

GasWende

Studien und Analysen

Erdgas-Phase-out in Deutschland

Perspektiven und Pfade aktueller
Klimaneutralitäts-Szenarien

Februar 2024

in Kooperation mit

 **Öko-Institut e.V.**
Institut für angewandte Ökologie
Institute for Applied Ecology

Erdgas-Phase-out in Deutschland

Eine Studie im Auftrag der Gaswende

Autor:innen

Dr. Tilman Hesse, Carmen Loschke, Christoph Heinemann,
Dr. Sibylle Braungardt und Mitarbeit von Marc Stobbe,
Dr. Roman Mendelevitch

Erstellt von

Öko-Institut e.V.
Geschäftsstelle Freiburg,
Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg
+49 761 45295-0
info@oeko.de

Medienansprechpartnerin:

Tina Loeffelbein
Projektleitung GasWende
+49 152 53095168
tina.loeffelbein@gaswende.de

Stand

Februar 2024

Gestaltung und Layout

Elias Domsch | domsch.studio

Impressum

GasWende
Oranienburger Straße 27, 10117 Berlin
info@gaswende.de

© 2024

V.i.S.d.P. Tina Loeffelbein / Gaswende.
Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit
Genehmigung des Herausgebers.

Über das Öko-Institut

Das Öko-Institut ist eines der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungsinstitute für eine nachhaltige Zukunft. Seit der Gründung im Jahr 1977 erarbeitet das Institut Grundlagen und Strategien, wie die Vision einer nachhaltigen Entwicklung global, national und lokal umgesetzt werden kann. Das Institut ist an den Standorten Freiburg, Darmstadt und Berlin vertreten.

Für eine fossilfreie Zukunft

Deutschland hat über Jahrzehnte seine Abhängigkeit vom Erdgas erhöht statt sie – wie viele europäische Nachbarländer – zu verringern. Die Verbrennung von Erdgas ist weltweit eine der drei größten CO₂-Quellen. Aber auch Erdgas selbst ist als Treibhausgas laut IPCC-Bericht bis zu 30-mal so klimaschädlich wie CO₂, wenn die Wirkung über einhundert Jahre betrachtet wird. Zur Einhaltung der Klimaschutzziele ist es deshalb notwendig, den Verbrauch schnell zu verringern. Die vorliegende Metastudie wertet sieben Klimaneutralitätsszenarien aus und zeigt auf, wie die Reduktionspfade in den einzelnen Sektoren aussehen müssen, um die gesetzlich festgelegten Klimaschutzziele der Bundesregierung einzuhalten.

Die Sektoren Gebäude, Industrie und Energie nutzen heute noch enorme Mengen Erdgas. Dabei bleiben uns nur noch 21 Jahre, um diesen Verbrauch auf null zu reduzieren. Die untersuchten Studien zeigen deshalb alle einen steilen Abfall der Erdgasnutzung insbesondere ab 2030. Bis 2035 muss sich demnach der Erdgasverbrauch um bis zu 63% im Vergleich zu 2022 verringern.

Wasserstoff spielt im Gebäudesektor studienübergreifend keine Rolle, weil er auch in Zukunft fünf- bis siebenmal so teuer sein wird wie Erdgas. Ein großer Teil des heutigen Erdgasnetzes, insbesondere das kleinteilige Verteilnetz in die

Haushalte, wird deshalb in 20 Jahren kaum noch benötigt werden. Der Aufbau einer passenden grünen Wasserstoff-Infrastruktur zur Versorgung der Industrie und je nach Studie auch im Energiesektor ist wichtig. Das grüne Wasserstoffnetz wird aber nur einen Bruchteil der Leitungskilometer des heutigen Erdgasnetzes umfassen. Subventionen und massive Investitionen beispielsweise in LNG oder Erdgasnetze sind nicht mehr zukunftsfähig.

Wir brauchen klare politische Rahmensetzungen und Investitionen, um durch Effizienz, Suffizienz, Elektrifizierung oder anderweitigen Ersatz schrittweise auf Erdgas zu verzichten. Investitions- und Planungsentscheidungen, die wir heute treffen, müssen sich daran messen lassen, ob sie in eine fossilfreie Zukunft führen – oder in einen fossilen Lock-In.

Die Meta-Studie zeigt, vor welcher gigantischen Aufgabe wir stehen. Alle Investitionen in die anstehende Transformation bieten uns die Chance, unsere Energiesouveränität zu stärken, die Abhängigkeit von schwankenden, hohen Gaspreisen und politischen Instabilitäten zu verringern und unsere Versorgung mit Energie und Wärme sauber, lebensfreundlich und bezahlbar zu gestalten.

Berlin, im Februar 2024
Tina Loeffelbein
Projektleitung GasWende

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Vorwort | 2 |
| Zusammenfassung | 4 |
| Summary | 6 |
| 1 Einleitung | 8 |
| 2 Methodik der Szenarienauswertung | 10 |
| 3 Relevante Annahmen und Rahmenbedingungen im Studienvergleich | 13 |
| 4 Überblick über den Erdgasverbrauch/-verbrauchsrückgang in den verschiedenen Klimaneutralitätsstudien | 17 |
| 4.1 Gesamtüberblick | 17 |
| 4.2 Detailbetrachtung nach Sektor | 22 |
| 4.2.1 Energiewirtschaft | 23 |
| 4.2.2 Gebäude | 27 |
| 4.2.3 Industrie | 29 |
| 4.2.4 Verkehr | 33 |
| 4.2.5 Landwirtschaft, Abfallwirtschaft, LULUCF, Sonstige | 33 |
| 4.3 Die Rolle von Wasserstoff | 34 |
| 5 Einordnung und Bewertung | 38 |
| Literaturverzeichnis | 40 |
| Abkürzungsverzeichnis | 42 |
| Abbildungsverzeichnis | 43 |

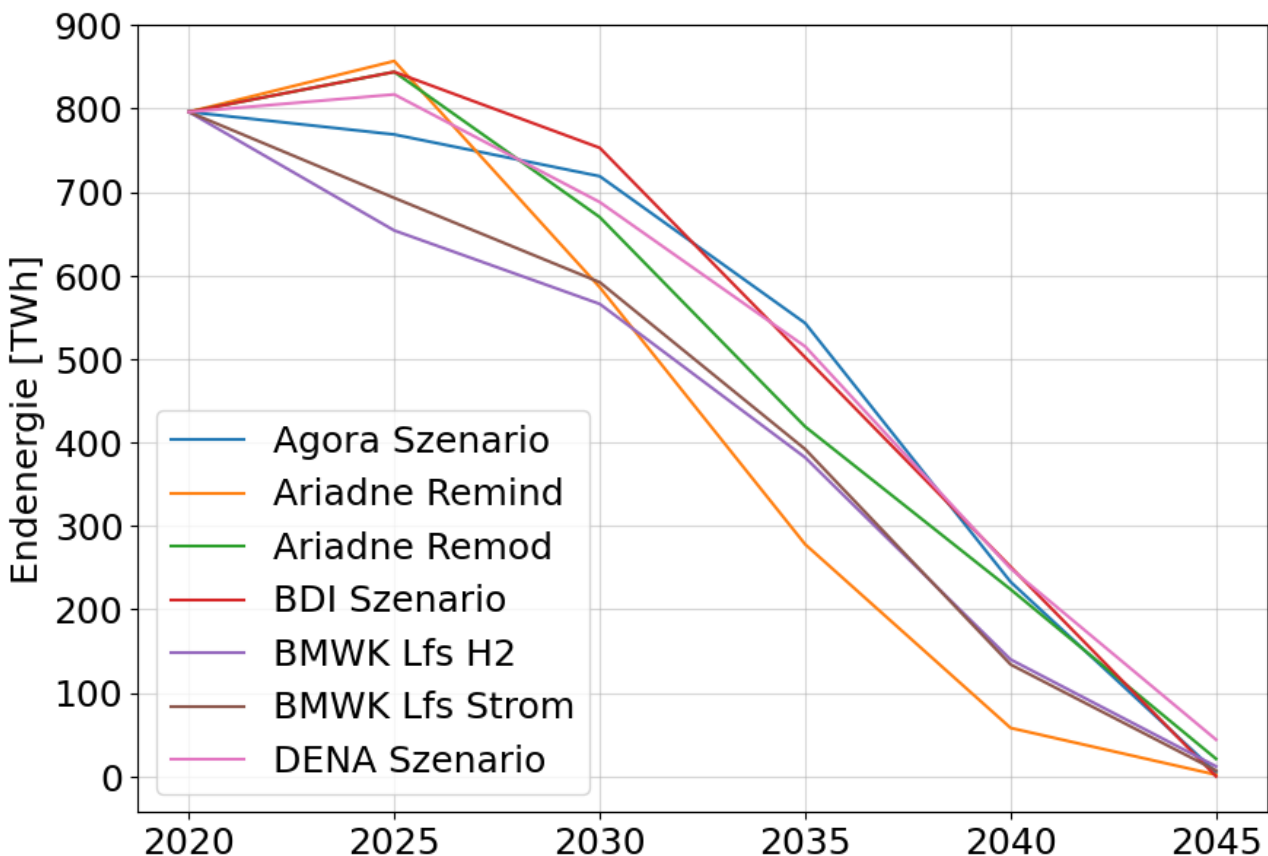
Zusammenfassung

Die vorliegende Studie zeigt, wie der Erdgasverbrauch in Deutschland im Gebäude-, Industrie- und Energiesektor sinken muss, um die deutschen Klimaschutzziele einzuhalten. Dafür wurden folgende Szenario-Studien ausgewertet: BDI Klimapfade 2.0, die DENA Leitstudie, Agora Klimaneutrales Deutschland 2045, Ariadne Klimaneutralität 2045 und die BMWK Langfristszenarien 3. Alle Studien erreichen in ihren Zielszenarien Treibhausgasneutralität im Jahr 2045.

Alle Szenarien zeigen bis zum Zieljahr 2045 einen steilen Abfall in der Erdgasnutzung, insbesondere ab 2030. Im Jahr 2045 werden nur noch in einzelnen Szenarien geringe Mengen an Erdgas eingesetzt. Schon bis zum Jahr 2035 wird eine Reduktion des Erdgasverbrauchs zwischen 28 % und 63 % im Vergleich zum Jahr 2022 erreicht.

Insgesamt zeigen die Studien im zeitlichen Verlauf, wie Erdgas in den untersuchten Sektoren bis in die 2040er Jahre genutzt wird. Die Energiewirtschaft kann in zwei Szenarien bereits bis zum Jahr 2040 vollständig aus der Erdgasnutzung aussteigen. Die Bundesregierung hat im EEG 2023 festgelegt, dass schon im Jahr 2030 80 % des Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energien stammen soll. Insofern ist der Ausstieg aus der Erdgasverstromung weit vor dem Szenariojahr 2045 noch relevanter geworden.

Abbildung 1-1: Reduktionsverläufe der Gesamtendenergie aus Erdgas



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Statistischer Wert 2020 auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für dena – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für BDI – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040

In den einzelnen Sektoren ergibt sich folgendes Bild:

- Der Gebäudesektor zeigt eine geringe Bandbreite im zeitlichen Verlauf der Erdgasnutzung und somit einen hohen Studien-Konsens. Alle Szenarien berechnen für den Gebäudesektor einen linearen Erdgas-Ausstiegspfad bis nahezu null spätestens im Jahr 2045.
- Der Industriesektor zeigt eine mittlere Bandbreite im zeitlichen Verlauf der Erdgasnutzung. Insbesondere im Jahr 2025 und 2030 liegen die Szenarien noch weit auseinander, während sie ab dem Jahr 2035 sehr eng beieinander liegen.
- Der Energiesektor zeigt eine hohe Bandbreite der Erdgasnutzung. Die Szenario-Ergebnisse unterscheiden sich stark bis in die Jahre 2035 und 2040 hinein.

Der Einsatz von Wasserstoff ist durch große Unsicherheiten geprägt: Bereits im Jahr 2030 ergibt sich eine Bandbreite in der Wasserstoffnutzung von ca. 50 TWh, die bis zum Zieljahr 2045 stark zunimmt auf ca. 500 TWh. Konsens besteht allerdings darin, dass der Wasserstoff überwiegend im Industriesektor sowie zum Teil im Energiesektor eingesetzt werden wird. Im Gebäudesektor spielt Wasserstoff keine relevante Rolle: Für die dezentrale Beheizung von Gebäuden wird Wasserstoff den Studien zufolge nicht eingesetzt werden.

Bezüglich der Gasnetz-Infrastruktur lassen sich indirekte Schlussfolgerungen ableiten: Das klassische Erdgas-Verteilnetz wird 2045 kaum noch benötigt werden; die vorhandenen Restmengen an Erdgas werden höchstens punktuell zum Einsatz kommen. Die Szenarien zeigen insbesondere im Gebäudesektor einen eindeutigen Zielpfad hin zu einer komplett eingestellten Nutzung von Erdgas im Zieljahr 2045. Daraus folgt, dass es bei den Verteilnetzen flächendeckend zu Stilllegungen kommen wird. Ein geringer Teil der bestehenden Gasnetz-Infrastruktur wird durch Umwidmung bestehender Transportnetze sowie Neubau von reinen Wasserstoff-Netzen dazu dienen, die Hauptverbrauchscentren der Industrie und der Energiewirtschaft mit Wasserstoff zu versorgen.

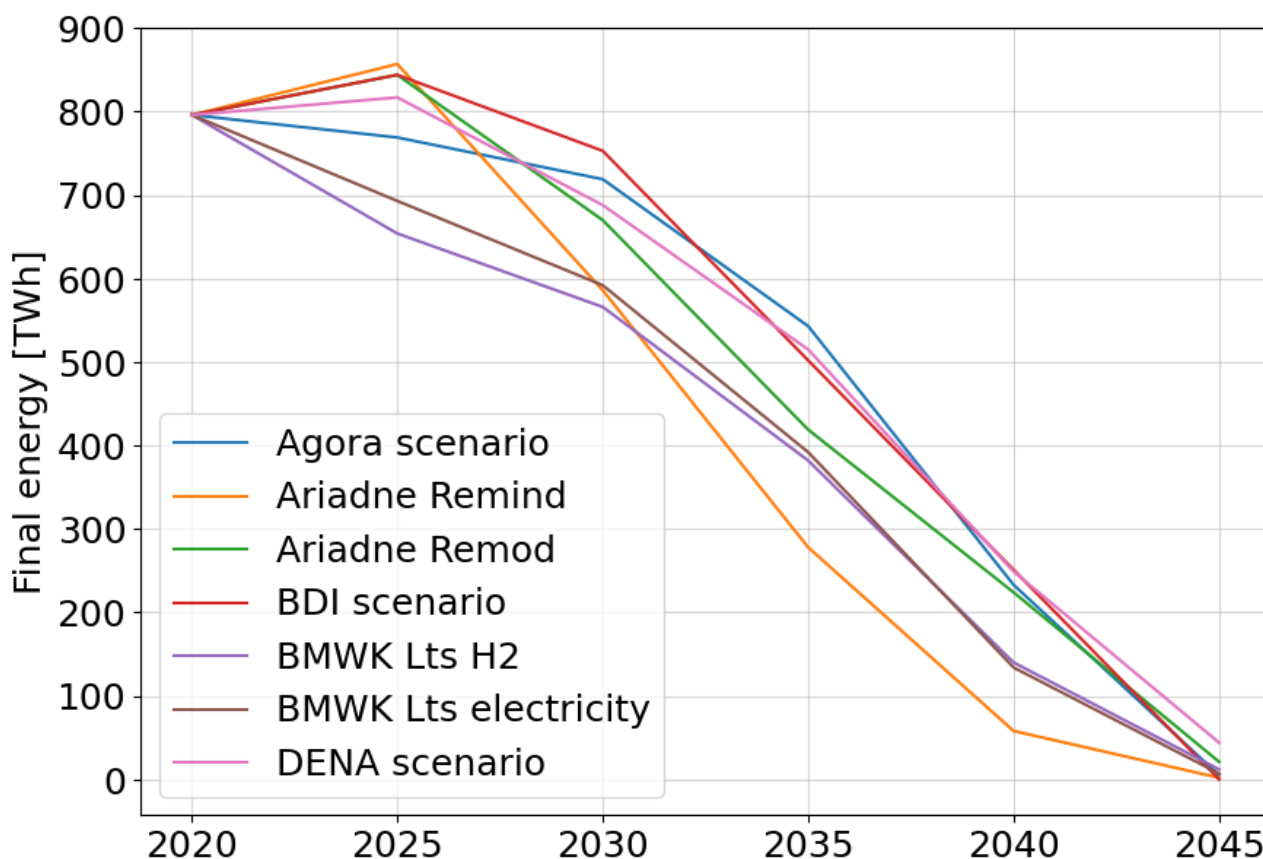
Summary

This study shows how natural gas consumption in the building, industrial and energy sectors in Germany must be reduced to meet climate protection targets. The following scenario studies were evaluated for this purpose: BDI Climate pathways 2.0, the DENA Leitstudie, Agora Climate-neutral Germany 2045, Ariadne Climate-neutrality 2045 and the BMWK Long-term scenarios 3. All studies achieve greenhouse gas neutrality in 2045 in their target scenarios.

All scenarios show a steep decline in the use of natural gas up to the target year 2045, particularly from 2030 onwards. In 2045, only small quantities of natural gas are still used in individual scenarios. A reduction in natural gas consumption of between 28 % and 63 % compared to 2022 levels is already achieved by 2035.

Overall, the studies show how natural gas will be used in the sectors examined up to the 2040s. In two scenarios, the energy industry can completely phase out the use of natural gas by 2040. In the Renewable Energy Law 2023, the German government has stipulated that 80 % of electricity consumption should come from renewable energies by 2030. In this respect, the phase-out of natural gas-fired power generation well before the scenario year 2045 has become even more relevant.

Figure 1-2: Reduction curves for total final energy from natural gas



Source: own representation based on data from the analyzed studies. Statistical value 2020 based on the evaluation tables for the energy balance 1990 to 2022 (data as at November 2023). Values were linearly interpolated for dena - 2025 (with base year 2020), as well as for BDI - 2025 (with base year 2020), 2035, 2040.

The following picture emerges for the individual sectors:

- The buildings sector shows a narrow bandwidth in its trajectory of natural gas utilisation and thus a high study consensus. All scenarios calculate a linear natural gas phase-out path for the buildings sector to almost zero by 2045 at the latest.
- The industrial sector shows a medium range in its trajectory of natural gas utilisation. In 2025 and 2030 in particular, the scenarios are still far apart, while they are very close together from 2035 onwards.
- The energy sector shows a wide range of natural gas utilisation. The scenario results differ greatly until 2035 and 2040.

The use of hydrogen is characterised by great uncertainties: Already in 2030, there is a range in hydrogen utilisation of approx. 50 TWh, which increases sharply to approx. 500 TWh by the target year 2045. However, there is a consensus that hydrogen will be used primarily in the industrial sector and partly in the energy sector. Hydrogen does not play a relevant role in the buildings sector: For decentral heating of buildings hydrogen will not be used according to the studies.

Indirect conclusions can be drawn with regard to the gas grid infrastructure: The traditional natural gas distribution network will hardly be needed in 2045; the existing residual quantities of natural gas will be used selectively, if at all. The distribution grids must be decommissioned across the board: The scenarios show a clear target path towards a complete cessation of natural gas use in the target year 2045, particularly in the buildings sector. A small part of the existing gas grid infrastructure will be used to supply the main consumption centres of the industry and energy sectors with hydrogen by rededicating existing transport grids and building new hydrogen-only grids.

1 Einleitung

Die Bekämpfung der Erderhitzung ist von entscheidender Bedeutung, um eine nachhaltige Zukunft für kommende Generationen zu gewährleisten. Die in den Berichten des Weltklimarates (IPCC) regelmäßig zusammengefassten wissenschaftlichen Erkenntnisse verdeutlichen die Dringlichkeit von Maßnahmen zur Begrenzung des Klimawandels und zeigen die weitreichenden Folgen der Klimakrise auf. Im Kontext der globalen Bemühungen zur Bekämpfung des Treibhauseffekts war das Pariser Abkommen aus dem Jahr 2015 ein wichtiger Durchbruch. Ziel des Abkommens ist die Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau, mit Anstrengungen, den Temperaturanstieg auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen.

Um den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur zu begrenzen, muss die Menge an Treibhausgasemissionen reduziert werden. Das CO₂-Budget beschreibt die Gesamtmenge an Treibhausgasemissionen, die noch in die Atmosphäre abgegeben werden können, ohne dass die angestrebten Temperaturziele überschritten werden. Laut den Berechnungen des Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) wäre das Budget zur Erreichung des 1,5 Grad Ziels bei konstanter Entwicklung der Emissionen in weniger als sechs Jahren aufgebraucht¹.

Auf europäischer Ebene wurden die Energie- und Klimaziele mit dem Fit-for-55 Paket deutlich verschärft: Die Treibhausgasemissionen sollen bis zum Jahr 2030 um 55% sinken im Vergleich zum Jahr 1990. Die neue Erneuerbare-Energien Richtlinien hebt das Ziel für den Anteil erneuerbarer Energien auf mindestens 42,5 Prozent bis 2030 an (möglichst 45 Prozent) und die Energieeffizienzrichtlinie erhöht das Ziel für 2030 auf 11,7%.

In Deutschland verfolgt das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) den Zweck, „zum Schutz vor den Auswirkungen des weltweiten Klimawandels die Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele sowie die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben zu gewährleisten“ und verweist dabei auf das Pariser Klimaabkommen als Grundlage (KSG 2023). Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz setzt Deutschland sich das Ziel, bis zum Jahr 2045 Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. Nach dem Jahr 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erreicht werden.

Deutschland muss aus der Verbrennung von fossilem Gas, Öl und Kohle aussteigen, um das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 zu erreichen. Dabei zeigen alle relevanten Transformations-Studien, die Wege zur Erreichung der Klimaziele betrachten, einen starken Rückgang der Nutzung von Erdgas auf. Aufgrund der langen Lebenszyklen von Infrastrukturinvestitionen muss der Rückgang der Nutzung von Erdgas insbesondere in der Planung der Infrastruktur berücksichtigt werden. Der Expertenrat für Klimafragen hat in seiner Stellungnahme zum Entwurf des Bundes-Klimaschutzprogramms 2023 geschrieben, dass trotz der geplanten Maßnahmen „eine *substanzielle Zielerreichungslücke von deutlich mehr als 200 Mt CO₂-Äq². kumuliert bis 2030 [verbleibt]*“ (Expertenrat für Klimafragen 2023). Insbesondere im Gebäudesektor müssen die Anstrengungen deutlich gesteigert werden, da der Sektor seine im KSG vorgegebene Ziele dreimal in Folge verfehlt hat (Umweltbundesamt 2023).

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, anhand einer Metaanalyse bestehender Szenario-Studien Hintergrundinformationen zu liefern, welche Mengen an Erdgas in der Zukunft in welchen Sektoren

¹ Siehe <https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html>

² Mt CO₂-Äq bedeutet Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente

zum Einsatz kommen können. Die Studie zeigt damit die Bandbreite eines klimaschutzkompatiblen Mengengerüsts für die Erdgasnutzung auf.

2 Methodik der Szenarienauswertung

Für die vorliegende Metastudie haben wir die folgenden Studien ausgewertet:

| | |
|---|--|
| BDI Klimapfade 2.0 | BDI - Bundesverband der Deutschen Industrie (Hg.) (2021): Burchardt, J.; Franke, K.; Herhold, P.; Hohaus, M.; Humpert, H.; Päiväranta, J.; Richenhagen, E.; Ritter, D.; Schönberger; Stefan; Schröder, J.; Strobl, S.; Treis, C. et al. Klimapfade 2.0, Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Boston Consulting Group. |
| DENA Leitstudie | dena – Deutsche Energieagentur (2021): dena-Leitstudie - Aufbruch Klimaneutralität, Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. |
| Agora Klimaneutrales Deutschland 2045 | Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut (2021): Dambeck, H.; Ess, F.; Falkenberg, H.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Kreidelmeyer, S.; Lübbers, S.; Piégsa, A.; Scheffer, S.; Spillmann, T.; Thamling, N.; Wünsch, A.; Wünsch, M. et al. Klimaneutrales Deutschland 2045, Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. |
| Ariadne Klimaneutralität 2045 | Ariadne (2021): Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Sowie Ariadne (2022): Szenarien zur Klimaneutralität: Vergleich der „Big 5“-Studien. Online verfügbar unter https://ariadneprojekt.de/news/big5-szenarienvergleich/ , zuletzt aktualisiert am 17.03.2022, zuletzt geprüft am 29.09.2023. |
| BMWK Langfristszenarien 3 | Fraunhofer ISI - Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung; Consentec; IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung; TU Berlin Fachgebiet E&R (2022): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Langfristszenarien 3, Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung; Consentec; Institut für Energie- und Umweltforschung; TU Berlin Fachgebiet E&R. Online verfügbar unter https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/ . |

Zudem haben wir auf den Studienvergleich des ARIANDE Projektes zurückgegriffen (Ariadne 2022).

Alle Studien erreichen mit ihren Zielszenarien Treibhausgasneutralität im Jahr 2045. Die Studien unterscheiden sich in der Anzahl der Szenarien. Manche Studien dokumentieren mehrere Szenarien mit spezifischen Annahmen während andere nur ein Szenario darstellen. Die Studien der DENA, des BDI und der Agora dokumentieren nur jeweils ein Szenario. Die BMWK Langfristszenarien 3 haben mehrere Szenarien berechnet. Um die Bandbreite zwischen einer Strom-fokussierten und einer Gas-fokussierten Versorgung mit Energie aufzuzeigen, haben wir die Szenarien T45-H₂ und T45-Strom ausgewählt. Die ARIADNE Szenarien wurden gemäß der Datenverfügbarkeit (in Ariadne 2022) ausgewählt.

Es ist zu berücksichtigen, dass alle Studien außer der BMWK Langfristszenarien vor dem Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine berechnet wurden und die resultierenden Verwerfungen auf den Energiemärkten nicht berücksichtigt wurden. In der folgenden Tabelle stellen wir die von uns ausgewählten Szenarien mit ihren Charakteristika dar.

Tabelle 2-1: Überblick über analysierten Studien und Szenarien

| Studie | Jahr der Veröffentlichung | Kurztitel der Studie | analysiertes Szenario | Basisjahr der Szenarienrechnung | Bezeichnung der Szenarien im Rahmen dieser Studie |
|---------------------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------|---|
| BDI Klimapfade 2.0 | 2021 | BDI | Zielpfad | 2019 | BDI Szenario |
| DENA Leitstudie | 2021 | DENA | KN100 | 2018 | DENA Szenario |
| Agora Klimaneutrales Deutschland 2045 | 2021 | Agora | KN2045 | 2016/2018 | Agora Szenario |
| Ariadne Klimaneutralität 2045 | 2021 | Ariadne | Remind-Mix | 2015 | Ariadne Remind |
| Ariadne Klimaneutralität 2045 | 2021 | Ariadne | ReMod-Mix | 2015 | Ariadne Remod |
| BMWK Langfristszenarien 3 | 2022 | BMWK LFS | T45- H2 | 2019 | BMWK LFS H ₂ |
| BMWK Langfristszenarien 3 | 2022 | BMWK LFS | T45- Strom | 2019 | BMWK LFS Strom |

Quelle: Öko-Institut

Was haben wir analysiert?

Wir haben für jedes Szenario die Endenergie für Erdgas, synthetische Methan, Biogas und Wasserstoff ausgewertet. Damit zeigen wir einerseits, wieviel Erdgas oder sonstiges Methan (z.B. Biogas oder synthetisches Methan) in den jeweiligen Szenarien noch benötigt wird. Andererseits zeigen wir den Hochlauf von Wasserstoffbedarfen in den Szenarien. Die Bilanzierung in den Szenarien folgt der Aufteilung der Sektoren nach dem Klimaschutzgesetz (KSG 2023): Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude und Verkehr. Der Sektor Landwirtschaft ist für die Gasnachfrage kaum relevant aber in unseren Ergebnissen berücksichtigt. Für den Sektor Abfallwirtschaft sehen die analysierten Szenarien keine Gas-Nachfrage vor.

Folgende Herausforderungen ergaben sich in der vergleichenden Szenarienauswertung:

- Herausforderung Energiewirtschaft:** Die Studien weisen meist lediglich die Nettostromerzeugung je Energieträger aus, aber nicht den tatsächlichen Energieträgereinsatz zur Stromerzeugung. Um die hinter der Nettostromerzeugung liegende Gasnachfrage ermitteln zu können, haben wir die folgende Methodik angewendet: zunächst haben wir die Zahlen der AG Energiebilanzen (vgl. BMWK (2022)) in den verschiedenen Szenario-Basisjahren mit den Szenariozahlen im Sektor Energiewirtschaft verglichen. Dort, wo in den Szenarien die Gasverbräuche für die Stromerzeugung deutlich niedriger liegen als in der Statistik, schlagen wir einen Faktor von 1,83³ auf die in den Szenarien dargestellten Gasverbräuche für die Stromerzeugung auf, da es sich vermutlich um die Energieträgerverteilung bezogen auf die Nettostromerzeugung handelt. Ebenso gehen wir beim Gaseinsatz für die Fernwärmeerzeugung vor: hier gibt es bei einigen Szenarien eine Erhöhung des Gaseinsatzes um den Faktor 1,17⁴.
- Die dokumentierte Datenlage ist sehr unterschiedlich und Begriffe sind nicht eindeutig definiert:** Die Dokumentation der einzelnen Studien unterscheiden sich zum Teil in der Wahl der verwendeten Begriffe und Definitionen. Es werden z.B. die Begriffe Methan, fossiles Gas, Gas oder e-Methan verwendet. Die Begriffe sind dabei nicht eindeutig definiert und können Teilmengen

³ Der Faktor 1,83 ergibt sich unter Berücksichtigung des Gaseinsatzes für die Fernwärme aus KWK-Anlagen sowie durchschnittlicher elektrischer Wirkungsgrade in Gas-Kraftwerken.

⁴ Der Faktor 1,17 berücksichtigt die Wirkungsgradverluste in KWK-Anlagen, die anteilig auch der Fernwärme zugeschlagen werden.

anderer Begriffe darstellen. Das erschwert die vergleichende Analyse. Zudem wird der nicht-energetischer Einsatz von Erdgas und Wasserstoff selten eindeutig ausgewiesen.

- **Nicht alle Studien weisen für alle Stützjahre Werte aus – Interpolation notwendig:** Die Studien der dena und des BDI weisen nicht alle Werte für die fünf-Jahres Schritte von 2025 bis 2045 auf. Das dena-Szenario beginnt die Berechnungen erst im Jahr 2030, während das BDI-Szenario lediglich Werte für 2030 und das Zieljahr 2045 liefert. Um dennoch einen Vergleich aller Szenarien für die betrachteten Jahre zu ermöglichen, wurden die fehlenden Werte mittels linearer Interpolation ergänzt. Dies soll insbesondere auch die Verzerrung der gezeigten Bandbreiten verhindern. Zur Interpolation der 2025-Werte wurde jeweils als Basis der Wert aus dem Jahr 2020 verwendet.

3 Relevante Annahmen und Rahmenbedingungen im Studienvergleich

Bei den analysierten Klimaneutralitätsstudien handelt es sich um Szenarien, die auf Modellierungen beruhen. Die verwendeten Modelle haben dabei im Rahmen bestimmter Restriktionen (z.B. THG-Minderungspfad) Freiheitsgrade, z.B. wann und in welchem Ausmaß Technologien ausgebaut werden und wie sie eingesetzt werden.

Zwei Effekte sind in diesem Zusammenhang bei der Szenarien Analyse zu beachten:

- Nicht alle Entscheidungen werden von den Modellen in einer Optimierung getroffen. So können die Studienautoren z.B. Ausbaugeschwindigkeiten bestimmter Technologien begrenzen, Obergrenzen für bestimmte Technologien vorgeben oder Potenziale beispielsweise für CCS-Technologien oder den EE-Ausbau begrenzen.
- Zudem reagieren Optimierungsmodelle z.T. sensibel auf die angenommenen Rahmendaten. So können Annahmen zu beispielsweise Preisen für Energieträger oder Kosten für bestimmte Technologien das Szenarien Ergebnis erheblich beeinflussen.

Im Folgenden haben wir Rahmendaten sowie einige Studienergebnisse herausgegriffen, um zu zeigen, wie sich die analysierten Szenarien unterscheiden. Es kann jedoch kein kausaler Zusammenhang zwischen diesen Annahmen und bestimmten Szenarien Ergebnissen gezogen werden, da in einer Optimierung eine Vielzahl von Parametern in das Modell eingehen und ein einzelner Parameter nicht zwangsläufig einem einzelnen Ergebnis zugeordnet werden kann.

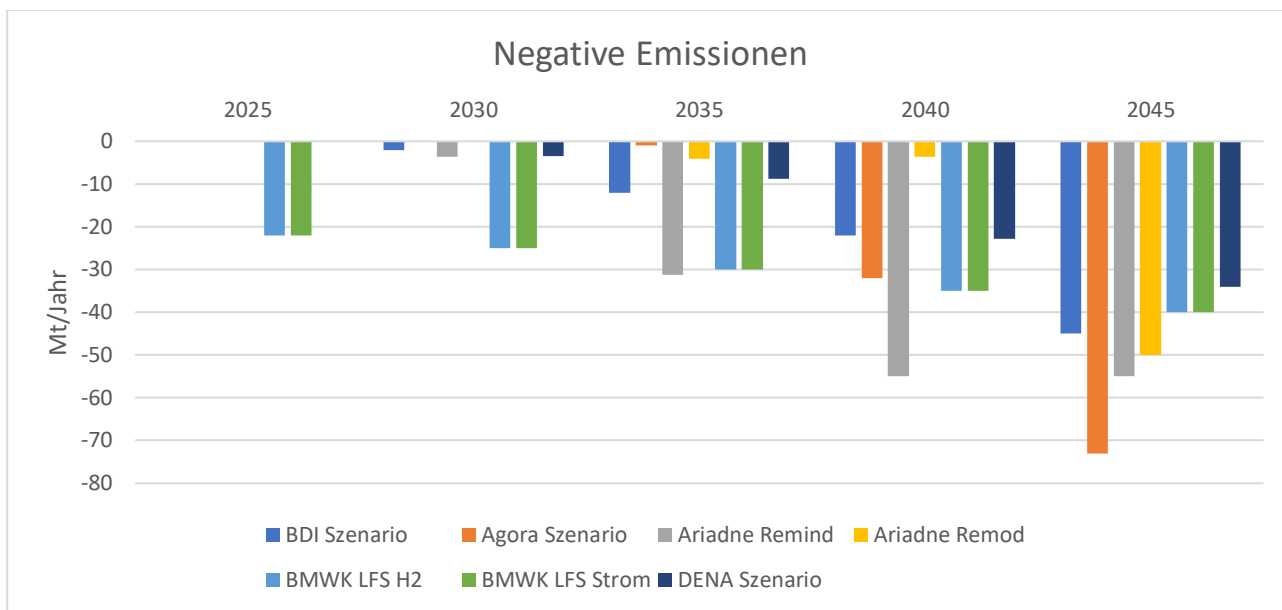
Negative Emissionen

Negative Emissionen sind eine Möglichkeit verbleibende Emissionen langfristig zu speichern. Je größer und je günstiger das Potenzial für negative Emissionen angenommen wird, desto eher können verbleibende Rest-THG-Emissionen in anderen Sektoren mit den THG-Minderungszielen kompatibel sein.

Abbildung 3-1 stellt die negativen Emissionen je Szenario dar. Alle Szenarien weisen einen Anstieg der negativen Emissionen über den Zeitverlauf auf. Im Jahr 2045 werden zwischen 35 und 73 Millionen Tonnen CO₂ langfristig gespeichert. Eine Besonderheit weisen die Szenarien der BMWK Langfristszenarien auf. Sie bilanzieren schon heutige negative Emissionen durch Landnutzung und Forstwirtschaft und weisen entsprechend schon im Jahr 2025 substanzielle negative Emissionen aus. In anderen Studien (beispielsweise Agora Klimaneutralität 2045) werden die THG-Senken in Böden und Wäldern „[...] nur *nachrichtlich ausgewiesen und nicht zur Erreichung der Klimaziele angerechnet* [...]“ (Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut 2021) und die in Abbildung 3-1 ausgewiesenen negativen Emissionen werden auf Basis von Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS), Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) und die stoffliche Bindung von CO₂ in der Chemieindustrie erreicht.

Alle Szenarien bewegen sich hierbei um die gleiche Größenordnung. Es ist darum nicht zu erwarten, dass der Ausstiegspfad aus Erdgas einzelner Szenarien entscheidend von anderen Szenarien aufgrund der Annahmen zu negativen Emissionen abweicht.

Abbildung 3-1: Negative CO₂-Emissionen



Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Daten der dargestellten Studien

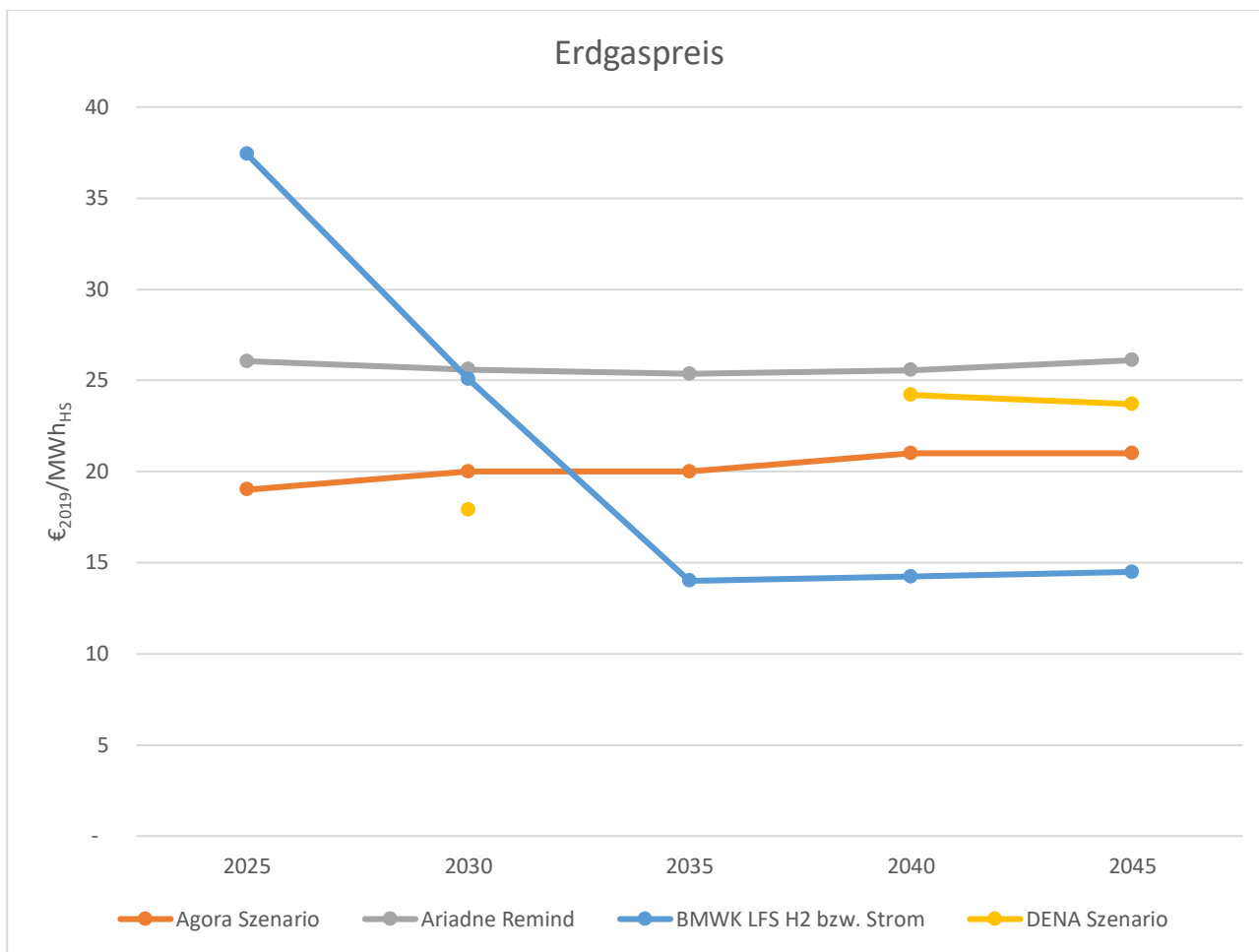
Erdgaspreise

Erdgaspreise sind eine Inputgröße der Modellierung, welche den Einsatz von Technologien, die Erdgas nutzen, beeinflussen kann. Je günstiger die Kosten für Erdgas angenommen werden, desto mehr kann Erdgas beispielsweise in der Wärme- oder Stromerzeugung zum Einsatz kommen.

Abbildung 3-2 stellt die Erdgaspreise pro Szenario dar. Es ist zu erkennen, dass lediglich die BMWK Langfristszenarien den Erdgaspreisschock aus dem Jahr 2022 berücksichtigen. Alle Szenarien bewegen sich jedoch ab 2035 in einer Bandbreite zwischen 14 und 25 €₂₀₁₉/MWh_{HS}⁵.

⁵ HS = oberer Heizwert oder Brennwert; Die tiefgestellte Jahreszahl bei €₂₀₁₉ definiert das Basisjahr. für die angenommenen Preise.

Abbildung 3-2: Entwicklung der Erdgaspreise in den Szenarien



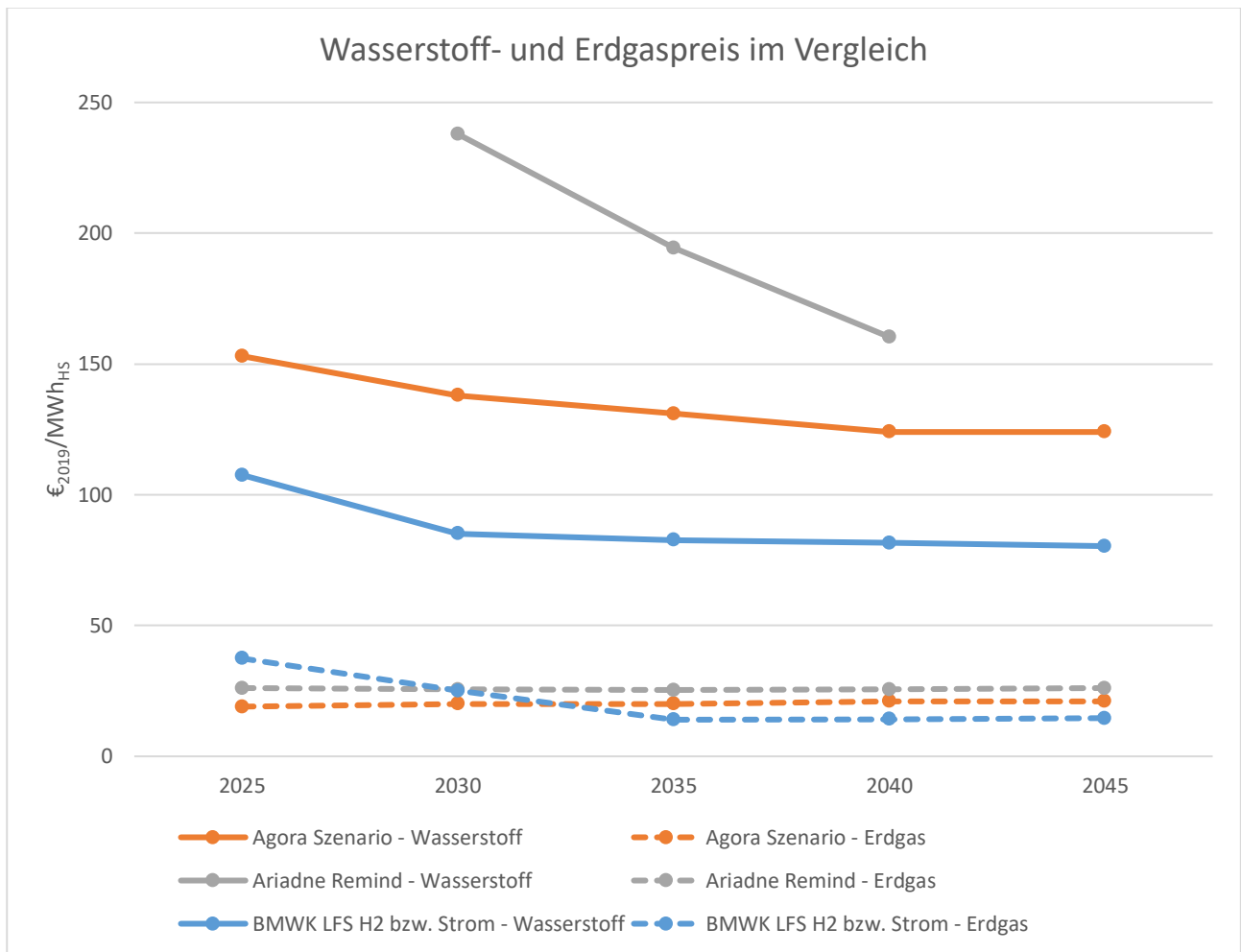
Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Daten der dargestellten Studien

Wasserstoffpreise

Wasserstoffpreise sind ebenfalls eine Inputgröße der Modellierung, die den Einsatz von Technologien, die Wasserstoff nutzen, beeinflussen kann. Je günstiger die Kosten für Wasserstoff angenommen werden, desto mehr kann Wasserstoff in unterschiedlichen Sektoren zum Einsatz kommen.

Abbildung 3-3 stellt die Erdgas- und Wasserstoffpreis der Szenarien vergleichend dar. Dabei wird in den publizierten Daten der Studien nicht zwischen erneuerbarem oder anderem Wasserstoff unterschieden. Nicht in allen Studien werden Wasserstoffpreise Modell-exogen als Inputparameter vorgegeben. Vielmehr sind sie ein Modell-endogenes Ergebnis der Modellierung. In dem Fall können diese hier nicht ausgewiesen werden. Der Preis für Wasserstoff liegt ca. 5- bis 7-mal so hoch wie der Preis für Erdgas im Jahr 2040. Die Preisspanne bei Wasserstoff ist im Vergleich zum Erdgaspreis sehr viel größer. Die Bandbreite der Wasserstoffpreise beträgt im Jahr 2030 ca. 150 €/2019/MWh_{HS} und konvergiert zum Jahr 2040 auf eine Bandbreite von ca. 80 €/2019/MWh_{HS}.

Abbildung 3-3: Wasserstoff- und Erdgaspreis im Vergleich



Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Daten der dargestellten Studien

4 Überblick über den Erdgasverbrauch/-verbrauchsrückgang in den verschiedenen Klimaneutralitätsstudien

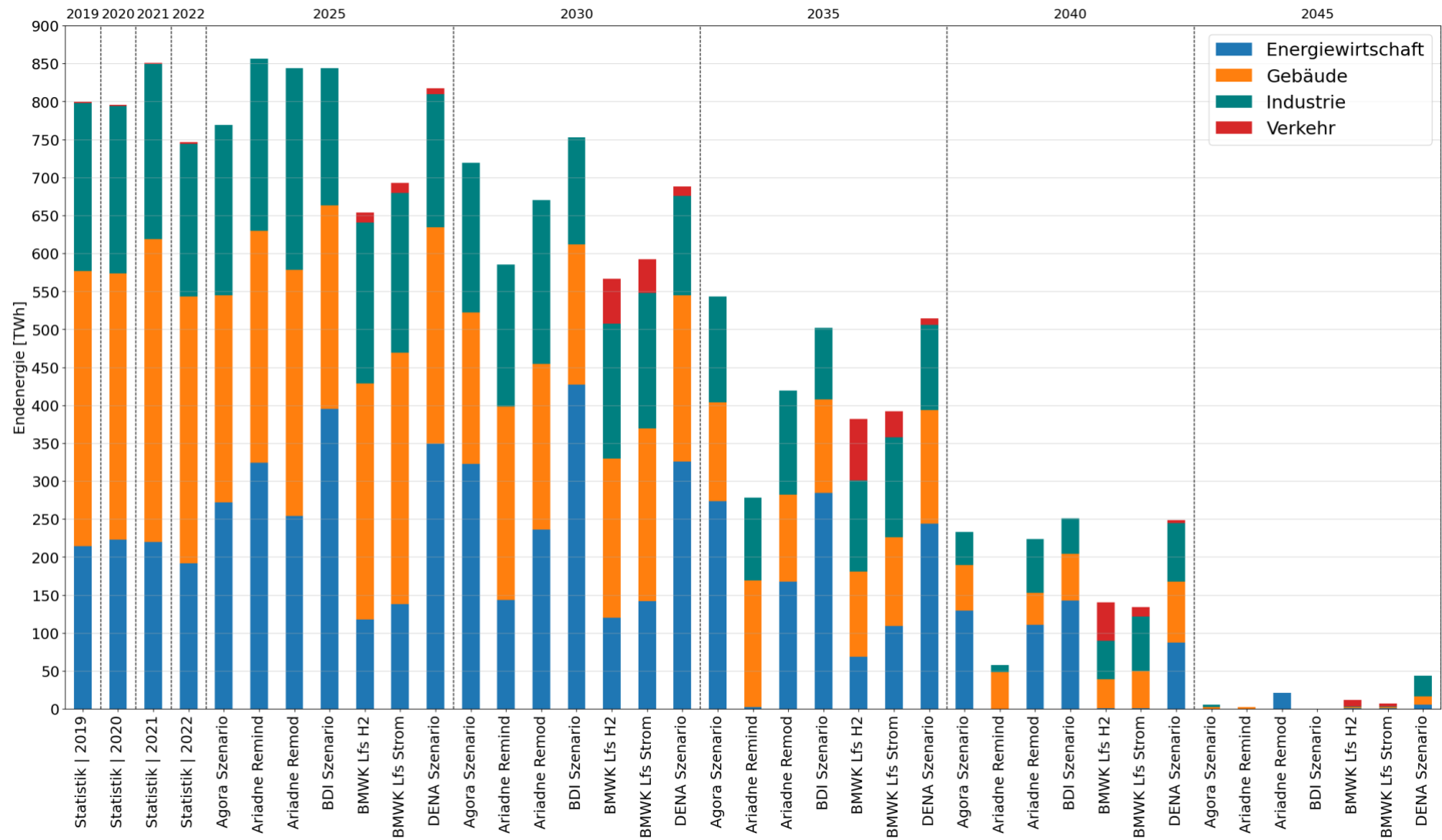
4.1 Gesamtüberblick

Im folgenden Kapitel erfolgt eine detaillierte Analyse der Erdgas-Endenergieverbräuche auf Basis der untersuchten Studien. Dabei wird sowohl die zeitliche Entwicklung bis zum angestrebten Zieljahr 2045 als auch die jeweilige Aufschlüsselung der Verbräuche auf die Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude, Industrie und Verkehr beleuchtet (siehe Abbildung 4-1). Im Ergebnis zeigen sich deutliche Unterschiede, die u.a. auf die in der Berechnung zugrunde liegenden Annahmen zurückzuführen sind. Die zeitlichen Verläufe der Erdgas-Reduktion über die fünf-Jahres Schritte lassen sich grob in drei Kategorien einteilen: Frontloading, lineare Reduktion und Backloading.

Frontloading bezieht sich auf eine Strategie, bei der der Großteil der Reduktion und des Übergangs zu alternativen Energiequellen zu Beginn des Zeitraums erfolgt. Lineare Reduktion hingegen beschreibt eine gleichmäßige Verringerung der Erdgasnutzung über den gesamten Zeithorizont hinweg. Im Gegensatz zu Frontloading steht Backloading, welches eine verstärkte Reduktion in den späteren Jahren des betrachteten Zeitraums vorsieht.

Zur Beurteilung und Kontextualisierung dieser Szenarien wurden statistische Daten aus den Jahren 2019 bis 2022 herangezogen (AGEB 2023). Obwohl 2020, 2021 und 2022 als Ausnahmejahre betrachtet werden müssen, da sowohl die Corona-Pandemie als auch der Ukrainekrieg massive Auswirkungen auf die deutsche Gesellschaft und Wirtschaft hatten, ermöglichen sie dennoch einen Vergleich zwischen den Studienberechnungen und die kontextuelle Einordnung in die reale Entwicklung der Erdgasverbräuche.

Abbildung 4-1: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Erdgas bis 2045

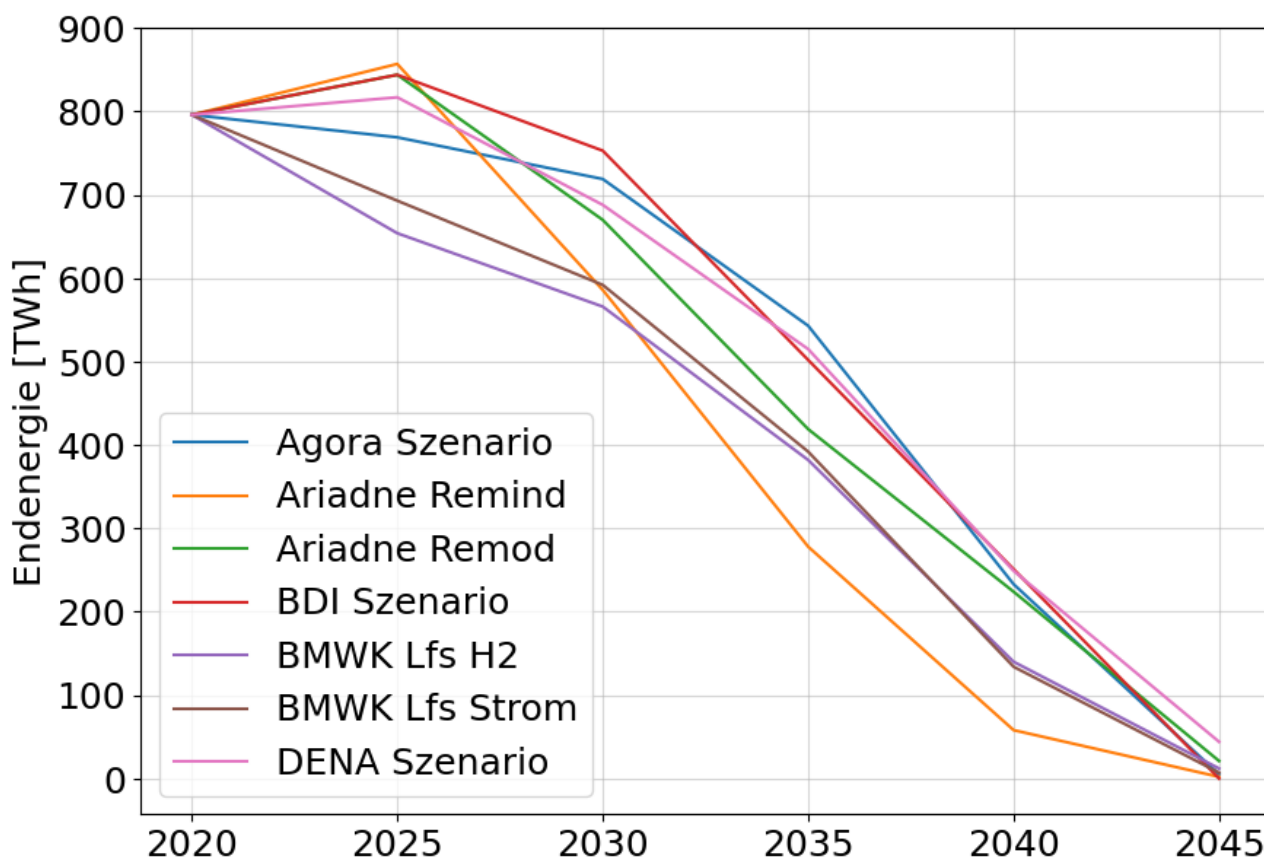


Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Daten der dargestellten Studien. Statistische Daten auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für das DENA Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für das BDI Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040

Die statistischen Daten von 2019 bis 2022 zeigen eine anfängliche Zunahme des jährlichen Endenergieverbrauchs für Erdgas bis 2021 von 800 TWh auf ca. 850 TWh. Im Zuge der Energiekrise kam es im Jahr 2022 zu einem Rückgang auf nurmehr 745 TWh, der Bedarf wurde also innerhalb eines Jahres um über 100 TWh gesenkt.

In Abbildung 4-2 ist die sukzessive Reduktion der Gesamtenergie aus Erdgas je Szenario dargestellt. Das statistische Jahr 2020 vervollständigt die Zeitreihe um den aktuellen Wert. Während die Langfristszenarien des BMWK und das Agora Szenario bereits Reduktionen bis 2025 berechnen, steigen die Erdgasverbräuche der übrigen Szenarien von 2020 bis 2025 zunächst an.

Abbildung 4-2: Reduktionsverläufe der Gesamtenergie aus Erdgas



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Statistischer Wert 2020 auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für dena – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für BDI – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040

Im Agora Szenario sinken die Erdgas-Verbräuche zunächst nur schwach. Ab 2035 nimmt die Reduktion Fahrt auf und der Verbrauch verringert sich um ca. 300 TWh bis 2040 und um ca. 230 TWh bis 2045. Im Zieljahr werden noch 2 TWh den Gebäuden und 3 TWh der Industrie zugeschlagen.

Im Ariadne Remind Szenario wird tendenziell nach der Strategie des Frontloadings die Reduktion des Verbrauchs zwischen 2025 und 2040 um etwa 220 bis 300 TWh alle fünf Jahre berechnet. Dies wird insbesondere durch eine Verbrauchsreduktion im Energiesektor erreicht. Hier werden bereits 2035 nur noch 2 TWh Endenergie aus Erdgas verbraucht. Im Zieljahr liegt der Erdgasverbrauch noch bei 2 TWh (im Gebäudesektor).

Das Szenario Ariadne Remod nimmt ähnlich zu Ariadne Remind hohe Verbräuche für 2025 an. Die Endenergie aus Erdgas wird zunächst weniger steil und anschließend linear um ca. 200 TWh alle fünf Jahre reduziert. Im Jahr 2045 werden insgesamt noch 21 TWh Erdgas verbraucht, allesamt in der Energiewirtschaft.

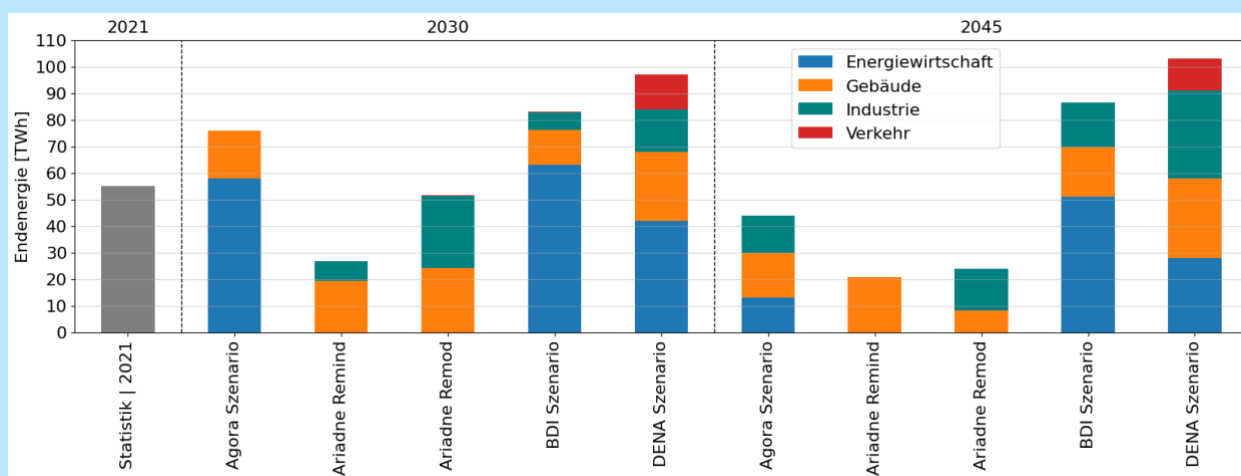
Die beiden analysierten BMWK Szenarien ähneln sich in ihren Verläufen: die aus Erdgas bezogene Endenergie liegt 2025 bereits deutlich unter dem Wert der übrigen Szenarien (650 bis 700 TWh). Die Reduktionsverläufe entsprechen eher der Strategie des Backloadings, bei dem die stärkste Reduktion zwischen den Jahren 2030 und 2040 berechnet wird (ca. 185 TWh im H₂-Szenario bis 255 TWh im Strom-Szenario). Im Jahr 2045 liegen die Erdgasverbräuche hier bei 7-12 TWh. Die Anteile in den Sektoren Energie, Industrie und Gebäude sind dabei die gleichen, im Szenario H₂ werden dagegen 5 TWh mehr dem Verkehrssektor zugeschlagen.

Sowohl im DENA Szenario als auch im BDI Szenario beginnen die Berechnungen erst ab dem Jahr 2030; ausgewiesene Werte für 2035 und 2040 liegen zudem nur im DENA Szenario vor. Die Reduktion verläuft hier überwiegend linear. Während im BDI Szenario bis zum Jahr 2045 die Erdgasverbräuche auf tatsächlich 0 TWh reduziert werden, werden im Dena-Szenario noch 44 TWh/a verbraucht. Diese teilen sich auf die Sektoren Energiewirtschaft (ca. 6 TWh), Gebäude (11 TWh) und Industrie (27 TWh) auf.

Die Rolle von Biogas/Biomethan

Die gasförmige Biomasse lässt sich aufteilen in Biogas und Biomethan. Biogas ist ein Gemisch aus Biomethan und CO₂, welches typischerweise direkt in KWK-Anlagen im ländlichen Raum zur Verstromung eingesetzt und nicht über die weitere Erdgas-Infrastruktur verteilt wird. Biomethan hingegen ist chemisch betrachtet das gleiche Molekül wie Erdgas (CH₄) und kann folglich in die bestehende Erdgas-Infrastruktur eingespeist werden. Die untenstehende Abbildung zeigt den Endenergieverbrauch für Biogas bzw. Biomethan aus der offiziellen Statistik sowie ausgewählte Szenarien in den Jahren 2030 und 2045. Die angegebenen Biogas/Biomethan Endenergiemengen sind zusätzlich zu den in Abbildung 4-1 gezeigten Erdgas-Mengen zu sehen.

Abbildung 4-3: Biogas/Biomethan



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien.

Der statistische Wert lässt sich weiter aufteilen in ca. 50 TWh Biogas und ca. 5 TWh Biomethan. Die betrachteten Szenarien weisen leider nicht explizit aus, ob es sich bei der gasförmigen Biomasse um Biogas, Biomethan oder eine Mischung aus beiden handelt. Insgesamt zeigt sich ein gemischtes Bild bezüglich der gasförmigen Biomasse. In der BDI und DENA Studie steigt ihr Anteil bis 2030 an und steigert sich weiter bis 2045. Die Agora und Ariadne Szenarien sehen bis 2045 eher eine Reduktion von Biogas/Biomethan.

Im Sektor Energiewirtschaft wird gasförmige Biomasse nur in drei Studien betrachtet: Agora, BDI und DENA. In allen Szenarien sinkt ihr Anteil über die Zeit von 2030 bis 2045. Im Gebäudesektor kommt gasförmige Biomasse in allen fünf Szenarien vor, mehr oder weniger gleichbleibend im Zeitverlauf. Der Industriesektor sieht ein gemischtes Bild: Agora, BDI und DENA sehen hier eine Zunahme der Biogas/Biomethan Nutzung bis 2045. In den Ariadne-Szenarien hingegen nimmt die Nutzung im Industriesektor im Zeitverlauf ab. Im Verkehrssektor wird gasförmige Biomasse nur im DENA Szenario eingesetzt – sowohl im Jahr 2030 als auch im Jahr 2045.

4.2 Detailbetrachtung nach Sektor

Wie Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 zeigten, unterscheiden sich die Ergebnisse der Szenarien nicht nur in ihrem Reduktionsverlauf, sondern auch in ihrer Verteilung der Endenergie auf die Haupt-Erdgasverbrauchs-Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude, Industrie und Verkehr. Diese werden im Folgenden jeweils in einer Detailanalyse untersucht und unter anderem mittels Boxplots visualisiert.

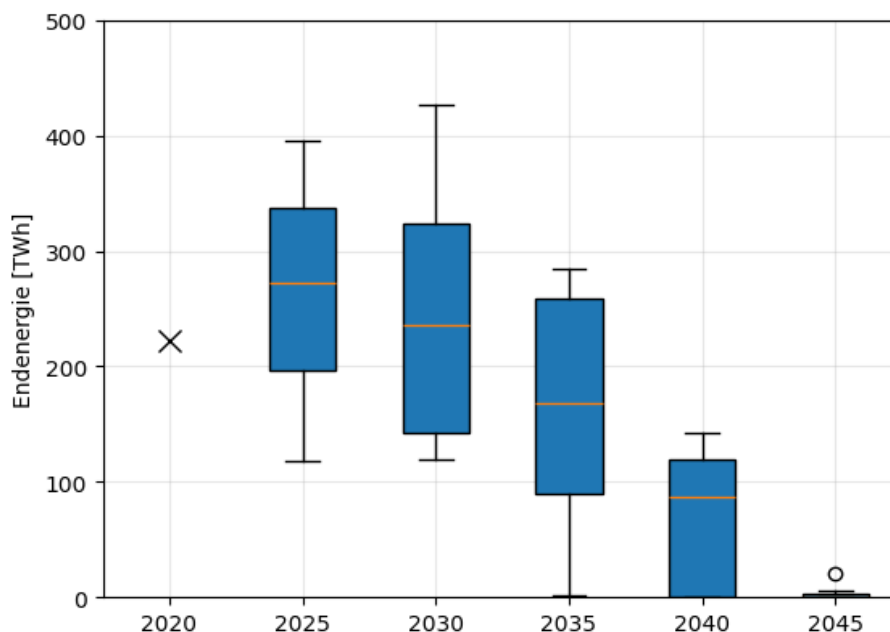
Erläuterung Boxplot

Ein Boxplot ist eine statistische Visualisierungsmethode, die hilft, die Verteilung und zentrale Tendenz eines Datensatzes zu verstehen. Die (in den folgenden Abbildungen dargestellte blaue) Box repräsentiert den Interquartilsbereich (IQR). Dies ist der Bereich, in dem sich die mittleren 50% der Daten befinden. Die untere Grenze der Box entspricht demensprechend dem ersten Quartil (Q1) und damit 25% der Werte und die obere Grenze dem dritten Quartil (Q3) und markiert damit 75% der Werte. Die (im Folgenden orangene) Linie in der Box zeigt den Median an. Der Median liegt genau in der Mitte des Datensatzes. Die "Whiskers" (Linien außerhalb der Box) erstrecken sich bis zum Minimum und Maximum der Daten, es sei denn, es gibt Ausreißer (weißer Punkt). Ausreißer werden basierend auf dem IQR berechnet: Wenn ein Datenpunkt kleiner als das 1,5-fache des IQR unter dem ersten Quartil oder größer als das 1,5-fache des IQR über dem dritten Quartil liegt, wird er als Ausreißer betrachtet und separat dargestellt.

4.2.1 Energiewirtschaft

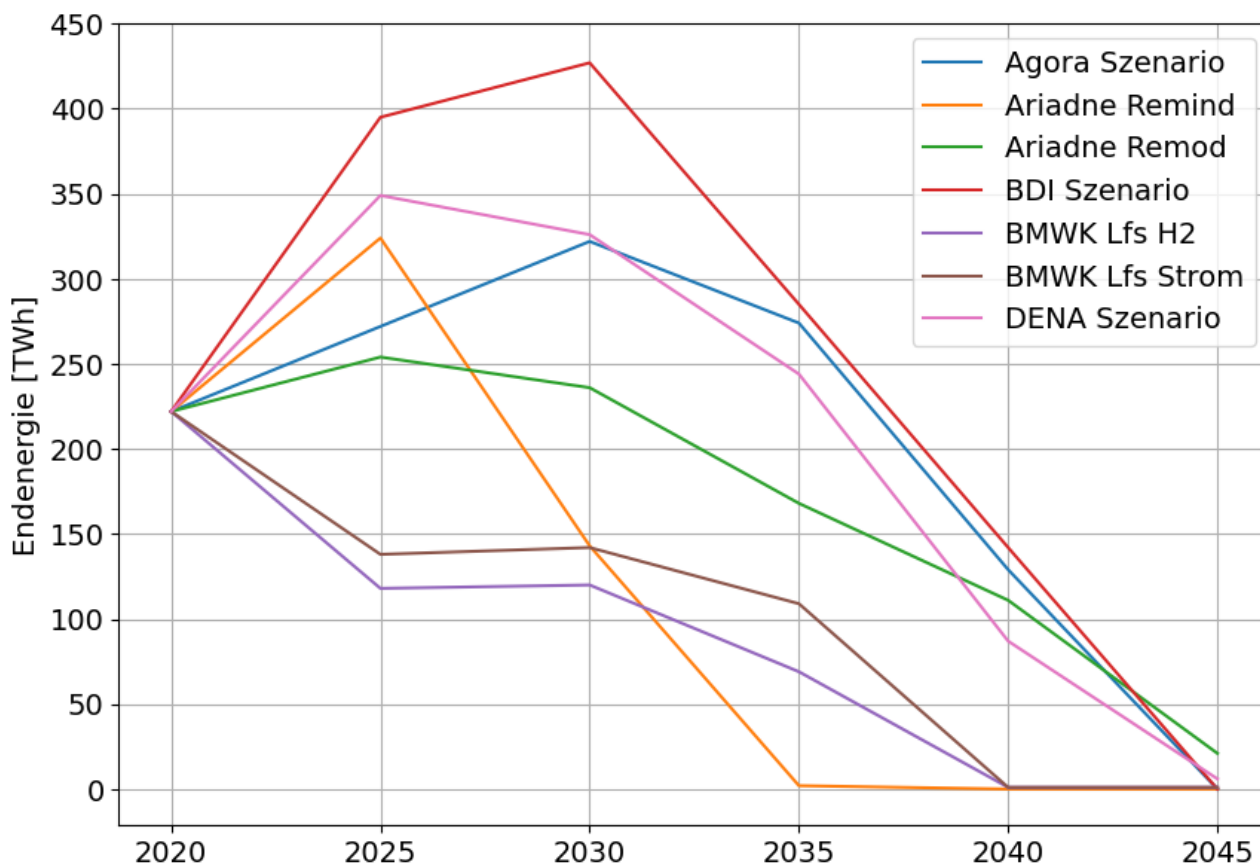
Allgemeine Erläuterung zum Sektor: Erdgas wird heute in der Energiewirtschaft in Heiz- oder Kraftwerken zur Erzeugung von Strom und/oder Wärme eingesetzt. Im Jahr 2020 wurden dafür 223 TWh Erdgas in der Energiewirtschaft verbraucht.

Abbildung 4-4: Detailbetrachtung Erdgas: Energiewirtschaft



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Statistischer Wert 2020 auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für dena – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für BDI – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040

Die im Boxplot dargestellten Boxen zum Erdgasverbrauch in der Energiewirtschaft zeigen große Spannweiten über die Szenarien hinweg. Der abwärts gerichtete Trend wird allerdings sowohl im Verlauf der Boxen als auch insbesondere im Verlauf des Medians deutlich. Hier zeigt sich auch, dass mehr als die Hälfte der Studien noch eine anfängliche Steigerung des Verbrauchs zwischen 2020 und 2025 annehmen.

Abbildung 4-5: Reduktionsverläufe der Endenergie aus Erdgas: Energiewirtschaft

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Statistischer Wert 2020 auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für dena – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für BDI – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040

Zeitlicher Verlauf: Ausgehend vom Jahr 2020 zeigen die Szenarien zwei unterschiedliche Pfade auf. Diese Pfade spiegeln sich in der großen Bandbreite im Jahr 2030 wider.

- Einerseits gehen die Studien von Agora, BDI und DENA von einem Anstieg des Einsatzes von Erdgas in den Jahren 2025 und 2030 aus. Erst ab dem Jahr 2040 sinkt der Erdgaseinsatz wieder unter den Wert von 2021, bevor er bis zum Jahr 2045 auf nahezu null sinkt. Gründe für diesen Verlauf sind unter anderem Annahmen zur Verfügbarkeit von alternativen Technologien zum Ersatz von erdgasbasierten Spitzenlastkraftwerken und der Fernwärmeerzeugung in KWK-Anlagen.
- Andererseits berechnen insbesondere die BMWK Langfristszenarien schon für das Jahr 2025 einen deutlich reduzierten Erdgaseinsatz im Vergleich zum historischen Wert. In diesen Szenarien wird bereits im Jahr 2040 kein Erdgas mehr in der Energiewirtschaft eingesetzt. Dieses Ergebnis kann durch die für die Jahre 2025 und 2030 hohen Erdgaspreise beeinflusst sein (vgl. Abbildung 3-2: Entwicklung der Erdgaspreise in den Szenarien (Abbildung 3-2)). Das Szenario Ariadne Remind setzt sogar schon im Jahr 2035 kaum mehr Erdgas ein.

Bandbreite: Die Bandbreite von maximal 290 TWh im Jahr 2030 und 2035 zeigt, dass die Szenarien sich im Sektor Energiewirtschaft stark unterscheiden.

Die Nutzung von Erdgas in der Energiewirtschaft kann zwischen der Nutzung zur Fernwärmeerzeugung und zur Stromerzeugung unterteilt werden (vgl. Abbildung 4-6). Historisch hat die **Fernwärmeerzeugung** ca. ein Viertel der Erdgasnutzung im Energiesektor ausgemacht. Etwa 50 TWh Erdgas wurden für die Fernwärmeerzeugung jährlich verbraucht.

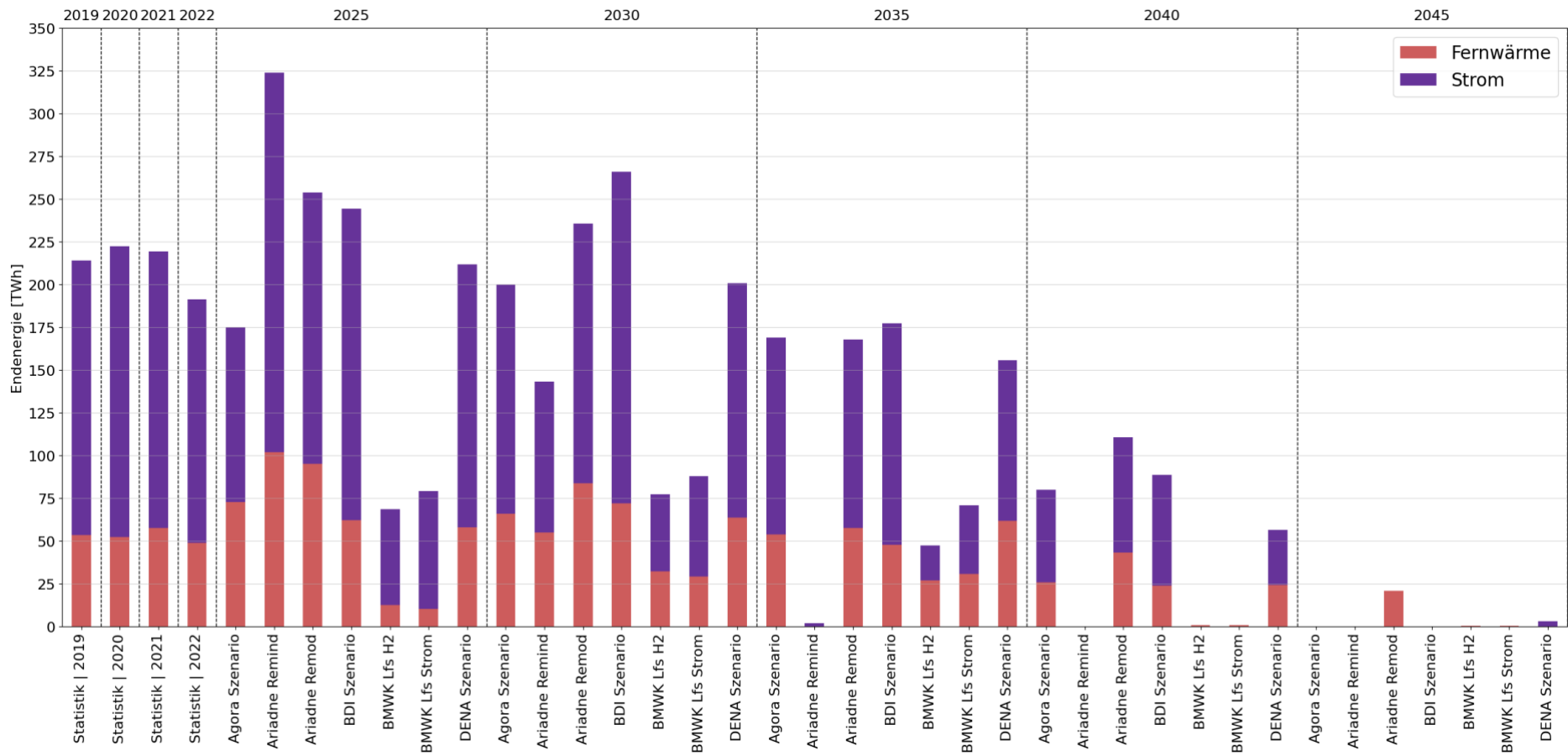
Zeitlicher Verlauf bei der Fernwärmeerzeugung: Die Szenarien unterscheiden sich auch bei der Nutzung von Erdgas in der Fernwärmeerzeugung stark:

- Erdgas wird über das heutige Ausmaß hinaus zur Fernwärmeerzeugung in den Szenarien von Agora⁶, Ariadne, BDI und DENA eingesetzt. Dieser Peak der Erdgasnutzung in der Fernwärmeerzeugung endet im Jahr 2040 und fällt dort wieder unter den heutigen Erdgasverbrauch in der Fernwärmeerzeugung.
- Die beiden betrachteten BMWK Langfristszenarien⁷ reduzieren den Erdgasbedarf in der Fernwärme bereits bis 2025 unter den heutigen Wert und erreichen im Jahr 2040 einen Ausstieg aus der Erdgasnutzung zur Fernwärmeerzeugung.
- Das Szenario Ariadne Remind stellt eine Besonderheit dar: Hier liegt der Erdgasverbrauch in den Jahren 2025 und 2030 über den historischen Werten, fällt aber schon im Jahr 2035 auf null ab

⁶ Agora weitet insgesamt die Fernwärmeerzeugung aus und ersetzt in den Jahren 2025 und 2030 zunächst die Energieträger Stein- und Braunkohle durch Erdgas. Ab 2030 wird dann Erdgas durch erneuerbare Wärme (Geothermie, Solarthermie, Umweltwärme), Strom und Wasserstoff in KWK-Anlagen verdrängt.

⁷ Auch in den BMWK Langfristszenarien steigt die Erzeugung von Fernwärme. Erdgas wird dabei schon im Jahr 2030 hauptsächlich durch Großwärmepumpen ersetzt.

Abbildung 4-6: Detailbetrachtung Erdgas: Nutzung für Strom- und Fernwärmeerzeugung

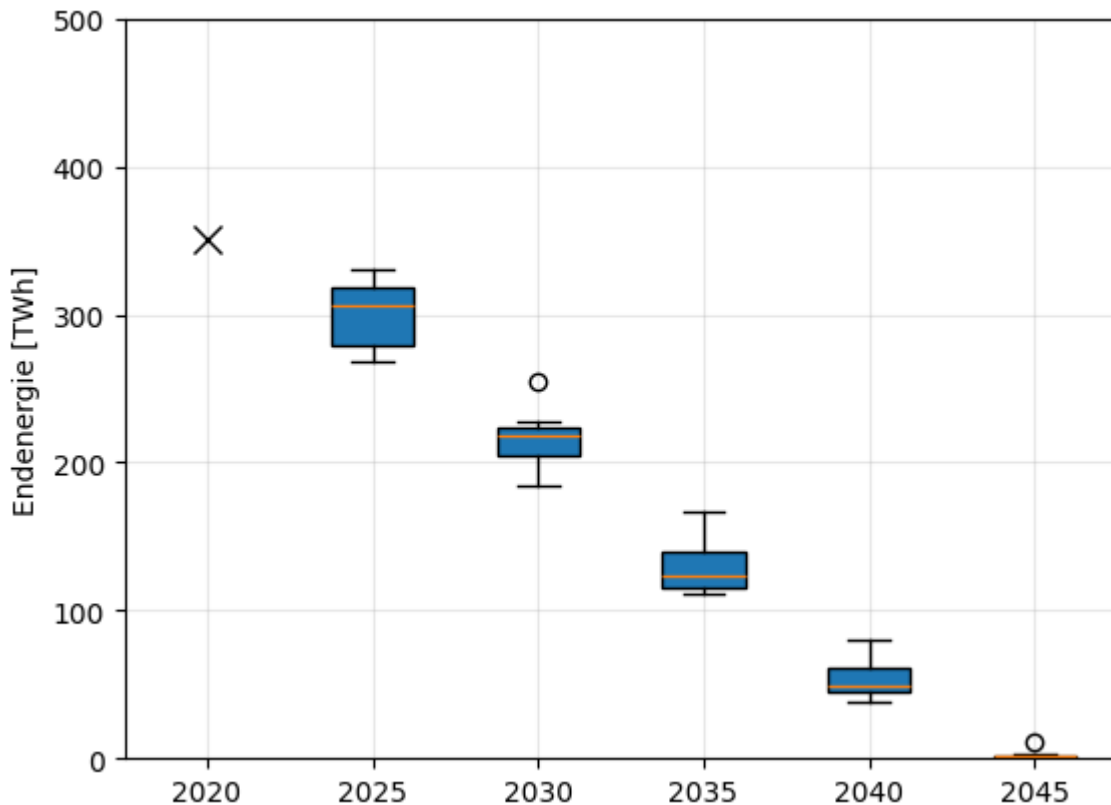


Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Daten der dargestellten Studien. Statistische Daten auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für das DENA Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für das BDI Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040.

4.2.2 Gebäude

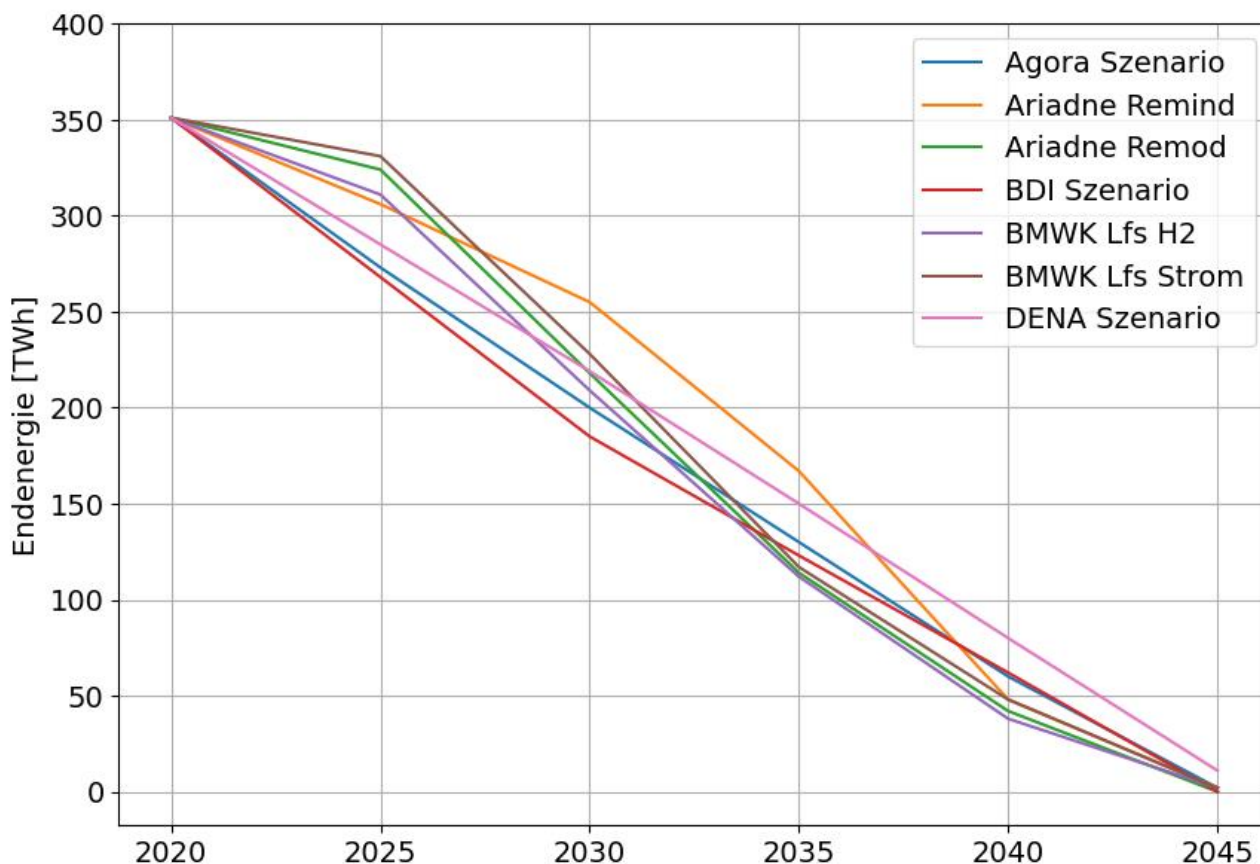
Allgemeine Erläuterung zum Sektor: Im Gebäudesektor spielt Erdgas traditionellerweise eine wichtige Rolle: ca. 50% des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser wird durch die Verbrennung von Erdgas erzeugt. Der Sektor selbst ist vergleichsweise träge. Die typischen Gas-Kessel haben Lebensdauern von 20 oder bis zu 30 Jahren.

Abbildung 4-7: Detailbetrachtung Erdgas: Gebäude



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Statistischer Wert 2020 auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für das DENA Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für das BDI Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040.

Die Entwicklung des Erdgasverbrauchs im Gebäudesektor zeigt sowohl im Verlauf der Boxen (Spannweiten der Studien) als auch im Verlauf des Medians klar eine lineare Reduktion (vgl. Abbildung 4-7).

Abbildung 4-8: Reduktionsverläufe der Endenergie aus Erdgas; Gebäude

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Statistischer Wert 2020 auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für das DENA Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für das BDI Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040.

Zeitlicher Verlauf: Alle betrachteten Szenarien zeigen im Gebäudesektor einen fast linearen Reduktionspfad zwischen 2020 und 2045 in Bezug auf den Erdgasverbrauch. Die in der Gesamtschau der verschiedenen Szenarien gezeigte Bandbreite liegt in keinem der betrachteten Szenario Jahre über 60 TWh.

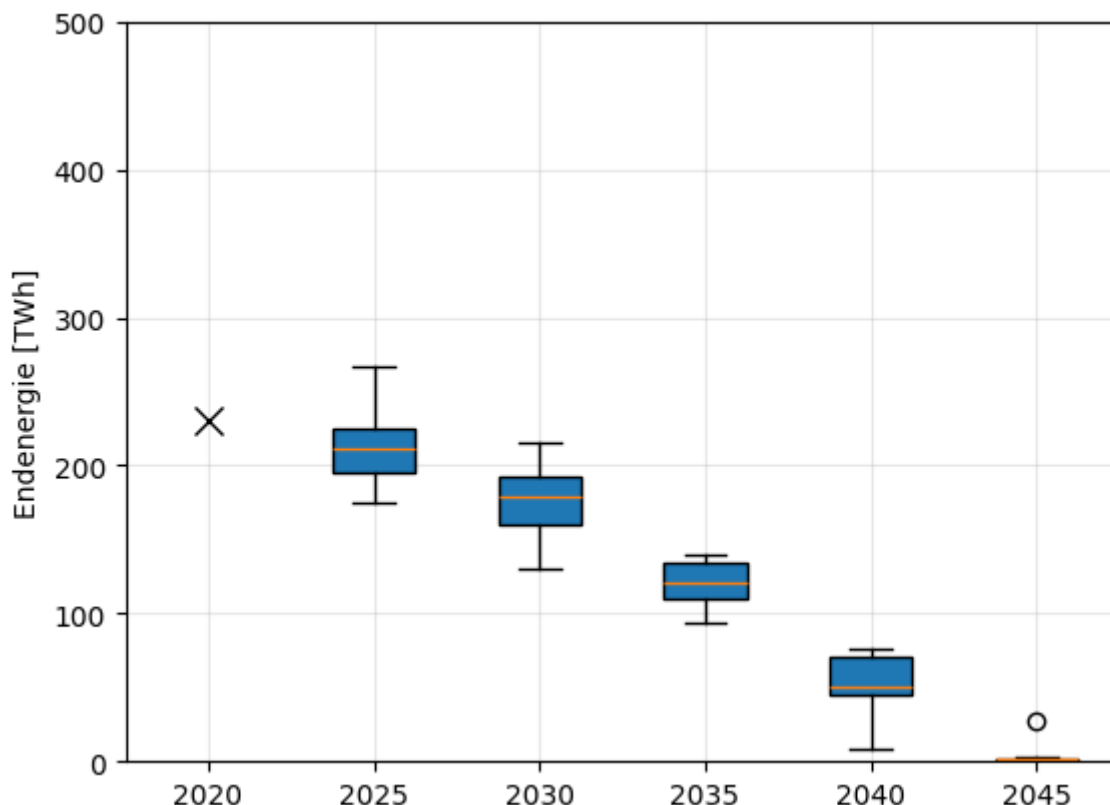
- **2030:** Im Jahr 2030 zeigt nur das BDI-Szenario nahezu eine Halbierung des Gasverbrauchs (184 TWh) gegenüber dem Ausgangsjahr 2020 – alle anderen Szenarien liegen bei über 200 TWh im Jahr 2030.
- **2045:** Im Zieljahr 2045 erreichen das BDI und das Ariadne REMod Szenario eine Erdgasverbrauchsreduktion auf 0 TWh. Das Gros der Szenarien zeigt einen Restverbrauch im Gebäudesektor von ca. 2 TWh. Nur das dena Szenario sticht mit ca. 11 TWh im Jahr 2045 als Ausreißer hervor.

Bandbreite: Im Gegensatz zu den anderen Sektoren (insbesondere Energiewirtschaft und Industrie) zeigt der Gebäudesektor im Szenarienvergleich einen klaren, linearen Pfad der Verbrauchsreduktion. In der überwiegenden Mehrzahl der Szenarien ist der Verbrauch im Jahr 2045 auf nahezu null gesenkt.

4.2.3 Industrie

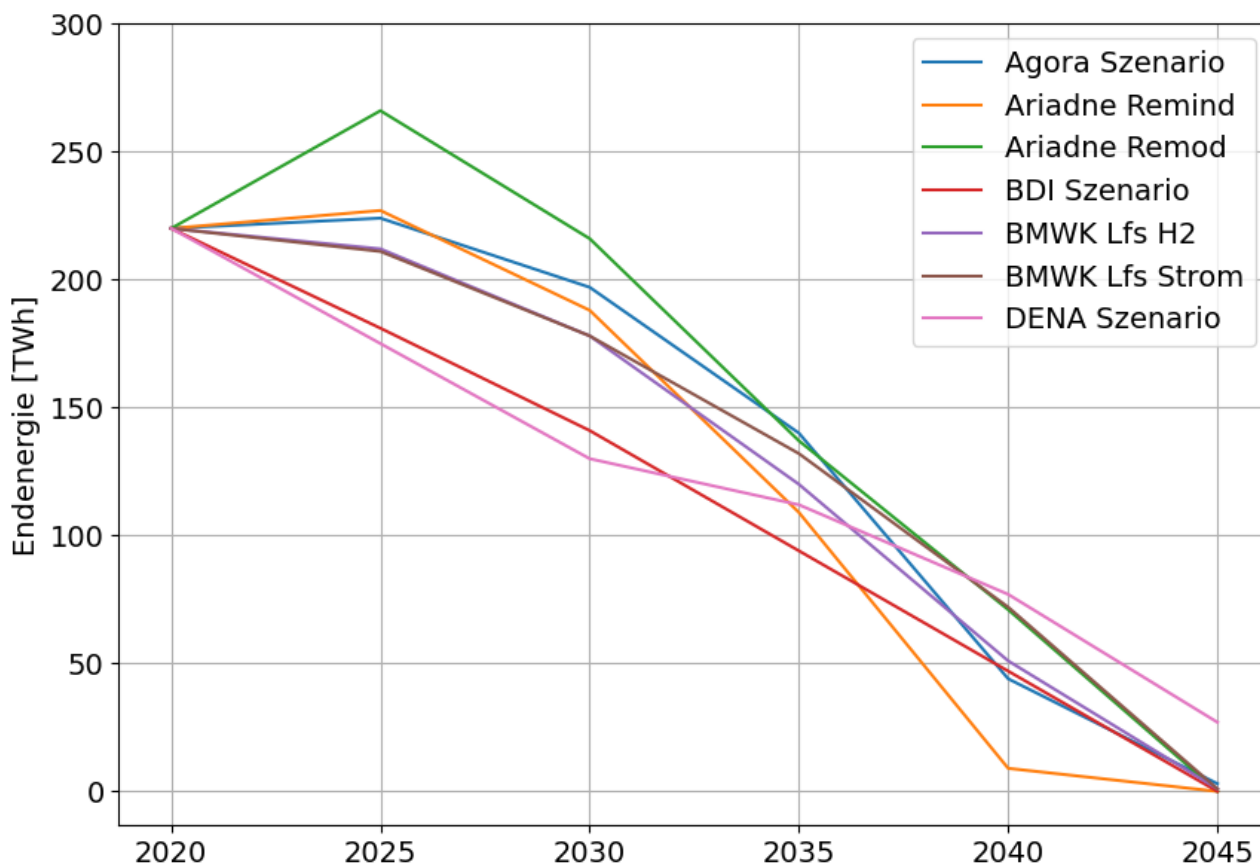
Allgemeine Erläuterung zum Sektor: Erdgas wird derzeit in der Industrie sowohl als Energieträger (z.B. für die Erzeugung von Prozesswärme) als auch als chemischer Grundstoff (z.B. für die Düngemittel- oder Chemieindustrie eingesetzt). Im Jahr 2020 wurden ca. 36 TWh Erdgas als Grundstoff („stoffliche Nutzung“) und ca. 185 TWh als Energieträger („energetische Nutzung“) in der Industrie eingesetzt.

Abbildung 4-9: Detailbetrachtung Erdgas: Industrie



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Statistischer Wert 2020 auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für das DENA Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für das BDI Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040.

Die berechnete Reduktion der Endenergie aus Erdgas unterliegt im Industriesektor über die verschiedenen Szenarien geringeren Schwankungen im Vergleich mit den anderen Sektoren. Der Abwärtstrend zeigt sich dennoch deutlich, insbesondere ab dem Jahr 2030. Zwischen 2020 und 2025 nehmen einige Studien noch einen geringen Anstieg im Verbrauch an (vgl. Abbildung 4-10).

Abbildung 4-10: Reduktionsverläufe der Endenergie aus Erdgas – Sektor Industrie

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Statistischer Wert 2020 auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023). Werte wurden linear interpoliert für das DENA Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für das BDI Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040.

Zeitlicher Verlauf: Die Szenarien-Analyse zeigt, dass zwischen den Jahren 2020 und 2025 durchweg nur geringe Reduktionsmöglichkeiten für den Einsatz von Erdgas in der Industrie angenommen werden. Ab dem Jahr 2030 setzt jedoch eine starke Reduktion des Erdgasverbrauchs ein. Im Jahr 2045 wird – mit Ausnahme eines Szenarios – nur noch eine minimale Nutzung von Erdgas angenommen. Zur Reduktion des Erdgasbedarfs in der Industrie können unterschiedliche Maßnahmen beitragen. Im Szenario Agora Klimaneutrales Deutschland 2045 beispielsweise führen drei Haupteffekte zur Reduktion von Erdgas in der Industrie:

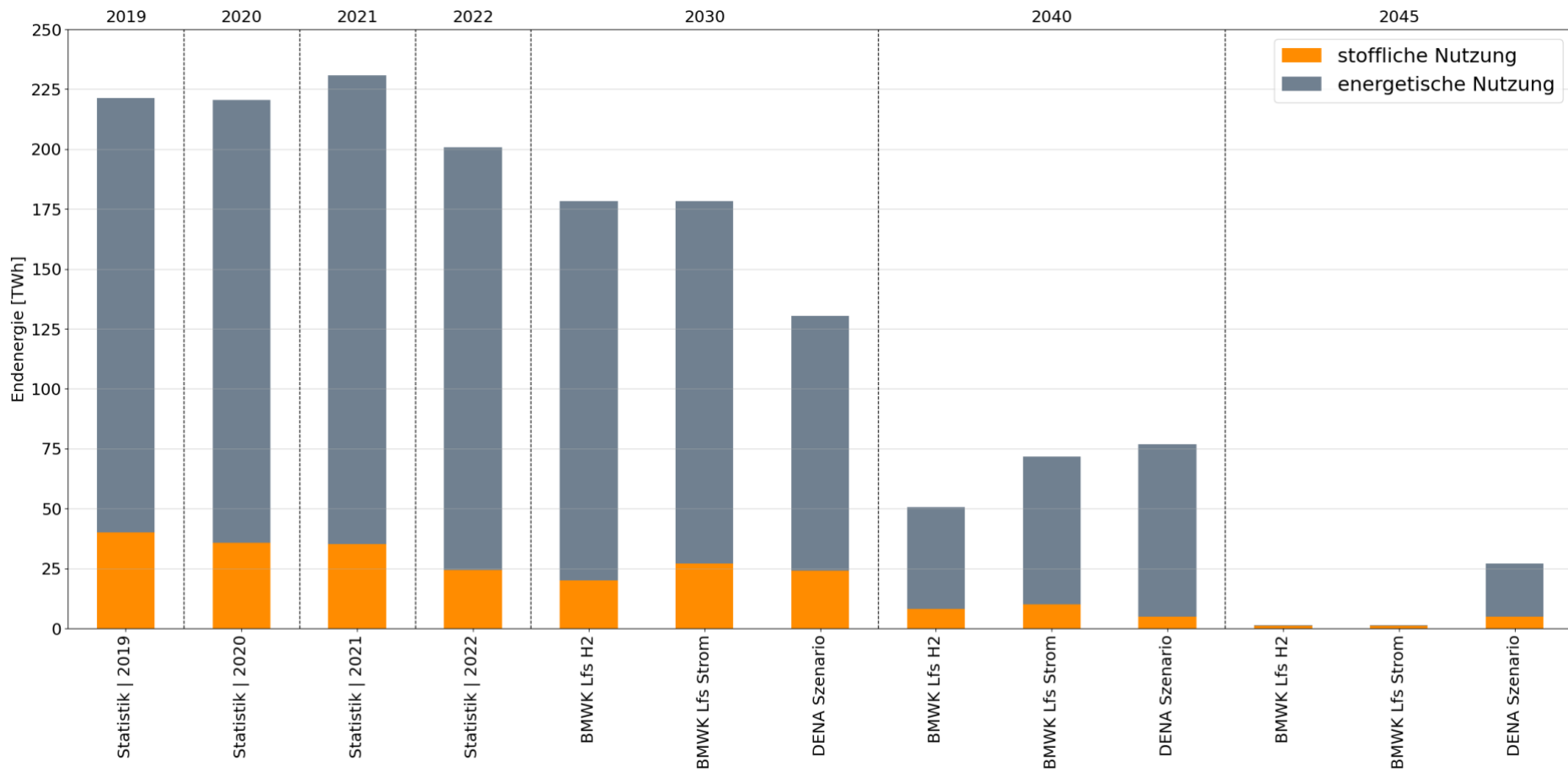
1. Reduktion des Endenergieverbrauchs durch Effizienzmaßnahmen
2. Verstärkter direkter Nutzung von Strom (z.B. zur Prozesswärmebereitstellung)
3. Verstärkter Einsatz von Biomasse

Bandbreite: Die größte Bandbreite zwischen den Szenarien ist für das Jahr 2030 zu erkennen. Hier liegen die Studien bezüglich der Annahmen, wie lange es dauert bis erste Anlagen auf direkte Stromnutzung oder auch Wasserstoff umstellen können, auseinander.

Die **stoffliche Nutzung** wird nicht in allen analysierten Szenarien ausgewiesen. Die vorhandenen Daten sind in Abbildung 4-11 aufgetragen und zeigen, dass die stoffliche Nutzung von Erdgas analog zur energetischen Nutzung von Erdgas im Zeitverlauf zurückgeht. Dazu werden in den Szenarien

stoffliche Erdgasverbräuche durch direkte Nutzung von Wasserstoff substituiert (z.B. in der Ammoniakindustrie) oder bei der Herstellung von High-Value-Chemicals andere Produktionsrouten (z.B. über die Verwendung von Methanol) eingesetzt.

Abbildung 4-11: Detailbetrachtung Erdgas: Stoffliche Nutzung von Erdgas in der Industrie

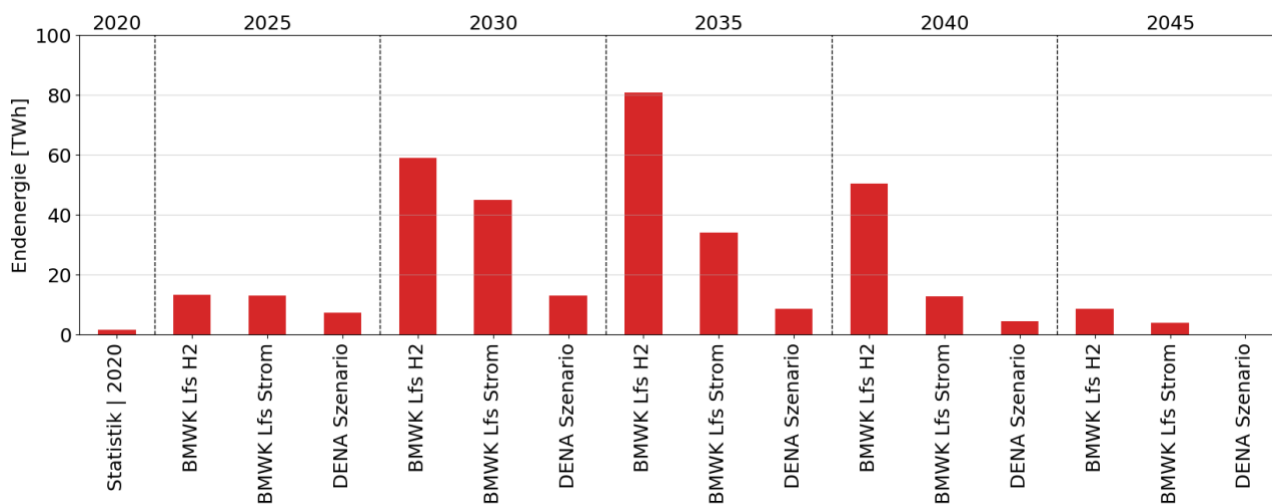


Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Daten der dargestellten Studien. Statistische Daten auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023).

4.2.4 Verkehr

Allgemeine Erläuterung zum Sektor: Im Vergleich zu den anderen Sektoren werden im Verkehrssektor vergleichsweise geringe Mengen an Erdgas eingesetzt. Die statistischen Werte der letzten Jahre liegen alle zwischen 1-2 TWh pro Jahr. Erdgas wird im Verkehrssektor nur in der DENA Studie und den BMWK Langfristszenarien explizit ausgewiesen.

Abbildung 4-12: Detailbetrachtung Erdgas: Verkehr



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Statistische Wert auf Grundlage der Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022 (Datenstand November 2023).

Zeitlicher Verlauf: Aus Abbildung 4-12 wird ersichtlich, dass Erdgas im Verkehrssektor eine Art Brückenfunktion zukommt, wenn überhaupt. Insbesondere die BMWK Langfristszenarien sehen einen Anstieg auf in der Spitze 45 TWh im Jahr 2030 (Strom-Szenario) bzw. gut 80 TWh im Jahr 2035 (H₂-Szenario) bevor der Erdgaseinsatz Richtung 2045 wieder deutlich abnimmt auf jährlich 4 bis 9 TWh. In der DENA Studie steigt der Erdgaseinsatz auf 13 TWh im Jahr 2030 bevor er bis 2045 linear auf null absinkt.

Bandbreite: Die in den BMWK Szenarien erreichten hohen Erdgasverbräuche im Verkehrssektor sind vermutlich auf eine Mischung aus niedrigen Erdgaspreisen ab 2035 sowie niedrige Investitionskosten für mit Erdgas betriebene LKW zurückzuführen. Erdgas wird hier ganz überwiegend im Schwerlastverkehr eingesetzt. Auch sei hier nochmal hervorgehoben, dass drei der fünf betrachteten Studien Erdgas im Verkehrssektor nicht weiter in Betracht ziehen.

4.2.5 Landwirtschaft, Abfallwirtschaft, LULUCF, Sonstige

Der Erdgasverbrauch in den übrigen Sektoren Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Sonstiges sowie LULUCF wird in keiner der Studien explizit ausgewiesen. In der offiziellen Energiebilanz sind die Subsektoren Landwirtschaft, Fischerei und Bauwirtschaft zusammengefasst. Diese bleiben hinsichtlich ihres kombinierten Erdgasverbrauchs in der Statistik der Jahre 2019 bis 2022 jedes Jahr unter 4 TWh. Da der größte Anteil des Erdgasverbrauchs vermutlich in der Bauwirtschaft anfällt, ist davon auszugehen, dass die übrigen Sektoren Landwirtschaft⁸, Abfallwirtschaft und Sonstiges sowie

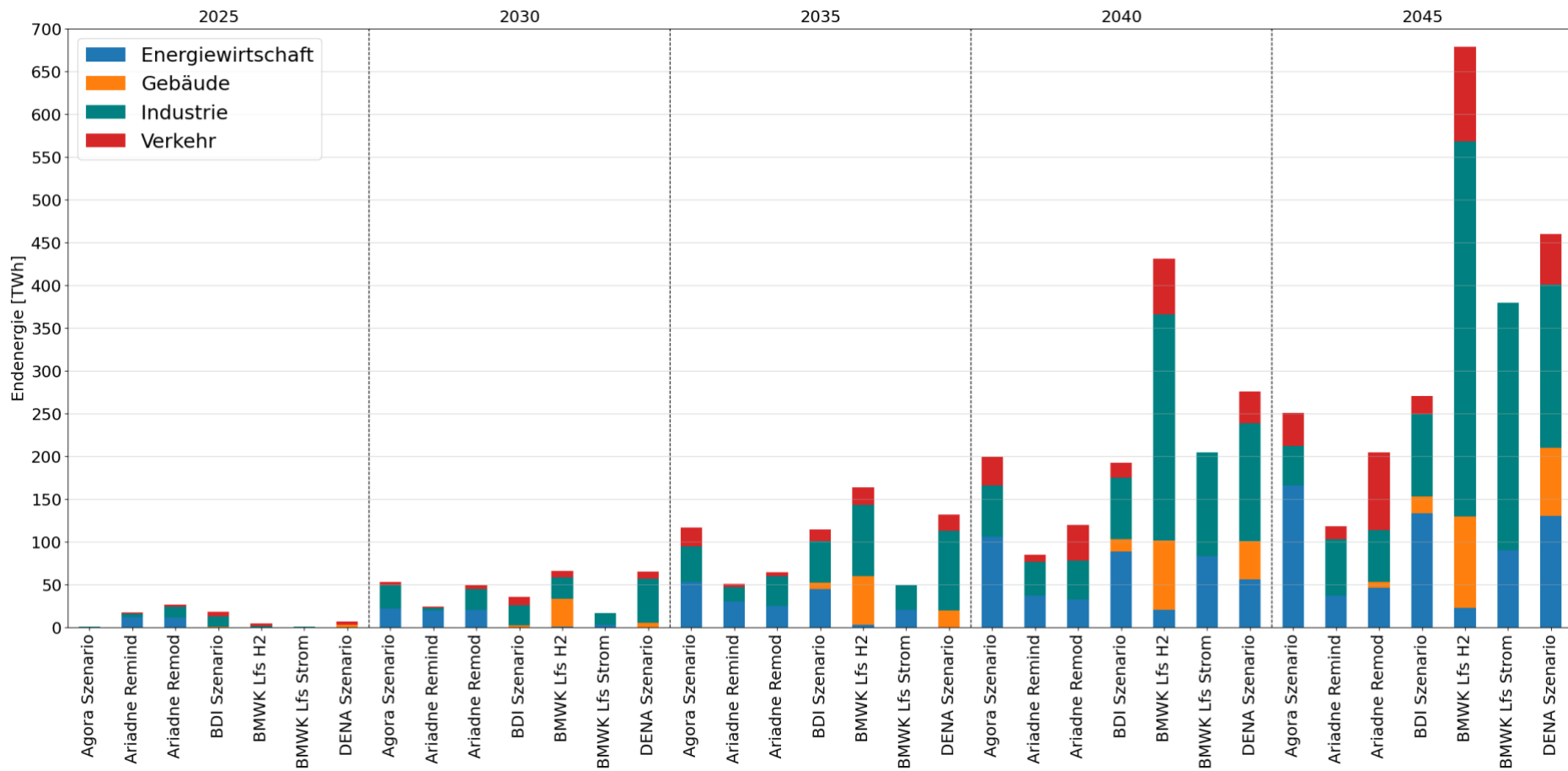
⁸ Ammoniak für die Düngemittelherstellung wird im Sektor Industrie bilanziert.

LULUCF schon heute keine nennenswerten Erdgasverbraucher sind. Auf Basis der betrachteten Szenarien gehen wir davon aus, dass sie es auch in Zukunft nicht sein werden.

4.3 Die Rolle von Wasserstoff

Analog zur angestrebten Reduktion des Erdgasverbrauchs bis zum Zieljahr 2045 (sog. Phase-out) zeigen die untersuchten Studien auch Prognosen für die zunehmende Integration von Wasserstoff (sog. Phase-in) in die Sektoren. Beim Vergleich der verschiedenen Szenarien ergeben sich signifikante Unterschiede bezüglich der Bedeutung der Substitution von Erdgas durch Wasserstoff. Man kann davon ausgehen, dass es sich dabei wie in der nationalen Wasserstoffstrategie beschrieben hauptsächlich um grünen Wasserstoff handeln wird und nur anfänglich auch blauer Wasserstoff eine Rolle spielt (BMWK 2023, S. 4). Es bestehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Realisierbarkeit und Umsetzung insbesondere in Bezug auf die Nutzung bestehender Erdgasnetze und -infrastrukturen für Wasserstoff. Bis zum Jahr 2022 erfolgt in den Szenarien keine signifikante Einspeisung. Trotzdem rechnen sämtliche Szenarien, in unterschiedlichen Maßen, ab 2025 mit einem stetigen Anstieg der Wasserstoffanteile in den Netzen. Abbildung 4-13 zeigt den Hochlauf des Einsatzes von Wasserstoff nach Szenario in fünf-Jahres Schritten. Ausgewiesen wird die Endenergie aus Wasserstoff in TWh. Der heute in der Industrie genutzte Wasserstoff (ca. 55-60 TWh) wird aus Erdgas gewonnen (Ariadne 2022) und ist entsprechend beim Erdgasverbrauch in der Statistik und den Studien bilanziert. Zukünftig wird der aus Erdgas gewonnene Wasserstoff durch z.B. aus Elektrolyse erzeugten Wasserstoff teilweise ersetzt. Dieser Wasserstoff ist dann in den Szenarien und entsprechend in der Abbildung 4-13 unter dem Hochlauf von Wasserstoff bilanziert. Aktuell sind zur Produktion von grünem Wasserstoff in Deutschland keine verlässlichen Daten verfügbar. Es kann aber von einem Wert im niedrigen einstelligen TWh-Bereich ausgegangen werden (Wuppertal Institut und DIW Econ 2021).

Abbildung 4-13: Hochlauf des Einsatzes von Wasserstoff je Szenario



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Werte wurden linear interpoliert für das DENA Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für das BDI Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040.

Im Jahr 2025 zeigen sich in den verschiedenen Szenarien zunächst noch vergleichbare Gesamtwerte, wobei sektorale Unterschiede bereits deutlich werden. In der DENA Studie liegt der Fokus mit etwa 4 TWh auf dem Verkehrssektor, während Ariadne Remind den Einsatz mit 11 TWh in der Energiewirtschaft sieht. Im Kontrast dazu prognostiziert das Agora Szenario in Summe nur 1 TWh (im Industriesektor).

Ein Blick auf die zeitliche Entwicklung der Einspeisung bis 2045 verdeutlicht drastische Unterschiede: Die Bandbreite vergrößert sich von anfänglichen 26 TWh im Jahr 2025 bis auf 561 TWh im Jahr 2045.

Die Ausrichtung der Szenarien variiert dabei erheblich: Das Agora Szenario fokussiert sich vorrangig auf die Energiewirtschaft, die im Jahr 2045 etwa 170 TWh ausmacht, während kleinere Anteile in Industrie und Verkehr zu verzeichnen sind (jeweils etwa 40 TWh).

Im Gegensatz dazu liegt der Fokus bei Ariadne Remind eher auf der Industrie mit 66 TWh. Interessanterweise beläuft sich die Gesamt-Endenergie aus Wasserstoff in diesem Szenario im Jahr 2045 nur auf etwa 120 TWh und liegt damit deutlich unter den Annahmen der restlichen Szenarien.

Das Szenario Ariadne Remod zeigt anfangs eine relativ gleichmäßige Verteilung der Endenergie aus Wasserstoff zwischen Energie- und Industriesektor, mit einem zusätzlichen kleinen Anteil im Verkehrssektor. Ab 2040 wird jedoch eine verstärkte Einspeisung in den Verkehrsbereich prognostiziert, der im Jahr 2045 etwa 90 TWh erreichen soll.

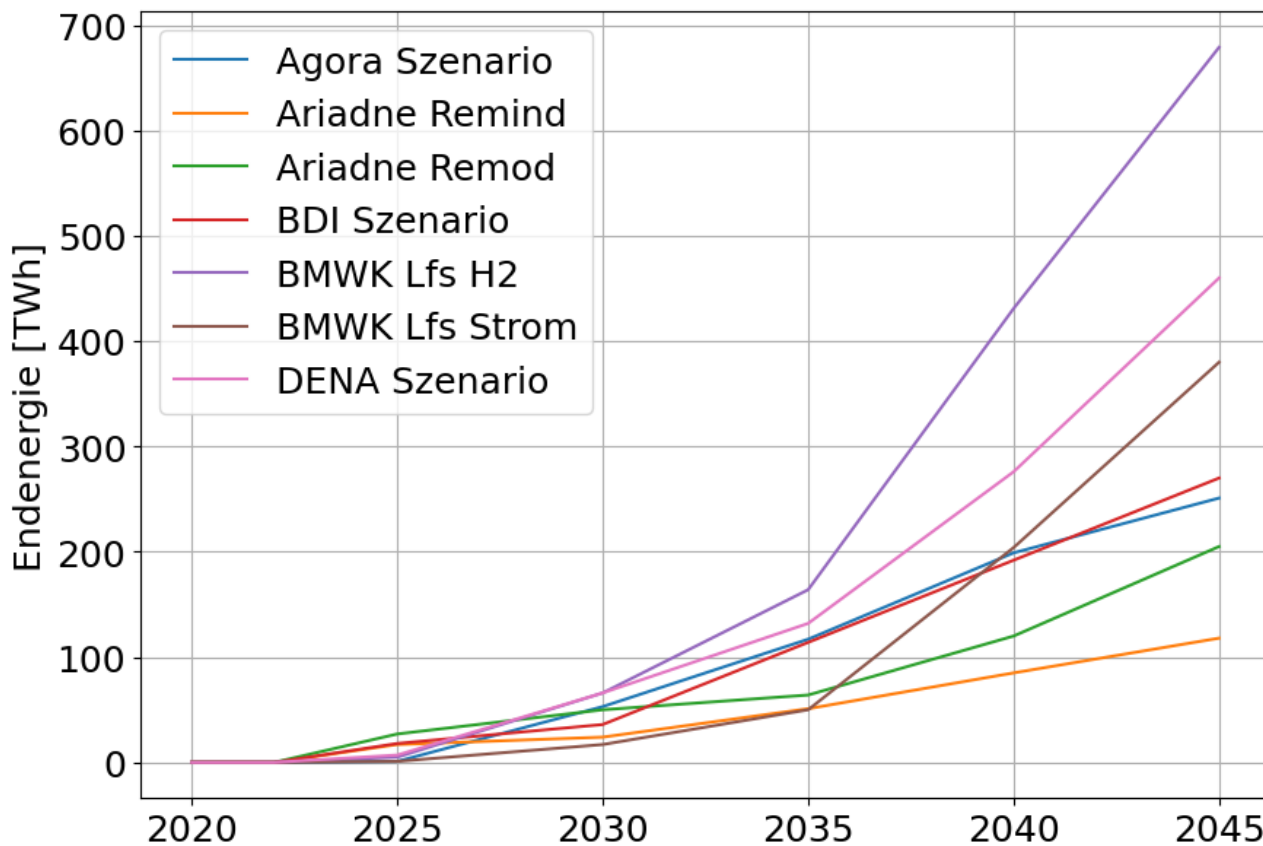
Die BDI Studie fokussiert gleichermaßen auf die Sektoren Energiewirtschaft und Industrie (133 bzw. 96 TWh). Im Zieljahr verbrauchen jedoch auch die Sektoren Gebäude und Verkehr jeweils ca. 20 TWh.

Das Langfristszenario H2 des BMWK setzt, wie der Name schon andeutet, einen Schwerpunkt auf die Nutzung von Wasserstoff. Anfänglich liegt der Fokus auf den Sektoren Gebäude und Industrie, wobei ab 2030 auch im Verkehrssektor Wasserstoff genutzt werden soll. Ab 2040 liegt der Schwerpunkt eindeutig auf der Industrie, mit ca. 250 TWh pro Jahr. Allerdings wird auch der Fokus auf den Gebäudesektor im Vergleich zu den anderen Szenarien deutlich. Im Jahr 2045 entfallen ca. 440 TWh auf den Industriesektor, jeweils ca. 110 TWh auf den Gebäude- und Verkehrssektor und immerhin 107 TWh auf die Energiewirtschaft.

Das Langfristszenario Strom des BMWK beschränkt die Wasserstoffeinspeisung auf die Sektoren Energiewirtschaft und Industrie. Für das Jahr 2045 sind hier etwa 90 bzw. 290 TWh vorgesehen. Die Nutzung der Endenergie aus Wasserstoff ist im Jahr 2045 mit insgesamt ca. 380 TWh trotzdem vergleichsweise hoch.

Das DENA Szenario rechnet mit relativ hohen Wasserstoff-Anteilen in Energiewirtschaft und Industrie (130 bzw. 191 TWh) sowie in den Sektoren Gebäude und Verkehr (79 bzw. 59 TWh). Die Gesamtendenergie aus Wasserstoff übertrifft hier mit 460 TWh im Jahr 2045 auch den Zielwert des Langfristszenarios T45-Strom.

Abbildung 4-14: Anstiegsverläufe der Gesamtendenergie aus Wasserstoff



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus den analysierten Studien. Werte wurden linear interpoliert für das DENA Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), sowie für das BDI Szenario – 2025 (mit Basisjahr 2020), 2035, 2040.

Abbildung 4-14 zeigt die Verläufe der Wasserstoffeinspeisung in den Szenarien und verdeutlicht die Bandbreite der berechneten Werte. Das Wasserstoff-Phase-In variiert stark je nach Studie, beginnend mit geringen Bandbreiten im Jahr 2025. Bis 2045 reicht die Spannweite von etwa 120 TWh (Ariadne REMIND) bis 790 TWh (BMWK T45-H₂). Während Ariadne REMIND und BDI eher auf frühzeitige Einspeisung und ein moderates bis lineares Wachstum des Wasserstoffanteils setzen, zeigen die BMWK Szenarien T45-H₂ und T45-Strom sowie die DENA Studie bis 2025 geringe Wasserstoffanteile und ab 2030 ein stärkeres Wachstum.

5 Einordnung und Bewertung

Bezüglich des Phase-outs von **Erdgas** zeigt die Metaanalyse die folgenden Ergebnisse:

- Erdgas wird heute insbesondere in den Sektoren Gebäude, Industrie und Energiewirtschaft eingesetzt. Die Sektoren Landwirtschaft und Verkehr spielen eine untergeordnete Rolle.
- Bis zum Jahr 2045 zeigen alle Szenarien einen steilen Abfall der Erdgasnutzung, insbesondere ab 2030; im Jahr 2045 werden nur noch in einzelnen Szenarien geringe Erdgasnachfragen berechnet.
- Im Zieljahr für die Klimaneutralität wird in den Szenarien weder Erdgas noch synthetisches Methan in relevanten Mengen eingesetzt. Schon bis zum Jahr 2035 wird eine notwendige Reduktion des Erdgasverbrauchs zwischen 28% und 63% im Vergleich zum Jahr 2022 berechnet.
 - Insgesamt zeigen die Studien im zeitlichen Verlauf die Nutzung von Erdgas in den untersuchten Sektoren bis in die 40er Jahre. Die Energiewirtschaft kann in zwei Szenarien bereits bis zum Jahr 2040 vollständig aus der Erdgasnutzung aussteigen.
 - Eine geringe Bandbreite im zeitlichen Verlauf der Erdgasnutzung und somit ein hoher Studien-Konsens zeigt sich im Gebäudesektor. Alle Szenarien berechnen für den Gebäudesektor einen linearen Erdgas-Ausstiegspfad bis auf nahezu null spätestens im Jahr 2045.
 - Eine mittlere Bandbreite im zeitlichen Verlauf der Erdgasnutzung zeigt der Industriesektor. Insbesondere im Jahr 2025 und 2030 liegen die Szenarien noch weit auseinander, während sie ab dem Jahr 2035 sehr eng beieinander liegen.
 - Eine hohe Bandbreite der Erdgasnutzung zeigt der Energiesektor. Die Szenario Ergebnisse unterscheiden sich stark bis in die Jahre 2035 und 2040 hinein.
- Für Biogas bzw. Biomethan ergeben die Szenarien (wo dies berichtet wird) keinen Konsens: gegenüber heute gibt es sowohl eine Verdoppelung (ca. 100 TWh pro Jahr) als auch eine Halbierung (< 25 TWh pro Jahr) der Nutzung bis zum Zieljahr 2045.

Bezüglich des Phase-ins von **Wasserstoff** zeigt die Metaanalyse die folgenden Ergebnisse:

- Bis 2030 liegt Bandbreite der Wasserstoffnutzung zwischen 18 und 66 TWh.
- Bis zum Zieljahr 2045 nimmt die Spreizung dieser Bandbreite stark zu, so dass im Jahr 2045 zwischen 118 und 690 TWh genutzt werden. Die Bandbreite der Szenarien spiegelt die hohe Unsicherheit bzgl. der Wasserstoffnutzung in den kommenden Jahren wider.
- Über die Szenarien hinweg liegt der Fokus der Nutzung überwiegend auf der Industrie; nur ca. die Hälfte der Szenarien geht im Jahr 2045 von einer verstärkten Nutzung im Energiesektor aus.
- In den Szenarien besteht Konsens darüber, dass Wasserstoff im Gebäudesektor keine relevante Rolle spielt.
- Die Herkunft, Produktion sowie der Import von H₂ werden selten spezifiziert; auch infrastrukturelle Fragestellungen werden in den untersuchten Szenarien vernachlässigt.

- Die angenommenen Preise für Wasserstoff liegen in den Szenarien etwa fünf- bis siebenmal so hoch wie die angenommenen Preise für Erdgas.

Bezüglich der **Gasnetz-Infrastruktur** lassen sich indirekt folgende Schlüsse aus der Metaanalyse ziehen. Dabei gilt es zwischen Gas-Fernleitungsnetz (heute ca. 40.000km) und Gas-Verteilnetz (heute ca. 555.000km) zu unterscheiden⁹:

- Da Deutschland auch in Zukunft den Transport von Gasmengen leisten muss, wird ein Transportnetz aufrechterhalten werden, welches zunächst noch Erdgas transportiert, perspektivisch aber teilweise für den Transport von Wasserstoff umgewidmet wird (vgl. auch das geplante Wasserstoff-Kernnetz¹⁰, welches in erster Linie den überregionalen Transport von Wasserstoff zu den Hauptverbrauchszentren der Industrie und der Energiewirtschaft gewährleisten und bis 2032 knapp 10.000 km umfassen soll¹¹).
- Auf Verteilnetzebene wird es hingegen flächendeckend zu Stilllegungen kommen (müssen): die Szenarien zeigen insbesondere im Gebäudesektor einen eindeutigen Zielpfad Richtung einer komplett eingestellten Nutzung von Erdgas im Zieljahr 2045. Hier gilt es Lock-ins zu vermeiden und die jährlichen Investitionen in das Netz von derzeit ca. 1,5 Mrd. EUR pro Jahr (BNetzA 2023) herunterzufahren.

⁹ Für mehr Informationen siehe: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/gas-erdgasversorgung-in-deutschland.html>

¹⁰ Für mehr Informationen siehe: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/Wasserstoff-Kernnetz/faq-wasserstoff-kernnetz.html>

¹¹ Zum Vergleich: das derzeitige Transportnetz umfasst ca. 42.000 km

Literaturverzeichnis

- AGEB - AG Energiebilanzen (2023): Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2022. Online verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/10/awt_2022_deutsch.xlsx, zuletzt geprüft am 20.12.2023.
- Ariadne (2021): Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Online verfügbar unter <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>, zuletzt geprüft am 09.05.2022.
- Ariadne (2022): Szenarien zur Klimaneutralität: Vergleich der „Big 5“-Studien. Online verfügbar unter <https://ariadneprojekt.de/news/big5-szenarienvergleich/>, zuletzt aktualisiert am 17.03.2022, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- BDI - Bundesverband der deutschen Industrie (Hg.) (2021): Burchardt, J.; Franke, K.; Herhold, P.; Hohaus, M.; Humpert, H.; Päivärinta, J.; Richenhagen, E.; Ritter, D.; Schönberger, Stefan; Schröder, J.; Strobl, S.; Treis, C. et al. Klimapfade 2.0, Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Boston Consulting Group.
- BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hg.) (2022). Zahlen und Fakten: Energiedaten, Nationale und internationale Entwicklung. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 21.06.2023.
- BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hg.) (2023). Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie NWS 2023. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Downloads/Fortschreibung.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 27.07.2023.
- BNetzA - Bundesnetzagentur (2023): Monitoringbericht 2022., Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2022.pdf;jsessionid=280DA177FD1F3034855CCEC97868534F?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 10.02.2023.
- dena - Deutsche Energie-Agentur (Hg.) (2021). dena-Leitstudie - Aufbruch Klimaneutralität, Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Berlin. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf.
- Expertenrat für Klimafragen (2023). Stellungnahme zum Entwurf des Klimaschutzprogramms 2023, Gemäß § 12 Abs. 3 Nr. 3 Bundes-Klimaschutzgesetz. Online verfügbar unter <https://www.expertenrat-klima.de>, zuletzt geprüft am 21.12.2023.
- Fraunhofer ISI - Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung; Consentec; IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung; TU Berlin Fachgebiet E&R (2022): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Langfristszenarien 3, Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung; Consentec; Institut für Energie- und Umweltforschung; TU Berlin Fachgebiet E&R. Online verfügbar unter <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>.
- KSG (2023): Deutscher Bundestag. Klimaschutzgesetz, KSG. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>.

- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut (2021): Dambeck, H.; Ess, F.; Falkenberg, H.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Kreidelmeyer, S.; Lübbers, S.; Piégsa, A.; Scheffer, S.; Spillmann, T.; Thamling, N.; Wunsch, A.; Wunsch, M. et al. Klimaneutrales Deutschland 2045, Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Online verfügbar unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/KNDE_2045_Langfassung/Klimaneutrales_Deutschland_2045_Langfassung.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2022.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2023): BReg. Projektionsbericht 2023 für Deutschland, Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 (Climate Change, 39/2023). Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/39_2023_cc_projektionsbericht_2023.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.
- Wuppertal Institut; DIW Econ (2021): Merten, F.; Scholz, A.; Krüger, C.; Heck, S.; Girard, Y.; Mecke, M.; Goerge, M. Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung - Update, Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW e.V. (LEE-NRW), zuletzt geprüft am 22.12.2023.

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------------|--|
| AGEB | AG Energiebilanzen |
| BDI | Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. |
| BECCS | Bioenergy with Carbon Capture and Storage |
| BMWK | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz |
| DACCS | Direct Air Carbon Capture and Storage |
| DENA | Deutsche Energieagentur |
| H _i | Heizwert (auch: unterer Heizwert) |
| H _s | Brennwert (auch: oberer Heizwert) |
| IPCC | International Panel on Climate Change |
| IQR | Interquartilsbereich |
| KSG | Klimaschutzgesetz |
| KWK | Kraft-Wärme-Kopplung |
| LFS | Langfristszenarien |
| LULUCF | Land use, land use change, forestry |
| MCC | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change |
| MWh | Megawattstunde |
| THG-Emissionen | Treibhausgasemissionen |
| TWh | Terawattstunde |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1-1: Reduktionsverläufe der Gesamtendenergie aus Erdgas | 4 |
| Figure 1-2: Reduction curves for total final energy from natural gas | 6 |
| Abbildung 3-1: Negative CO ₂ -Emissionen | 14 |
| Abbildung 3-2: Entwicklung der Erdgaspreise in den Szenarien | 15 |
| Abbildung 3-3: Wasserstoff- und Erdgaspreis im Vergleich | 16 |
| Abbildung 4-1: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Erdgas bis 2045 | 18 |
| Abbildung 4-2: Reduktionsverläufe der Gesamtendenergie aus Erdgas | 19 |
| Abbildung 4-3: Biogas/Biomethan | 21 |
| Abbildung 4-4: Detailbetrachtung Erdgas: Energiewirtschaft | 23 |
| Abbildung 4-5: Reduktionsverläufe der Endenergie aus Erdgas: Energiewirtschaft | 24 |
| Abbildung 4-6: Detailbetrachtung Erdgas: Nutzung für Strom- und Fernwärmeerzeugung | 26 |
| Abbildung 4-7: Detailbetrachtung Erdgas: Gebäude | 27 |
| Abbildung 4-8: Reduktionsverläufe der Endenergie aus Erdgas; Gebäude | 28 |
| Abbildung 4-9: Detailbetrachtung Erdgas: Industrie | 29 |
| Abbildung 4-10: Reduktionsverläufe der Endenergie aus Erdgas – Sektor Industrie | 30 |
| Abbildung 4-11: Detailbetrachtung Erdgas: Stoffliche Nutzung von Erdgas in der Industrie | 32 |
| Abbildung 4-12: Detailbetrachtung Erdgas: Verkehr | 33 |
| Abbildung 4-13: Hochlauf des Einsatzes von Wasserstoff je Szenario | 35 |
| Abbildung 4-14: Anstiegsverläufe der Gesamtendenergie aus Wasserstoff | 37 |



gaswende.de