

CLIMATE CHANGE

47/2025

Teilbericht

Deutsche Szenarien zur Treibhausgasneutralität im Vergleich

Zielerreichung unter Berücksichtigung der technischen
und natürlichen Senken sowie der Kohlenstoffnutzung

von:

Sabine Gores, Jakob Graichen, Mateo Flohr Reija, Wolfram Jörß
Öko-Institut, Berlin

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 47/2025

KLIFOPLAN des Bundesministeriums für Wirtschaft und
Klimaschutz

Forschungskennzahl 3722 41 502 0

FB FB001837

Teilbericht

Deutsche Szenarien zur Treibhausgasneutralität im Vergleich

Zielerreichung unter Berücksichtigung der technischen
und natürlichen Senken sowie der Kohlenstoffnutzung

von

Sabine Gores, Jakob Graichen, Mateo Flohr Reija,
Wolfram Jörß
Öko-Institut, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e. V.
Borkumstraße 2
13189 Berlin

Abschlussdatum:

Juli 2025

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 Szenarien und Strategien für Klimaschutz und Energie
Karlotta Schultz, Joris Spindler, René Lanz

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8518>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2026, 2. Auflage

Konkretisierungen in den Legenden der Abb. 1, 3, 4, 5, 9, 10 und Figure 2, sowie eine Ergänzung in den jeweiligen Anmerkungen unter diesen Abbildungen.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren.

Kurzbeschreibung: Deutsche Szenarien zur Treibhausgasneutralität im Vergleich

Im Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes (UBA) „Treibhausgasneutralität in der EU und in Deutschland: Die Konzeption einer Zielarchitektur unter Berücksichtigung von Senken“ werden verschiedene Szenarien zur Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 in Deutschland in Bezug auf die Wirkung von natürlichen und technischen Senken verglichen. Im vorliegenden Dokument werden die zentralen Ergebnisse vorgestellt. Bei der Betrachtung der verschiedenen Elemente, die zu den Emissionen oder zur Senkenwirkung in den Szenarien beitragen, liegen einheitliche Ansätze zur Verortung der Effekte in der Treibhausgasbilanz zu Grunde. Die zentralen Annahmen sind, zusammen mit weiteren Annahmen zu den einzelnen Szenarien gesammelt im „[Technischen Hintergrundpapier](#) zur Szenarienanalyse. Methoden und Annahmen zum Vergleich deutscher Treibhausgasneutralitätsszenarien“ beschrieben. Außerdem werden durch ein parallel veröffentlichtes [Excel-Tool](#) die zugrundeliegenden Daten verfügbar gemacht. Im Vergleich der Szenarien zeigt sich, dass mit der angewendeten einheitlichen Betrachtungsweise nicht alle Szenarien im Endergebnis eine Netto-Treibhausgasneutralität erreichen. Die Spanne der Residualemissionen liegt zwischen 40 und 70 Mt CO₂-Äq im Zieljahr, wobei die natürlichen Senken Netto-Einbindungen von 11 bis 56 Mt CO₂-Äq ausweisen, die technischen Senken zwischen 6 und 57 Mt CO₂-Äq. Die Analyse verdeutlicht die Notwendigkeit einer klaren und konsistenten Ausweisung von Kategorien und Annahmen, um die Vergleichbarkeit von Szenarien zu gewährleisten. Eine Ausweisung der insgesamt erzeugten Treibhausgase, der detaillierten Informationen zu CCU, insbesondere zur Unterscheidung zwischen kurz- und mittelfristigen Produkten, die sektorale Zuordnung von CCS-Aktivitäten, die Angaben zu importierten und exportierten Kohlenstoffprodukten sowie eine separate Ausweisung von LULUCF-Unterkategorien mit Emissionen und Einbindungen sind notwendig. Mit den Ergebnissen aus diesem Vorhaben wird deutlich, dass weitere Arbeiten an der Vereinheitlichung der Darstellung von Szenarienergebnissen und der bilanztechnischen Konsistenz erforderlich sind. Gleichzeitig besteht die politische Herausforderung, geeignete Anreize für klimapolitische Maßnahmen zu setzen, die sich nicht direkt in den nationalen Treibhausgasbilanzen darstellen lassen.

Abstract: Comparison of German greenhouse gas neutrality scenarios

In the UBA project ‘Greenhouse gas neutrality in the EU and Germany: designing a target architecture taking into account sinks,’ various scenarios for greenhouse gas neutrality in 2045 in Germany are compared in relation to the effect of natural and technical sinks. The key results are presented in this document. When considering the various elements that contribute to emissions or sink effects in the scenarios, uniform approaches to locating the effects in the greenhouse gas balance are used. The key assumptions, along with other assumptions for the individual scenarios, are described in a technical paper entitled ‘[Technical background paper on the scenario analysis](#). Methods and assumptions for comparing greenhouse gas neutrality scenarios for Germany.’ In addition, an [Excel tool](#) which contains the underlying data is made available. A comparison of the scenarios shows that, when the uniform approach is applied, not all scenarios ultimately achieve net greenhouse gas neutrality. The range of residual emissions is between 40 and 70 MtCO₂ eq in the target year, with natural sinks showing net captures of 11 to 56 Mt CO₂ eq and technical sinks between 6 and 57 Mt CO₂.eq. The analysis highlights the need for categories and assumptions to be clearly and consistently identified to ensure the comparability of scenarios. It is necessary to identify the total greenhouse gases generated, detailed information on CCU, distinguishing in particular between short- and medium-term products, the sectoral classification of CCS activities, information on imported and exported carbon products and the LULUCF sub-categories with their emissions and removals. The results of this project make it clear that further work is required to standardise the presentation of

scenario results and to ensure consistency in the accounting. At the same time, there is the political challenge of setting appropriate incentives for climate policy measures that cannot be directly reflected in national greenhouse gas balances.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Zusammenfassung.....	10
Summary	13
1 Einleitung.....	16
2 Zusammenfassung der Ergebnisse	17
3 Emissionen und Einbindungen in den Szenarien im Jahr 2045.....	18
3.1 Vergleich der Szenarien	18
4 Sektorale Treibhausgaserzeugung in den Szenarien im Jahr 2045	20
4.1 Vergleich der Szenarien	20
4.2 Einordnung in den europäischen Kontext	21
5 Kohlenstoff-Einbindungen in den Szenarien im Jahr 2045	23
5.1 Vergleich der Szenarien	23
5.2 Einordnung in den europäischen Kontext	24
6 Technische Speichermengen im Jahr 2045	26
6.1 Vergleich der Szenarien	26
6.2 Einordnung in den europäischen Kontext	26
7 Kohlenstoffnutzung.....	28
7.1 Vergleich der Szenarien	28
8 Literaturverzeichnis.....	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	THG-Erzeugung und -Einbindung im Jahr 2045.....	11
Figure 2:	GHG generation and removals in 2045	14
Abbildung 3:	THG-Erzeugung und Einbindung im Jahr 2045	19
Abbildung 4:	Gesamte THG-Erzeugung und Residualemissionen ohne LULUCF im Jahr 2045	20
Abbildung 5:	Prozentuale, sektorale Verteilung der THG-Erzeugung im Jahr der Treibhausgasneutralität (2045/2050)	21
Abbildung 6:	Technische und natürliche Netto-Einbindungen im Jahr 2045 im Vergleich.....	23
Abbildung 7:	LULUCF Emissionen und Einbindungen im Jahr 2045 im Vergleich.....	24
Abbildung 8:	Prozentuale technische und natürliche Netto-Einbindungen im Jahr der Treibhausgasneutralität (2045/2050) im Vergleich ...	25
Abbildung 9:	Kohlenstoffabscheidung zur Speicherung in geologischen Formationen 2045	26
Abbildung 10:	Prozentuale technische Speichermengen im Jahr der Treibhausgasneutralität (2045/2050)	27
Abbildung 11:	Nutzung von Kohlenstoff 2045	28

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BCCU	Biogenic Carbon Capture and Storage
BCG	Boston Consulting Group
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
B(E)CCS	Biogene CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (Biogenic Carbon Capture and Storage)
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BECCU	Bioenergy with Carbon Capture and Use
BWACCS	Biogenic waste incineration with carbon capture and storage
CCS	CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage)
CCU	CO ₂ -Abscheidung und -Nutzung (Carbon Capture and Usage)
CDR	Kohlenstoffentnahme (Carbon Dioxide Removal)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ eq	CO ₂ -equivalents
CO ₂ -Äq	CO ₂ -Äquivalente
DACC	Direct Air Carbon Capture
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage
DACCU	Direct Air Carbon Capture and Use
DENA	Deutsche Energie-Agentur
E-Fuel	Strombasierter synthetischer Kraftstoff
FoCCS	Fossiles CCS
IA	Folgenabschätzung (Impact Assessment)
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (Land Use, Land-Use Change and Forestry)
THG	Treibhausgas(e)
WACCS	Waste incineration with carbon capture and storage

Zusammenfassung

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2045 Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen, auf EU-Ebene besteht das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050. Zahlreiche Szenarien beschäftigen sich mit der Frage, wie diese Ziele erreicht werden können. Dabei spielt der Einsatz von Null- und Negativemissionstechnologien ebenso wie die Berücksichtigung der natürlichen Senken eine entscheidende Rolle. Mit diesen sollen die verbleibenden Restemissionen, die sogenannten Residualemissionen, ausgeglichen werden.

Im Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes „Treibhausgasneutralität in der EU und in Deutschland: Die Konzeption einer Zielarchitektur unter Berücksichtigung von Senken“ (FKZ 3722 41 502 0) werden Treibhausgasneutralitätsszenarien für Deutschland systematisch miteinander verglichen. In dem hier vorliegenden Dokument werden die Ergebnisse einheitlich graphisch dargestellt. Die detaillierten Informationen für die zu Grunde liegende Methodik und die Annahmen zur Vereinheitlichung der Szenarienergebnisse sind in einem parallel veröffentlichten [Technischen Hintergrundpapier](#) erläutert. Zusätzlich werden die Daten in einem [Excel-Tool](#) zur Verfügung gestellt, mit dem auch die Szenarien zur Analyse ausgewählt werden können.

Ziel dieser Arbeiten ist es, einen konsistenten Szenarienvergleich zu ermöglichen. Denn nur mit diesem einheitlichen Ansatz wird deutlich, welche Annahmen in den Szenarien getroffen worden sind, um die Netto-Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 zu erreichen. Ein besonderer Fokus liegt hier auf der Quantifizierung der Gesamtheit der erzeugten Treibhausgase, der Anwendung von Technologien zur Vermeidung der Emission erzeugter Treibhausgase sowie der Berücksichtigung der technischen und natürlichen Einbindungen und der gesamten technischen Speichermengen, die in den Szenarien gefordert werden.

Das Tool, das Analysepapier und das Hintergrundpapier werden im Rahmen des laufenden Vorhabens um neue Szenarien ergänzt und damit aktualisiert.

Mit dem Stand Februar 2025 werden die folgenden Szenarien betrachtet:

- ▶ Agora KN 2045 (2021) (Dambeck et al. 2021)
- ▶ DENA KN100 (Gierkink et al. 2021)
- ▶ BDI Klimapfade 2.0 (Burchardt et al. 2021)
- ▶ Agora KN-DE (2024) (Nesselhauf et al. 2024)
- ▶ CARESupreme, CARETech (Harthan et al. 2025, in Veröffentlichung)

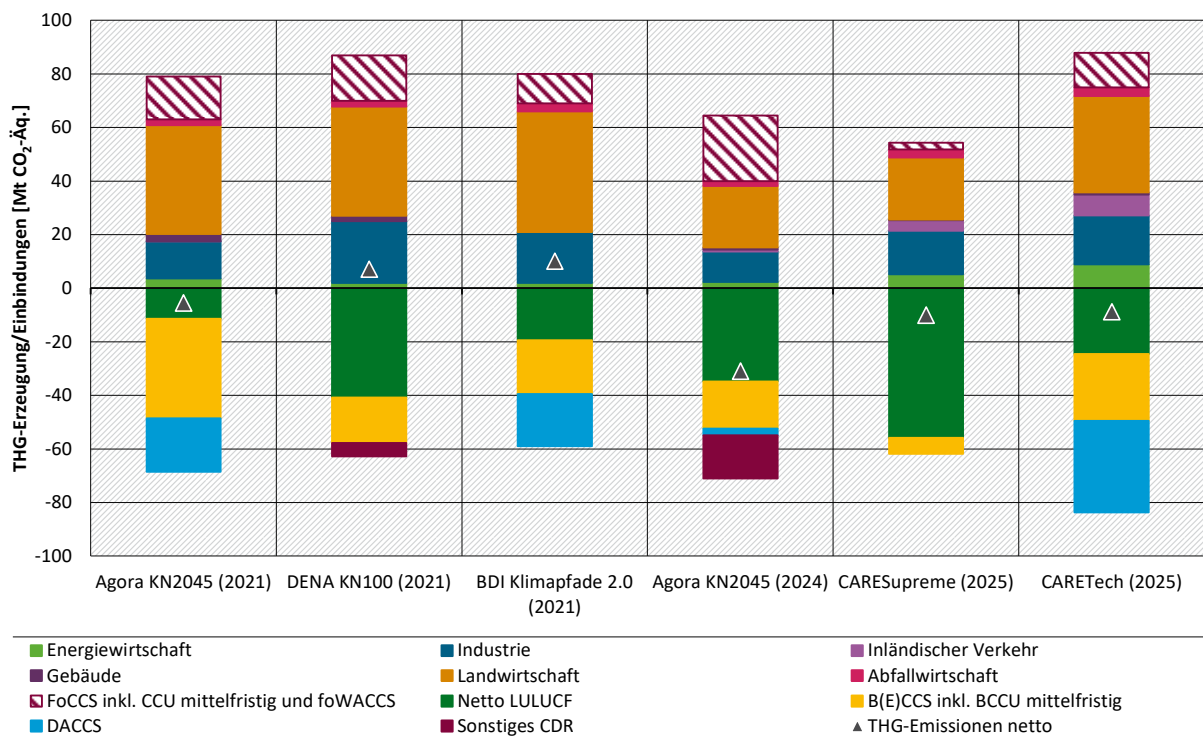
Zudem wurden die Szenarien der Folgenabschätzung für das 2040-Klimaziel der EU (EC 2024) ausgewertet, um eine Einordnung der deutschen Ergebnisse in den europäischen Kontext zu ermöglichen.

Im Vergleich der Szenarien zeigt sich, dass mit der angewendeten einheitlichen Betrachtungsweise nicht alle Szenarien im Endergebnis eine Netto-Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 erreichen. Die Spanne der Residualemissionen liegt zwischen 40 und 74 Mt CO₂-Äq im Zieljahr, wobei die natürlichen Senken Netto-Einbindungen von 11 bis 56 Mt CO₂-Äq ausweisen, die technischen Senken zwischen 6 und 59 Mt CO₂-Äq. Die Annahmen zu den Emissionsminderungen sind damit relativ ähnlich zwischen den Szenarien, wohingegen die Spannweite bei den natürlichen Senken und den technischen Abscheidungen ein uneinheitliches Bild aufweisen.

Werden die einzelnen Elemente in den deutschen Szenarien mit den Ergebnissen des 2040 Impact Assessments für Szenario 2,5 im Jahr 2050 verglichen, haben die maximalen Residualemissionen der deutschen Szenarien einen Anteil von 17 % an den europäischen Residualemissionen, ebenso wie die natürlichen Netto-Senken. Die maximal ausgewiesenen technischen Senken hätten einen Anteil von 50 %. Bei diesen Vergleichen müssen jedoch die unterschiedlichen Zeitscheiben berücksichtigt werden, wegen der Zielsetzung der Treibhausgasneutralität in den Jahren 2045 bzw. 2050.

Die folgende Abbildung zeigt eine Gesamtübersicht der Ergebnisse der betrachteten Szenarien, die die Ergebnisse des Szenarien-Vergleichs gesammelt darstellt.

Abbildung 1: THG-Erzeugung und -Einbindung im Jahr 2045



Anmerkungen: Der Verkehr wird hier ohne den internationalen Schiffs- und Seeverkehr betrachtet. Fossiles, biogenes oder atmosphärisches CCU (Carbon Capture and Usage) für kurzfristige Produkte, vor allem E-Fuels, wird hier nicht einbezogen. Fossiler Anteil von WACCS ist in „Fossiles CCS (FoCCS) inkl. CCU mittelfristig und foWACCS“ enthalten. Es gilt das Territorialprinzip: Importe von Produkten auf Basis von Negativemissionen werden hier nicht als Entnahmen berücksichtigt, ihre Emissionen ausgewiesen, soweit möglich. Emissionen durch E-Fuels waren nur in den CARE-Szenarien ausgewiesen und werden gänzlich importiert. Dies ist beim Vergleich im inländischen Verkehr und der Gesamtemissionen mit anderen Szenarien zu beachten. Mittelfristiges, fossiles CCU wird als THG-Erzeugung oberhalb der Nulllinie dargestellt, im Gegensatz dazu BCCU (Biogenic Carbon Capture and Storage; Biogene CO₂-Abscheidung und -Speicherung). Beide Elemente werden per Default im Industriesektor bilanziert, wenn in den Sektoren nichts anderes ausgewiesen wird.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Auswertung der Ergebnisse des Szenarien-Vergleichs führt zu Erkenntnissen, die insbesondere hinsichtlich der Ausarbeitung zukünftiger Treibhausgasneutralitätsszenarien zu beachten sind: Um eine Vergleichbarkeit zwischen Szenarien durch saubere und konsistente Bilanzierung zu gewährleisten, ist die klare Ausweisung von Kategorien und getroffener Annahmen notwendig, insbesondere bezüglich der technischen Senken. Angelehnt an die für die Analyse verwendete Bilanzierungslogik und in Anbetracht der Unklarheiten, die während der

Auswertungen der einzelnen Szenarien aufgetaucht sind, gilt es insbesondere für folgende Punkte eine klare Ausweisung zu gewährleisten:

- ▶ Explizite Ausweisung der insgesamt erzeugten Treibhausgase neben den Brutto- und Netto-Emissionen;
- ▶ Eindeutige Informationen zu Carbon Capture and Use (CCU), insbesondere Unterscheidung zwischen kurz- und mittelfristigen Produkten, Angaben zu Zwischenprodukten und unterjährigen sektoralen Transfers (z. B. E-Fuels);
- ▶ Eindeutige Informationen zu sektoraler Zuordnung von Carbon Capture and Storage (CCS)-Aktivitäten, inklusive expliziter Ausweisung von fossilem und biogenem CCS im Abfallbereich (Waste incineration with carbon capture and storage, WACCS);
- ▶ Explizite und konsistente Angaben zu importierten und exportierten Kohlenstoffprodukten;
- ▶ Separate Ausweisung von LULUCF-Unterkategorien (Land Use, Land-Use Change and Forestry; Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft) mit Emissionen und Einbindungen;
- ▶ Separate Ausweisung von Pflanzenkohle, beschleunigter Verwitterung und stofflicher C-Nutzung, sowie anderer Carbon Dioxide Removal (CDR)-Technologien.

Insgesamt wird deutlich, dass nur die Ausweisung von Annahmen und Anteilen von Senken-Kategorien die Aussagekraft, Vergleichbarkeit und Konsistenz von Szenarien ermöglicht. Dazu gehört idealerweise auch eine nach Gasen getrennte Ausweisung, um unter anderem Informationen zu Ansatzpunkten für Minderungsmaßnahmen zu geben. Insbesondere aber bezüglich CCU, der Nutzung von E-Fuels und der Import-Anteile von Kohlenstoffprodukten sollten zukünftige Szenarien deutlich explizitere Angaben enthalten, um die Vergleichbarkeit von Szenarien zu verbessern. Dies gilt auch für Kategorien, bei denen die Inventarzuordnung erst in den kommenden Jahren auf internationaler Ebene final entschieden wird.

Ein zentraler Punkt der durchgeführten Analyse ist die konsistente Anwendung des Territorialprinzips in der Bilanzierung sowohl von Emissionen als auch von Entnahmen. In vielen Szenarien wurden importierte CCU-Produkte wie beispielsweise grünes Naphtha entgegen des Territorialprinzips als Entnahmen bilanziert, um somit einen Anreiz gegenüber der Nutzung von konventionellem Naphtha zu schaffen. Mit den Ergebnissen aus diesem Vorhaben wird deutlich, dass die Treibhausgasbilanzierung nach dem Territorialprinzip den Umstieg von fossilen auf synthetische Energieträger und andere CCU-Produkte für importierende Länder nicht honoriert. Die Wirkung von klimapolitischen Instrumenten bildet sich also bei solchen Importströmen nicht mehr direkt in den Treibhausgasinventaren ab, wie das z. B. bei der Verringerung der Nutzung fossiler Energieträger der Fall ist. So werden aus diesen Arbeiten zwei Herausforderungen für die kommenden Jahre besonders deutlich:

- ▶ Auf nationaler und internationaler Ebene sind weitere Arbeiten erforderlich, um zu einer einheitlichen und konsistenten Bilanzierung von Emissionen und Einbindungen und der Darstellung der Effekte der neuen Technologien in den nationalen Treibhausgasszenarien zu gelangen.
- ▶ Gleichzeitig besteht die politische Herausforderung, geeignete Anreize für klimapolitische Maßnahmen zu setzen, die sich nicht direkt in den nationalen Treibhausgasbilanzen darstellen lassen. Ein Beispiel ist hier die Errichtung von DACCS-Anlagen (Direct Air Carbon Capture and Storage) außerhalb des eigenen, bilanztechnischen Territoriums.

Summary

Germany has set itself the goal of achieving net greenhouse gas neutrality by 2045; at EU level, the goal is to achieve greenhouse gas neutrality by 2050. Numerous scenarios address the question of how these goals can be achieved. The use of zero and negative emission technologies as well as the consideration of natural sinks play a crucial role. These are intended to offset the remaining emissions, the so-called residual emissions.

The UBA project ‘Greenhouse gas neutrality in the EU and Germany: The conception of a target architecture taking sinks into account’ (FKZ 3722 41 502 0) systematically compares greenhouse gas neutrality scenarios for Germany. This paper compares the scenario results and presents them in the form of standardized graphs. A technical paper entitled ‘[Technical background paper on the scenario analysis. Methods and assumptions for comparing greenhouse gas neutrality scenarios for Germany](#)’ is published in parallel, which provides detailed information on the underlying methodology and the assumptions for standardising the scenario results. In addition, the data is made available in an [Excel tool](#), which can also be used to select the scenarios for analysis.

The aim of this research is to enable a consistent comparison of scenarios. Only with this uniform approach can it be clear which assumptions have been made in the scenarios in order to achieve net greenhouse gas neutrality in 2045. A particular focus is placed on quantifying the total amount of greenhouse gases generated, the application of technologies to avoid the emission of generated greenhouse gases, and the consideration of industrial and natural integration and the total industrial storage volumes required in the scenarios.

The tool, the analysis paper and the technical paper will be supplemented with new scenarios as part of the ongoing project and thereby updated.

As of February 2025, the following scenarios have been considered:

- ▶ Agora KN 2045 (2021) (Dambeck et al. 2021)
- ▶ DENA KN100 (Giuntoli et al. 2019; Gierkink et al. 2021)
- ▶ BDI Klimapfade 2.0 (Burchardt et al. 2021)
- ▶ Agora KN-DE (2024) (Nesselhauf et al. 2024)
- ▶ CARESupreme, CARETech (Harthan et al. 2025, forthcoming)

Additionally, the scenarios from the impact assessment for the EU’s 2040 climate target (EC 2024) were evaluated to contextualise Germany’s findings within the European context.

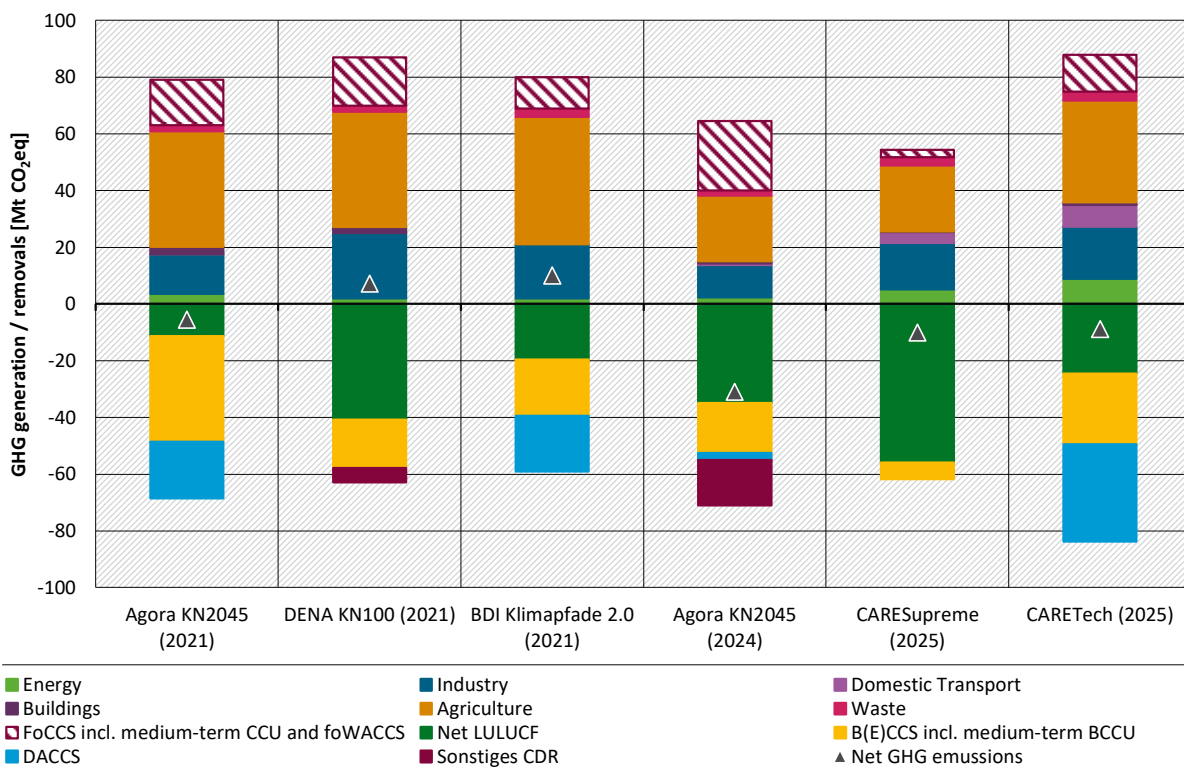
A comparison of the scenarios shows that when the uniform approach is applied, not all scenarios ultimately achieve net greenhouse gas neutrality in 2045. The range of residual emissions is between 40 and 74 MtCO₂ eq in the target year, with the natural sinks showing net captures of 11 to 56 Mt CO₂ eq and the technical sinks between 6 and 59 Mt CO₂ eq. The assumptions regarding emission reductions are thus relatively similar between the scenarios, whereas the range for technical capture shows an inconsistent picture.

If the individual elements in the scenarios for Germany are compared with the results of the 2040 Impact Assessment for Scenario 2.5 in 2050, the maximum residual emissions of the German scenarios account for 17 % of the European residual emissions, as do the natural net sinks. The maximum technical sinks reported would have a share of 50 %. However, these

comparisons must take into account the different time periods associated with the goals of achieving greenhouse gas neutrality in 2045 and 2050.

The following figure shows an overview of the results of the scenarios considered, gathering together the results of the scenario comparison.

Figure 2: GHG generation and removals in 2045



Note: The transport sector is considered without including international shipping and maritime traffic. Fossil, biogenic, or atmospheric CCU for short-term products, particularly e-fuels, is not included. The fossil share of WACCS is categorised under 'Fossil CCS (FoCCS) incl. medium-term CCU and foWACCS'. The territorial principle applies: imports of products based on negative emissions are not considered as removal, while their emissions are included if information is available. Emissions from e-fuels were only reported in the CARE scenarios and are entirely imported. This has to be considered when comparing domestic transport or total emissions with other scenarios. Medium-term fossil CCU as GHG generation is shown as an emission, while BCCU is shown as a sink below the zero line as part of B(E)CCS. Both elements are accounted for by default in the industrial sector unless explicitly allocated to other sectors.

Source: Authors' own, Oeko-Institut

The evaluation of the results of the scenario comparison leads to findings that should be taken into account, particularly with regard to the development of future greenhouse gas neutrality scenarios: in order to ensure comparability between scenarios through clean and consistent accounting, it is necessary to clearly identify the categories and assumptions made, particularly with regard to technical sinks. Based on the accounting logic used for the analysis and in view of the ambiguities that arose during the evaluation of the individual scenarios, it is particularly important to ensure that the following points are clearly identified:

- ▶ The total greenhouse gases generated need to be explicitly identified in addition to gross and net emissions;
- ▶ There needs to be clear information on carbon capture and use (CCU), distinguishing in particular between short- and medium-term products; information is needed on intermediate products and intra-year sectoral transfers (e. g. e-fuels);

- ▶ Clear information is needed on the sectoral classification of carbon capture and storage (CCS) activities, including explicit identification of fossil and biogenic CCS in the waste sector (waste incineration with carbon capture and storage, WACCS);
- ▶ Explicit and consistent information is needed on imported and exported carbon products;
- ▶ LULUCF sub-categories need to be separately identified with their emissions and removals;
- ▶ Biochar, accelerated weathering and material C use, and other carbon dioxide removal (CDR) technologies need to be separately identified.

Overall, it is clear that only when having identified the assumptions and shares of sink categories are the scenarios informative, comparable and consistent. Ideally, this also includes a separate classification for each gas in order to provide, among other things, information on starting points for mitigation measures. In particular, future scenarios should contain much more explicit information on the shares of CCU, the use of e-fuels and the import shares of carbon products in order to improve the comparability of scenarios. This is particularly true for categories for which the inventory classification will only be finally decided at international level in the coming years.

A central point of the analysis is the consistent application of the territorial principle in the accounting of both emissions and removals. In many scenarios, imported CCU products like green naphtha were accounted for as removals, contrary to the territorial principle, in order to create an incentive to use green rather than conventional naphtha. However, the results of this project make it clear that greenhouse gas accounting does not always directly go towards achieving the calculated target and thus policy implementation. The effect of instruments is therefore no longer directly reflected in the greenhouse gas inventories, as is the case, for example, with the reduction in the use of fossil fuels. This research makes two challenges particularly clear for the years ahead:

- ▶ Further work is required at national and international levels in order to achieve a uniform and consistent accounting of emissions and removals and to show the effects of the new technologies and natural sinks in the national greenhouse gas scenarios.
- ▶ At the same time, there is the political challenge of setting appropriate incentives for climate policy measures that cannot be directly reflected in national greenhouse gas balances. In particular, the use of imported e-fuels should be mentioned, for which a uniform, international convention reduces incentives on one side or the other, as well as, for example, the construction of DACCS plants outside one's own accounting territory.

1 Einleitung

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2045 Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. Auf EU-Ebene besteht das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050. Zahlreiche Szenarien beschäftigen sich mit der Frage, wie diese Ziele erreicht werden können. Dabei spielt der Einsatz von Null- und Negativemissionstechnologien ebenso wie die Berücksichtigung der natürlichen Senken eine entscheidende Rolle. Mit diesen sollen die verbleibenden Restemissionen, die sogenannten Residualemissionen, ausgeglichen werden.

Das vorliegende Analysepapier wird begleitet von einem Excel-Tool, in dem verschiedene Szenarien zur Analyse ausgewählt werden können und in dem die Daten ausgewiesen werden. Des Weiteren werden in einem Hintergrundpapier die zu Grunde liegende Methodik und die Annahmen zur Vereinheitlichung der Szenarienergebnisse erläutert.

Das Szenarien-Tool ermöglicht einen Vergleich, welche Annahmen in den Szenarien getroffen worden sind, um die Netto-Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 zu erreichen. Ein besonderer Fokus liegt hier auf der Quantifizierung der Gesamtheit der erzeugten Treibhausgase, der Anwendung von Technologien zur Vermeidung der Emission erzeugter Treibhausgase sowie der Berücksichtigung der technischen und natürlichen Einbindungen und der gesamten technischen Speichermengen, die in den Szenarien gefordert werden.

Die Arbeiten erfolgten in dem UBA-Vorhaben „Treibhausgasneutralität in der EU und in Deutschland: Die Konzeption einer Zielarchitektur unter Berücksichtigung von Senken“ (FKZ 3722 41 502 0).

Sowohl das Tool als auch das hier vorliegende Analysepapier sowie das Hintergrundpapier werden im Rahmen des laufenden Vorhabens um neue Szenarien ergänzt und damit aktualisiert.

Mit dem Stand Februar 2025 werden die folgenden Szenarien betrachtet:

- ▶ Agora KN 2045 (2021) (Dambeck et al. 2021)
- ▶ DENA KN100 (Giuntoli et al. 2019; Gierkink et al. 2021)
- ▶ BDI Klimapfade 2.0 (Burchardt et al. 2021)
- ▶ Agora KN-DE (2024) (Nesselhauf et al. 2024)
- ▶ CARESupreme, CARETech (Harthan et al. 2025, in Veröffentlichung)

Zudem wurden die Szenarien der Folgenabschätzung für das 2040-Klimaziel der EU (EC 2024) ausgewertet, um eine Einordnung der deutschen Ergebnisse in den europäischen Kontext zu ermöglichen.

2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Vergleich der Szenarien zeigt sich, dass mit der angewendeten einheitlichen Betrachtungsweise nicht alle Szenarien im Endergebnis eine Netto-Treibhausgasneutralität erreichen (siehe Textbox zu zentralen Annahmen). Die Spanne der Residualemissionen liegt zwischen 40 und 70 Mt CO₂-Äq im Zieljahr, wobei die natürlichen Senken Netto-Einbindungen von 11 bis 56 Mt CO₂-Äq ausweisen, die technischen Senken zwischen 6 und 57 Mt CO₂-Äq.

Werden die einzelnen Elemente in den deutschen Szenarien für das Jahr 2045 mit den Ergebnissen des 2040 Impact Assessments für Szenario 2,5 im Jahr 2050 verglichen¹, haben die maximalen Residualemissionen der deutschen Szenarien einen Anteil von 17 % an den europäischen Residualemissionen, ebenso wie die natürlichen Netto-Senken. Die maximal ausgewiesenen technischen Senken hätten einen Anteil von 50 %. Bei diesen Vergleichen muss jedoch berücksichtigt werden, dass wegen der unterschiedlichen Zieljahre der Treibhausgasneutralität (2045 bzw. 2050), verschiedene Zeitscheiben betrachtet werden.

Zentrale Bilanzierungsannahmen:

Bei der Betrachtung der verschiedenen Elemente, die zu den Emissionen oder zur Senkenwirkung in den Szenarien beitragen, liegen hier einheitliche Ansätze zur Verortung der Effekte in der Treibhausgasbilanz zu Grunde. Dadurch können sich in Summe abweichende Ergebnisse zu den in den Publikationen der Szenarien ausgewiesenen Gesamtergebnissen ergeben. Dies sind u. a. 1) Die grundsätzliche Unterscheidung in erzeugte Treibhausgase, Brutto- und Netto-Emissionen, wobei der Begriff „erzeugte Treibhausgase“ das über CCS eingefangene CO₂ einbezieht. Siehe dazu auch Gores und Graichen (2024). 2) Die Effekte von CCU auf die Bilanzierung werden produktbezogen unterschieden in kurz- und mittelfristige Speicherung. Kurzfristige Speicherung wird in der Bilanz nicht betrachtet. Mittelfristiges, fossiles CCU wird wie CCS behandelt, wohingegen mittelfristiges, biogenes CCU (BCCU) unter B(E)CCS fällt und damit als eine Senke gewertet wird. 3) Die Verbrennung von E-Fuels wird mit Emissionen berücksichtigt, wenn die Mengen in den Szenarien ausgewiesen werden. E-Fuels gelten als kurzfristiges CCU und werden nicht als CO₂-Speicher angesehen. 4) Sektorale Zuordnungen wurden für den Vergleich harmonisiert. 5) Emissionen des internationalen Verkehrs werden in der Betrachtung nicht einbezogen. 6) Wenn nicht anders ausgewiesen, wird die Wirkung des LULUCF Sektors netto betrachtet. 7) Es wird das Territorialprinzip angewendet, d. h. auch, dass z. B. importierte Produkte aus CCU-Verfahren nicht als Negativemissionen angerechnet werden und Emissionen von importierten Produkten einbezogen werden. Siehe dazu auch weitere Anmerkungen unter den Grafiken sowie das Hintergrundpapier, in dem auch weitere Annahmen, die für die Auswertung der einzelnen Szenarien getroffen wurden, beschrieben sind. Dazu gehören insbesondere auch sektorale Zuweisungen, Aufteilungen nach biogenem und fossilem Ursprung sowie Annahmen zur Verteilung der Nutzung und Speicherung von Kohlenstoff.

¹ Die Folgenabschätzung (engl. Impact Assessment) der EU-Kommission (EC 2024) zeigt unterschiedliche Wege zur Erreichung des Klimaneutralitätsziels für das Jahr 2050 auf. Es enthält drei unterschiedliche Emissionspfade S1 bis S3, die sich in der Geschwindigkeit der Minderung in der Periode 2030 bis 2040 unterscheiden, bis 2050 aber wieder konvergieren. Auf dieser Basis hat die Kommission ein Ziel von 90 % Netto-Minderung gegenüber 1990 für das Jahr 2040 vorgeschlagen. Dieses Ziel entspricht in der Modellierung dem Mittelwert der Szenarien S2 und S3 und wird in diesem Dokument S2.5 bezeichnet.

3 Emissionen und Einbindungen in den Szenarien im Jahr 2045

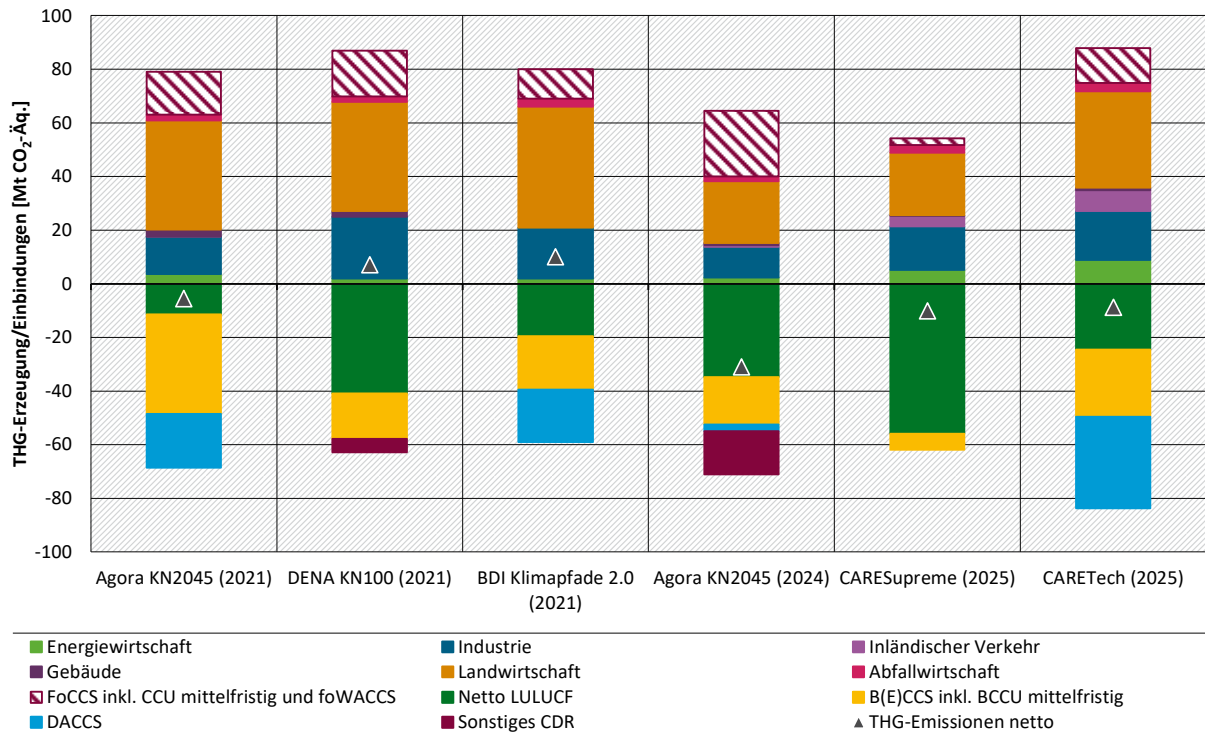
3.1 Vergleich der Szenarien

In Abbildung 3 wird eine Gesamtübersicht der Ergebnisse der betrachteten Szenarien gezeigt. Diese stellt damit eine Zusammenfassung der nachfolgenden Abbildungen dar, die verschiedene Elemente im Detail darstellen.

Der Abgleich der Szenarienergebnisse zu den Brutto-Emissionen mit den technischen und natürlichen Senken nach den erläuterten Bilanzierungsannahmen, resultiert in den Netto-Emissionen, die hier jeweils als Punkte dargestellt sind. Durch die angewendete Einordnung der verschiedenen Elemente ergeben sich für zwei Szenarien im Jahr 2045 (DENA KN100 und BDI Klimapfade 2.0) deutlich positive Netto-Emissionen, also eine Verfehlung der Anforderung der Netto-Treibhausgasneutralität. Das liegt vor allem an der Nicht-Anrechnung von importierten CCU-Produkten als bilanziell negativ (DENA KN100) und von DAC-Entnahmen im Ausland (BDI Klimapfade 2.0). Mehr Details zu den Gründen siehe Hintergrundpapier. Die anderen Szenarien erreichen im Jahr 2045 negative Netto-Emissionen von -5 Mt CO₂-Äq (Agora KN2045(2021)) bis -31 Mt CO₂-Äq (Agora KN-DE (2024)).

Außerdem sind in dieser Ansicht in der oberen Hälfte die zusätzlich erzeugten Treibhausgase aus fossilen Brennstoffen schraffiert dargestellt, die laut der Szenarienergebnisse über CCS (inkl. fossiles WACCS) oder mittelfristiges CCU am Ausstoß in die Atmosphäre gehindert werden und lang- bzw. mittelfristig gespeichert werden. Tatsächlich handelt es sich bei diesen Mengen um einen Netto-Betrag, da bei CCS keine vollständige Abscheidung und Speicherung stattfindet und ein Teil der erzeugten Emissionen in die Atmosphäre gelangen wird. Diese Mengen (Fossiles CCS (FoCCS) inkl. WACCS und CCU mittelfristig) werden nicht in die Gesamtbilanz zur Berechnung der Netto-Emissionen einbezogen.

Abbildung 3: THG-Erzeugung und Einbindung im Jahr 2045



Anmerkungen: Der Verkehr wird hier ohne den internationalen Schiffs- und Seeverkehr betrachtet. Fossiles, biogenes oder atmosphärisches CCU für kurzfristige Produkte, vor allem E-Fuels, wird hier nicht einbezogen. Fossiler Anteil von WACCS ist in „FoCCS inkl. CCU mittelfristig und foWACCS“ enthalten. Es gilt das Territorialprinzip: Importe von Produkten auf Basis von Negativemissionen werden hier nicht als Entnahmen berücksichtigt, ihre Emissionen ausgewiesen, soweit möglich. Emissionen durch E-Fuels waren nur in den CARE-Szenarien ausgewiesen und werden gänzlich importiert. Dies ist beim Vergleich im inländischen Verkehr und der Gesamtemissionen mit anderen Szenarien zu beachten. Mittelfristiges, fossiles CCU wird als THG-Erzeugung oberhalb der Nulllinie dargestellt, im Gegensatz dazu BCCU als Einbindung unterhalb der Nulllinie (als Teil von B(E)CCS). Beide Elemente werden per Default im Industriesektor bilanziert, wenn in den Sektoren nichts anderes ausgewiesen wird.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

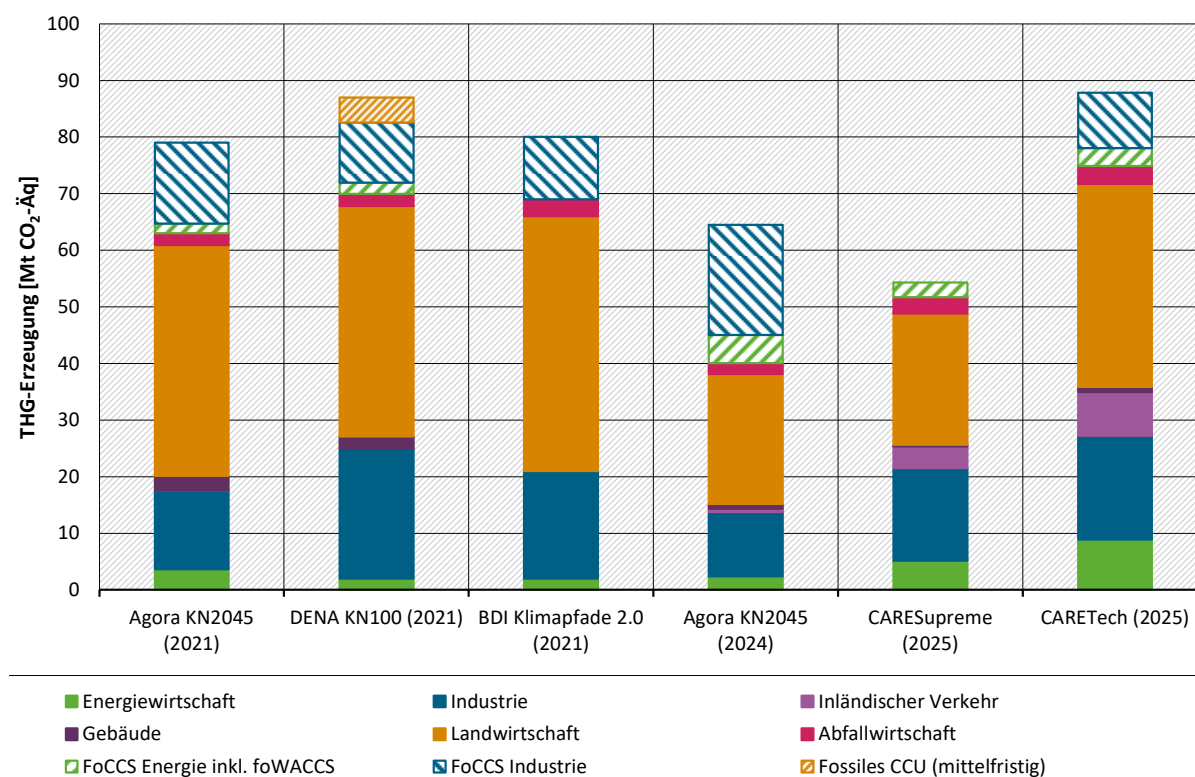
4 Sektorale Treibhausgaserzeugung in den Szenarien im Jahr 2045

4.1 Vergleich der Szenarien

In Abbildung 4 wird die obere Hälfte der Abbildung 3 detailliert betrachtet. Dabei werden die Mengen des fossilen CCS und mittelfristigen CCUs getrennt voneinander dargestellt. Ohne diese Elemente können aus dieser Graphik die Residualemissionen abgelesen werden: Diese liegen zwischen 40 Mt CO₂-Äq (Agora KN-DE (2024)) und 70 Mt CO₂-Äq (DENA KN100). Die gesamte Treibhausgaserzeugung umfasst auch die fossilen Emissionen, die erst entstehen und dann direkt durch Abscheidungs-Technologien aufgefangen und anschließend in geologischen Formationen gespeichert werden (CCS) bzw. die nach dem Auffangen in Produkte umgewandelt werden, die als mittelfristige Speicher angesehen werden können (CCU mittelfristig).

Die Gesamt-THG-Erzeugung liegt zwischen 54 Mt CO₂-Äq (CARESupreme) und 88 Mt CO₂-Äq (CARETech). In allen Szenarien stammen die meisten Emissionen aus der Landwirtschaft, gefolgt in fast allen Szenarien von den Industrieemissionen (exkl. FoCCS). Nur in den Szenarien Agora KN2045(2021) und Agora KN2045(2024) ist das fossile CCS in der Industrie das zweitgrößte Element in der Betrachtung der THG-Erzeugung. Die gesamten in der Industrie erzeugten Treibhausgase im Szenario Agora KN2045(2024) sind sogar höher als die Emissionen aus der Landwirtschaft. Bei der vergleichenden Betrachtung muss berücksichtigt werden, dass die Emissionen von E-fuels für den nationalen Verkehr in den CARE-Szenarien ausgewiesen und damit hier unter strikter Anwendung des Territorialprinzips einbezogen sind. In anderen Szenarien sind deren Mengen nicht in den Ergebnissen eindeutig dargestellt und damit hier nicht ausgewiesen.

Abbildung 4: Gesamte THG-Erzeugung und Residualemissionen ohne LULUCF im Jahr 2045



Anmerkungen: Mittelfristiges, fossiles CCU wird unter der Annahme der konsequenten Kreislaufnutzung und CCS am Ende

des Lebens und Vermeidung von Doppelzählung als FoCCS berücksichtigt und, falls nicht anders ausgewiesen, im Industriesektor bilanziert. Der fossile Anteil von WACCS ist in „FoCCS Energie inkl. foWACCS“ enthalten. Fossiles, biogenes oder atmosphärisches CCU für kurzfristige Produkte, vor allem E-Fuels, wird hier nicht einbezogen. Emissionen aus der Verbrennung von E-Fuels sind nur in den CARE Szenarien verfügbar.

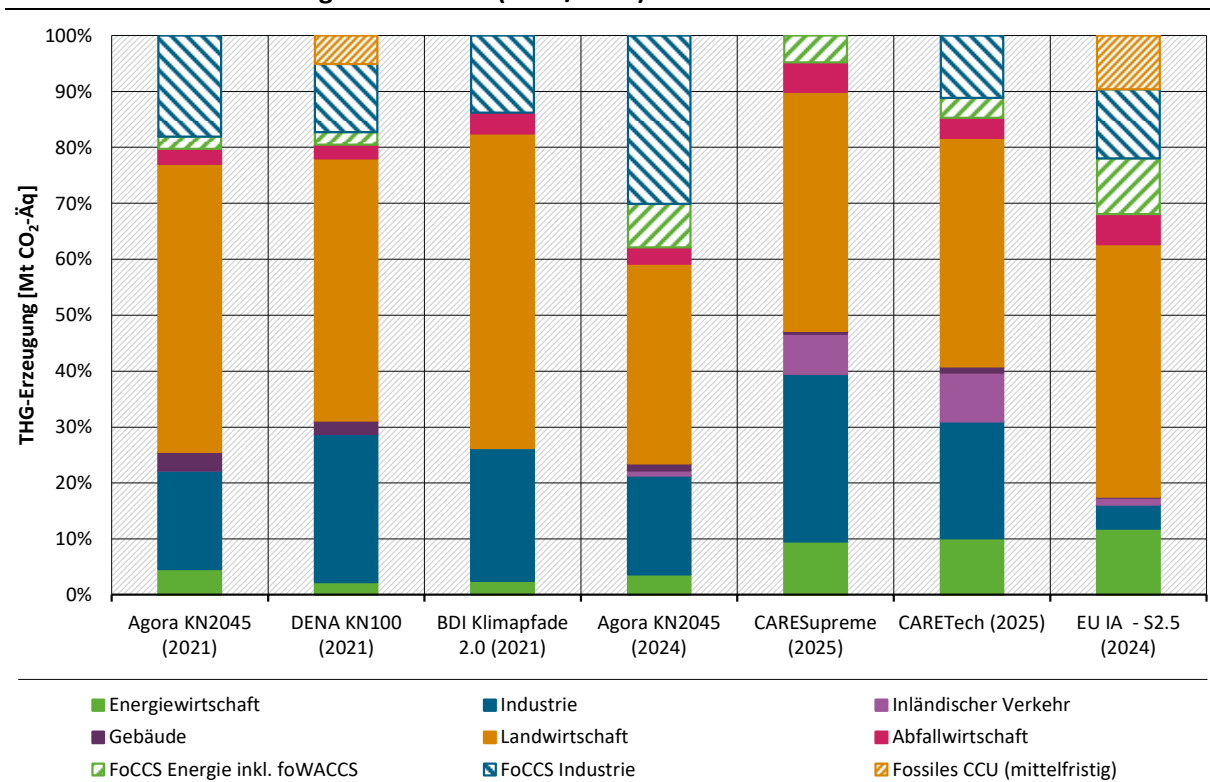
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

4.2 Einordnung in den europäischen Kontext

In der folgenden Abbildung wird die sektorale THG-Erzeugung prozentual verglichen, um damit auch eine parallele Betrachtung für die EU mit den Ergebnissen der Folgenabschätzung zu ermöglichen. Für die Betrachtung mit dem EU-Szenario wird ein mittleres Szenario verwendet (S2,5 als Mittelwert zwischen dem S2- und dem S3-Szenario). Dieses entspricht in den Dimensionen der Empfehlung der Europäischen Kommission zum 2040 Ziel. Um eine weitere Vergleichbarkeit zu ermöglichen, werden hier die Ergebnisse für das Jahr 2050 betrachtet, da dieses das Zieljahr der Treibhausgasneutralität auf europäischer Ebene ist und dadurch mit dem Jahr 2045 auf deutscher Ebene besser vergleichbar ist.

Auf EU-Ebene hat der Einsatz von fossilem CCS einen Anteil von 22 % an der gesamten THG-Erzeugung. Dieser Anteil ist bei Agora 2024 mit 38 % deutlich höher, bei CARESupreme mit 5 %, die lediglich fossilem WACCS entsprechen, erheblich niedriger. Der absolute Anteil am Einsatz von fossil CCS in Deutschland beträgt in dem Szenario mit dem höchsten Einsatz (Agora 2024) 24 Mt CO₂, etwas weniger als einem Fünftel der gesamten EU-Menge. Hier ist allerdings der zeitliche Versatz zwischen den Szenarien zu berücksichtigen. Im Jahr 2050 könnten die deutschen fossil CCS Mengen noch höher sein.

Abbildung 5: Prozentuale, sektorale Verteilung der THG-Erzeugung im Jahr der Treibhausgasneutralität (2045/2050)



Anmerkungen: Mittelfristiges, fossiles CCU wird unter der Annahme der konsequenten Kreislaufnutzung und CCS am Ende des Lebens und Vermeidung von Doppelzählung bei WACCS berücksichtigt. Und, falls nicht anders ausgewiesen, im Industriesektor bilanziert. Fossiler Anteil von WACCS ist in „FoCCS Energie inkl. foWACCS“ enthalten. Fossiles, biogenes oder

atmosphärisches CCU für kurzfristige Produkte, vor allem E-Fuels, wird hier nicht einbezogen. Emissionen aus der Verbrennung von E-Fuels sind nur in den CARE-Szenarien verfügbar.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

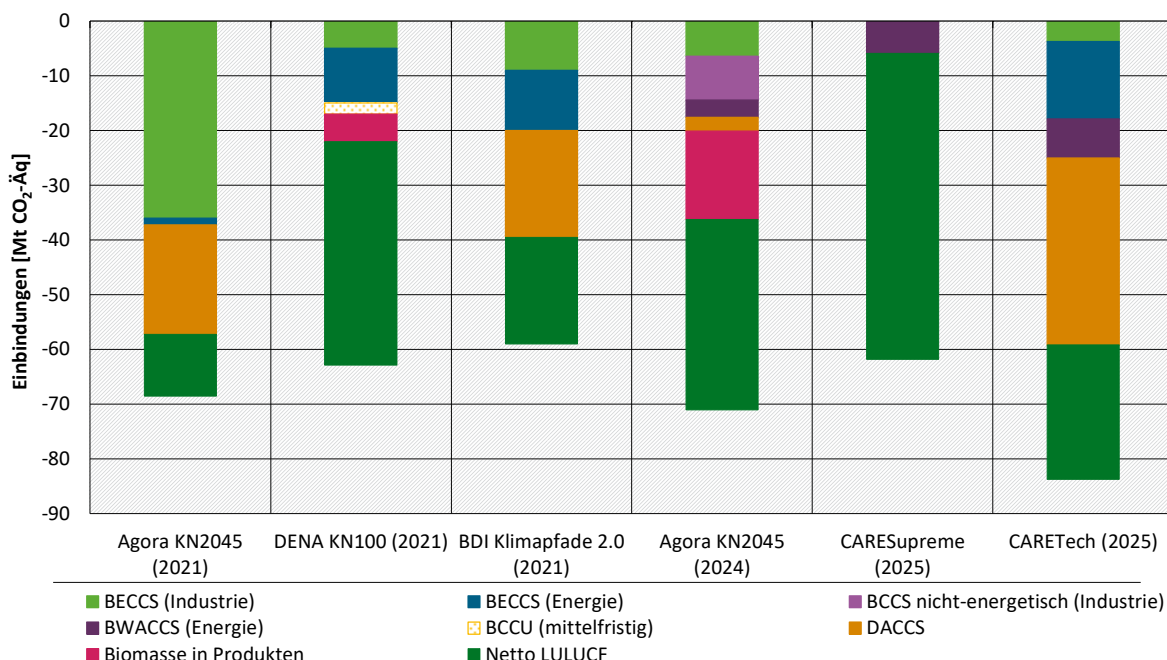
5 Kohlenstoff-Einbindungen in den Szenarien im Jahr 2045

5.1 Vergleich der Szenarien

In Abbildung 6 wird die untere Hälfte von Abbildung 1 in größerer Detailtiefe dargestellt: Außerdem wird die Kategorie B(E)CCS nach Sektoren (Energie, Industrie), energetischer und nicht-energetischer Nutzung, sowie BWACCS (Biogenic waste incineration with carbon capture and storage) und BCCU (mittelfristig) aufgetrennt. Schließlich wird hier auch die Kategorie der stofflichen C-Nutzung biogenen Ursprungs zur Erzeugung von Bio-Methanol (DENA KN100 und Agora 2024) dargestellt als „Biomasse in Produkten“. Dieses ist die einzige „Sonstige CDR-Technologie“ in den untersuchten Szenarien. Sie wird in zukünftigen Treibhausgasinventaren zusammen mit beschleunigter Verwitterung und Pflanzenkohle in zukünftigen Treibhausgasinventaren wahrscheinlich innerhalb der LULUCF-Kategorie verbucht. Es wird empfohlen, die Effekte sonstiger CDR-Technologien möglichst getrennt von der LULUCF-Bilanzierung ohne die sonstigen CDR-Technologien auszuweisen, also dem sogenannten „konventionellen LULUCF“, um die Transparenz der Szenarienergebnisse zu erhöhen.

Die Netto-Einbindung von konventionellem LULUCF liegt zwischen -11 Mt CO₂-Äq (Agora 2021) und -56 Mt CO₂-Äq (CARESupreme). Die gesamten Netto-Einbindungen liegen zwischen -59 Mt CO₂-Äq (BDI Klimapfade 2.0) und -81 Mt CO₂-Äq (CARETech). Bei dem Vergleich ist zu berücksichtigen, dass nur in die CARE-Szenarien die Ergebnisse der aktuellen Bundeswaldinventur antizipiert worden sind. Damit sind die Auswirkungen der extremen Jahre 2018 bis 2020 berücksichtigt worden, die zu einem deutlich niedrigeren Niveau der Waldsenke führten als in den vorhergehenden Jahren berichtet wurde..

Abbildung 6: Technische und natürliche Netto-Einbindungen im Jahr 2045 im Vergleich



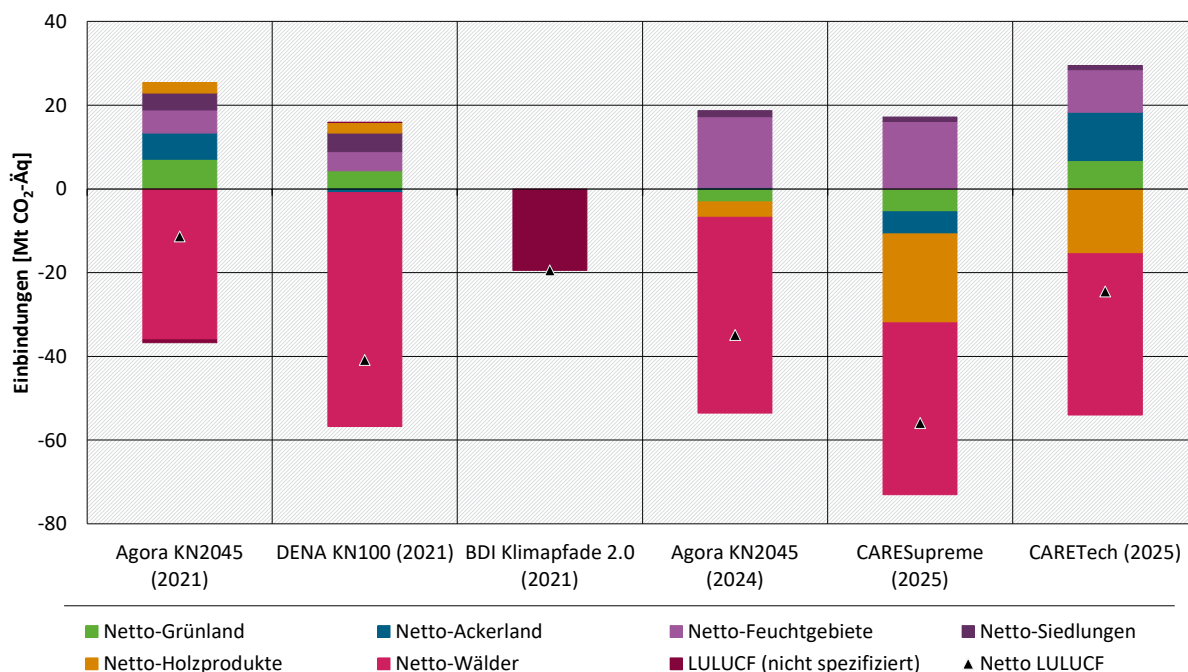
Anmerkungen: Wenn keine weiteren Informationen verfügbar sind, werden Informationen über „BECCS“ (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) dem Element „BCCS (Energie)“ zugewiesen. Die LULUCF Kategorie wird hier netto betrachtet und bedeutet konventionelles LULUCF, bezieht also z. B. Pflanzenkohle, beschleunigte Verwitterung (in keinem Szenario von Bedeutung) und direkte stoffliche Einbindung (bspw. in Biomethanol) nicht mit ein. Mittelfristiges BioCCU/DACCU (also

Kunststoffe) und langfristiges BECCU/DACCU (also erzwungene Karbonisierung z. B. von Betonteilen, Abbruchbeton etc.²) werden hier dargestellt, allerdings weisen die Szenarien diese Elemente noch nicht oder nicht getrennt aus. Kurzfristiges CCU (E-Fuels) wird hier wegen der fehlenden Speicherwirkung nicht einbezogen. Importe von E-Fuels und anderen Produkten werden hier nicht einbezogen.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

In den Szenarien wird stets angenommen, dass die LULUCF Unterkategorien der Treibhausgasinventare in Summe eine Einbindung ergibt. Damit stellt dieser Sektor eine Netto-Einbindung da. Manche Szenarien informieren auch über die Netto-Effekte der verschiedenen LULUCF-Unterkategorien, was eine zentrale Information zur angenommenen Entwicklung in diesem Sektor und ggf. zu unterlegten Maßnahmen darstellt. Deshalb werden diese Unterkategorien zusammen in Abbildung 7 aufgeführt, falls die Information vorliegt.

Abbildung 7: LULUCF Emissionen und Einbindungen im Jahr 2045 im Vergleich



Anmerkung: Die LULUCF-Unterkategorien werden hier jeweils netto betrachtet. Sie beziehen nur konventionelles LULUCF ein.

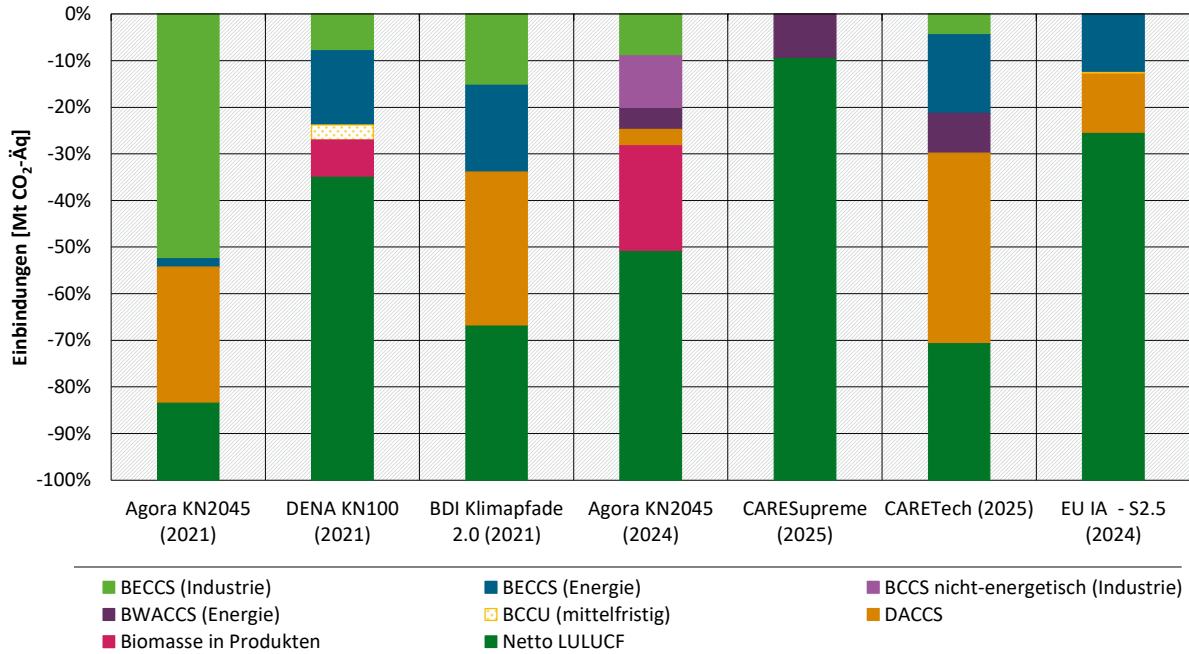
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

5.2 Einordnung in den europäischen Kontext

Wie in Abschnitt 4.2 wird hier das S2,5 Szenario im Jahr 2050 mit den Einbindungsmengen aus den deutschen Szenarien für das Jahr 2045 verglichen. Der Anteil der natürlichen Einbindungen auf EU-Ebene beträgt im Jahr 2050 rund 73 % an der gesamten CDR-Menge, also 332 Mt CO₂-Äq. Bis auf das Szenario CARESupreme, das einen Anteil von 90 % erreicht, liegen alle anderen Szenarien bei einem deutlich niedrigeren Anteil. In absoluten Mengen würden die natürlichen Senken bei CARESupreme einen Anteil von 17 % an der EU-weiten natürlichen Einbindung haben. Der Anteil der technischen Senken ist in Agora 2021 mit 83 % besonders groß. Die damit verbundene absolute Menge würde einem Anteil von 50 % der EU-Menge 2050 bedeuten.

² Bei BECCU/DACCU handelt es sich im Gegensatz zur ‚beschleunigten Verwitterung‘ um Prozesse, die **nicht** unter atmosphärischen Bedingungen ablaufen. Der chemische Prozess zur CO₂-Einbindung im Gestein ist derselbe.

Abbildung 8: Prozentuale technische und natürliche Netto-Einbindungen im Jahr der Treibhausgasneutralität (2045/2050) im Vergleich



Anmerkungen: Wenn keine weiteren Informationen verfügbar sind, werden Informationen über „BECCS“ (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) dem Element „BCCS (Energie)“ zugewiesen. Die LULUCF Kategorie wird hier netto betrachtet und bedeutet konventionelles LULUCF, bezieht also z. B. Pflanzenkohle, beschleunigte Verwitterung (in keinem Szenario von Bedeutung) und direkte stoffliche Einbindung (bspw. in Biomethanol) nicht mit ein. Mittelfristiges BioCCU/DACCU (also Kunststoffe) und langfristiges BECCU/DACCU (also erzwungene Karbonisierung z. B. von Betonteilen, Abbruchbeton etc.³) werden hier dargestellt, allerdings weisen die Szenarien diese Elemente noch nicht oder nicht getrennt aus. Kurzfristiges CCU (E-Fuels) wird hier wegen der fehlenden Speicherwirkung nicht einbezogen. Importe von E-Fuels und anderen Produkten werden hier nicht einbezogen.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

³ Bei BECCU/DACCU handelt es sich im Gegensatz zur ‚beschleunigten Verwitterung‘ um Prozesse, die **nicht** unter atmosphärischen Bedingungen ablaufen. Der chemische Prozess zur CO₂-Einbindung im Gestein ist derselbe.

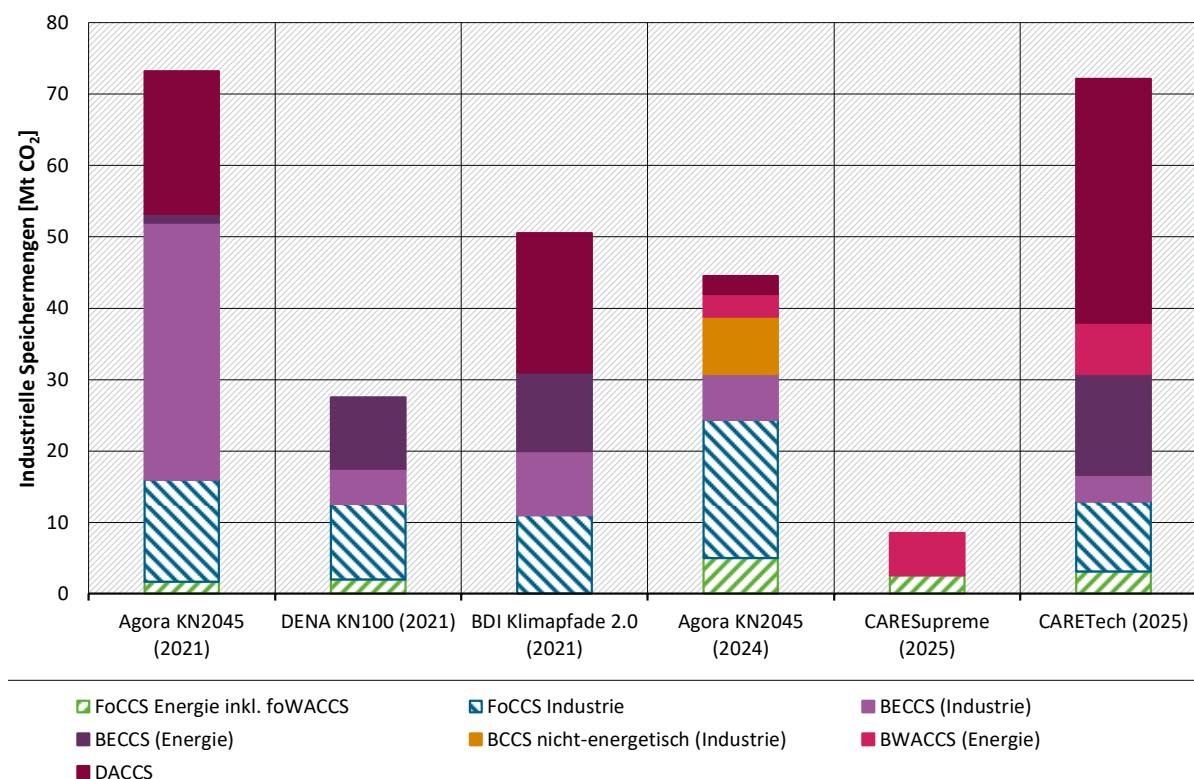
6 Technische Speichermengen im Jahr 2045

6.1 Vergleich der Szenarien

In Abbildung 9 wird die gesamte Kohlenstoffabscheidung dargestellt, die nach den Szenarienergebnissen in Deutschland im Jahr 2045 stattfindet. Dieses bedeutet keine Festlegung zum Ort der Speicherung, die zumindest teilweise auch im Ausland vorgenommen werden könnte.

In den Szenarien Agora 2021 und CARETech findet eine jährliche Speicherung in geologischen Formationen von über 70 Mt CO₂-Äq statt. Im CARESupreme hingegen ergibt sich nur eine jährliche Speicherung von 8,5 Mt CO₂-Äq.

Abbildung 9: Kohlenstoffabscheidung zur Speicherung in geologischen Formationen 2045



Anmerkungen: CCU wird hier nicht einbezogen, auch keine weitere stoffliche Einbindung, keine beschleunigte Verwitterung und keine Pflanzenkohle. Fossiler Anteil von WACCS ist in „FoCCS Energie inkl. foWACCS“ enthalten.

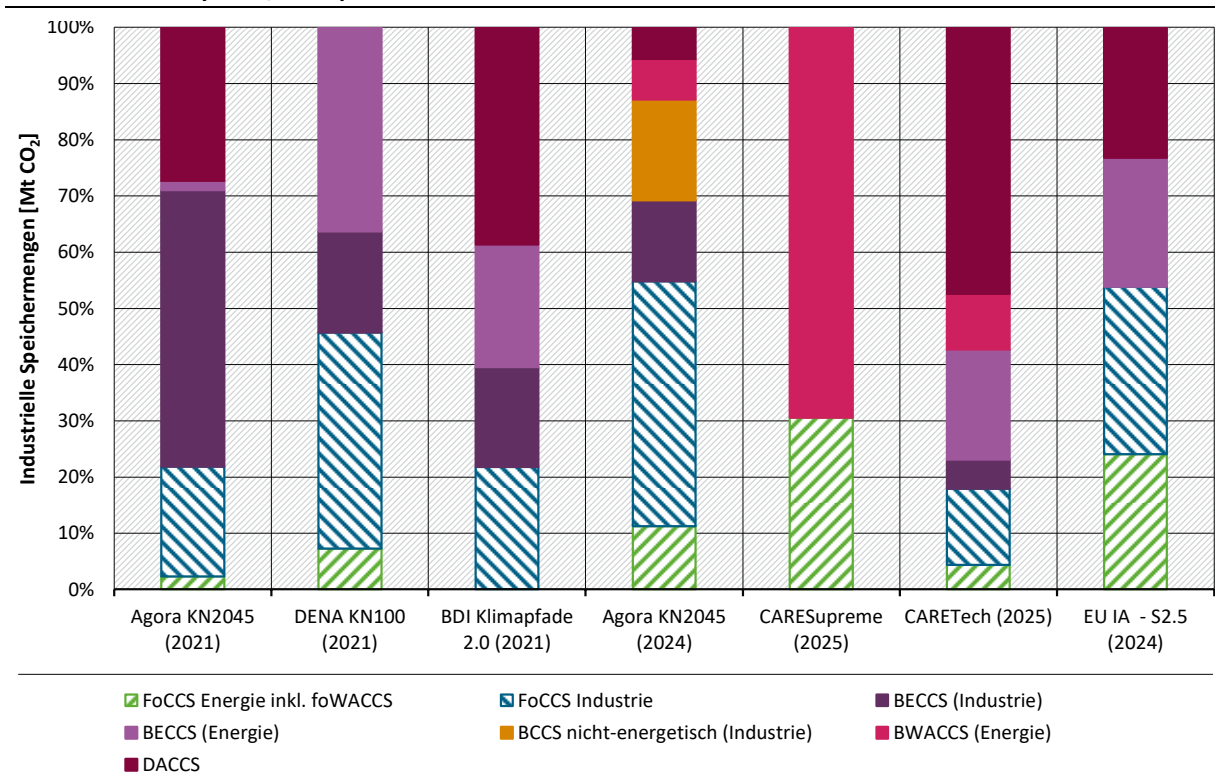
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

6.2 Einordnung in den europäischen Kontext

Wie in den vorherigen Abschnitten wird hier das EU Szenario S2,5 im Jahr 2050 mit den projizierten technisch gespeicherten Mengenanteilen aus den deutschen Szenarien für das Jahr 2045 verglichen. Der Anteil der Einbindung durch DACCS beträgt 47 % der gesamten industriellen Speichermengen im CARETech Szenario, in absoluten Mengen entspricht dies 60 % der EU-weiten jährlichen Speicherung durch DACCS im Jahr 2050. Das Impact Assessment geht mit 23 % nur von einem knapp halb so großen Anteil aus.

Auffällig ist, dass in zwei Szenarien (DENA KN100, Agora KN2045) der Anteil von fossilem CCS um die 50 % der gesamten Speichermenge beträgt. Dies entspricht auch der Größenordnung des S2,5 des Impact Assessments.

Abbildung 10: Prozentuale technische Speichermengen im Jahr der Treibhausgasneutralität (2045/2050)



Anmerkungen: CCU wird hier nicht einbezogen, auch keine weitere stoffliche Einbindung, keine beschleunigte Verwitterung und keine Pflanzenkohle. Fossiler Anteil von WACCS ist in „FoCCS Energie inkl. foWACCS“ enthalten.
 Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

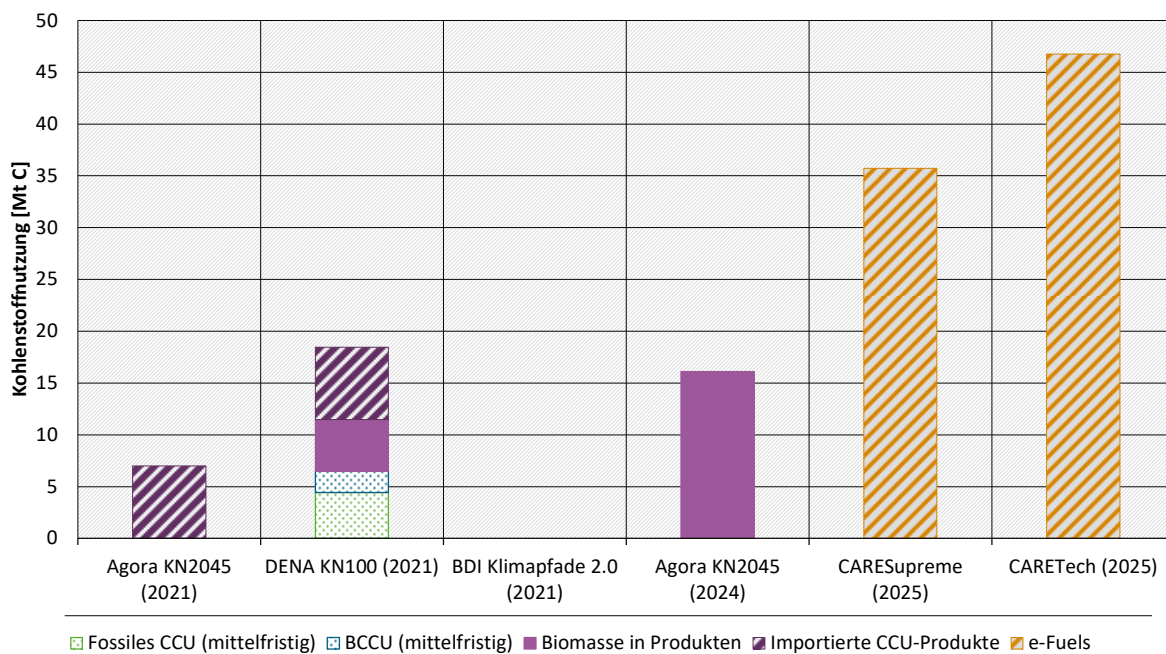
7 Kohlenstoffnutzung

Die Angaben zur Kohlenstoffnutzung, insbesondere bezüglich importierter CCU-Produkte und kurzfristiger CCU-Produkte wie E-Fuels, ist in den verschiedenen Szenarien nicht gänzlich konsistent und vollständig. Oftmals werden CCU-Anteile nicht explizit angegeben und der geologischen Speicherung gleichgesetzt oder Import-Anteile nicht oder lückenhaft angegeben und trotzdem in der Gesamtbilanz verrechnet. Daher sind die Informationen zwischen den Szenarien derzeit noch nicht mit ausreichender Sicherheit vergleichbar. Dies ist bei den folgenden Vergleichen zu berücksichtigen.

7.1 Vergleich der Szenarien

In Abbildung 11 werden die Mengen der Kohlenstoffabscheidung, die nicht in geologischen Formationen gespeichert, sondern genutzt werden (CCU), sowie die direkte stoffliche Nutzung biogenen Kohlenstoffs, die nicht im LULUCF Sektor enthalten ist, ausgewiesen. Dabei werden auch die Mengen dargestellt, die z. B. wegen des Territorialprinzips, der zu geringen Speicherdauer oder des gewählten Erfassungsbereiches nicht in die Gesamtbilanz einbezogen werden. Dementsprechend sind hier jegliche Formen von CCU ausgewiesen (mittel-, lang- und kurzfristiges CCU (fossil und biogen)) sowie Importe von CCU-Produkten. Kurzfristiges CCU wird dabei pauschal mit E-Fuels gleichgesetzt. Die dargestellten Elemente dienen damit allein der Information und der Nachvollziehbarkeit der ausgewiesenen Informationen aus den Szenarien.

Abbildung 11: Nutzung von Kohlenstoff 2045



Anmerkungen: Die dargestellten importierten Elemente werden nicht in die Gesamtbilanzierung aufgenommen. In den Szenarien BDI und Agora (2024) sind die Anteile für fossil CCU und BECCU (mittelfristig) nicht getrennt ausweisbar, sondern in den entsprechenden Kategorien fossil CCS und B \in CCS enthalten und deshalb hier nicht angegeben. Emissionen durch E-Fuels waren nur in den CARE-Szenarien ausgewiesen und werden gänzlich importiert. Sie beinhalten Emissionen durch importierte E-Fuels sowohl im nationalen als auch im internationalen Verkehr. Biomasse in Produkten kommt in den CARE-Szenarien auch zum Einsatz, wird aber nicht quantifiziert und kann deshalb hier nicht ausgewiesen werden.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

Im BDI-Szenario werden die jeweiligen Anteile an mittelfristigem, fossilem CCU und BCCU nicht explizit ausgewiesen, weshalb sie in der Graphik nicht dargestellt sind. Sie sind allerdings trotzdem innerhalb der entsprechenden Oberkategorien FoCCS und B(E)CCS in der Gesamtbilanzierung enthalten. Zudem weist das BDI-Szenario auf mögliche DACC-Anlagen im Ausland hin, die in der Abbildung ebenfalls nicht abgebildet sind.

Die CARE-Szenarien geben Emissionen durch importierte E-Fuels im nationalen und internationalen Verkehr an, welche in der Graphik zusammen dargestellt werden. Dabei belaufen sich die Werte im Jahr 2045 im CARESupreme Szenario auf 4 Mt CO₂-Äq im nationalen und 32 Mt CO₂-Äq im internationalen Verkehr, im CARETech Szenario auf jeweils 8 Mt CO₂-Äq und 40 Mt CO₂-Äq. Der CARETech Wert im internationalen Verkehr ist höher als im Supreme Szenario, da eine höhere Transportleistung angenommen wird.

Wegen der geringen Verfügbarkeit von Informationen, ist eine Vergleichbarkeit nicht gegeben. Dies ist auch der Grund warum von einem prozentualen Vergleich wie in den vorherigen Abschnitten der Daten aus den deutschen Szenarien mit den abgeschiedenen, genutzten Kohlenstoffmengen im EU Szenario S2,5 im Jahr 2050 abgesehen wurde. Die angegebenen Gesamtmengen für das EU Szenario betragen für das Jahr 2050 205 Mt CO₂-Äq. Darin enthalten sind vor allem E-Fuels mit 147 Mt CO₂-Äq, wobei sie bezüglich der Nutzung (intra- oder extra-EU Verkehr) nicht vollständig klar sind.

8 Literaturverzeichnis

Burchardt, J.; Franke, K.; Herhold, P.; Hohaus, M.; Humpert, H.; Päiväranta, J.; Richenhagen, E.; Ritter, D.; Schönberger, S.; Schröder, J.; Strobl, S.; Tries, C.; Türpitz, A. (2021): Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Gutachten für den BDI. Boston Consulting Group (Hg.). Online verfügbar unter <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/>, zuletzt geprüft am 09.05.2022.

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.; Ziegenhagen, I.; Zimmer, W.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Görz, W. K.; Henneberg, K.; Matthes, F. C.; Scheffler, M.; Wiegmann, K.; Schneider, C.; Holtz; Georg; Saurat, M.; Tönjes, A.; Lechtenböhrer, S. (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. 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.

EC - European Commission (2024): Securing our future - Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (COM/2024/63 final). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A63%3AFIN>, zuletzt geprüft am 14.10.2024.

Gierkink, M.; Wagner, J.; Czock, B. H.; Lilienkamp, A.; Moritz, M.; Pickert, L.; Sprenger, T.; Zinke, J.; Fiedler, S. (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität - Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln. Deutsche Energie-Agentur (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/dena-ls2/>, zuletzt geprüft am 02.04.2025.

Giuntoli, M.; Guterath, G.; Garzón-Real, J.; Kerzel, M.; Becker, L. A.; Ruf, J.; Wildgrube, T.; Ulfers, J.; Koch, M.; Seebach, D.; Kulms, T.; Nobis, M.; Schultheis, P.; Hebbeln, I.; Pohl, O. (2019): Zentrale und dezentrale Merkmale zukünftiger Systemstrukturen - Studie im Rahmen des Kopernikus-Projekts ENSURE. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/BOEAD600AB4353D9E0537E695E86C9AA/live/document/20191009_Studie_Cluster_2_final_5.pdf, zuletzt geprüft am 15.07.2020.

Gores, S.; Graichen, J. (2024): Discussion of the results of the 2040 Impact Assessment. Unter Mitarbeit von Cook, V. Öko-Institut (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikation/diskussion-der-ergebnisse-der-folgenabschaetzung-fuer-2040-englische-version/>, zuletzt geprüft am 27.10.2024.

Harthan, R.; Repenning, J.; Bei der Wieden, M.; Bürger, V.; Braungardt, S.; Cook, V.; Emele, L.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Kasten, P.; Ludig, S.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Pfeiffer, M.; Scheffler, M.; Steinbach, I.; Wiegmann, K.; Bussmann, S.; Fleiter, T.; Lotz, M. T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Yu, S. (2025, in Veröffentlichung): Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech - Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: 10.60810/openumwelt-7983.

Nesselhauf, L.; Fischer, C.; Müller, S.; Godron, P.; Huneke, F.; Koch, M.; Wauer, N.; Weiß, U.; Metz, J.; Münnich, P.; Brizay, A.; Chemnitz, C.; Klümper, W.; Elmer, C.-F.; Vieweg, M.; Wietschel, J. (2024): Klimaneutrales Deutschland - Von der Zielsetzung zur Umsetzung. Agora Think Tanks (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-studie>, zuletzt geprüft am 11.11.2024.