

CLIMATE CHANGE

48/2025

Teilbericht

Technisches Hintergrundpapier zur Szenarienanalyse

Methoden und Annahmen zum Vergleich deutscher Treibhausgasneutralitätsszenarien

von:

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

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 48/2025

KLIFOPLAN des Bundesministeriums für Wirtschaft und
Klimaschutz

Forschungskennzahl 3722 41 502 0
FB001838

Teilbericht

Technisches Hintergrundpapier zur Szenarienanalyse

Methoden und Annahmen zum Vergleich deutscher
Treibhausgasneutralitätsszenarien

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 zu Klimaschutz und Energie
Karlotta Schultz, Joris Spindler, René Lanz

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7970>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, September 2025

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

Kurzbeschreibung: Technisches Hintergrundpapier zur Szenarienanalyse

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. Um einen konsistenten Szenarienvergleich zu ermöglichen, müssen Annahmen zur Bilanzierungsmethodik getroffen werden. Das vorliegende technische Hintergrundpapier dient dazu, diese gesammelt zu erläutern. Es begleitet das parallel veröffentlichte Analysepapier „Deutsche Szenarien zur Treibhausgasneutralität im Vergleich - Zielerreichung unter Berücksichtigung der technischen und natürlichen Senken sowie der Kohlenstoffnutzung“ sowie ein Excel-Tool mit den zugrundliegenden Daten. Als übergeordnete Methodik zur Analyse und Darstellung verschiedener Emissions-Kategorien wurde die „Wasserfallstruktur“ entwickelt. Diese unterscheidet Gesamtbilanzen von Szenarien in erzeugte Treibhausgase, Brutto- und Netto-Emissionen. Neben den natürlichen Senken als Netto-Treibhausgas-Einbindungen im LULUCF Sektor, werden verschiedene technische Senken betrachtet. Bei Kohlenstoffabscheidung zur Nutzung wird bezüglich der Bindungsdauer in Endprodukten zwischen kurz- und mittelfristigem Carbon Capture and Use (CCU) unterschieden. Kurzfristiges CCU geht lediglich als Verschiebung zwischen Sektoren in die Bilanz ein, wohingegen mittelfristiges CCU als technische Senke zu betrachten ist. In diesem Dokument wird insbesondere auch auf die bilanziellen Herausforderungen eingegangen. Diese betreffen unter anderem die Vermeidung von Doppelzählungen beim Einsatz von CCS-Technologien bei thermischer Verwertung am Ende des Lebenszyklus von synthetischen Produkten. Auch erfordert z. B. die Anwendung des Territorialansatzes eine konsistente Berücksichtigung von Emissionen und Entnahmen, die innerhalb der Landesgrenzen freigesetzt oder abgeschieden werden. Für jedes analysierte Szenario werden Auffälligkeiten, Annahmen und Abweichungen in der Bilanzierungsmethodik einzeln beschrieben.

Abstract: Technical Background Paper on Scenario Analysis

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 Germany in 2045 are compared in relation to the effect of natural and technical sinks. In order to enable a consistent comparison of scenarios, assumptions must be made regarding the accounting methodology. This technical background paper gathers these assumptions and explains them. It accompanies the analysis paper entitled ‘German greenhouse gas neutrality scenarios in comparison – Target achievement with a special focus on natural and technical sinks as well as carbon utilisation,’ published in parallel, and an Excel tool which contains the underlying data. The ‘waterfall structure’ was developed as an overarching methodology for analysing and presenting various emission categories. This differentiates overall balances of scenarios into greenhouse gases generated, gross and net emissions. In addition to natural sinks as net greenhouse gas captures in the LULUCF sector, various technical sinks are considered. In the case of carbon capture and use (CCU), a distinction is made between short- and medium-term CCU with regard to the duration of binding in end products. Short-term CCU is only included in the balance as a shift between sectors while medium-term CCU is considered a technical sink. This document also addresses the accounting challenges in particular. These include, for example, avoiding double counting when using CCS technologies for thermal recycling at the end of the life cycle of synthetic products. Applying the territorial approach, for example, also requires consistent consideration of emissions and removals that are released or captured within national borders. For each scenario analysed, anomalies, assumptions and deviations in the accounting methodology are described individually.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Zusammenfassung.....	10
Summary	13
1 Einleitung.....	16
2 Übersicht über verglichene Szenarien	17
2.1 Deutsche Treibhausgasneutralitäts-Szenarien 2045	17
2.2 Szenarien aus dem Impact Assessment 2040	17
3 Übergreifende Annahmen und Methoden für die Bilanzierung	19
3.1 Fossiles CCS (FoCCS).....	19
3.2 Negativemissionen.....	20
3.2.1 Unterscheidung technischer und natürlicher Senken	20
3.2.2 Netto-LULUCF	20
3.2.3 B(E)CCS.....	21
3.2.4 DACCS.....	22
3.2.5 Andere Technologien zur Kohlenstoffspeicherung (Sonstiges CDR)	22
3.3 Carbon Capture and Usage	23
3.3.1 Kurzfristiges CCU.....	23
3.3.2 Mittelfristiges CCU	24
3.4 Wasserfallstruktur.....	25
3.5 Importe	26
3.6 Sektorale Zuordnungen.....	26
4 Auffälligkeiten & Abweichungen in der Bilanzierungsmethodik der einzelnen Szenarien	28
4.1 Agora KN2045 (2021).....	28
4.1.1 Sektorale Zuordnungen	28
4.1.2 Kohlenstoffmanagement	28
4.1.3 Andere Auffälligkeiten	29
4.2 DENA KN100.....	30
4.2.1 Sektorale Zuordnungen	30
4.2.2 Kohlenstoffmanagement	30
4.2.3 Andere Auffälligkeiten	32
4.3 BDI-Klimapfade 2.0	32
4.3.1 Sektorale Zuordnungen	32

4.3.2	Kohlenstoffmanagement	32
4.3.3	Andere Auffälligkeiten	33
4.4	Agora KN-DE (2024)	33
4.4.1	Sektorale Zuordnungen	34
4.4.2	Kohlenstoffmanagement	34
4.4.3	Andere Auffälligkeiten	35
4.5	CARE Supreme & CARETech: Preview.....	35
4.5.1	Sektorale Zuordnungen	35
4.5.2	Kohlenstoffmanagement	36
4.6	EU 2040 Impact Assessment S2,5	36
4.6.1	Sektorale Zuordnungen	37
4.6.2	Kohlenstoffmanagement	38
4.6.3	Andere Auffälligkeiten	39
5	Quellenverzeichnis	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	THG-Erzeugung und Einbindung im Jahr 2045	11
Figure 2:	GHG generation and removals in 2045	14

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
GHG	Treibhausgas (Greenhouse gas)
IA	Folgenabschätzung (Impact Assessment)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JRC	Joint Research Center
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (Land Use, Land-Use Change and Forestry)
MVA	Müllverbrennungsanlage
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
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. Dafür bietet das hier vorliegende Technische Hintergrundpapier die detaillierten Informationen für die zu Grunde liegende Methodik und die Annahmen zur Vereinheitlichung der Szenarienergebnisse. In einem parallel veröffentlichten Analysepapier „Deutsche Szenarien zur Treibhausgasneutralität im Vergleich – Zielerreichung unter Berücksichtigung der technischen und natürlichen Senken sowie der Kohlenstoffnutzung“ wird diese Methodik angewendet und die Szenarienergebnisse miteinander verglichen. 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 Bilanzierungsannahmen 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 (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)

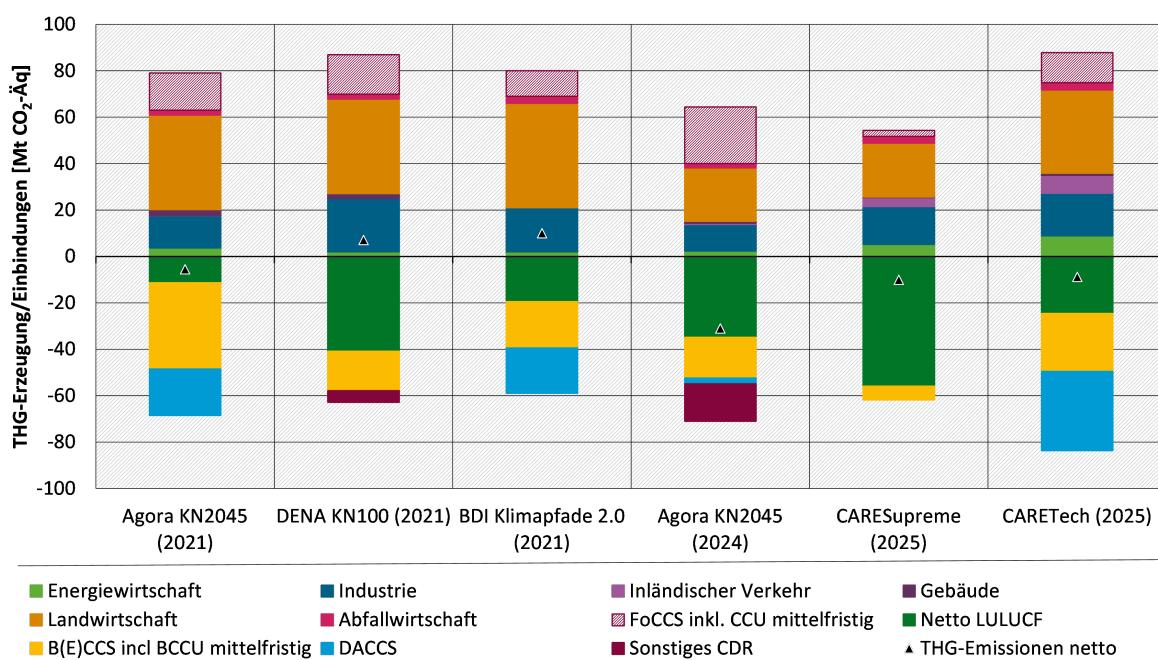
Zudem wurden die Szenarien der Folgenabschätzung für das 2040-Klimaziel der EU (EC 2024a) ausgewertet, um eine Einordnung der deutschen Ergebnisse in den europäischen Kontext zu ermöglichen.

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 Spannbreite bei den technischen Abscheidungen ein uneinheitliches Bild aufweist.

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 1 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 (CO₂-Abscheidung und -Nutzung (Carbon Capture and Usage)) für kurzfristige Produkte, vor allem E-Fuels, wird hier nicht einbezogen. Fossiler Anteil von WACCS ist in „Fossiles CCS (CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, FoCCS)) inkl. CCU mittelfristig“ enthalten. Es gilt das Territorialprinzip: Importe von Produkten auf Basis von Negativemissionen werden hier nicht als Entnahmen berücksichtigt, ihre Emissionen ausgewiesen, soweit möglich. Mittelfristiges, fossiles CCU wird als THG-Erzeugung oberhalb der Nulllinie dargestellt, im Gegensatz dazu BCCU (Biogenic Carbon Capture and Storage) als Einbindung unterhalb der Nulllinie als Teil von B(E)CCS (Biogenic Carbon Capture and Storage; Biogenes 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 aufgetreten 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 (Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (Land Use, Land-Use Change and Forestry)) mit Emissionen und Einbindungen;
- ▶ Separate Ausweisung von Biokohle, beschleunigter Verwitterung und stofflicher C-Nutzung, sowie anderer Carbon Dioxid 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 and the consideration of natural sinks play a crucial role. These are intended to offset the remaining emissions, the so-called residual emissions.

In the UBA project 'Greenhouse gas neutrality in the EU and Germany: The conception of a target architecture taking into account sinks' (FKZ 3722 41 502 0), greenhouse gas neutrality scenarios for Germany are systematically compared with one another. This technical background paper provides detailed information on the underlying methodology and the assumptions for standardizing the scenario results. This methodology is applied and the scenario results are compared in an analysis paper, published in parallel and entitled 'German greenhouse gas neutrality scenarios in comparison – Target achievement with a special focus on natural and technical sinks as well as carbon utilisation'. 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 abate the emissions of the greenhouse gases generated, and the consideration of technology-based and natural removals 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 thus 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 2024a) were evaluated to contextualise the 'findings for Germany within the European context.'

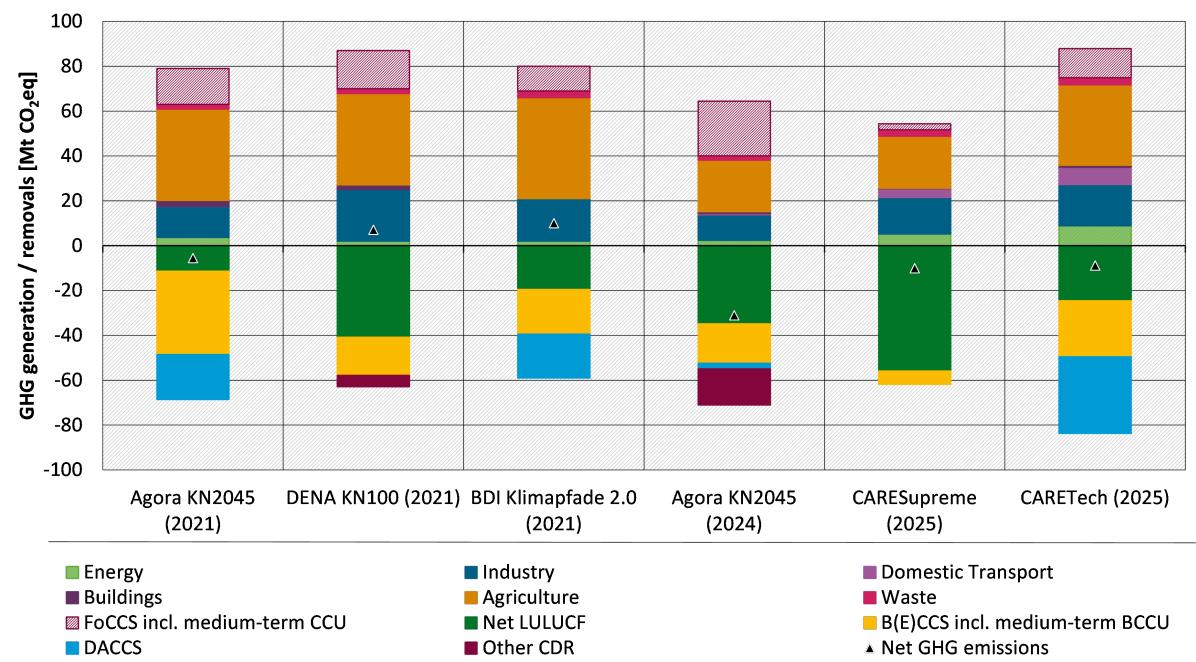
A comparison of the scenarios shows that with the uniform approach, not all scenarios ultimately achieve net greenhouse gas neutrality in 2045. The range of residual emissions is between 40 and 74 MtCO₂ eq in the target year, with the natural sinks showing net captures of 11 to 56 Mt CO₂ eq and the technical 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, which gathering together the results of the scenario comparison.

Figure 2: GHG generation and removals in 2045



Notes: The transport sector is taken into account 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) energy.’ The territorial principle applies: imports of products based on negative emissions are not considered as removals, while their emissions are included if information is available. Medium-term fossil CCU as GHG generation is shown as an emission, while BCCU is shown as a removal 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 a view to the development of future greenhouse gas neutrality scenarios. In order to ensure the comparability of scenarios on the basis of 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 in addition to gross and net emissions need to be explicitly identified;
- ▶ Clear information is needed 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 also 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 do the scenarios become 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. 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 die Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen, auf EU-Ebene besteht das Ziel der Klimaneutralität bis 2050¹. 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 restlichen Emissionen im Jahr der Treibhausgasneutralität, die sogenannten Residualemissionen, ausgeglichen werden.

Im UBA-Vorhaben „Treibhausgasneutralität in der EU und in Deutschland: Die Konzeption einer Zielarchitektur unter Berücksichtigung von Senken“ (FKZ 3722 41 502 0) wurden verschiedene Treibhausgasneutralitätsszenarien in Bezug auf die Senkenwirkungen verglichen. Ein besonderer Fokus liegt auf der Quantifizierung der Gesamtheit der erzeugten Treibhausgase, der Anwendung von Nullemissionstechnologien sowie der Berücksichtigung der technischen und natürlichen Einbindungen und der gesamten technischen CO₂-Speichermengen, die in den Szenarien gefordert werden.

Das vorliegende **technische Hintergrundpapier** dient dazu, grundlegende Annahmen bezüglich der gewählten Bilanzierungsmethodik gesammelt zu erläutern. Es enthält somit die folgenden technischen Details, die von zentraler Bedeutung für die Szenarien-Analyse sind:

- ▶ Annahmen und Methoden zur bilanztechnischen Behandlung von Kohlenstoffmanagement (Abschnitt 3), insbesondere zur
 - Zuordnung zu Null- und Negativemissionstechnologien (Abschnitte 3.1 und 3.2);
 - Behandlung von Carbon Capture and Use (3.3)
 - Einordnung in die Wasserfallstruktur als allgemeine Bilanzierungsmethodik (3.4)
 - Berücksichtigung von Importen (3.5);
 - Sektoralen Zuordnung von Emissionen und Entnahmen (3.6).
- ▶ Szenarien-spezifische Auffälligkeiten und Abweichung in der Bilanzierungsmethodik (Abschnitt 4)

Es ist somit als Begleitung zu dem Analysepapier „Deutsche Szenarien zur Treibhausgasneutralität im Vergleich - Zielerreichung unter Berücksichtigung der technischen und natürlichen Senken sowie der Kohlenstoffnutzung“ zu verstehen, in dem die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien verglichen, analysiert und beurteilt werden. Des Weiteren werden in einem ebenfalls veröffentlichten Excel-Tool die zugrundeliegenden Daten ausgewiesen, wobei die verschiedenen Szenarien ausgewählt und visualisiert werden können.

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

¹ Das Ziel der Klimaneutralität wird in den EU-Szenarien praktisch stets als Treibhausgasneutralitätsziel umgesetzt. Im Folgenden wird einheitlich deshalb auch nur noch von Treibhausgasneutralität gesprochen.

2 Übersicht über verglichene Szenarien

Es wurden verschiedene deutsche Klimaneutralitäts-Szenarien nach zuvor festgelegten Kriterien ausgewählt und miteinander verglichen. Zusätzlich wurden die Szenarien des EU-Impact Assessments 2040 analysiert, die die europäische Ebene betrachten (EC 2024b). Sie wurden als methodische Vorlage verwendet und bieten eine quantitative Einordnung der verschiedenen Elemente der nationalen Szenarien.

Die Kriterien zur Auswahl der deutschen Szenarien sind das Ausweisen der Klimaneutralität 2045 und eine ausreichend quantitativ und qualitativ detaillierte und konsistente Darstellung der Szenarienergebnisse. Entscheidend dafür sind Informationen zu sektoralen THG-Emissionen und dem Kohlenstoffmanagement, durch veröffentlichte Datenanhänge oder Studien, die die graphischen Ergebnisse der Szenarien im Detail beschreiben. Dabei wurden im ersten Schritt Szenarien analysiert, die bis zum Jahr 2023 veröffentlicht worden sind. Diese stellen Aktualisierungen von Vorgänger-Szenarien dar, die aktualisiert worden sind, um auf die Gesetzesänderung zum Vorziehen des Zieljahres der Klimaneutralität von 2050 auf 2045 zu reagieren. Anschließend wurden Szenarien der „zweiten Generation“ der Treibhausgasneutralitätsszenarien analysiert, die ab dem Jahr 2024 veröffentlicht wurden und bereits hinsichtlich der verwendeten Senken expliziter sind.

Im Folgenden werden die ausgewählten Szenarien kurz eingeführt und erläutert.

2.1 Deutsche Treibhausgasneutralitäts-Szenarien 2045

Für die Analyse wurden folgende Szenarien ausgewählt, die Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 in Deutschland modellieren:

- ▶ 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)
- ▶ CARE Supreme, CARE Tech (Harthan et al. 2025, in Veröffentlichung)

Sobald verfügbar, wird die Analyse um die folgenden Szenarien erweitert:

- ▶ Klimaschutzszenarien (Öko-Institut et al.)

2.2 Szenarien aus dem Impact Assessment 2040

Die EU-Kommission hat im Frühjahr 2024 eine Empfehlung für einen Vorschlag zum Treibhausgas-Reduktionsziel im Jahr 2040 veröffentlicht, zusammen mit einer umfangreichen Folgenabschätzung (EC 2024b). In der Folgenabschätzung werden drei Hauptszenarien (S1-S3), sowie ein Alternativszenario (LIFE) vorgestellt. Alle Szenarien starten am gleichen Punkt im Jahr 2030, erreichen im Jahr 2050 die Treibhausgasneutralität und betrachten jeweils die gesamte EU. Sie beinhalten deutliche, aber unterschiedliche Mengen an Kohlenstoffabscheidung und unterscheiden sich insgesamt in der Umsetzungsgeschwindigkeit von Emissionsreduktionsmaßnahmen. Das LIFE-Szenario enthält zusätzlich Annahmen bezüglich Änderungen hin zu nachhaltigeren Lebensstilen und damit veränderte Aktivitätsraten und Möglichkeiten der Suffizienz. Somit ergeben sich insgesamt vier verschiedene Emissionsprojektionen, die sich in der Gesamtreduktion an Netto-THG-Emissionen im Jahr 2040

(S1 – 78 %; S2 – 88 %; S3 – 93 %) und sektorale stark unterscheiden. Das Life-Szenario ist ein alternativer Pfad zur Erreichung des Ziels der Treibhausgasneutralität im Jahr 2050. Der wesentliche Unterschied sind deutlich niedrigere Emissionen aus der Landwirtschaft und höhere Einbindungen aus Wäldern durch erhöhte Flächenverfügbarkeit für Aufforstung durch Umstellung der landwirtschaftlichen Produktion. Dafür sind die Restemissionen aus fossilen Quellen und Industrieprozessen entsprechend höher.

Die 2040 Folgeabschätzung ist aufgrund der politischen Bedeutung der EU-Ziele für die deutschen Klimaziele von großer Relevanz. Es kann so geprüft werden, ob die Annahmen und Ergebnisse der nationalen Szenarien kompatibel mit den europäischen Szenarien sind. Mit einem Anteil von aktuell knapp einem Viertel der EU-weiten THG-Emissionen ist eine gewisse Konsistenz zwischen deutschen und europäischen Szenarien unabdingbar.

Die EU-Szenarien bieten darüber hinaus eine methodische Grundlage zur Analyse bestehender sowie zur Ausarbeitung zukünftiger Projektionen. Grund dafür sind zum einen das hohe Maß an Detailinformationen zu den Annahmen und zur Methodik für die Modellierungen, die zu aufgeschlüsselten Ergebnissen in Wirtschaftssektoren sowie technischer und natürlicher Senken führen. Somit sind die Ergebnisse weitgehend nachvollziehbar und können als Basis einer Struktur für die Analyse anderer Szenarien dienen. Die Annahmen, Definitionen und Bilanzierungen entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft rund um das Kohlenstoffmanagement, das sich besonders in der letzten Dekade stark weiterentwickelt hat. Sie können auch daher als Vorlage für andere Emissionsprojektionen dienen, voraussichtlich auch für die neuen deutschen Szenarien der „2. Generation“. Die Struktur wurde um einige methodische Überlegungen und Untergliederungen weiterentwickelt und ergänzt, die sich aus der Analyse dieser Szenarien ergaben und in Kapitel 3 konkret erklärt werden. Zum anderen betrachten die Szenarien in der 2040 Folgenabschätzung ein hohes Maß an Kohlenstoffabscheidung. Diese Annahmen, die auf europäischer Ebene im Raum stehen, werden für die Entwicklung einer deutschen Zielsetzung zu berücksichtigen sein. Deutlich abweichende Pfade zur nationalen Zielerreichung würden auch auf EU-Ebene zu einem anderen Gesamtpfad führen. Deshalb werden die Szenarien des Impact Assessments in diesem Vorhaben als Vergleichsmaßstab für die Konsistenz der Annahmen und der Größenordnungen verwendet. Deutliche Diskrepanzen sind dabei kein Indikator für oder gegen ein bestimmtes Szenario, sondern ein Hinweis darauf, dass es zu bestimmten Technologien und Annahmen unterschiedliche Einschätzungen der zukünftigen Entwicklung gibt.

Für eine größere Aussagekraft wurde für den Vergleich mit den deutschen Szenarien das Szenario S2,5 verwendet, dessen Werte sich aus den Mittelwerten der Szenarien S2 und S3 ergibt und etwa dem von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen Reduktionspfad von 90 % im Jahr 2040 entspricht (Gores und Graichen 2024). Die Ergebnisse dieses Szenarios werden für das Jahr 2050 dargestellt, dem Zieljahr der Treibhausgasneutralität der EU. Damit können die Situationen in den jeweiligen Zieljahren verglichen werden, die Entwicklungspfade werden dabei ausgeklammert ebenso wie eine gewisse Unschärfe durch die verschiedenen betrachteten Jahre.

3 Übergreifende Annahmen und Methoden für die Bilanzierung

Um eine einheitliche Analyse und einen aussagekräftigen Vergleich verschiedener Szenarien zu ermöglichen, müssen im ersten Schritt übergreifende Annahmen zu der Bilanzierungsmethodik getroffen werden. Diesen Annahmen und Methoden entsprechend wurden die Angaben der analysierten Szenarien ausgewertet und, falls notwendig, angepasst. Allgemein wurden Bezeichnungen für Kategorien, die der für die Analyse gewählten Bilanzierungsstruktur entsprechen in *kursiv* dargestellt. Bezeichnungen für Kategorien, die aus den verglichenen Szenarien übernommen wurden, aber nicht oder nur teilweise denen der Analyse entsprechen, wurden nur textlich benannt.

3.1 Fossiles CCS (FoCCS)

Unter die Kategorie „*Fossiles CCS*“ (*Carbon Capture and Storage, FoCCS*) fallen alle Aktivitäten, bei denen CO₂-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, aus Industrieprozessen sowie aus der Verbrennung der fossilen Anteile an MVAs (Müllverbrennungsanlagen) abgeschieden und langfristig gespeichert werden. Es sind also fossile Emissionen, die zwar erzeugt, aber durch die Abscheidung und langfristige Speicherung größtenteils nicht unmittelbar in die Atmosphäre gelangen. FoCCS ist eine Möglichkeit zur Reduktion der Emissionen, die oftmals auch als Nullemissionstechnologie bezeichnet wird, wenn auch ein Teil der CO₂-Emissionen weiterhin in die Atmosphäre gelangt. Diese so abgeschiedenen und langfristig gespeicherten Emissionen werden nicht als Teil der Brutto- oder Netto-Emissionen behandelt. Dennoch ist es sinnvoll deren Anteil explizit auszuweisen, da Abscheidungs-Technologien immer Leckagen von bis zu 15 % mit sich bringen und auch die Speicherung mit dem Risiko der Wiederfreilassung verbunden ist (Purr und Spindler 2023). Außerdem muss auch für FoCCS die entsprechende Infrastruktur von Abscheidung über Transport bis hin zur Speicherung vorgesehen und ein entsprechender Energieaufwand betrieben werden. Aus diesem Grund ist die CCS-Technologie systematisch anders gelagert als ein Technologiewechsel zur Emissionsvermeidung: sie erfordert kontinuierliche, zukünftige Aufwendungen. Eine explizite und transparente Ausweisung der Technologie ist damit absolut erforderlich.

Diese Art der weitgehenden Vermeidung der Freisetzung entstandener Emissionen fällt ausschließlich in den Sektoren Industrie und Energiewirtschaft an und werden daher jeweils in einem der beiden Sektoren bilanziert. In der Industrie werden unvermeidbare Prozessemissionen abgeschieden, vorrangig geht es dabei um die Zement- sowie die Chemieindustrie. In der Energiewirtschaft ist der Einsatz von fossilem CCS vor allem bei der thermischen Verwertung von Abfällen und Restchemikalien vorgesehen. Hinzu kommt Kohlenstoffabscheidung beim Einsatz fossiler Brennstoffe zur Energieerzeugung an fossilen Kraftwerken, auch wenn dies hauptsächlich auf europäischer Ebene relevant sein wird. In Deutschland werden diese Emissionen voraussichtlich auf ein absolutes Minimum reduziert sein.

Der Einsatz von fossilem CCS an Müllverbrennungsanlagen bringt bilanzierungstechnische Besonderheiten mit sich, denen besondere Aufmerksamkeit gilt. Die Abfälle enthalten im Allgemeinen sowohl fossile als auch biogene Anteile, die getrennt bilanziert werden müssen. Die Abscheidung und Speicherung der fossilen Anteile wird als fossiles *WACCS* („*waste incineration with carbon capture and storage*“) bezeichnet, fällt unter die Kategorie FoCCS und wird in der Energiewirtschaft bilanziert. Der biogene Anteil muss allerdings getrennt betrachtet werden, da dieser Negativemissionen entspricht. In normalen Müllverbrennungsanlagen kann der biogene Anteil auf 50 % gerundet werden, wobei der Anteil mit zunehmender Kreislaufwirtschaft und

grünen Polymeren steigt (Dietz et al. 2024). In der hier erfolgten Analyse wird der biogene Anteil des in MVAs abgeschiedenen und anschließend gespeicherten CO₂ als Biogen Waste Carbon Capture and Storage (BWACCS) innerhalb der Kategorie Biogenic Carbon Capture and Storage (B(E)CCS) kategorisiert.

Unter Umständen kann abgeschiedener Kohlenstoff, der aus fossilen Quellen stammt, in synthetischen Produkten, beispielsweise in der chemischen Industrie, verarbeitet und somit mittelfristig gespeichert werden. Die Bilanzierungsmethodik dieser Abscheidungen entspricht der Kategorie mittelfristiges Carbon Capture and Use (CCU) und wird im Abschnitt 3.3.2 im Detail erklärt. Sie wurden sektorale dem Industriesektor zugeordnet, falls nicht anders erwähnt. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass es sich bei mittelfristigem CCU aus fossilen Quellen nicht um Negativemissionen handelt, sondern analog zu fossilem CCS um weitgehende zeitliche Verzögerung oder Vermeidung der Freisetzung erzeugter Emissionen. Dafür ist die Annahme der konsequenten Kreislaufnutzung der synthetischen Produkte und der Einsatz von CCS-Technologien bei thermischer Verwertung am Ende des Lebenszyklus anzunehmen, um Doppelzählungen zu vermeiden. Auch wenn es sich bei dieser Kategorie nicht um FoCCS mit Speicherung in geologischen Formationen handelt, wurde die Unterkategorie *Fossiles CCU (mittelfristig)* zur Vereinfachung der Oberkategorie Fossil CCS zugeordnet, da es sich bei fossilem CCU derzeit nur um Ausnahmefälle in wenigen Szenarien handelt.

3.2 Negativemissionen

3.2.1 Unterscheidung technischer und natürlicher Senken

Technische Senken, in den EU IA-2040 Szenarien als „industrial removals“ bezeichnet, beziehen sich im Allgemeinen auf Prozesse, Aktivitäten oder Mechanismen, durch die CO₂ aus der Atmosphäre entnommen und eingespeichert wird, die zumindest teilweise auf dem Einsatz von Technologien basieren (Jörß et al. 2024). Sie unterscheiden sich von natürlichen Senken, bei denen CO₂ nur mittels biologischer Prozesse der Atmosphäre entnommen und gespeichert wird. Beide fallen unter die Kategorie der CO₂-Entnahmen („removals“), die als Negativemissionen in Bilanzen gleichgestellt sind. Damit sind technische und natürliche Senken der zentrale Ansatz in allen betrachteten Szenarien, um Restemissionen zu kompensieren und Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen.

Technische Senken umfassen in den betrachteten Szenarien vor allem die Technologien B(E)CCS („Biogenic CCS“) und DACCS („Direct Air CCS“). Die natürlichen Senken entsprechen den gesammelten Netto-Einbindungen des LULUCF-Sektors (siehe Abschnitt 3.2.2.)

Besonders zu berücksichtigen ist stets die unterschiedliche geplante Verweildauer des CO₂ in den jeweiligen Speichermedien. Natürliche und technische Senken sind aber auch immer mit einem „Risk of Reversal“ verbunden, was bedeutet, dass das eingespeicherte CO₂ unter bestimmten Umständen wieder in die Atmosphäre entweichen kann. Die Unterscheidung und die damit verbundenen Risiken, müssen im Kontext der Gesamtbewertung der Senkenoptionen berücksichtigt werden, insbesondere im Hinblick auf die Rolle dieser Optionen zur Kompensation von Restemissionen und zur Erreichung von Netto-Treibhausgasneutralität (Jörß et al. 2024).

3.2.2 Netto-LULUCF

Der Begriff „Netto-LULUCF“ umfasst die THG-Emissionen und -Einbindungen aus dem Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF). Innerhalb des Sektors bestehen natürliche Senken, indem Wälder und Böden

sowie Holzprodukte Kohlenstoff speichern. In der Klimabilanz werden sowohl diese Senken durch Aufforstung oder nachhaltige Landnutzung als auch die durch Entwaldung oder landwirtschaftliche Praktiken freigesetzten Emissionen berücksichtigt. Ergibt die Netto-Bilanz Emissionen, so zählt der LULUCF-Sektor als Emissions-Quelle, ist die Bilanz negativ, so ist der Sektor insgesamt eine natürliche CO₂-Senke. Für einzelne Quellen im LULUCF-Sektor kann die Bilanz auch anders ausfallen. So sind trockengelegte Moore z. B. eine Nettoquelle, auch wenn der Sektor insgesamt eine Senke ist.

3.2.3 B(E)CCS

Die Kategorie *B(E)CCS (Biogenic (Energy) Carbon Capture and Storage)* wird als Überkategorie betrachtet und beinhaltet alle biogenen Kohlenstoffabscheidungen in industriellen Anwendungen mit anschließender langfristiger Speicherung in geologischen Formationen, die mit energetischer Nutzung verknüpft sein können oder, bei industriellen Prozessen, auch ohne diese zur Anwendung kommen können.

Die Einordnung von *B(E)CCS* als Negativemissionstechnologie beruht auf Annahmen zum verwendeten, biogenen Einsatzstoff, der sich durch eine nachhaltige Anbauweise auszeichnen muss (Jörß 2024).

BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) stellt dabei eine Unterkategorie dar, bei der der Kohlenstoff aus biogenen Anlagen zur elektrischen oder thermischen Energieerzeugung stammt. BECCS bezeichnet damit die Abscheidung und Speicherung von biogenem CO₂, z. B. aus Feuerungsanlagen für Holz, Anbaubiomasse oder biogenen Abfällen. Die gewonnene Energie kann sowohl für Fernwärme als auch für Prozesswärme in der Industrie oder zur Stromerzeugung verwendet werden. Entsprechend der Nutzung der erzeugten Energie werden die Negativemissionen, die durch die BECCS-Technologie erzielt werden, den Sektoren Energiewirtschaft (für Fernwärme und Stromerzeugung) und Industrie (für Prozesswärme) zugeordnet. Während diese Zuordnung in allen analysierten deutschen Szenarien ebenfalls angewandt wurde, werden in den Szenarien des EU IA 2040 alle BECCS-Negativemissionen der Energiewirtschaft zugeordnet. Über Annahmen wurden diese EU-Szenarienergebnisse angepasst, um die BECCS-Entnahmen dem Sektor zuzuordnen, in dem sie erfolgen.

Eine weitere Unterkategorie ist die Abscheidung biogener Emissionen, die in industriellen Prozessen entstehen, die nicht mit energetischer Nutzung verknüpft sind. Diese werden als *BCCS nicht-energetisch* bezeichnet. Konkret handelt es sich dabei um Emissionen, die bei dem Aufwertungsprozess von Biogas zu Biomethan entstehen und abgeschieden und gespeichert werden. Sie fallen als technische Entnahmen von biogenem Kohlenstoff unter die Kategorie *B(E)CCS*, aber nicht unter die Unterkategorie *BECCS*, da keine energetische Nutzung vorliegt. Ein weiteres Beispiel hierfür sind Anwendungen, bei denen Biomasse direkt in chemische Grundstoffe umgewandelt wird. Dies ist beispielsweise bei der Produktion von Methanol durch Pyrolyse und Gasifizierung von Biomasse der Fall. Diese Entnahmen werden dem Industriesektor zugeordnet.

Negative Emissionen, die durch Abscheidung und Speicherung von biogenen Brennstoffanteilen an Müllverbrennungsanlagen (MVAs) entstehen, fallen ebenfalls unter die Überkategorie *B(E)CCS* und werden der Unterkategorie *BWACCS (Biogenic Waste Carbon Capture and Storage)* zugeordnet. Damit können sie von *BECCS* oder *nicht-energetischem B(E)CCS* unterschieden werden. Da der Großteil der MVAs in der EU und alle in Deutschland die durch die Verbrennung freigesetzte Energie nutzen, werden Negativemissionen der biogenen Anteile an MVAs der Energiewirtschaft zugeordnet. Es muss darauf geachtet werden, diese Negativemissionen von denen zu unterscheiden, die durch Abscheidung und Speicherung von fossilen

Brennstoffanteilen entstehen. Da oftmals diese Trennung nicht explizit erfolgt, wurde im Einzelfall untersucht, welche Negativemissionen bzw. Vermeidung der Freisetzung erzeugter Emissionen wo betrachtet wurde. Daraufhin getroffene szenarienspezifische Annahmen werden im jeweiligen Abschnitt in Kapitel 4 beschrieben.

Die Oberkategorie *B(E)CCS* enthält somit die Unterkategorien *BECCS (Energie)*, *BECCS (Industrie)*, *BCCS nicht-energetisch (Industrie)* und *BWACCS (Energie)*. Hinzu kommt die Unterkategorie *BCCU (mittelfristig)*, auf die in Abschnitt 3.3.2 eingegangen wird.

3.2.4 DACCS

Die *DACCS* Technologie, bei der CO₂ direkt aus der Luft abgeschieden, gefiltert und anschließend langfristig gespeichert wird, ist die zweite große Kategorie technischer Entnahmen. *DACCS*-Entnahmen können i. d. R. nicht direkt einem Sektor zugeordnet werden, da sie allgemein verfügbares CO₂ aus der Atmosphäre entnehmen. In manchen Szenarien inklusive der Szenarien des EU IA-2040 wird *DACCS* der Energiewirtschaft zugeordnet, um die sektoralen Netto-Emissionen auszuweisen. Dies liegt vor allem an dem hohen Energieverbrauch der Technologie.

Für die hier durchgeführte Analyse wurden *DACCS*-Entnahmen getrennt betrachtet und keinem Sektor zugeordnet. *DACCS* dient im Gegensatz zu *BECCS* alleine dem Zweck, Negativemissionen zu generieren und wird nicht wie *BECCS* zusätzlich zur Energiegewinnung eingesetzt. Oft wird *DACCS* daher als Möglichkeit für einen aus Szenarienperspektive flexiblen Ausgleich verbleibender Restemissionen gesehen, abhängig von den erwarteten Einbindungen im LULUCF Sektor.

3.2.5 Andere Technologien zur Kohlenstoffspeicherung (Sonstiges CDR)

Eine weitere Kategorie, bei der Kohlenstoff gespeichert wird, ist die direkte stoffliche Kohlenstoff (C)-Nutzung: In dieser Kategorie wird kein abgeschiedener Kohlenstoff genutzt. Biomasse wird direkt zum Zwischenschritt Methanol verarbeitet. Anschließend kann der Kohlenstoff in synthetischen Produkten mittelfristig gespeichert werden. Diese Nutzung wird zur besseren Unterscheidung nicht in der Kategorie Netto-LULUCF betrachtet, sondern fällt unter die Kategorie *Sonstiges CDR* als *Biomasse in Produkten*. Das wichtigste Beispiel ist dabei die Herstellung von Bio-Methanol durch Pyrolyse und anschließende Gasifizierung und Methanolsynthese. Das Methanol kann anschließend vielseitig genutzt werden, etwa zur Herstellung chemischer Grundstoffe, wodurch fossiles Erdöl als Kohlenstoffquelle ersetzt wird. Diese Art der stofflichen Nutzung von Biomasse speichert somit Kohlenstoff entsprechend der Nutzung der entstehenden chemischen Grundstoffe. Diese Mengen können gemäß der Bilanzierungsmethodik für mittelfristiges CCU als Entnahmen bilanziert und dem Industriesektor zugeordnet werden² (siehe Abschnitt 3.3.2). Dabei ist auch hier auf eine konsequente Kreislaufführung der synthetischen Produkte sowie den Einsatz von CCS-Technologien bei der thermischen Verwertung am Ende ihres Lebenszyklus zu achten, unter Vermeidung von Doppelzählungen.

Bei der stofflichen C-Nutzung von Biomasse muss darauf hingewiesen werden, dass während des Umwandlungsprozesses CO₂-Emissionen entstehen. Werden diese abgeschieden und gespeichert, fallen sie unter die Kategorie *nicht-energetisches BCCS* und werden in dem Industriesektor bilanziert.

Die stoffliche Nutzung von Biomasse als Entnahme ähnelt konzeptionell der Kategorie Holzprodukte im LULUCF-Sektor. Dazu könnte ebenfalls die *Biokohle-Technologie* gezählt

² Würde der Kohlenstoff hingegen z. B. zur Erzeugung von E-Fuels genutzt werden, müssten die Mengen als kurzfristiges CCU bilanziert werden (s. Abschnitt 3.3.1).

werden, als neuartiges, dauerhaftes, biobasiertes Produkt. Beide Kategorien wurden für die Analyse getrennt als technische Entnahmen ausgewiesen, auch wenn sie möglicherweise perspektivisch unter LULUCF bilanziert werden könnten (Wolff et al. 2022; Jörß 2025).

Weitere Technologien, wie *Beschleunigte Verwitterung (Enhanced Weathering)*, *Ozean Düngung (Ocean Fertilization)* oder die bereits erwähnte *Pflanzenkohle*, werden als technische Entnahmen gesehen und würden ebenfalls unter die Kategorie *Sonstiges CDR* fallen. Sie wurden im Rahmen dieses Projekts nicht betrachtet, weil bislang in keinem betrachteten Szenario detaillierte Angaben zu diesen Technologien gemacht wurden.

3.3 Carbon Capture and Usage

Bei Kohlenstoffentnahmen, deren Ziel nicht die langfristige geologische Speicherung, sondern die Nutzung des gewonnenen Kohlenstoffs ist, wird von *Carbon Capture and Usage (CCU)* gesprochen. Je nach Herkunft des Kohlenstoffs wird von *BCCU* oder *fossilem CCU* gesprochen. Die Bilanzierung von *BCCU* oder *fossilem CCU* hängt von der nachgelagerten Nutzung des CO₂ ab. Wann Kohlenstoffabscheidungen für Nutzung als Entnahmen bilanziert werden bzw. wie mit zeitlich begrenzter Speicherung umgegangen wird, wird im Folgenden behandelt.

Allgemein muss für eine konsistente Bilanzierung vor allem auf die Dauer der Bindung des Kohlenstoffs nach der Abscheidung geachtet werden. Die Verwendung abgeschiedenen Kohlenstoffs für industrielle Prozesse, für die Weiterverarbeitung zu synthetischen Treibstoffen oder zur Speicherung in synthetischen Produkten bedeutet stets eine deutlich kürzere Bindungsdauer als die langfristige, geologische Speicherung von mehreren Jahrhunderten. Beide Arten des Kohlenstoffmanagements können daher nicht als gleichwertig angesehen werden und müssen entsprechend in der Bilanzierung getrennt betrachtet werden. Bei nicht-fossilem CCU kommt es deshalb auf die Produkte und deren Bindungsdauer an, ob sie als Senke und der abgeschiedene Kohlenstoff entsprechend als Negativemission gezählt werden. Außerdem ist zu betrachten, ob der Pool an nicht-fossilem Kohlenstoff wächst oder nur konstant bleibt und nicht-fossiler Kohlenstoff lediglich umgelagert wird, ohne dass der Gesamtvorrat an gespeichertem Kohlenstoff zunimmt (Purr und Garvens 2021). Im Folgenden wird nur zwischen kurzfristigem und mittelfristigem CCU unterschieden, bei nicht-fossilem Kohlenstoff wird hier von einer Zunahme des Gesamtvorrats ausgegangen.

Es gibt durchaus Technologien, die unter die Kategorie langfristiges CCU fallen könnten, mit deutlich längeren Speicherdauern als bei mittelfristigem CCU. Ein Beispiel hierfür sind industrielle Prozesse, in denen abgeschiedener Kohlenstoff in Neu- und Abbruchbeton durch Karbonatisierung fixiert wird. Auch wenn die Speicherdauer solcher Technologien noch nicht vollständig im Konsens bewiesen ist, liegt sie oft jenseits der 100 Jahre. Der Kohlenstoff wird dann teilweise auch als dauerhaft gebunden bezeichnet (Jörß 2024). Da diese Technologien in den betrachteten Szenarien keine oder nur eine sehr geringe Rolle spielen und sich vor allem bilanzierungstechnisch nicht von mittelfristigem CCU unterscheiden, wird in dieser Analyse nicht explizit auf langfristiges CCU eingegangen.

3.3.1 Kurzfristiges CCU

In diese erste Kategorie der CCU-Aktivitäten fallen Prozesse, bei denen abgeschiedener Kohlenstoff weiterverarbeitet und innerhalb eines kurzen Zeitraums (meistens eines Jahres) wieder emittiert wird. Diese Aktivitäten können nicht als technische Senken betrachtet werden: die Kohlenstoffentnahmen zählen nicht als Negativemissionen, sondern können lediglich als Verschiebungen zwischen Sektoren in der Bilanz beobachtet werden (Jörß et al. 2022). Beispiele für solche Aktivitäten sind die Verwendung abgeschiedenen Kohlenstoffs als

landwirtschaftlicher Dünger, als direkter Rohstoff ohne chemische Umwandlung in industriellen Prozessen, beispielsweise in der Getränke- oder Lebensmittelindustrie, oder für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe (E-Fuels). Besonders letztere Kategorie ist im Hinblick auf Treibhausgasneutralität im Verkehrssektor von großer Bedeutung und spielt in den Szenarien des EU IA 2040 mit bis zu 100 Mt CO₂-Äq/Jahr eine besonders große Rolle. Die Prozesskette stellt allerdings keine Senke dar, sondern führt zu einer Verschiebung von Emissionen aus dem Sektor, in dem das verwendete CO₂ abgeschieden wird, in den Verkehrssektor. Es gilt hier zu unterscheiden, ob das verwendete CO₂ fossilen oder biogenen Ursprungs ist. Bei fossilem Ursprung zählen die abgeschiedenen Emissionen als Vermeidung der Freilassung entstandener Emissionen im Ursprungssektor und als normale Emissionen im Verkehrssektor, was gesamtbilanziell zu einer Brutto-Emission führt. Die Verwendung von abgeschiedenem, biogenem Kohlenstoff für die Produktion von E-Fuels, sollte entsprechend gesamtbilanziell als Brutto-Nullemission eingehen, wenn sich der verwendete, biogene Einsatzstoff durch eine nachhaltige Anbauweise auszeichnet (Jörß 2024).

Besonders im Bereich des kurzfristigen CCUs spielen Importe von abgeschiedenem Kohlenstoff aus anderen Ländern eine Rolle. Kohlenstoffentnahmen zur Nutzung können nur dann in nationalen Inventaren als Senke bilanziert werden (Downstream), falls das abgeschiedene CO₂ oder die synthetischen Brennstoffe exportiert werden und außerhalb der Landesgrenzen emittiert werden. Entsprechend sollte der Import insgesamt als Emission im Verkehrssektor bilanziert werden.³ Synthetische Brennstoffe werden in Deutschland im Jahr 2045 voraussichtlich lediglich im Luft- und Schiffsverkehr eingesetzt werden. Da die in den Szenarien ausgewiesenen Mengen relativ begrenzt sind, bleibt in manchen der untersuchten Szenarien unklar, ob importierte E-Fuels als Nullemission oder als Emission bilanziert wurden.

3.3.2 Mittelfristiges CCU

Die Speicherung von abgeschiedenem CO₂ in synthetischen Produkten, wie beispielsweise in Polymeren und Kunststoffen, chemischen Produkten, Baumaterialien oder Carbonfasern, gewährleistet im Allgemeinen eine chemische Bindung des Kohlenstoffs zwischen mehreren Jahren bis zu mehreren Jahrzehnten, bevor es wieder freigesetzt wird. Die Bindungsdauer ist immer abhängig von dem Einsatz der Produkte und kann stark variieren, beispielsweise zwischen wenigen Jahren bei synthetischen Produkten wie Naphtha oder Methanol, wenn keine konsistente Kreislaufführung der Produkte gewährleistet wird, bis hin zu mehreren Jahrhunderten, wie bei der Speicherung in Beton durch Karbonatisierung (Lübbbers et al. 2021). Ähnlich wie bei Holzprodukten stellen die Produkte somit eine zeitlich begrenzte Speicherung dar und können daher für den Speicherungszeitraum als eine Art technischer Senke angesehen werden. In dem neuen europäischen Zertifizierungsrahmen für Kohlenstoffentnahmen (Carbon Removal Certification Framework – CRCF) sind zum Beispiel Zertifikate für Produkte mit Bindungen von mindestens 35 Jahren vorgesehen (European Parliament 2024; Böttcher et al. 2024). Dieser Wert wird in der Analyse hier als mittelfristiger Zeitrahmen angesehen. Diese in Produkten mittelfristig gespeicherten Kohlenstoffmengen können somit im Jahr der Abscheidung als Negativemissionen im Inventar verbucht werden, müssen allerdings entsprechend der Bindungsdauer dann bei Re-Emission, voraussichtlich nach mehreren Jahrzehnten, wieder als Emission in der Bilanzierung auftauchen. Gegebenenfalls könnten sie dann auch über CCS-Technologien aufgefangen und langfristig gespeichert werden, wobei dann

³ Grundsätzlich könnte die Bilanzierung auch umgekehrt stattfinden: Abscheidung für kurzlebige Produkte wird dort als Emission angerechnet, wo das CO₂ entstanden ist. Entsprechend hätte der Verkehrssektor dann niedrigere Emissionen, dafür wären die Emissionen der Industrie und Energiewirtschaft entsprechend höher. Bei Handel von solchen Produkten über nationale Grenzen muss eine einheitliche Bilanzierung sichergestellt sein, damit es nicht zu einer Doppelzählung/Lücke in der globalen Emissionsbilanz kommt.

eine Doppelzählung der Senke vermieden werden müsste (Jörß et al. 2022). Dieser Bilanzierungsansatz gilt schon aktuell in den Treibhausgasinventaren für die Kategorie Harvested Wood Products.

Grundsätzlich hängt die Speicherdauer von der jeweiligen Verarbeitung und Anwendung ab. Dies ist insbesondere bei Zwischenprodukten wie Naphtha oder Methanol der Fall, die abgeschiedenes CO₂ speichern, danach aber weiterverarbeitet werden. Bei einer Weiterverarbeitung zu synthetischen Produkten muss je nach Produkttyp auf eine konsequente Kreislaufnutzung geachtet werden, um die Annahme der mittelfristigen Speicherdauer zu erlauben. Dieser Hinweis gilt für alle Kategorien, in denen Kohlenstoff mittel- bis langfristig, aber nicht geologisch gespeichert wird, aber entsprechend einer geologischen Speicherung bilanziert wird. Für die Annahme der langfristigen Kohlenstoffentnahme aus der Atmosphäre bei synthetischen Produkten ist der Einsatz von CCS-Technologien bei thermischer Verwertung am Ende des Lebenszyklus erforderlich, wobei Doppelzählungen vermieden werden müssen.

Mit Verweis auf diesen Hinweis wurde für die Szenarienanalyse bilanztechnisch mittel- bis langfristiges CCU als technische Senke betrachtet, allerdings aufgrund der genannten Unsicherheiten immer getrennt ausgewiesen und behandelt. Es muss bei diesen Senken also beachtet werden, dass sie sich in einigen Jahrzehnten wieder in Emissionen umwandeln, sofern sie dann nicht mittels CCS in langfristige Senken umgewandelt werden. Bei Kohlenstoffabscheidungen und insbesondere im Falle von CCU muss also der Nutzungspfad nachvollzogen werden, um die verschiedenen Emissionsströme richtig zu bilanzieren (Jörß und Moosmann 2024).

Es gilt zu beachten, dass sich die genutzten Definitionen für kurz- und mittelfristiges CCU auf Endprodukte beziehen und nicht direkt auf Übergangsprodukte. Bei Übergangsprodukten, wie beispielsweise grünem Naphtha und Methanol, ist die Endanwendung entscheidend, ob diese als Senken bilanziert werden können oder nicht. Die Senkenrechnungen für grünes Naphtha und Methanol als Grundstoff für die Chemieindustrie werden übernommen, falls das abgeschiedene CO₂ oder die Biomasse dafür nationalen Ursprungs ist und unter der Annahme, dass diese für die Produktion von Produkten, die in die Kategorie mittelfristiges CCU fallen, genutzt wird. Würden sie für die Produktion von kurzfristigen CCU-Produkten genutzt werden, sollte dies als Emission in die Bilanz mit eingehen und nicht als Senke zählen. Insgesamt bietet auch hierfür der oben angesprochene Poolansatz die entscheidende Logik für die Anrechnung von CCU als Senke oder nicht.

Da in keinem Szenario mittelfristige Speicherung in synthetischen Produkten nach DACC-Abscheidung betrachtet wurde, wurde angenommen, dass mittelfristiges CCU nur nach fossiler oder biogener Abscheidung genutzt wird. Daher ergeben sich die beiden Kategorien *fossiles CCU (mittelfristig)* und *BCCU (mittelfristig)*, die jeweils unter der entsprechenden Oberkategorie *FoCCS* und *B(E)CCS* fallen.

3.4 Wasserfallstruktur

Als übergeordnete Methodik zur Analyse und Darstellung verschiedener Emissions-Kategorien wurde die „Wasserfallstruktur“ entwickelt, die Gesamtbilanzen von Szenarien jeweils in erzeugte Treibhausgase, Brutto- und Netto-Emissionen unterscheidet. Da in allen Szenarien Kohlenstoffabscheidung eine große Rolle zum Erreichen der Treibhausgasneutralität spielt, ist eine saubere Trennung zwischen den verschiedenen Kategorien notwendig. Die Wasserfallstruktur bietet die Möglichkeit einheitlich zu erkennen, wie viele Treibhausgase erzeugt werden und wie viel Kohlenstoff als Negativemissionen bzw. als Vermeidung der

Freisetzung entstandener Emissionen abgeschieden werden. Diese Struktur ist an die Analyse in (Gores und Graichen 2024) angelehnt.

Der Wert der *erzeugten Treibhausgase* (*GHG Generated*) weist die Gesamtmenge der erzeugten Treibhausgase aus, bevor eine Kohlenstoffabscheidung erfolgt. Das bedeutet, dass in diesem Wert auch alle fossilen Treibhausgase enthalten sind, die beispielsweise in Industrieprozessen oder an Müllverbrennungsanlagen entstehen und abgeschieden werden, um anschließend dauerhaft gespeichert zu werden (*FoCCS*). Diese Emissionen, die zwar erzeugt werden, aber aufgrund Abscheidung und Speicherung nicht freigesetzt werden, entsprechen dem Unterschied zwischen den *erzeugten Treibhausgasen* und den Brutto-Emissionen (*GHG Gross*). Brutto-Emissionen entsprechen also der Kategorie, die zwar fossile Kohlenstoffabscheidung, aber noch keine technischen oder natürlichen Senken als Negativemissionen anrechnet. Sie werden oft als Residualemissionen beschrieben, d. h. die Menge an CO₂-Äq, die tatsächlich an die Atmosphäre abgegeben wird. Die *Netto-Emissionen* beinhalten zudem alle Negativemissionen, die sich aus technischen Entnahmen (industrial removals) und der natürlichen Senke des Netto-LULUCF-Sektors ergeben. Diese Netto-Emissionen sind die Zielgröße für die Treibhausgasneutralität.

Da Kohlenstoffabscheidungen derzeit ausschließlich in den Sektoren Energiewirtschaft und Industrie bilanziert werden, sind in den anderen Sektoren, bis auf den LULUCF-Sektor, die erzeugten Treibhausgase, die Brutto-Emissionen sowie die Netto-Emissionen identisch.

3.5 Importe

Viele Treibhausgasneutralitätsszenarien sehen den Import von synthetischen Produkten, die abgeschiedenen Kohlenstoff enthalten, und/oder den Aufbau von DACCS-Anlagen im Ausland zur Kohlenstoffabscheidung vor. Angelehnt an den Territorialansatz, so wie er im deutschen Bundes-Klimaschutzgesetz verankert ist, werden im Rahmen der durchgeföhrten Analyse Emissionen nur dann der Bilanz angerechnet, wenn sie innerhalb der Landesgrenzen freigesetzt oder abgeschieden worden sind. Entsprechend werden die importierten Anteile an Negativemissionen, die durch Abscheidungen im Ausland und Speicherung in importierten Produkten oder durch DACCS-Anlagen im Ausland entstehen, nicht der Bilanz angerechnet. Dieser Ansatz führt im Falle importierter synthetischer Kraftstoffe dazu, dass die abgeschiedenen Emissionen im Exportland als Kohlenstoffabscheidungen gezählt werden und im Importland, in dem die Emissionen im Verkehrssektor freigesetzt werden, als Emissionen in die Bilanz eingehen.⁴ Da es in mehreren Szenarien nicht möglich war, den genauen Anteil „importierter Kohlenstoffabscheidungen“ zu berechnen, wurde in diesem Falle explizit darauf hingewiesen, dass in den angegebenen Abscheidungen Importe mit eingerechnet sind.

3.6 Sektorale Zuordnungen

Hinsichtlich der Zuordnung von Emissionen zu den verschiedenen Wirtschaftssektoren gibt es grundsätzliche Unterschiede in den Szenarien. Dies betrifft vor allem die Zuordnung von Emissionen im Energie- und Industriesektor, bei denen prinzipiell zwischen der Einordnung nach der Energiebilanz oder entsprechend der Treibhausgasinventare vorgegangen werden kann. Auch bei der Zuordnung von Emissionen in den Treibhausgasinventaren gibt es in diesen beiden Sektoren trotz weitgehender Vereinheitlichung Unterschiede zwischen den Vorgehensweisen der Mitgliedsstaaten. In Szenarien kann die Zuordnung auch nach Nachfragesektoren erfolgen, so dass Emissionen aus der Fern- oder Nahwärme auch dem Gebäudesektor zugeordnet sein können. So weit möglich, wird bei dem Vergleich der Szenarien eine Zuordnung der Emissionen entlang der Logik der Treibhausgasinventare gewählt. Die

⁴ Siehe auch Fußnote 3 für eine alternative Bilanzierungslogik.

Emissionen des Landwirtschaftssektors beziehen hier allerdings auch die energiebedingten Emissionen ein und entsprechen damit der Struktur des Klimaschutzgesetzes. Sie umfassen damit die Emissionen der Treibhausgasinventarsektoren 3 und 1.A.4.c. Die europäischen Szenarien wurden dementsprechend angepasst.

Die Darstellung der Effekte von Negativemissionstechnologien ist noch nicht eindeutig in den Treibhausgasinventaren geregelt (vgl. dazu Jörß et al. 2024). Im 2040 Impact Assessment der Europäischen Kommission wurden die Effekte von DACCS der Industrie, von BECCS dem Industriesektor zugewiesen. Hier werden diese Negativemissionen separat ausgewiesen und nicht den beiden Wirtschaftssektoren zugeschlagen.

Der internationale Transportsektor wird in den europäischen Szenarien mit bilanziert, wobei der sogenannte „Target Scope“ verwendet wird. Dieser entspricht dem Erfassungsbereich des Europäischen Klimagesetzes (European Climate Law), der die Emissionen des durch den EU-Emissionshandel abgedeckten internationalen Flug- und Schiffsverkehrs umfasst. Damit werden die Emissionen des Luftverkehrs und Seeschifffahrts-Verkehrs innerhalb des europäischen Wirtschaftsraums sowie 50 % des Schiffverkehrs außerhalb der EU abdeckt (JRC 2024). In den deutschen Szenarien wird hingegen nur der nationale Transport bilanziert.

4 Auffälligkeiten & Abweichungen in der Bilanzierungsmethodik der einzelnen Szenarien

Im Folgenden werden die Details der einzelnen Szenarien vor allem bezüglich der betrachteten Elemente diskutiert, wobei der Fokus auf den getroffenen Annahmen der betrachteten Elemente aus Abschnitt 3 und deren Einordnung in der vergleichenden Analyse liegt.

4.1 Agora KN2045 (2021)

Das Szenario KN2045 stammt aus der im Jahr 2021 veröffentlichten Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045 – Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann“ (Dambeck et al. 2021). Neben der Langfassung als PDF-Dokument sind ein Datenanhang als Excel-Dokument mit den Rohdaten für das Szenario frei zugänglich. Die beiden Dokumente wurden als Datengrundlage für die Analyse des Szenarios KN2045 genutzt und bilden zusammen, ähnlich wie bei den Szenarien des EU IA 2040, einen weitgehend vollständigen Datensatz, um die Bilanzierungsstruktur nachzuvollziehen. Alle in diesem Kapitel zitierten Seitenzahlen beziehen sich auf die Langfassung.

Das KN2045 Szenario zeigt im Allgemeinen eine ähnliche Struktur wie die deutlich neueren Szenarien der EU. Insgesamt ist die zu dem Szenario zugehörige Studie weniger detailliert bezüglich Erklärungen, Zusatzinformationen und Graphiken als das EU IA 2040. Die sektoralen Emissionen werden meist nicht in einzelnen Graphiken dargestellt, sondern erfolgen gesammelt in Abbildung 3 (S. 12).

Die Gesamt-, sowie sektoralen Emissionen werden durchgehend als Netto-Werte angegeben. Die Brutto-Emissionen sowie die erzeugten Treibhausgase mussten aus dem Datensatz berechnet werden. Datenpunkte liegen für alle fünf Jahre vor. Im Vergleich zu den EU IA 2040 Szenarien gibt es einige Unterschiede in den konkreten Bilanzierungskategorien, auf die im Detail im Folgenden eingegangen wird.

4.1.1 Sektorale Zuordnungen

Die sektorale Zuordnung von Emissionen sowie von Kohlenstoffabscheidungen im Szenario KN2045 stimmt im Allgemeinen mit der für die Analyse gewählten Struktur überein. Die einzige direkte Abweichung stellen DACCS-Entnahmen dar: Das KN2045 bilanziert sie in der Energiewirtschaft, so dass für diesen Sektor im Jahr 2045 negative Netto-Emissionen ausgewiesen werden. Für unsere Analyse werden DACCS-Entnahmen wie die LULUCF-Entnahmen getrennt bilanziert und keinem Sektor zugeordnet.

Die Emissionen des internationalen Verkehrs sind im KN2045 nicht in der Emissionsbilanz enthalten, da diese sich auf nationale Emissionen beschränkt. Sie werden aber im Kapitel 3.4.4 der Langfassung beschrieben.

4.1.2 Kohlenstoffmanagement

Die Angaben zur Kohlenstoffabscheidung beschränken sich auf die Angaben der Gesamt Mengen der verschiedenen Kategorien. Wie genau der Fluss des abgeschiedenen Kohlenstoffs für die Weiterverwendung in industriellen Prozessen oder zur mittelfristigen Speicherung in synthetischen Produkten erfolgt, beziehungsweise welche Anteile importiert werden, wird nicht komplett lückenfrei erklärt. Dies ist auch in den anderen nationalen Szenarien der Fall, während das EU IA 2040 in Abbildung 11 (S. 280) eine sehr detaillierte Graphik enthält, die genau

darstellt auf welche Art, in welchem Sektor für welche Endnutzung Kohlenstoff abgeschieden wird.

In der Kategorie *FoCCS* stammen die verwendeten sektorübergreifenden Angaben aus Abbildung 100 und ergeben sich aus „prozessbedingten Emissionen, bei der thermischen Verwertung von Abfällen (ohne biogene Anteile) und Restchemikalien sowie an den Steamcrackern der chemischen Industrie“ (S. 100). Dabei wird der Anteil an fossilem CCS in der Zementindustrie zusätzlich explizit in Abbildung 29 für die Jahre 2030 und 2045 angegeben. Um im Jahr 2045 eine Zuordnung der fossilen CCS-Emissionen in die Sektoren Energiewirtschaft und Industrie zu ermöglichen, wurde eine Annahme für die restlichen abgeschiedenen Emissionen getroffen. Die Differenz aus dem gesamten fossilen CCS und dem in der Zementindustrie abgeschiedenen CO₂ wurden in gleichen Teilen und jeweils den MVAs und „anderen Industriesektoren“ zugeordnet. Somit werden im Industriesektor fossile CCS-Anteile des Zementsektors und aus „andere(n) Industriesektoren“ verrechnet, in der Energiewirtschaft die aus MVAs.

Während der biogene Anteil an MVAs in KN2045 für die Kategorie *FoCCS* explizit ausgeschlossen wurde (siehe S. 100), ist er nicht in einer anderen Kategorie explizit enthalten. Da in den Angaben zu produzierter Fernwärme explizit auf den biogenen Anteil in MVAs (Abbildung 21) und bei der Beschreibung von BECCS-Entnahmen auf negative Emissionen in Biomassefernheizwerken zur Wärmeproduktion hingewiesen wird (S. 102), wird davon ausgegangen, dass der biogene Anteil in MVAs in BECCS-Entnahmen in der Energiewirtschaft enthalten ist.

Die sonstigen Angaben für BECCS-Entnahmen, die getrennt dem Energie-, sowie Industriesektor zugeordnet werden, und DACCS-Entnahmen sind eindeutig. Nur die in der Kategorie „Grüne Polymere“ angegebenen Entnahmen benötigen eine gesonderte Betrachtung. Darin enthalten ist aus abgeschiedenem Kohlenstoff hergestelltes grünes Naphtha. Dies wird in der Industrie „als Feedstock für verschiedene Prozesse zur Weiterverarbeitung genutzt“ (S. 101) und soll vollständig importiert werden. Es ist anzunehmen, dass das dafür benötigte CO₂ nicht in Deutschland abgeschieden wird. Trotzdem bilanziert das KN2045 Szenario für das Jahr 2045 Negativemissionen in Höhe von -7 Mt CO₂-Äq aus importiertem, grünem Naphtha. Auch wenn, wie in Abschnitt 3 beschrieben, grünes Naphtha als Kohlenstoffspeicherung in synthetischen Stoffen prinzipiell als Entnahme bilanziert werden kann, widerspricht die im KN2045 diesbezügliche Bilanzierung dem für diese Analyse angewandten Territorialprinzip.

Neben grünem Naphtha wird in der chemischen Industrie zur Produktion von Plattformchemikalien zudem grünes Methanol eingesetzt, das gänzlich importiert wird (S. 101). Nach dem Territorialprinzip wurde importiertes, grünes Naphtha und Methanol nicht als Entnahme gewertet, weshalb die Kategorie grüne Polymere in Abbildung 7 (mit 7 Mt CO₂ in 2045) nicht als Negativemissionen gewertet wurde.

4.1.3 Andere Auffälligkeiten

Eine wichtige Auffälligkeit betrifft die im Verkehrssektor eingesetzten, synthetischen oder strombasierten Kraftstoffe (E-Fuels). Die KN2045 Studie betont mehrmals, dass diese im Jahr 2045 stark eingesetzt werden, vorwiegend im nationalen und internationalen Schiffs- und Flugverkehr, in geringem Umfang auch im Straßenverkehr (S. 24). Die daraus entstehenden Emissionen werden im KN2045 als FoCCS behandelt und nicht angerechnet, unabhängig davon, ob die Kraftstoffe importiert sind und ob die Kohlenstoffabscheidung, die die Nullbilanzierung rechtfertigen würde, im Ausland geschehen ist. Auch wenn im Szenario für 2045 erste Produktionsanlagen für strombasierte Kohlenwasserstoffe geplant sind (S. 80), kann

angenommen werden, dass der Großteil der synthetischen Kraftstoffe importiert wird. Konkret nimmt die Studie an, dass etwa 12 % des Primärenergieverbrauchs aus importierten, synthetisch erzeugten Energieträgern besteht, wobei darin auch Wasserstoff enthalten ist (S. 20). Der genaue Import-Anteil der genutzten synthetischen Kraftstoffe lässt sich aus den veröffentlichten Daten nicht ermitteln. Nach dem Territorialprinzip sollten allerdings die Emissionen importierter synthetischer Kraftstoffe in Deutschland als Emissionen im Verkehrssektor angerechnet werden. Dies würde dazu führen, dass die Emissionen im Verkehrssektor nicht auf null abgesenkt werden könnten, was sich entsprechend auf die Menge an Restemissionen und das Erreichen der Treibhausgasneutralität auswirken würde.

4.2 DENA KN100

Die Studie „Klimaneutralität 2045 – Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems“ wurde im Oktober 2021 vom Energiewirtschaftlichen Institut an der Universität zu Köln im Auftrag der Deutschen Energie Agentur veröffentlicht (Gierkink et al. 2021). Die Langfassung der Studie ist als PDF-Dokument veröffentlicht und enthält die Analyse zu den Emissionstrajektorien des Szenarios KN100. Die in diesem Kapitel zitierten Seitenzahlen beziehen sich auf besagte Langfassung. Zudem wurde die im Rahmen der Leitstudie veröffentlichten Excel-Datei⁵, die Rohdaten der Ergebnisse des Szenarios enthält, für die Analyse verwendet.

Im Allgemeinen entspricht das Szenario in der Herangehensweise dem Agora KN2045 Szenario: Es lehnt sich an die Bilanzstruktur des Klimaschutzgesetzes (KSG) an, weist meist Netto-Emissionen in Fünf Jahresschritten aus. Nutzungs- und Emissionspfade von abgeschiedenem Kohlenstoff sind nicht lückenlos nachzuvollziehen.

Bezüglich des Weges zur Treibhausgasneutralität fällt auf, dass Entnahmen mittels DACC bis 2045 nicht vorgesehen sind. Auch Entnahmen durch BECCS fallen im Vergleich zu den meisten anderen Szenarien deutlich kleiner aus. Die nötigen Entnahmen zur Kompensation von Residualemissionen werden hauptsächlich durch den LULUCF Sektor abgedeckt.

4.2.1 Sektorale Zuordnungen

Die sektorale Zuordnung von Emissionen, sowie von Kohlenstoffabscheidungen im Szenario KN100 stimmt im Allgemeinen mit der für die Analyse gewählten Struktur überein. Kleinere Unklarheiten oder Zuordnungen für die Bilanzierung von Kohlenstoffmanagement werden im folgenden Unterkapitel angemerkt.

4.2.2 Kohlenstoffmanagement

Die Angaben zum Kohlenstoffmanagement im Szenario KN100 enthalten neben den aufgeschlüsselten Angaben für technische Entnahmen und Abscheidungen in Abbildung 86 (S. 124) in den Jahren 2030-2050, grundlegende Annahmen für die Bilanzierung von Kohlenstoffabscheidungen. Auch wenn lückenlose Nutzungspfade des abgeschiedenen Kohlenstoffs nicht vorhanden sind, bieten die in Kapitel 2.6.1 der Langfassung beschriebenen Annahmen zu den verschiedenen Entnahmetechnologien durchaus die Möglichkeit, die angewendete Bilanzierung zu bewerten.

Bezüglich der Negativemissionen fällt auf, dass DACC-Technologien, genauso wie Recarbonatisierung von Beton, für das KN100-Szenario explizit nicht vorgesehen sind, sodass sich technische Entnahmen auf B(E)CCS und stoffliche Kohlenstoff-Bindung beschränken.

⁵ Online verfügbar unter: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/dena-ls2/>

Die Speicherung in synthetischen Produkten bezieht sich konkret auf grünes Naphtha und grünes Methanol, wobei im Szenario jeweils -5 und -7 Mt CO₂-Äq im Jahr 2045 als Negativemissionen angerechnet wurden. Im Text wird konkretisiert, dass das Naphtha gänzlich importiert wird (S. 141), während das Methanol über Biomassevergasung produziert wird. Zudem weist die Studie darauf hin, dass deren Behandlung als Negativemissionen davon abhängt, dass ein konsequenter Kreislaufzyklus eingehalten wird und die energetische Verwertung der Kunststoffe mit WACCS Abscheidung und Speicherung einhergeht. Dies entspricht dem für diese Analyse gewählten Ansatz, wobei ein zusätzlicher Hinweis darauf, dass bei WACCS Abscheidung am Ende des Lebenszyklus der synthetischen Stoffe eine Senken-Doppelzählung vermieden werden muss, wünschenswert wäre. Das KN100 Szenario wählt zudem den Ansatz, die Senkenleistungen durch Speicherung in synthetischen Produkten aufgrund von Unsicherheiten des Verbleibs des Kohlenstoffs über den gesamten Lebenszyklus, nur zu 75 % anzurechnen.

Trotz der Hinweise und der Gewichtung wurden gemäß des Territorialprinzips die Naphtha-Anteile nicht als Negativemissionen angerechnet. Gespeicherter Kohlenstoff in aus Biomasse gewonnenem Methanol fällt allerdings unter die Kategorie *stoffliche C-Bindung*, weshalb diese Angaben gemäß Abschnitt 3.2.4 als Negativemissionen angerechnet wurden. Emissionen von E-Fuels werden nicht in die Bilanz aufgenommen, obwohl sie ausschließlich aus Importen stammen. Die Energieeinsätze werden jedoch in der Datensammlung ausgewiesen.

Während sich die Angaben für FoCCS in Müllverbrennungsanlagen (*fossiles WACCS*) explizit nur auf Kohlenstoffabscheidungen beziehen, die durch Speicherung in geologischen Formationen langfristig gespeichert werden, wird bei fossilen Abscheidungen in der Industrie („Industry – CCU/S“) keine Unterscheidung zwischen CCU und CCS gemacht. In gleicher Weise bleibt bei der angegebenen Kategorie „Industry – BECCU/S“ unklar, welcher Anteil der hier angegebenen Abscheidungen genutzt bzw. gespeichert werden oder wie genau die Nutzung erfolgt. Die Langfassung enthält die Angabe, dass „von den 34 Mt über BECCU/S und CCU/S abgeschiedenen Mengen CO₂ in 2045 10 Mt CO₂ in der Chemieindustrie genutzt und 24 Mt CO₂ geologisch gespeichert werden“ (S. 143). Dieses Verhältnis wurde entsprechend für die Unterkategorien „Industry – CCU/S“ und „Industry – BECCU/S“ angenommen, um die jeweiligen Nutzungs- und Speicherungsanteile zu bilanzieren.

Im Szenario soll abgeschiedener Kohlenstoff über CCU oder BECCU lediglich in der Chemieindustrie zum Einsatz kommen, wobei grünes Methanol und Naphtha explizit genannt werden. Da allerdings auch die Speicherung von Kohlenstoff in grünem Methanol und Naphtha als Kategorien aufgelistet werden, bei denen der Kohlenstoff nicht in Deutschland abgeschieden wird, bleibt unklar, welche Nutzungsarten den unter fossil CCU bzw. BECCU aufgeführten, abgeschiedenen Emissionen entsprechen. Es wurde angenommen, dass keine Doppelzählung vorliegt, sondern dass die angegebenen 10 Mt CO₂ in der Chemieindustrie als zusätzliche mittelfristige Speicherung in synthetischen Produkten verwendet worden sind. Gemäß der gewählten Bilanzierungsmethodik, werden also die BCCU-Anteile als Negativemissionen gewertet und die fossilen CCU-Anteile als Vermeidung der Freisetzung entstandener Emissionen gewertet. Auch hier muss in beiden Fällen auf einen konsequenten Kreislaufzyklus, Kombination von energetischer Verwertung am Ende des Lebenszyklus mit WACCS Technologien und Vermeidung von Doppelzählungen geachtet werden.

Explizite Hinweise auf nicht-energetisches BCCS durch abgeschiedene Emissionen bei Biogas-Aufwertung oder Biomasse-Gasifizierung gibt es nicht, weshalb angenommen wird, dass diese, falls vorhanden, unter BECCS (Industrie) verrechnet worden sind. Der Anteil an biogenen Emissionen, die bei der thermischen Abfallbehandlung abgeschieden werden, sind laut der Langfassung der Kategorie *BECCS (Energie)* zugeordnet worden.

4.2.3 Andere Auffälligkeiten

Das KN100 Szenario betrachtet mit 41 Mt CO₂-Äq Netto-Entnahmen im LULUCF-Sektor im Jahr 2045 besonders hohe natürliche Senken. Dadurch fallen die nötigen Mengen technischer Senken entsprechend kleiner aus, wobei DACC-Technologien gänzlich entfallen. Allerdings wird in der Studie in der Infobox 14 (S. 138) auch auf eine LULUCF Sensitivität hingewiesen, die den Fall betrachtet, dass das Maß an natürlichen Senken aufgrund von Klimawandelauswirkungen und allgemeinen Unsicherheiten bezüglich der rechtzeitigen Umsetzung der ambitionierten Ziele, letztendlich nicht so hoch ausfällt. In diesem Falle werden die nötigen Entnahmen durch technische Senken ausgeglichen und es werden DACCS-Entnahmen von bis zu 16 Mt CO₂-Äq in 2045 betrachtet.

Eine weitere Auffälligkeit ist, dass das Szenario an manchen Stellen die Ergebnisse aus der Agora-KN2045-Studie gänzlich übernimmt, wie beispielsweise der Transformationspfad der THG-Emissionen in den Sektoren Landwirtschaft, sowie „Abfall und Sonstige“ (S. 145).

4.3 BDI-Klimapfade 2.0

Die Studie „Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“ wurde im Oktober 2021 von der Boston Consulting Group (BCG) im Auftrag des Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) veröffentlicht (Burchardt et al. 2021). Die Langfassung der Studie ist als PDF-Dokument veröffentlicht und enthält die Analyse zu den Emissionstrajektorien des Szenarios Klimapfade 2.0. Eine Excel-Datei mit Rohdaten zu dem Szenario ist nicht verfügbar, weshalb auch hier für die Auswertung alle Werte aus der Langfassung abgelesen wurde. Ein vollständiger und konsistenter Datensatz ist in diesem Szenario nur für das Jahr 2045 angegeben, für die anderen Jahre sind entweder keine oder nur lückenhafte Angaben verfügbar.

4.3.1 Sektorale Zuordnungen

Bezüglich der Emissionen durch den Einsatz fossiler Brennstoffe im landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen und Fischereibereich, die der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)-Emissionskategorie 1.A.4c entsprechen, wurden in der Langfassung keine konkreten Informationen gefunden. Daher wurde angenommen, dass die gleiche sektorale Zuordnung wie in den anderen deutschen Szenarien gewählt wurde und diese Emissionen im Landwirtschaftssektor bilanziert wurden. Zudem wurden die Angaben für die Sektoren „Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Sonstiges“ gesammelt angegeben. Die Emissionen des landwirtschaftlichen Sektors wurden anhand textlicher Angaben extrahiert, die restlichen Emissionen wurden dem Abfallsektor zugeordnet. Ansonsten stimmen die sektoralen Zuordnungen von Emissionen und Entnahmen mit der für die Analyse gewählten Struktur überein.

4.3.2 Kohlenstoffmanagement

Es fällt auf, dass das BDI-Szenario in den Kategorien *FoCCS*, *BECCS* und *DACCS* nicht zwischen Nutzung und geologischer Speicherung des abgeschiedenem CO₂ unterscheidet und jeweils die Bezeichnung CCUS angibt. Es wird textlich darauf hingewiesen, dass damit die permanente Speicherung bzw. dauerhafte stoffliche Bindung von CO₂ gemeint ist, wobei nicht konkretisiert wird, was mit „dauerhaft“ gemeint ist. Genauso ist es nicht möglich, die Anteile an dauerhafter Bindung durch Nutzung und geologischer Speicherung zu trennen.

Es wird zudem explizit die Möglichkeit der Nutzung von abgeschiedenem CO₂ für die Produktion von E-Fuels, sowie als Rohstoff für chemische Grundstoffe angesprochen, allerdings mit dem Hinweis darauf, dass in diesen Fällen das genutzte CO₂ kurz- bis mittelfristig wieder freigesetzt

wird. Als Kondition, damit diese Arten von Nutzung zur Treibhausgasneutralität beitragen, wird die vollständige Kreislaufführung des CO₂ oder die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs genannt (S. 93). Es bleibt allerdings unklar, ob die in den Kategorien CCUS, BECCUS und DACCUS verrechneten Nutzungsanteile diese Kondition erfüllen. Für die Analyse wurden die entsprechenden Kategorien so behandelt, als ob sie ausschließlich geologische Speicherung beinhalteten würden. Da explizit die Speicherung von abgeschiedenem CO₂ in rekarbonisiertem Beton genannt wird (S. 93), diese allerdings nur in geringem Umfang vorgesehen ist (S. 166), wird angenommen, dass es sich hauptsächlich um geologische Speicherung handelt und die stoffliche Bindung nur eine geringe Rolle spielt. Es wird allerdings in den entsprechenden Kategorien darauf hingewiesen, dass nicht ausweisbare Anteile an mittelfristigem CCU enthalten sind, die nur konsistent als Entnahmen gelten sollten, falls sie die oben genannte Kondition erfüllen und unter Vermeidung von Doppelzählungen am Ende des Lebenszyklus der Produkte durch CCS abgeschieden und gespeichert werden.

Bezüglich der Kategorie *FoCCS* werden nur Angaben zur Abscheidung unvermeidlicher Prozessemmissionen gemacht, ohne zwischen der Energiewirtschaft und dem Industriesektor zu unterscheiden. Die angegebenen Größen wurden der Kategorie *FoCCS (Industrie)* zugeordnet, da die Zementindustrie bei diesen Abscheidungen eine besonders große Rolle spielt (vgl. Abbildung 44, S. 91). Hier können allerdings Anteile an fossilem WACCS enthalten sein.

4.3.3 Andere Auffälligkeiten

Eine wichtige Auffälligkeit des BDI-Szenarios ist, dass keine konkrete Prognose für die Netto-LULUCF-Senke im Jahr 2045 ausgewiesen wird. Stattdessen wird angegeben, dass die verbleibenden Restemissionen von 40 Mt CO₂-Äq im Jahr 2045, die nicht durch natürliche Entnahmen ausgeglichen werden, durch DACCS-Entnahmen kompensiert werden, um Treibhausneutralität zu erreichen. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurde angenommen, dass die Anteile an DACCS und Netto-LULUCF-Entnahmen gleich sind und jeweils 20 Mt CO₂-Äq in 2045 betragen. Wenn man allerdings die in dem neuesten verfügbaren Szenario, Agora KN-DE (2024), projizierten Netto-LULUCF-Entnahmen betrachtet, würden lediglich 5 Mt CO₂ DACCS-Entnahmen nötig sein. Die Langfassung gibt an, dass der Einsatz von DACCS erst ab dem Jahr 2035 vorgesehen ist und dass es sinnvoll sein könnte, einen Teil der Anlagen im Ausland zu errichten (S. 93). Nach dem Territorialprinzip dürften diese Entnahmen im Ausland dann allerdings nicht der THG-Bilanz in Deutschland angerechnet werden.

4.4 Agora KN-DE (2024)

Das Szenario Agora KN-DE (2024) ist das erste betrachtete Klimaschutzszenario in dieser Analyse, das nach dem EU IA 2040 veröffentlicht wurde. Es wurde in der Studie „Klimaneutrales Deutschland - Von der Zielsetzung zur Umsetzung“ (Nesselhauf et al. 2024) eingeführt, die im Oktober 2024 von Agora Think Tanks veröffentlicht wurde. Das Szenario kann als Aktualisierung des Szenarios Agora KN2045 gesehen werden und ist daher für die Analyse besonders interessant, da einige Annahmen aktualisiert worden sind und insbesondere neue Größenordnungen für das Kohlenstoffmanagement vorgesehen werden. Alle in diesem Kapitel zitierten Seitenzahlen beziehen sich auf die Langfassung.

Insgesamt fällt auf, dass im Jahr 2045 die Restemissionen deutlich kleiner als auch die negativen Emissionen in dem neu aufgelegten Szenario deutlich größer ausfallen als in der Version von 2021, weshalb das Ziel der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 stark übertroffen wird. Die größten Unterschiede sind bei den Restemissionen in der Landwirtschaft zu erkennen: Diese sind im Jahr 2045 fast halb so gering wie im KN2045 (2021) Szenario, hauptsächlich beeinflusst durch einen starken Rückgang der Wiederkäuerstände durch höheren Konsum von

Ersatzprodukten. Bei den Negativemissionen fällt insbesondere auf, dass die Netto-Entnahmen im LULUCF-Sektor deutlich größer sind, vor allem beeinflusst durch hohe Emissionseinsparung durch Moorböden (siehe Abbildung 31). Zudem sind DACC-Entnahmen im Vergleich zum älteren Szenario deutlich reduziert, etwa um den gleichen Anteil wie Netto-LULUCF-Entnahmen erhöht sind. Insgesamt lässt sich sagen, dass in der Aktualisierung natürliche und Biomasse-basierte Entnahmen eine größere Rolle spielen, während die Nutzung von abgeschiedenem CO₂ zur Herstellung von Kohlenwasserstoffen (CCU) sowie die direkte CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre durch DACC aufgrund der hohen Energieintensität der Prozesse eine untergeordnete Rolle spielen.

In der Methodik entspricht die Bilanzierung des neu aufgesetzten Szenarios weitgehend der älteren Version. Es fällt auf, dass viele Annahmen und Kategorien klarer getrennt und konsistenter erläutert sind, insbesondere im Bereich des Kohlenstoffmanagements.

4.4.1 Sektorale Zuordnungen

Die sektorale Zuordnung für die Emissionsbilanzierung entspricht im Allgemeinen den für die Analyse getroffenen Annahmen. Wie im älteren Szenario Agora KN2045 (2021) ist der Unterschied in der Verrechnung der DACC-Entnahmen zu erkennen. Im Szenario KN - DE (2024) wurden diese in der Energiewirtschaft verrechnet, um sektorale Netto-Emissionen zu bestimmen. Für die hier durchgeführte Analyse wurden die Entnahmen jedoch separat ausgewiesen und keinem Sektor zugeordnet.

4.4.2 Kohlenstoffmanagement

Die Angaben zu Carbon Management sind gesammelt in Kapitel 4.3 und insbesondere in den Abbildungen 38 und 39 der Langfassung zu finden. Der Nutzungspfad für abgeschiedenen Kohlenstoff ist besser nachzuverfolgen als in der Version des Szenarios aus 2021, da in Abbildung 39 Kohlenstoffentnahmen nach Kohlenstoffquelle und nach Branche aufgeführt sind. Auch wenn der Nutzungspfad des abgeschiedenen Kohlenstoffs nicht vollständig lückenfrei verfolgbar ist, sind die Angaben deutlich klarer und mit textlichen Annahmen verknüpft.

Der Einsatz von CCU soll nach Angaben der Langfassung „vor allem bei der Herstellung langlebiger Produkte zum Einsatz kommen“ (S. 63) und eine „untergeordnete Rolle“ (S. 66) spielen. Es bleibt allerdings unklar, ob und wie viel mittelfristige Speicherung durch CCU in synthetischen Produkten vorgesehen ist oder ob die vorgesehenen Mengen in den Unter-Kategorien von B(E)CCS enthalten ist. Für die Bilanzierung wurde angenommen, dass kein mittelfristiges CCU vorgesehen ist. Entsprechend der Bilanzierungsmethodik dieser Analyse wird allerdings darauf hingewiesen, dass mittelfristiges CCU aufgrund der größeren Unsicherheiten bezüglich der Speicherdauer immer getrennt ausgewiesen werden sollte. Somit wurde angenommen, dass die gesamten 45 Mt CO₂, die 2045 aus fossilen, biogenen und atmosphärischen Kohlenstoffquellen abgeschieden werden, langfristig geologisch gespeichert werden.

Die in Abbildung 38 und 39 angegebenen Kategorien für technische Entnahmen entsprechen weitestgehend den für die Analyse gewählten Kategorien. Die Kategorie *FoCCS (Industrie)* ergibt sich aus den angebenden Kategorien für energie- und prozessbedingtes fossiles CO₂ in der Industrie. *FoCCS (Energie)* enthält sowohl fossiles CO₂ aus Raffinerien als auch aus nicht-biogener Abfallverbrennung. In der Kategorie „Industrie biogenes CO₂“ aus Abbildung 39 sind nicht-energetisches BCCS und BECCS (Industrie) ohne Ausweisung der Anteile enthalten. Um die jeweiligen Anteile zu bestimmen, wurde angenommen, dass keine Abscheidung aus Biogasaufwertung angenommen wurde, da keine Hinweise darauf zu finden sind. Somit enthält *nicht-energetisches BCCS* nur Prozessemisionen aus der Gasifizierung von Biomasse zur

Herstellung von Methanol. Diese können durch Vergleich aus Angaben in Abbildung 13, wo 24 Mt CO₂ für stoffliche Biomassenutzung inklusive Bio-CCS angegeben werden, und Abbildung 38, wo 16 Mt CO₂ Entnahmen für stoffliche C-Bindung verrechnet werden, ermittelt werden. Somit ergibt die Differenz den Wert für *nicht-energetisches BCCS* und es kann auch der Anteil für *BECCS (Industrie)* errechnet werden. Da die biogene Abfallverbrennung der Kategorie *BWACCS (Energie)* entspricht und somit dieser alle Abscheidungen zugeordnet sind, entfallen Abscheidungen in der Kategorie *BECCS (Energie)*.

Eine besonders große Rolle spielt im Szenario KN-DE (2024) die stoffliche Bindung von biogenem Kohlenstoff, der über den Zwischenschritt Bio-Methanol in synthetischen Produkten in der Chemieindustrie eingesetzt und als Negativemissionen angerechnet wird. Es wird konkretisiert, dass es sich dabei um inländische Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen handelt. Zudem ist die Anrechnung dieser Negativemissionen mit dem Hinweis verbunden, dass eine konsequente Kreislaufführung erforderlich ist, um eine lange Speicherndauer zu ermöglichen und dass der Einsatz von CCS-Technologien bei der thermischen Verwertung am Ende des Lebenszyklus der Produkte notwendig ist, um dauerhaft Negativemissionen zu generieren. Ein expliziter Hinweis darauf, dass dabei Doppelzählungen vermieden werden müssen, wäre an dieser Stelle wünschenswert. Ansonsten deckt sich die Behandlung von Negativemissionen durch stoffliche Bindung von biogenem Kohlenstoff mit dem für die Analyse gewählten Ansatz.

4.4.3 Andere Auffälligkeiten

Das Szenario KN-DE (2024) sieht für 2045 den Einsatz strombasierter Kraftstoffe insbesondere im Verkehrssektor vor. Dies ist sowohl im inländischen Verkehr, wo sie bis zu acht Prozent des Endenergiebedarfs im Jahr 2045 decken, als auch vor allem in der internationalen Luft- und Schifffahrt der Fall. Unklar bleibt jedoch, wie die Nachfrage gedeckt wird und welche Rolle Importe spielen. Es scheint, als ob Power-to-Liquid Verfahren, bei denen strombasierte Kraftstoffe aus Wasserstoff und CO₂ hergestellt werden, bei der Produktion eine große Rolle spielen (S. 61). Es bleibt aber unklar, woher das dafür abgeschiedene CO₂ stammt. Wird es im Ausland abgeschieden, müssten die durch die Verbrennung strombasierter Kraftstoffe entstandenen Emissionen in Deutschland nach dem Territorialprinzip auch als Emissionen verrechnet werden. Ob dies beispielsweise im Verkehrssektor bedacht wurde, der im Szenario im Jahr 2045 lediglich 0,6 Mt CO₂-Äq Restemissionen ausweist, lässt sich nicht klar beantworten.

4.5 CARE Supreme & CARETech: Preview

Die Studie „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)“ wird im Jahr 2025 vom Umweltbundesamt (UBA) veröffentlicht (in Veröffentlichung). Der Abschlussbericht der Studie ist als PDF-Dokument veröffentlicht und enthält die Analyse zu den Emissionstrajektorien der Szenarien CARESupreme und CARETech. Zeitreihen der Treibhausgasemissionen stehen auch als Excel-Datei zur Verfügung. Insgesamt fällt insbesondere das hohe Maß an Detail bezüglich Annahmen und zeitlicher Auflösung auf. Die CARE-Szenarien verwenden eine Bilanzierungsmethodik, die der in der Analyse angewandten Methodik weitgehend ähnelt. Dennoch gibt es Unterschiede, die berücksichtigt werden sollten.

4.5.1 Sektorale Zuordnungen

Die sektorale Zuordnung von Emissionen, sowie von Kohlenstoffabscheidungen in den CARE-Szenarien stimmt im Allgemeinen mit der für die Analyse gewählten Struktur überein. Kleinere Unklarheiten bei der Zuordnung für die Bilanzierung von Kohlenstoffmanagement werden im folgenden Unterkapitel angemerkt.

4.5.2 Kohlenstoffmanagement

In CARESupreme wird CCS ausschließlich in Müllverbrennungsanlagen umgesetzt. Deshalb geschieht die Abscheidung und Speicherung von biogenem CO₂ in diesem Szenario nur durch *BWACCS*. In CARETech wird hingegen CCS auch in Biomassekraftwerken angewendet. In diesem Szenario wird nur fossiles *WACCS* explizit ausgewiesen, während die biogenen Anteile, die an Müllverbrennungsanlagen abgeschieden werden, in der Kategorie „feste Biomasse“ enthalten sind. Anders als in Kapitel 3.1 erläutert, wird kein 50:50 Verhältnis angesetzt, da der Anteil an Biomasse deutlich höher ist. Deshalb wird auf die detaillierten Modellierungsergebnisse zurückgegriffen: Die Mengen an *BWACCS* werden damit anteilig entsprechend der Energieträger in Müllverbrennungsanlagen bestimmt und liegen damit etwa doppelt so hoch wie *fossiles WACCS*. Die Angaben für *BWACCS* werden entsprechend aus der Kategorie *BECCS (Energie)* gekürzt.

DACCS-Entnahmen werden im CARESupreme Szenario nicht betrachtet, spielen aber im CARETech Szenario eine große Rolle. Diese Anlagen werden in Deutschland errichtet und an das deutsche Stromnetz angeschlossen. Im Sektor Industrieprozesse wird Kohlenstoff aus Biomasse für die Herstellung von wasserstoffbasierten Kohlenwasserstoffen verwendet. Da es sich dabei um kurzfristiges CCU handelt, werden die Mengen in der THG-Bilanz nicht ausgewiesen und deshalb nicht quantifiziert.

Eine wichtige Annahme, die in dem Abschlussbericht explizit angegeben wird, ist, dass Emissionen, die durch inländische Verbrennung importierter synthetischer Kraftstoffe entstehen, als Nullemissionen angerechnet werden. Diese Annahme widerspricht dem Territorialprinzip, welches für die Analyse hier zugrunde gelegt wurde. Nach diesem Prinzip müssten diese Emissionen im Verkehrssektor berücksichtigt werden, während sie im Herkunftsland als Entnahmen zählen würden. Diese Emissionen werden zwar nicht zu den Gesamtemissionen gezählt, werden aber in den Szenarien trotzdem explizit angegeben. Für die vergleichende Analyse wurden sie dem Territorialprinzip entsprechend im nationalen Verkehrssektor hinzugaddiert.

Genauso wird der Import synthetischer Materialien, die aus abgeschiedenem Kohlenstoff hergestellt sind (mittelfristiges CCU) in den Szenarien betrachtet. In den CARE-Szenarien gehen die CO₂-Emissionen aus der thermischen Verwertung am Ende des Lebenszyklus der Produkte nicht in die Brutto-Emissionen ein. Jener Anteil des CO₂, der abgeschieden und in geologischen Formationen gespeichert wird, geht ebenfalls nicht in die Bilanz ein, sondern wird separat ausgewiesen. In der vorliegenden Analyse wird hingegen nach dem Territorialprinzip vorgegangen: Die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung der importierten synthetischen Produkte werden in die Bilanz im Sektor Energiewirtschaft einbezogen, und das aus diesen Produkten abgeschiedene CO₂ wird in der Bilanz als *FoCCS* gewertet.

Ansonsten entspricht die Bilanzierung von Kohlenstoffmanagement der für die Analyse gewählten Struktur.

4.6 EU 2040 Impact Assessment S2,5

Die für die Analyse relevanten Daten der vier Szenarien des EU 2040 Impact Assessment sind zum einen in der veröffentlichten Langfassung (EC 2024b) verfügbar, wo in diversen Graphiken, Tabellen sowie in Textpassagen relevante Informationen für die Auswertung abzulesen sind. Zudem hat die EU-Kommission eine Excel-Datei mit den Daten zu den Graphiken in der Folgenabschätzung veröffentlicht (EC 2024c). Dies führt zu einem umfangreichen Datensatz, sodass verschiedene Angaben miteinander verglichen und überprüft werden können, um die Logik der Emissionsbilanzierung nachzuvollziehen. Beispielsweise können dadurch die Summen

sektoraler Emissionsprojektionen, die oft in einzelnen Graphiken angegeben sind, mit den Gesamtsummen, die in der Langfassung oft in Tabellen angegeben werden, verglichen werden. Durch Extrapolation können auch Schlussfolgerungen getroffen werden, ob eine Angabe, wie beispielsweise die Emissionserzeugung, den Brutto- oder Netto-Emissionen entspricht.

Dadurch, dass für die EU IA 2040 Szenarien mit Tabellen, Graphiken, Texterläuterungen und Rohdaten im Excel-Format zahlreiche Datenarten verfügbar sind, können diese Szenarien in besonders detailliertem Maße nachvollzogen und verglichen werden. Durch die Menge an Informationen wird die Wahrscheinlichkeit gesteigert, dass unklare Angaben überprüft und verstanden werden können. Dies ist einer der Gründe, weshalb diese Szenarien als Strukturvorlage für die Analyse der deutschen Szenarien gewählt wurde.

Trotzdem offenbart auch das EU IA 2040 Schwächen, wo z. B. Angaben nicht zusammenpassen, nur schwer nachzuvollziehen sind oder THG-Bilanzierungen auf Annahmen basieren, die problematisch oder umstritten sind. Ein Beispiel für letzteres ist die gebündelte Anrechnung aller BECCS-Negativemissionen im Energiesektor, ohne zu unterscheiden, ob die Kraftwerke für Energieerzeugung, beispielsweise Fernwärme, oder für Prozesswärme in der Industrie eingesetzt werden. Für eine saubere Sektortrennung und aussagekräftige Netto- und Brutto-Sektorangaben sollten BECCS-Negativemissionen den Sektoren angerechnet werden, in denen sie anfallen.

Die Szenarien umfassen nur die Gesamtsituation der EU und bieten keine Aufteilung nach Mitgliedsstaaten. Diese Szenarien werden in der vergleichenden Analyse verwendet, um quantitative Annahmen zu den neuen Technologien in den deutschen Szenarien mit denen in der EU, sowie prozentuale Anteile in den Treibhausgasbilanzen zu vergleichen. Dabei wird das Jahr 2050 verwendet, dem Zieljahr der Treibhausgasneutralität auf EU-Ebene. Entsprechend der Analyse in Gores und Graichen (2024) wird der Mittelwert der Szenarien 2 und 3 verwendet, genannt das 2,5 Szenario.

Im Folgenden werden Annahmen, Analysemethoden und Auffälligkeiten für die Auswertung der vier EU IA 2040 Szenarien detailliert beschrieben.

4.6.1 Sektorale Zuordnungen

Die EU IA 2040 Szenarien unterscheiden sich in der sektoralen Zuordnung von Emissionen und Entnahmen teilweise von der für die Analyse gewählten Logik. Letztere orientiert sich, ebenso wie die analysierten deutschen Szenarien, stärker an den Zuordnungen im deutschen Klimaschutzgesetz.

Ein Beispiel für Anpassungen, die vorgenommen wurden, sind Emissionen aus dem Einsatz fossiler Brennstoffe im landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen und Fischereibereich, die der IPCC-Emissionskategorie 1.A.4c entsprechen. Diese werden in den europäischen Szenarien im Gebäudesektor angerechnet, wurden aber für die Analyse in den Landwirtschaftssektor übertragen. Ein weiteres Beispiel sind Emissionen im Sektor „other non-energy“, wo Flüchtige Emissionen und Nicht-CO₂-Emissionen aus direkter Nutzung oder spezifischen Produkten enthalten sind. Diese Kategorie wurde in keinem deutschen Szenario gesondert aufgeführt, sondern ist in den Sektoren Energie und Industrie enthalten. Für die einheitliche Bilanzierung wurden die Emissionen aus diesem Sektor jeweils zur Hälfte dem Energie- und Industriesektor zugeordnet.

Wie oben bereits angesprochen, werden die Negativemissionen durch BECCS-Technologien nur dem Sektor „Stromerzeugung und Fernwärme“ zugeordnet, was dem Energiesektor entspricht. Ob dabei auch BECCS-Anwendung zur Erzeugung von Prozesswärme in der Industrie enthalten sind, wird nicht vollständig geklärt, ist aber anzunehmen. Da allerdings keine Anteile an BECCS-

Entnahmen im Industriesektor angegeben wurden und diese auch nicht durch gerechtfertigte Annahmen zu ermitteln waren, wurden die Angaben zu BECCS übernommen. Dies führt dazu, dass die sektoralen Netto-Angaben in der Energie im anteiligen Vergleich mit deutschen Szenarien etwas geringer sind, die in der Industrie etwas erhöhter, als wenn man BECCS Angaben in Industrie und Energie aufteilt. Wie in den deutschen Szenarien auch, wurden zudem jegliche DACCS Entnahmen getrennt behandelt und nicht dem Energiesektor zur Berechnung der Sektor-spezifischen Netto-Emissionen zugeordnet.

Hinzu kommt, dass im S2,5 Szenario im Gegensatz zu den deutschen Szenarien der internationale Verkehr als Emissions-Kategorie betrachtet wurde. Dabei sind jeweils zwei verschiedene Geltungsbereiche angegeben: „Memo Items“ und „Target Scope“. Dabei wird letztere Kategorie für die Anrechnung der angegebenen Gesamtemissionen genutzt. Für die relativen Vergleiche der sektoralen Emissionen mit den deutschen Szenarien im Analyse-Papier und Szenarien-Tool, wurden die Emissionen aus dem internationalen Verkehr allerdings nicht betrachtet, um die relativen Anteile nicht zu verzerrn.

4.6.2 Kohlenstoffmanagement

Die EU IA 2040 Szenarien enthalten eine detaillierte Beschreibung der Kohlenstoffabscheidung, insbesondere im Jahr 2040. An verschiedenen Stellen werden die Mengen an abgeschiedenem Kohlenstoff abhängig vom bilanzrelevanten Ursprung (Abbildung 9, S. 278), der Endanwendung (Abbildung 10, S. 279) oder der verwendeten Technologien (Abbildung 2, S. 267) angegeben. Die gesamten Kohlenstoffabscheidungsströme sind in Abbildung 11 (S. 280) für das Jahr 2040 zusammengeführt, nach bilanzrelevantem Ursprung (Energie, Industrie, DACC), geographischem Ursprung (fossil, Luft, biogen), und Endanwendung (E-Fuels, geologische Speicherung, mittelfristige Speicherung). Diese Daten gelten durch Vergleich mit den anderen oben genannten Datenquellen als Vorlage, um die verschiedenen Kategorien Kohlenstoffabscheidung im Jahr 2040 zu ermitteln. Eine solch detaillierte Beschreibung der Nutzungspfade des abgeschiedenen Kohlenstoffs ist insbesondere im Hinblick auf die hohen Produktionszahlen von synthetischen Kraftstoffen wünschenswert.

Viele der Angaben in den europäischen Szenarien entsprechen allerdings nicht der für die Analyse gewählten Analyselogik, besonders bei den Kategorien der technischen Entnahmen. Ein Beispiel hierfür ist, dass fossile und biogene Anteile (fossiles WACCS, BWACCS), die in Müllverbrennungsanlagen abgeschieden werden, nicht ausgewiesen werden und wahrscheinlich in den Kategorien „Power Generation“ BECCS und Fossil Fuels enthalten sind. Stoffliche C-Nutzung von Biomasse wurde in den europäischen Szenarien nicht betrachtet, weshalb sich technische Entnahmen vor allem aus BECCS und DACCS, sowie aus Speicherung von biogenem Kohlenstoff in synthetischen Materialien (erst ab 2050) zusammensetzen.

In der Kategorie *FoCCS* werden die für die Analyse benötigten Angaben nicht direkt vollständig angegeben, weshalb auch hier gesonderte Annahmen getroffen werden mussten. Während die Kategorie *FoCCS (Energie)* direkt aus Abbildung 9 (S. 278) übernommen werden kann, muss *FoCCS (Industrie)* und *fossiles CCU (mittelfristig)* aus den Angaben in Tabelle 6 (S. 39) extrahiert werden. Erstere wird aus der Differenz aus abgeschiedenem Kohlenstoff, das in geologische Speicherung fließt, den technischen Entnahmen, wo lediglich BECCS und DACCS enthalten sind (vgl. Tabelle 5, S. 270), und der Kategorie *FoCCS (Energie)* berechnet. *Fossiles CCU (mittelfristig)* ergibt sich aus der Angabe zur Speicherung in synthetischen Materialien in Abbildung 10 (S. 279) sowie dem biogenen Anteil, der in Abbildung 2 (S. 267) angegeben wird. Dieser entspricht der Kategorie *biogenes CCU (mittelfristig)* und stammt aus Biogas-Aufwertungsprozessen. Es wird angenommen, dass kein durch DACC abgeschiedener

Kohlenstoff für mittelfristige Speicherung verwendet wird. Die mittelfristige Speicherung von abgeschiedenem CCU wird allgemein erst ab 2050 betrachtet.

4.6.3 Andere Auffälligkeiten

Insgesamt fallen in den EU-Szenarien im Vergleich zu deutschen Szenarien die besonders hohen Mengen an abgeschiedenem Kohlenstoff auf, der für die Produktion von E-Fuels verwendet wird. Während dies in deutschen Szenarien kaum für inländisch abgeschiedenen Kohlenstoff vorgesehen ist, nehmen die EU-Szenarien einen Großteil der Kohlenstoffabscheidungen für die E-Fuel-Produktion an. Es ist davon auszugehen, dass dabei auch ein Teil an europäischer Produktion enthalten ist, der für den Import nach Deutschland vorgesehen ist.

5 Quellenverzeichnis

Böttcher, H.; Fallasch, F.; Schneider, L.; Siemons, A.; Meyer-Ohlendorf, N. (2024): Sustainability criteria for carbon dioxide removals - Requirements for sustainability criteria in the EU CRCF proposal and elements to be included in a delegated act. German Environment Agency (Hg.). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/sustainability_criteria_for_carbon_dioxid_removals.pdf, zuletzt geprüft am 14.03.2024.

Burchardt, J.; Franke, K.; Herhold, P.; Hohaus, M.; Humpert, H.; Päivärinta, 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.; Lübbbers, 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.; Lechtenböhmer, 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.

Dietz, W.; Schönemann, M.; Seitz, M.; Thiel, N.; Rommel, W. (2024): Nutzungsmöglichkeiten und Potenziale bei Abfallbehandlungsanlagen zur Sektorenkopplung, Energiebereitstellung und CO₂-Abscheidung (113/2024). Umweltbundesamt (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nutzungsmoeglichkeiten-potenziale-bei>, zuletzt geprüft am 09.10.2024.

EC - European Commission (2024a): 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.

EC - European Commission (Hg.) (2024b): Impact Assessment Report - Accompanying the document "Communication from the Commission to the EU. Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society" (SWD(2024) 63 final). Strasbourg. Online verfügbar unter https://climate.ec.europa.eu/document/download/768bc81f-5f48-48e3-b4d4-e02ba09faca1_en?filename=2040%20Climate%20Target%20Impact%20Assessment_en_0.pdf, zuletzt geprüft am 14.10.2024.

EC - European Commission (Hg.) (2024c): Supplementary information - This document provides the data of the graphs as presented in the impact assessment (SWD(2024) 63 final). Version as of 23/04/2024. Online verfügbar unter https://climate.ec.europa.eu/document/download/16af4e8b-11a4-4170-bebb-f90c832d7775_en?filename=policy_targets_2040_IA_Annex_8_graphs.xlsx, zuletzt geprüft am 06.03.2025.

European Parliament (Hg.) (2024): Provisional Agreement on the CRCF Regulation. Regulation establishing a Union certification framework for permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products - adopted by the European Parliament on 10 April 2024. European Union. Online verfügbar unter https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/plmrep/COMMITTEES/ENVI/DV/2024/03-11/Item9-Provisionalagreement-CFCR_2022-0394COD_EN.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2024.

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.; Gutermuth, G.; Garzón-Real, J.; Kerzel, M.; Becker, L. A.; Ruf, J.; Wildgrube, T.; Ulffers, 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-derergebnisse-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.

Jörß, W. (2024): Accounting of negative and neutral emission technologies (NETs) - Finnish case studies on the coverage of BECCS, fossil CCS, enforced concrete carbonation, biochar and e-fuels in GHG inventories and EU targets: EU ETS, ESR, LULUCF and ECL / EU NDC 2030 (Working Paper, 4/2024). Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/en/publications/accounting-of-negative-and-neutral-emission-technologies-nets/>, zuletzt geprüft am 03.12.2024.

Jörß, W. (2025): Optionen für die Definition des Beitrags technischer Senken im Bundes-Klimaschutzgesetz und zugehöriger Ziele (Working Paper, 2/2025). Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oeekodoc/WP-Definition-Beitrag-techn-Senken.pdf>, zuletzt geprüft am 11.02.2025.

Jörß, W.; Emele, L.; Moosmann, L.; Graichen, J. (2022): Challenges for the accounting of emerging negative and zero/low emission technologies (Working Paper, 3/2022). Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oeekodoc/WP-NET-accounting.pdf>, zuletzt geprüft am 22.06.2023.

Jörß, W.; Gores, S.; Siemons, A.; Liste, V.; Lübbbers, S.; Lengning, S. (2024): Herausforderungen zur separaten Ausweisung von Klimazielen für natürliche und technische Senken (Öko-Institut Working Paper, 1/2024). Öko-Institut, Prognos. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de//fileadmin/oeekodoc/WP-Senken-in-Klimazielen.pdf>, zuletzt geprüft am 25.03.2024.

Jörß, W.; Moosmann, L. (2024): Coverage of novel CDR and CCUS in GHG inventories – needs for IPCC guidance (Working Paper, 3/2024). Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikation/coverage-of-novel-cdr-and-ccus-in-ghg-inventories-needs-for-ipcc-guidance/>, zuletzt geprüft am 09.10.2024.

Lübbbers, S.; Hobohm, J.; Thormeyer, C.; Dambeck, H. (2021): Technische CO₂-Senken - Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO₂-Negativemissionstechnologien. Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Prognos. Deutsche Energie Agentur (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Prognos_final.pdf, zuletzt geprüft am 18.09.2023.

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.

Purr, K.; Garvens, H.-J. (2021): Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2021_hgp_ccu_final_bf_out_0.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2021.

Purr, K.; Spindler, J. (2023): Carbon Capture and Storage - Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien (Position). Umweltbundesamt (Hg.). DOI: 10.60810/openumwelt-3631.

Wolff, F.; Gensch, C.-O.; Kampffmeyer, N.; Schöpflin, P.; Lautermann, C.; Gebauer, J.; Schaltegger, S.; Norris, S.; Wüst, S.; Thiel, D.; Buda, F. (2022): Ganzheitliches Management von Energie- und Ressourceneffizienz in Unternehmen: Wie können Rebound-Effekte vermindert werden? - Handlungsoptionen für die Politik. Publikation im Rahmen des Projekts „Ganzheitliches Management von Energie- und Ressourceneffizienz in Unternehmen“ (MERU). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikation/ganzheitliches-management-von-energie-und-ressourceneffizienz-in-unternehmen-wie-koennen-rebound-effekte-vermindert-werden/>, zuletzt geprüft am 02.04.2025.