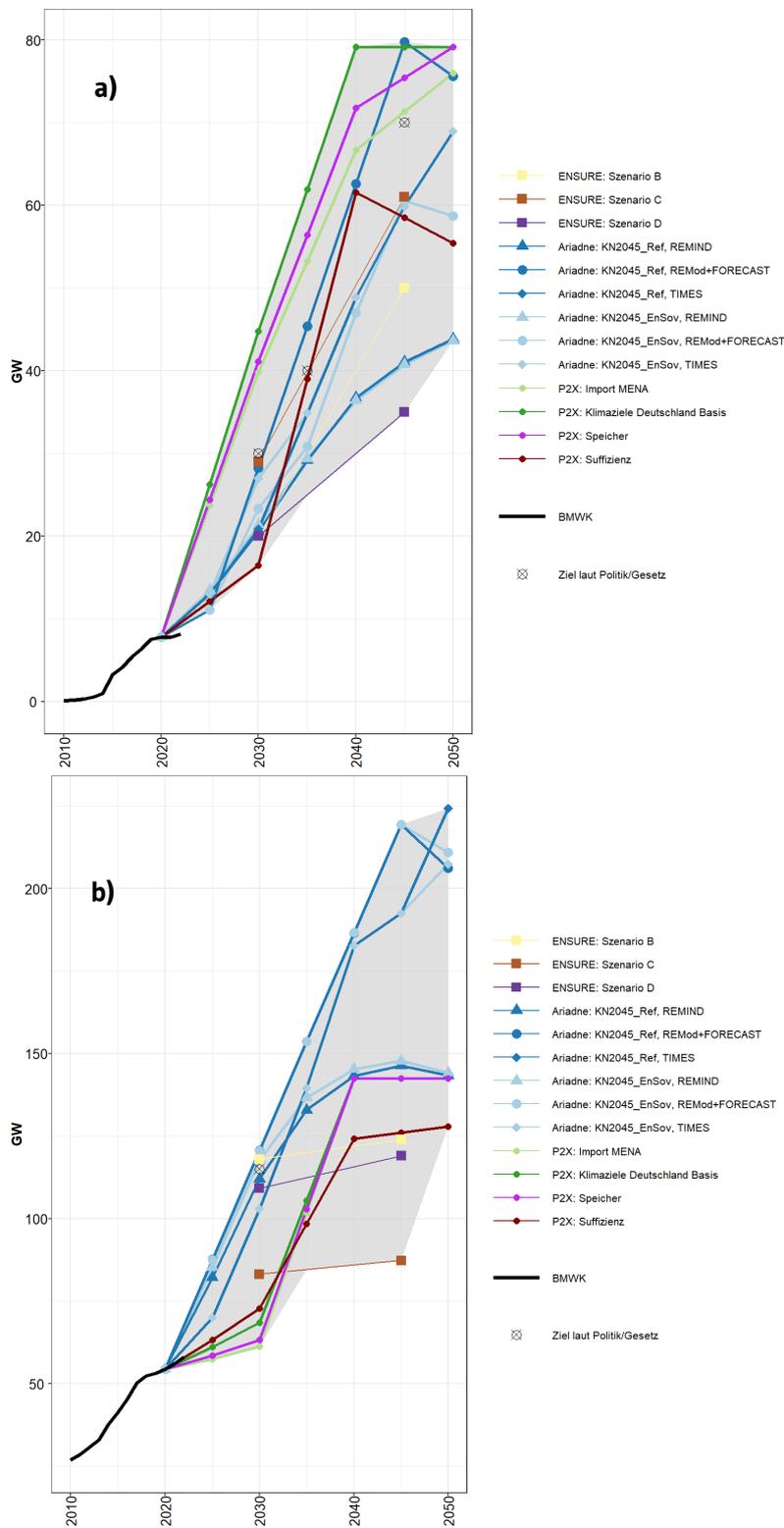


Abb. A 1: a) Installierte Netto-Leistung von Windenergieanlagen auf See und b) an Land. Die politischen Ziele (auf See: 30 GW in 2030, 40 GW in 2035 und 70 GW in 2045; an Land: 115 GW in 2030) sind durch die schwarzen Kreuze in der Abbildung markiert.

A.2 Installierte Netto-Leistung von Photovoltaik

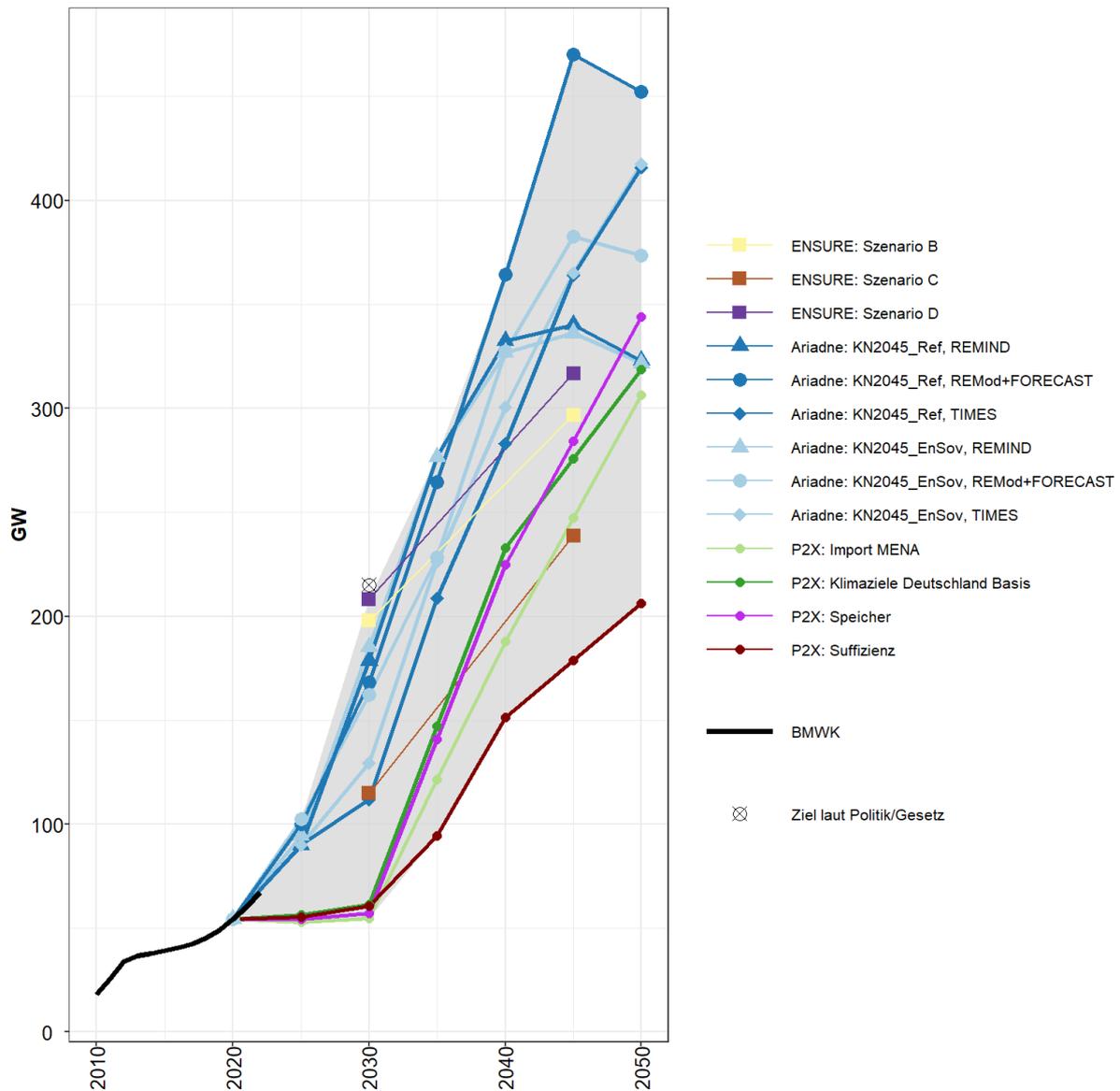


Abb. A 2: Installierte Netto-Leistung von Photovoltaik. Das politische Ziel (215 GW in 2030) ist durch das schwarze Kreuz in der Abbildung markiert.

A.3 Kohle in der Endnutzung

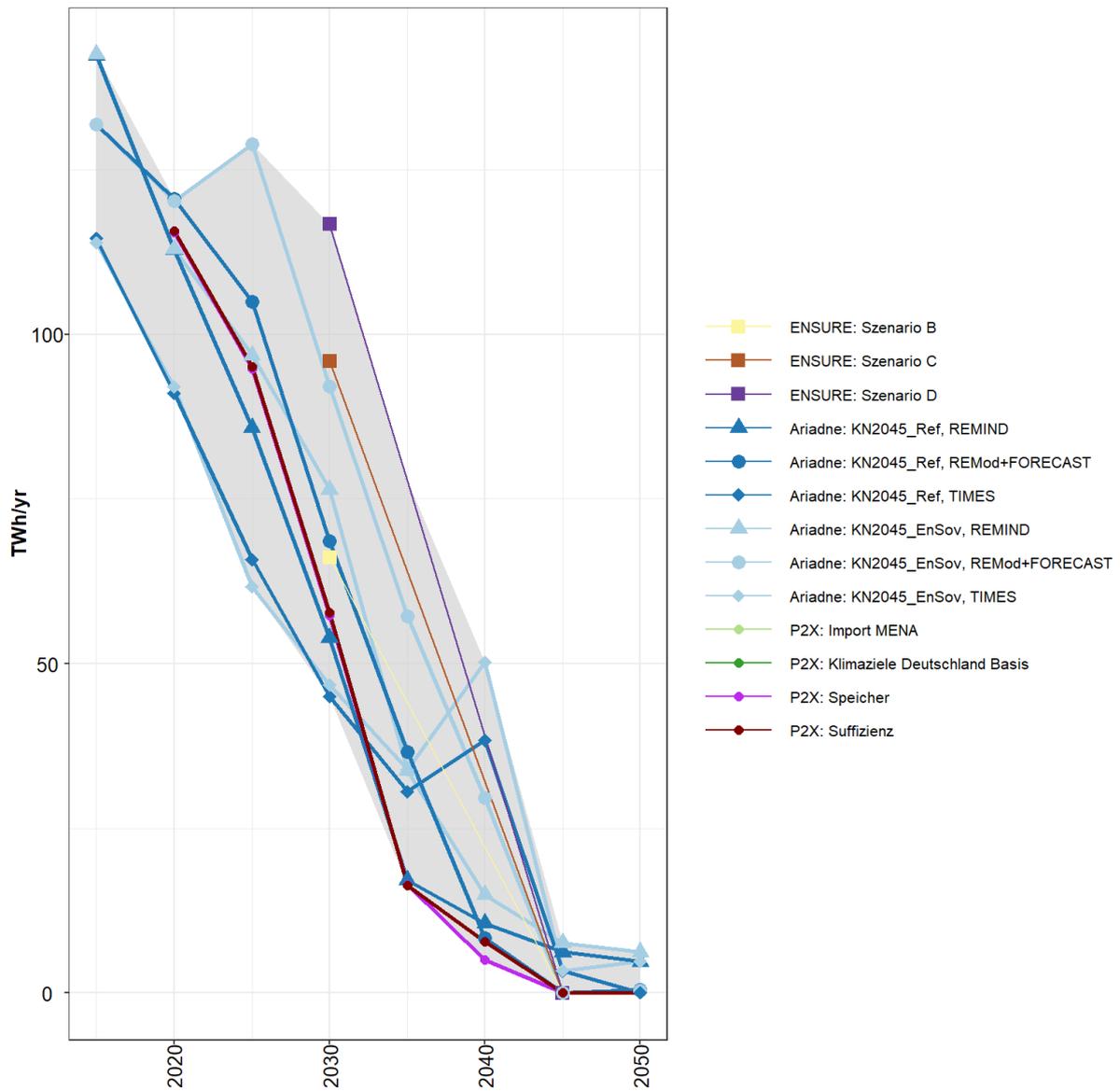


Abb. A 3: Einsatz von Kohle in der Endnutzung.

A.4 Stromverbrauch der Endnutzungssektoren

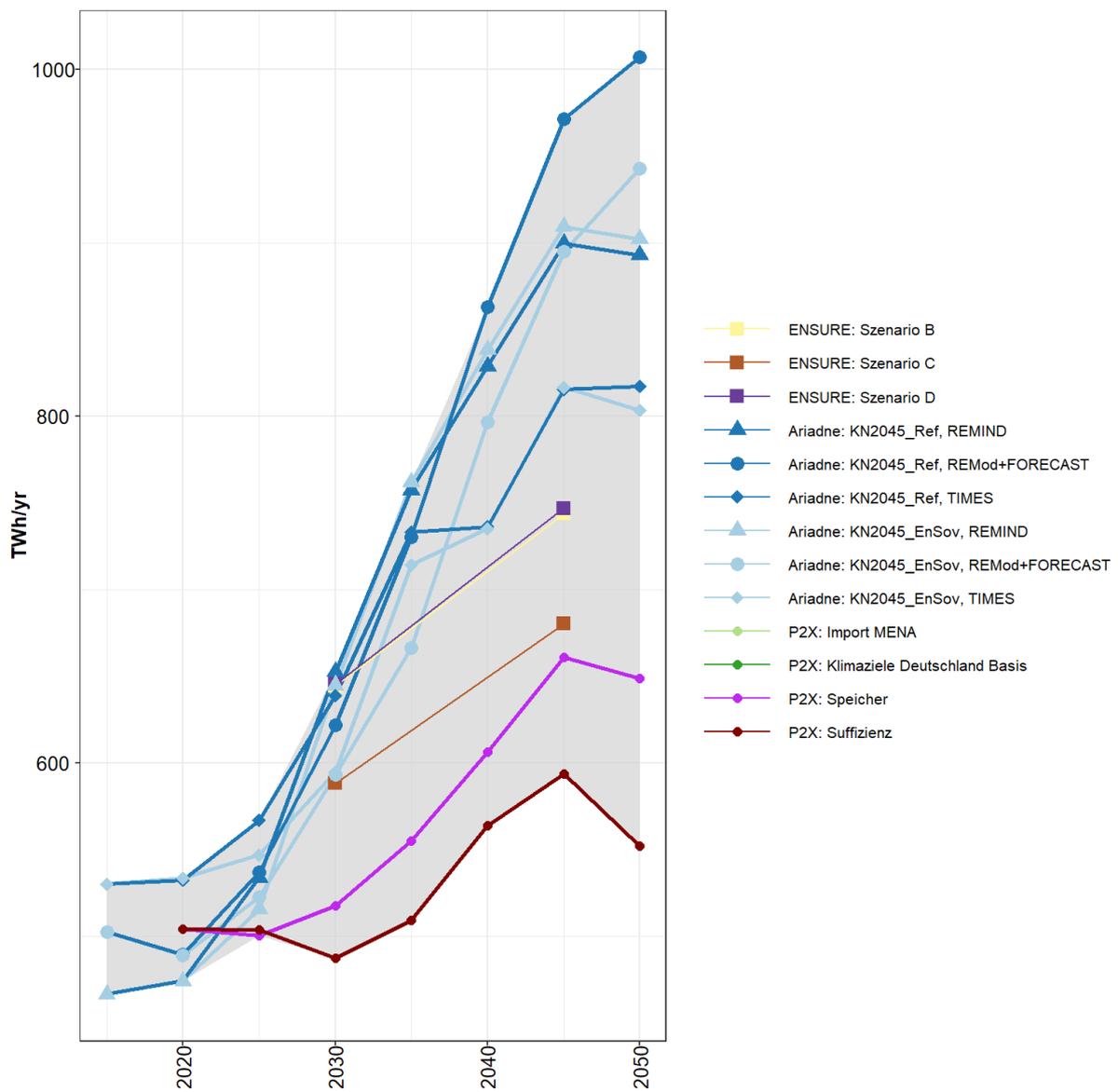


Abb. A 4: Stromverbrauch der Endnutzungssektoren.

A.5 Anzahl von Wärmepumpen im Gebäudesektor

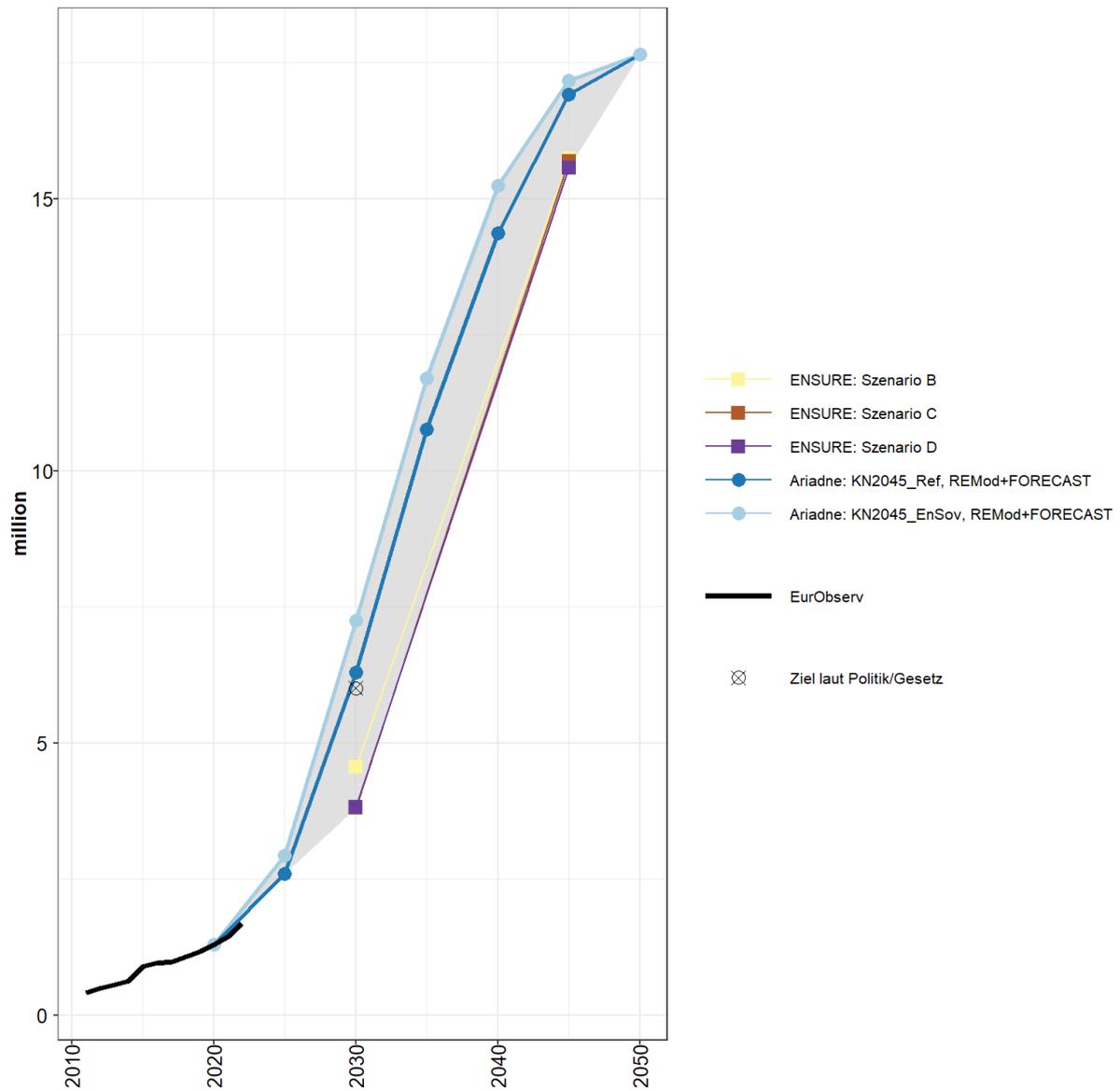


Abb. A 5: Bestand an Wärmepumpen im Gebäudesektor. Das politische Ziel (6 Mio. Wärmepumpen in 2030) ist durch das schwarze Kreuz in der Abbildung markiert.

A.6 Wasserstoffangebot

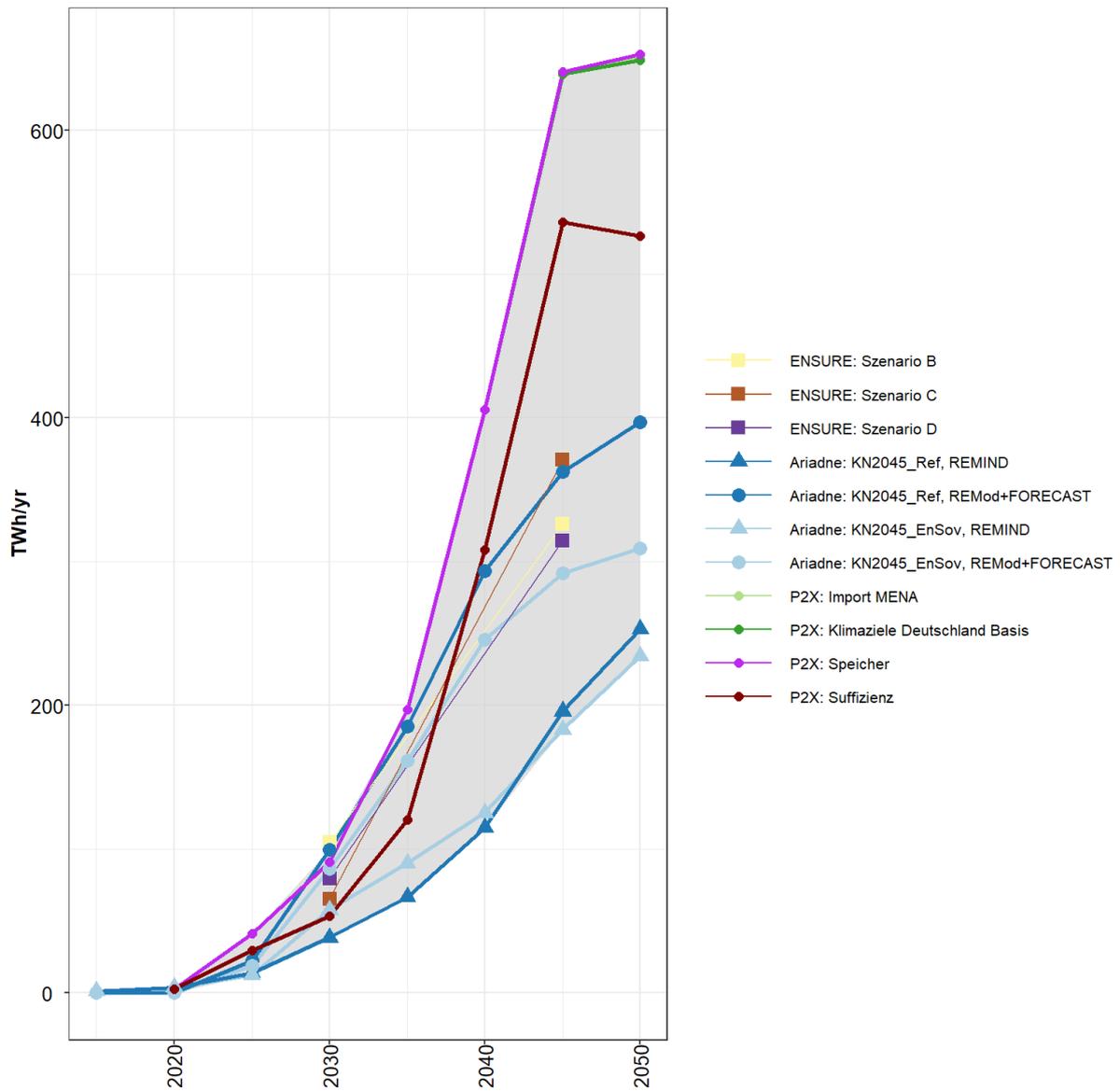


Abb. A 6: Wasserstoffangebot (einheimische Produktion, auch von nicht-grünem Wasserstoff, und Importe).

A.7 Angebot an Wasserstoff und Wasserstoffderivaten

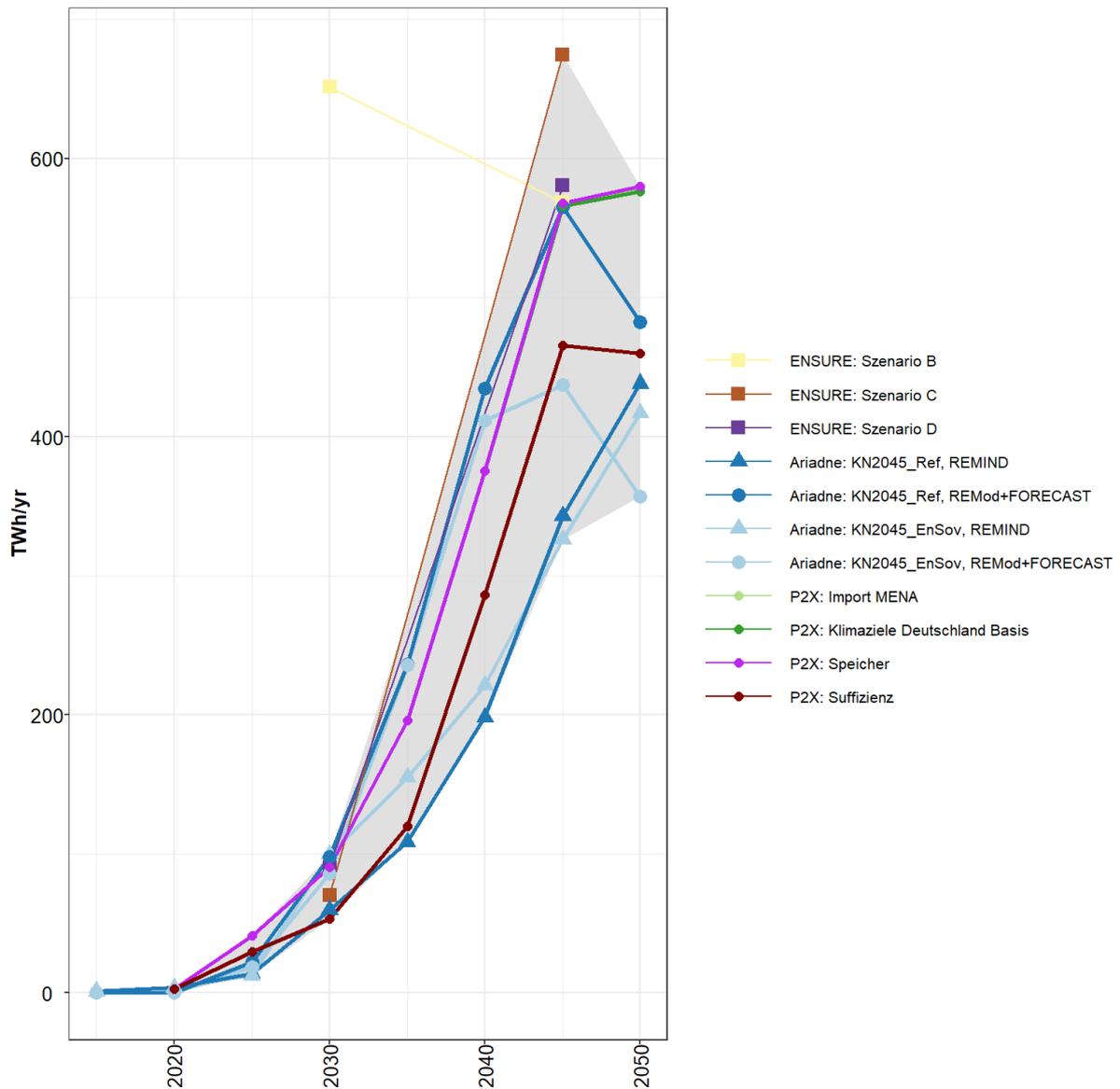


Abb. A 7: Angebot von Wasserstoff und Derivaten (einheimische Produktion und Importe von Wasserstoff und flüssigen und gasförmigen E-Fuels). In dieser Darstellung ist Wasserstoff, der für die E-Fuel-Produktion genutzt wird, nicht enthalten. Übereinstimmend damit ist in Abb. 6. 1 die Nachfrage nach Wasserstoff für die E-Fuel-Produktion ebenso nicht enthalten.