

CLIMATE CHANGE

84/2025

Zirkuläre Kohlenstoffpfade und THG-Berichterstattung

Teilbericht: Zukünftige Kohlenstoffflüsse und ihre Erfassung

von:

Vicki Duscha
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Anna Ehler, Quirin Oberpriller, Felix Weber
INFRAS, Zürich

Nele Friedrichsen, Alexandra Decker
IREES, Karlsruhe

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 84/2025

KLIFOPLAN des Bundesministeriums für Wirtschaft und
Klimaschutz

Forschungskennzahl 37K2 34 110 0

FB001979

Zirkuläre Kohlenstoffpfade und THG- Berichterstattung

Teilbericht: Zukünftige Kohlenstoffflüsse und ihre
Erfassung

von

Vicki Duscha
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Anna Ehler, Quirin Oberpriller, Felix Weber
INFRAS, Zürich

Nele Friedrichsen, Alexandra Decker
IREES, Karlsruhe

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:

Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48
76135 Karlsruhe

Abschlussdatum:

November 2024

Redaktion:

Fachgebiet V 1.6 Emissions- und Klimaschutzberichterstattung: Dirk Günther / Robert Kludt
Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie: Karlotta Schultz / Maximilian Pagel

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8224>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2025

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

Kurzbeschreibung: Zirkuläre Kohlenstoffpfade und THG-Berichterstattung

Mit den Zielen des Übereinkommens von Paris (ÜvP) und den daraus abgeleiteten Treibhausgasneutralitätszielen für Deutschland (2045) und die EU (2050) sowie den teilweise schon bestehenden Zielen negativer Emissionen kommt dem Kohlenstoff zukünftig eine neue Rolle in unserem Wirtschaftssystem zu. Dabei steht die schnelle und möglichst vollumfängliche Vermeidung von Treibhausgasemissionen (THGs), allen voran Kohlendioxid (CO₂), im Zentrum klimapolitischer Überlegungen. Zum Umgang mit und Ausgleich von verbleibenden Restemissionen und zum Erreichen möglicher Negativemissionen bekommen Speicher und Senken eine neue Rolle, da sie es ermöglichen, dem Kreislauf Kohlendioxid zu entziehen. Gleichzeitig dient Kohlenstoff in einigen Bereichen derzeit als wichtiger Input, z. B. als Basis für Kunststoffe und andere chemische Produkte und als zentraler Bestandteil von flüssigen Kraftstoffen. Solche Kohlenstoffpools, die derzeit z. B. für in Wäldern oder in Holzprodukten gespeicherten Kohlenstoff bereits im Inventar erfasst werden, können zukünftig eine größere Rolle bekommen.

Dieser Bericht beleuchtet die möglichen Pfade einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft und die Herausforderungen, die sich für eine transparente Erfassung dieser Ströme unter den internationalen Berichtspflichten des ÜvP und dem Bundes-Klimaschutzgesetz ergeben. Das Vorgehen ist zweistufig: zunächst werden die denkbaren Kohlenstoffflüsse visualisiert, um damit ein Gesamtverständnis über die zukünftig relevanten Kohlenstoffflüsse zu schaffen. Die Visualisierung baut auf den aktuellen Berichtspflichten zu nationalen Treibhausgasinventaren auf und ergänzt diese um zukünftig mögliche Flüsse einschließlich Quellen für Kohlenstoff, ggf. neu entstehende Nutzungspfade sowie Speicher und Senken. Aufbauend auf den entwickelten Kohlenstoffpfaden werden Hindernisse identifiziert, die derzeit eine adäquate Erfassung in den nationalen Treibhausgasinventaren verhindern. Die Analyse charakterisiert diese Fehlstellen hinsichtlich ihrer Auswirkungen, aber auch hinsichtlich der Möglichkeiten sie zu adressieren.

Abstract: Circular carbon pathways and GHG accounting

In the future, carbon will play a new role in our economic system as a result of the goals of the Paris Agreement (PA) and the greenhouse gas neutrality targets derived from them for Germany (2045) and the EU (2050), as well as the already existing targets of negative emissions. The rapid and comprehensive avoidance of greenhouse gas emissions (GHGs), especially carbon dioxide (CO₂), is at the heart of climate policy thinking. Offsetting remaining residual emissions and achieving possible negative emissions, stores and sinks take on a new role, as they make it possible to remove carbon dioxide from the cycle. At the same time, carbon currently serves as an important input in some areas, for example as a basis for plastics and other chemical products and as a central component of liquid fuels. Such carbon pools, which are currently already included in the inventory of stored carbon, in forests or in harvested wood products, for example, may play a greater role in the future.

This report highlights the possible approaches to a circular carbon economy and the challenges that arise in terms of the transparent monitoring of these flows under the international accounting requirements of the PA and the Federal Climate Action Act. The approach is two-fold: first, the potential carbon flows are visualized in order to create an overall understanding of the carbon flows that will be relevant in the future. The visualisation is based on the current accounting requirements for national greenhouse gas inventories and supplements these with possible future flows, including sources of carbon, newly emerging uses, storage and sinks. Zoom-ins are used to highlight individual aspects of these carbon flows, while an overview map attempts to provide a broader view of future relevant carbon flows. The visualization is done using Sankey diagrams to enable quantitative data to be added to the individual flows in the future.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Zusammenfassung.....	9
Summary	10
1 Einleitung.....	11
2 Konzeption.....	13
2.1 Hintergrund.....	13
2.2 Prinzipien und Struktur der THG-Inventare heute.....	13
2.2.1 CRT-Tabellen	14
2.2.2 CRT-Sektoren	14
2.2.3 Weitere relevante Grundregeln.....	16
2.3 Visualisierung von möglichen Kohlenstoffpfaden	17
2.3.1 Rahmen der Analyse	17
2.3.2 Methodik der Grafischen Aufbereitung.....	18
3 Kohlenstoffflüsse in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft.....	20
3.1 Elemente der Abbildungen	20
3.2 Visualisierung der Flüsse innerhalb der Kohlenstoffwirtschaft	21
3.2.1 Zoom-In: Kohlenstoffquellen	21
3.2.2 Zoom-In: Kohlenstoffspeicher und -senken.....	23
3.2.3 Zoom-In: Kohlenstoffpfade und Kohlenstoffpools in der Industrie.....	26
3.2.4 Zoom-In: Kohlenstoffflüsse der Chemischen Industrie.....	30
3.2.5 Übersichtsabbildung	33
4 Fehlstellenanalyse	35
4.1 Vorgehen für die Identifikation und Beurteilung von Fehlstellen	35
4.2 Ergebnisse der Fehlstellenanalyse	36
4.2.1 Übersicht.....	36
4.2.2 In den THG-Inventaren (CRT) abbildbare Kohlenstoffpfade.....	40
4.2.3 Fehlstellen.....	41
Quellenverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Elemente der Sankey-Diagramme.....	20
Abbildung 2:	Zoom-In Kohlenstoffquellen.....	22
Abbildung 3:	Zoom-In Kohlenstoffspeicher und -senken	25
Abbildung 4:	Zoom-In Kohlenstoffpfade und Kohlenstoffpools in der Industrie mit differenzierten C-Flüssen.....	29
Abbildung 5:	Zoom-In Kohlenstoffflüsse der Chemischen Industrie mit Teilen der Energiewirtschaft	32
Abbildung 6:	Kohlenstoffflüsse in der Transformation zu einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft im Überblick.....	33
Abbildung 7:	Grafische Darstellung der Fehlstellen in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft	40
Abbildung 8:	Grafische Darstellung der Auswirkungen von Fehlstellen auf weitere Flüsse.....	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fehlstellen und potenzielle Herkunft des Kohlenstoffs in der zirkulären Kohlenstoffwirtschaft	37
------------	--	----

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BECCS	Bioenergy Carbon Capture and Storage
CC	Carbon Capture
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Usage
CDR	Carbon Dioxide Removals
CO ₂	Kohlendioxid
CRCF	Carbon Removal Certification Framework
CRT	Common Reporting Tables
DAC	Direct Air Capture
DOC	Direct Ocean Capture
ETF	Enhanced Transparency Framework
EU	Europäische Union
HWP	Harvested Wood Products (Holzprodukte)
HFCs	Hydrofluorocarbons
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPU	Industrial Processes and Product Use
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry
MVA	Müllverbrennungsanlagen
MPGs	Modalities, Procedures and Guidelines
OCC	Onboard Carbon Capture
PFCs	Perfluorocarbons
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin
THG	Treibhausgase
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
ÜvP	Übereinkommen von Paris

Zusammenfassung

Mit den Zielen des Übereinkommens von Paris (ÜvP) und den daraus abgeleiteten Treibhausgasneutralitätszielen für Deutschland (2045) und die EU (2050) sowie den teilweise schon bestehenden Zielen negativer Emissionen kommt dem Kohlenstoff zukünftig eine neue Rolle in unserem Wirtschaftssystem zu. Dabei steht die schnelle und möglichst vollumfängliche Vermeidung von Treibhausgasemissionen (THGs), allen voran Kohlendioxid (CO₂), im Zentrum klimapolitischer Überlegungen. In Bereichen, in denen eine Vermeidung nicht möglich ist, stellen der Einsatz von CO₂-Abscheidung aus dem Abgasstrom oder eine andere Form der Separierung von Kohlenstoff z. B. durch Pyrolyse und die Einspeicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) oder erneute Nutzung (Carbon Capture and Usage – CCU) des abgeschiedenen Kohlenstoffs Möglichkeiten dar, eine Emission des CO₂ in die Atmosphäre zu verhindern. Zum Ausgleich verbleibender Restemissionen und zum Erreichen möglicher Negativemissionen bekommen Speicher und Senken eine neue Rolle, da sie es ermöglichen, dem Kreislauf Kohlendioxid zu entziehen. Gleichzeitig dient Kohlenstoff in einigen Bereichen derzeit als wichtiger Input, z. B. als Basis für Kunststoffe und andere chemische Produkte und als zentraler Bestandteil von flüssigen Kraftstoffen. Solche Kohlenstoffpools, die derzeit z. B. für in Wäldern oder in Holzprodukten gespeicherten Kohlenstoff bereits im Inventar erfasst werden, können zukünftig eine größere Rolle bekommen.

Dieser Bericht beleuchtet die möglichen Pfade einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft und die Herausforderungen, die sich für eine transparente Erfassung dieser Ströme unter den internationalen Berichtspflichten des ÜvP und dem Bundes-Klimaschutzgesetz ergeben. Das Vorgehen ist zweistufig: zunächst werden die denkbaren Kohlenstoffflüsse visualisiert, um damit ein Gesamtverständnis über die zukünftig relevanten Kohlenstoffflüsse zu schaffen. Die Visualisierung baut auf den aktuellen Berichtspflichten zu nationalen Treibhausgasinventaren auf und ergänzt diese um zukünftig mögliche Flüsse einschließlich Quellen für Kohlenstoff, ggf. neu entstehende Nutzungspfade sowie Speicher und Senken. Mit Hilfe von Zoom-Ins werden einzelne Aspekte dieser Kohlenstoffpfade näher beleuchtet, eine Übersichtsabbildung versucht einen generellen Überblick über zukünftig relevante Kohlenstoffflüsse zu geben. Die Visualisierung erfolgt über Sankey-Diagramme, um zukünftig die Aufnahme von Mengenangaben zu den einzelnen Flüssen zu ermöglichen.

Aufbauend auf den entwickelten Kohlenstoffpfaden werden Hindernisse identifiziert, die derzeit eine adäquate Erfassung in den nationalen Treibhausgasinventaren verhindern. Die Analyse charakterisiert diese Fehlstellen hinsichtlich ihrer Auswirkungen, aber auch hinsichtlich der Möglichkeiten sie zu adressieren.

Summary

In the future, carbon will play a new role in our economic system as a result of the goals of the Paris Agreement (PA) and the greenhouse gas neutrality targets derived from them for Germany (2045) and the EU (2050), as well as the already existing targets of negative emissions. The rapid and comprehensive avoidance of greenhouse gas emissions (GHGs), especially carbon dioxide (CO₂), is at the heart of climate policy thinking. In areas where avoidance is not possible, the use of carbon capture from the exhaust gas stream and the storage (carbon capture and storage, CCS) or reuse (carbon capture and usage – CCU) of the captured carbon dioxide are ways to prevent the emission of carbon dioxide into the atmosphere. Offsetting remaining residual emissions and achieving possible negative emissions, stores and sinks take on a new role, as they make it possible to remove carbon dioxide from the cycle. At the same time, carbon currently serves as an important source material in some areas, for example as a basis for plastics and other chemical products and as a central component of liquid fuels. Such carbon pools, which are currently already included in the inventory of stored carbon, in forests or in harvested wood products, for example, may play a greater role in the future.

This report highlights the possible approaches to a circular carbon economy and the challenges that arise in terms of the transparent monitoring of these flows under the international accounting requirements of the PA and the Federal Climate Action Act. The approach is two-fold: first, the potential carbon flows are visualized in order to create an overall understanding of the carbon flows that will be relevant in the future. The visualization is based on the current accounting requirements for national greenhouse gas inventories and supplements these with possible future flows, including sources of carbon, newly emerging uses, storage and sinks. Zoom-ins are used to highlight individual aspects of these carbon flows, while an overview map attempts to provide a broader view of future relevant carbon flows. The visualization is done using Sankey diagrams to enable quantitative data to be added to the individual flows in the future.

Based on the carbon pathways developed, obstacles are identified that currently prevent adequate monitoring in national greenhouse gas inventories. The analysis classifies these gaps in terms of their implications, but also in terms of the options for addressing them.

1 Einleitung

Mit den Zielen des Übereinkommens von Paris (ÜvP) und den daraus abgeleiteten Treibhausgasneutralitätszielen für Deutschland (2045) und die EU (2050) sowie den teilweise schon bestehenden Zielen negativer Emissionen kommt dem Kohlenstoff zukünftig eine neue Rolle in unserem Wirtschaftssystem zu. Dabei steht die schnelle und möglichst vollumfängliche Vermeidung von Treibhausgasemissionen (THGs), allen voran Kohlendioxid (CO₂), im Zentrum klimapolitischer Überlegungen. Dies erstreckt sich über alle Sektoren. Ein zentrales Element ist dabei die Vermeidung der Entstehung von Treibhausgasen z. B. durch Veränderungen im Energieträgereinsatz sowie den Produkten und Produktionsprozessen. In Bereichen, in denen eine Vermeidung nicht möglich ist, stellen der Einsatz von CO₂-Abscheidung aus dem Abgasstrom und die Einspeicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) oder erneute Nutzung (Carbon Capture and Usage – CCU) des abgeschiedenen Kohlendioxids Möglichkeiten dar, eine Emission des CO₂ in die Atmosphäre zu verhindern. Zum Ausgleich verbleibender Restemissionen und zum Erreichen möglicher Negativemissionen bekommen Speicher und Senken eine neue Rolle, da sie es ermöglichen, dem Kreislauf Kohlendioxid zu entziehen. Dabei können sowohl natürliche Prozesse wie z. B. das Einbinden von Kohlendioxid in Biomasse als auch technische Ansätze wie die Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture – DAC) oder die Abscheidung aus dem Ozean (Direct Ocean Capture – DOC) eine Rolle als Quelle für die Bereitstellung von atmosphärischem zur Substitution von fossilem Kohlenstoff oder in Kombination mit der Speicherung (DACCS, DOCCS) als technische Senke spielen. Weiterhin ist die Speicherung in geologischen Formationen oder im Ozean in Form von gebundenem Kohlenstoff in Pflanzenkohle und in Böden oder in Form von dauerhaft bestehendem Wald relevant.

Gleichzeitig ist Kohlenstoff in einigen Bereichen ein wichtiger Input, z. B. als Basis für Kunststoffe und andere chemische Produkte und als zentraler Bestandteil von flüssigen Kraftstoffen. Derzeit ist dieser Kohlenstoff überwiegend fossilen Ursprungs. Zwar gibt es Biomasse-basierte Alternativen, jedoch ist die Nutzung von Biomasse mit Herausforderungen verbunden. Die Nutzung (und Freisetzung) des Kohlenstoffs konkurriert mit einer langfristigen Speicherung in biogenem Material. Nachhaltige Biomasse stellt eine begrenzte Ressource dar, eine hohe Nachfrage gefährdet die Einhaltung von strengen Nachhaltigkeitskriterien. Nicht zuletzt besteht zudem eine Nutzungskonkurrenz mit landwirtschaftlichen Flächen zur Nahrungsmittelherstellung.

Das Rezyklieren von kohlenstoffhaltigen Produkten (insbesondere Kunststoffe) wird derzeit in Deutschland und der EU nur in geringem Maße umgesetzt. 89 % aller Kunststoffverpackungen bestehen aus Neumaterial, gleichzeitig werden mehr als 50 % der Verpackungsabfälle verbrannt (WWF 2021). Die Kreislaufführung von in Produkten gebundenem aber auch von abgeschiedenem CO₂ sind essenzielle Elemente einer zukünftigen THG-neutralen Kohlenstoffwirtschaft.

Zentrales Instrument der Treibhausgas Erfassung ist die Erstellung nationaler Treibhausgasinventare. Unter dem ÜvP und dem damit verbundenen Transparenzrahmen wurden die Guidelines zur Berechnung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen überarbeitet und angepasst. CCS und insbesondere Kohlenstoffkreisläufe spielten in den bisherigen Überarbeitungen der Regelungen zur Treibhausgasberichterstattung jedoch nur eine untergeordnete Rolle. 2027 plant der IPCC einen Methodenbericht zur Abbildung von Negativemissionen in den Inventaren (noch ohne verbindliche Vorgaben) vorzulegen.

Dieser Bericht beleuchtet die möglichen Pfade einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft und die Herausforderungen, die sich für eine transparente Erfassung dieser Ströme unter den

internationalen Berichtspflichten des ÜvP und dem Bundes-Klimaschutzgesetz ergeben. Das Vorgehen ist zweistufig: zunächst werden die denkbaren Kohlenstoffflüsse visualisiert, um damit ein Gesamtverständnis über die zukünftig relevanten Kohlenstoffflüsse zu schaffen. Die Visualisierung baut auf den aktuellen Berichtspflichten zu nationalen Treibhausgasinventaren auf und ergänzt diese um zukünftig mögliche Flüsse einschließlich Quellen für Kohlenstoff, ggf. neu entstehende Nutzungspfade sowie Speicher und Senken. Mit Hilfe von Zoom-Ins werden einzelne Aspekte dieser Kohlenstoffpfade näher beleuchtet, eine Übersichtsabbildung versucht einen generellen Überblick über zukünftig relevante Kohlenstoffflüsse zu geben. Die Visualisierung erfolgt über Sankey-Diagramme, um zukünftig die Aufnahme von Mengenangaben zu den einzelnen Flüssen zu ermöglichen.

Aufbauend auf den entwickelten Kohlenstoffpfaden werden Hindernisse identifiziert, die derzeit eine saubere Erfassung in den nationalen Treibhausgasinventaren verhindern. Die Analyse charakterisiert diese Fehlstellen hinsichtlich ihrer Auswirkungen, aber auch hinsichtlich der Möglichkeiten, sie zu adressieren.

2 Konzeption

2.1 Hintergrund

Wie einleitend dargestellt, wird sich die Rolle des Kohlenstoffs in der Zukunft deutlich verändern müssen, um die Ziele des ÜvP zu erreichen: Emissionen müssen erheblich reduziert werden, die Einspeicherung von Kohlenstoff und Senken (Entnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre) müssen maßgeblich ausgeweitet werden, gleichzeitig bekommt Kohlenstoff nicht-fossilen Ursprungs eine neue Rolle als Rohstoff insbesondere in der chemischen Industrie und ggf. in der Herstellung von Energieträgern.

Die internationale THG-Berichterstattung stellt das zentrale Instrument dar, um die Entwicklung der nationalen Emissionen zu verfolgen. Neben der Erfüllung internationaler Berichtspflichten dient das deutsche THG-Inventar auch als Grundlage zur Zielsetzung und Nachverfolgung der Zielerfüllung unter dem deutschen Bundes-Klimaschutzgesetz. Damit ist es ein zentrales Element der nationalen Klimapolitik. Eine lückenlose Erfassung aller anthropogenen territorialen Treibhausgasemissionen, die gleichzeitig Doppelerfassungen ausschließt, stellt die Basis dazu dar. Diese wird mit dem Transparenzrahmen unter dem ÜvP, den zugehörigen Guidelines und den entsprechenden Guidelines des IPCC zur THG-Berichterstattung geschaffen. Aus diesem Grund nutzen wir die aktuell verwendeten Regelungen zur THG-Berichterstattung als Basis zur Entwicklung und Visualisierung zukünftig möglicher Kohlenstoffpfade (Kapitel 3) sowie zur Identifikation von Fehlstellen (Kapitel 4)

In diesem Kapitel erläutern wir die grundlegenden Prinzipien und Strukturen der heutigen THG-Inventare und stellen die Elemente der Visualisierung vor.

2.2 Prinzipien und Struktur der THG-Inventare heute

Emissionsberichterstattung unter dem Übereinkommen von Paris

Die „Modalities, Procedures and Guidelines“ (MPGs) des „Enhanced Transparency Framework“ (ETF) unter dem Übereinkommen von Paris bilden die Grundlage für die Emissionsberichterstattung.

Die MPGs legen fest, wie die Vertragsparteien über ihre Treibhausgasemissionen, Klimaschutzmaßnahmen und Unterstützungsleistungen berichten müssen. Ziel ist es, ein klares Verständnis über die Fortschritte bei der Erreichung der Klimaziele zu vermitteln und die Transparenz zu erhöhen. In den MPGs wird auf die IPCC-Richtlinien verwiesen, welche standardisierte Methoden zur Berechnung und Berichterstattung von Emissionen beschreiben.

IPCC-Richtlinien

Unter der «United Nations Framework Convention on Climate Change» (UNFCCC) haben sich die Länder verpflichtet, nationale Treibhausgasinventare einzureichen. Die «IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories» sind detaillierte Richtlinien, welche die Methodik zur Erstellung der Treibhausgasinventare beschreiben. Die Richtlinie stammt aus dem Jahr 2006 und wurde in vielen Bereichen in den Jahren 2013 und 2019 überarbeitet¹. Hinsichtlich der Genauigkeit der Erhebungsmethoden wird zwischen verschiedenen «Tiers» unterschieden, welche die vorhandenen Daten und Ressourcen zur Erstellung der Inventare berücksichtigen (IPCC, 2006):

¹ Die Überarbeitungen von 2013 und 2019 werden jedoch nicht konsequent angewendet.

- ▶ Tier 1 ist am einfachsten anzuwenden und nutzt aggregierte Standardparameter (teils länderspezifisch). Die Unsicherheit ist höher als in den anderen Tiers.
- ▶ Tier 2 verlangt, dass die Parameter stärker disaggregiert werden, bestenfalls mit landesspezifischen Daten (AR / EF).
- ▶ Tier 3 verlangt die bestverfügbaren Methoden, wie Modelle und Inventarmesssysteme, die auf die nationalen Gegebenheiten zugeschnitten sind und die bestmöglichen Inputdaten verwenden (anlagenspezifische Daten (AR / EF)).

2.2.1 CRT-Tabellen

Ein zentrales Instrument des Treibhausgasinventars sind die sogenannten "Common Reporting Tables" (CRT). Diese Tabellen dienen der standardisierten Berichterstattung der Treibhausgasemissionen und -senken der einzelnen Länder und ermöglichen eine konsistente und vergleichbare Erfassung der Treibhausgasemissionen/-senken weltweit. (UNFCCC, 2021).

Die CRT-Tabellen sind in die unten beschriebenen fünf Sektoren und deren Untersektoren unterteilt. Die Tabellen umfassen Emissionen und Senken von Treibhausgasen, darunter CO₂, CH₄, N₂O und F-Gase (z. B. HFCs, PFCs, SF₆ und NF₃). Die CRT-Tabellen sind nach Jahren (ab 1990) gegliedert, so dass die Entwicklung der Emissionen/Senken über die Jahre hinweg verfolgt werden kann. Jede Tabelle für jeden Untersektor enthält detaillierte Aktivitätsdaten (z. B. Menge der verbrauchten Kraftstoffe) und weist implizite Emissionsfaktoren aus, die sich je Treibhausgas errechnen. Dies gewährleistet eine transparente und nachvollziehbare Emissionsberichterstattung sowie internationale Vergleichbarkeit.

2.2.2 CRT-Sektoren

Die Struktur des Treibhausgasinventars ist in den «MPGs» (modalities, procedures and guidelines) festgelegt, in welchen fünf Sektoren definiert sind. Die IPCC-Richtlinie ist in diese fünf Sektoren aufgeteilt. Im Folgenden werden diese Sektoren kurz im Hinblick auf ihre Relevanz für die CO₂-Abscheidungs (Carbon Capture - CC) Prozesse beschrieben.

CRT-Sektor 1: Energie

Der Energie-Sektor wird in Volume 2 der Richtlinie beschrieben. Er ist in Deutschland (und in den meisten anderen Ländern) der mit Abstand treibhausgasintensivste Sektor und umfasst rund 85 % der THG-Emissionen (ohne LULUCF). Er beinhaltet die Bereiche Energiewirtschaft, Gewerbe, Verkehr und übrige Feuerungsanlagen. Relevant für die Erfassung von CC sind vor allem

- ▶ Volume 2, Chapter 2.3.4: Stationary combustion systems (mainly electric power and heat production plants)
- ▶ Volume 2, Chapter 4.2.1. Natural gas and Hydrogen Processing Plants

Zudem beschäftigt sich Volume 2, Chapter 5 explizit mit CCS. Darin wird aber nicht die CO₂-Abscheidung behandelt (um eine Doppelzählung zu vermeiden), sondern nur Emissionen aus Transport, Injektion und Speicherung:

- ▶ Volume 2, Chapter 5.4: Emissionen im Zusammenhang mit dem Transportsystem (Kategorie 1.C.1), d.h. CO₂-Transport über Pipelines, Schiffe und andere (z. B. zeitliche Lagerung)

- ▶ Volume 2, Chapter 5.5: Emissionen im Zusammenhang mit der Injektion (Kategorie 1.C.1). Keine Tier 1 Methode verfügbar (keine Standardparameter); erlaubt sind nur spezifische Abschätzungen
- ▶ Volume 2, Chapter 5.6 Emissionen im Zusammenhang mit der geologischen Speicherung. Keine Tier 1 Methode verfügbar (keine Standardparameter); erlaubt sind nur spezifische Abschätzungen

CRT-Sektor 2: Industrieprozesse

Die prozessbedingten Emissionen des Industrie-Sektors werden in Volume 3 der Richtlinie beschrieben. Prozessbedingte Emissionen sind z. B. geogene CO₂-Emissionen der Zementindustrie oder CO₂-Emissionen der Stahlproduktion oder Lachgasemissionen der Chemieindustrie. Verbrennungsbedingte Emissionen sind in CRT-Sektor 1 abgedeckt. Der CRT-Sektor 2 umfasst in Deutschland rund 7,5 % der THG-Emissionen (ohne LULUCF), vor allem durch die Emissionen der Zement, Stahl und Chemieindustrie. Relevant für die Erfassung von CC sind vor allem Volume 3 (IPPU) Chapter 1.2.2 Capture and abatement, für eine allgemeine Beschreibung und speziell

- ▶ Volume 3, Chapter 2.2, Cement manufacture
- ▶ Volume 3, Chapter 3.2 Ammonia production
- ▶ Volume 3, Chapter 3.9, Methanol manufacture
- ▶ Volume 3, Chapter 4.2 Iron and steel manufacture

Bei der stofflichen Nutzung von Kohlenwasserstoffen wird der im Produkt gebundene Kohlenstoff über Massenbilanzen berücksichtigt (abgezogen), z. B. bei der Methanolherstellung oder der Produktion von Ruß. Entstehen Emissionen in der Nutzungsphase dieser Produkte, werden diese in der mit der Nutzung verbundenen Kategorie bilanziert.

CRT-Sektor 3: Landwirtschaft

Der Landwirtschafts-Sektor wird im ersten Teil des Volume 4 der Richtlinie beschrieben. Er umfasst in Deutschland rund 7.5 % der THG-Emissionen (ohne LULUCF), vor allem Methanemissionen der Rindviehhaltung sowie Methan- und Lachgasemissionen durch Dünger.

Prinzipiell sind die landwirtschaftlichen Prozesse relevante Kohlenstoffquellen bzw. -senken. Die CO₂-Flüsse, die durch landwirtschaftliche Prozesse in Böden entstehen, werden jedoch im LULUCF-Sektor (CRT 4.B, siehe unten) erfasst und nicht im landwirtschaftlichen Sektor (CRT 3). Daher ist der Sektor CRT 3 kein Fokus für die Fehlstellenanalyse im Zusammenhang mit Kohlenstoffflüssen in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft.

CRT-Sektor 4: LULUCF

Der LULUCF-Sektor umfasst Quellen und Senken aus Wäldern, Agrar-, Gras- und Feuchtgebieten und Siedlungen, sowie die Speicherung von Kohlenstoff in Holzprodukten und deren spätere Freisetzung^{2,3}. Er berücksichtigt Emissionen und Senken (i) innerhalb dieser Kategorien und (ii) Veränderungen zwischen diesen Kategorien. Als Senke innerhalb einer dieser Kategorien kann nur CO₂ fungieren, während Quellen aus CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen resultieren. CO₂ ist das wichtigste Treibhausgas im LULUCF-Sektor, aber da sich Quellen und Senken teilweise

² forests-, crop-, grass- and wetlands, settlements and harvested wood products (HWP)

³ Das 2019 Refinement zu den 2006 IPCC-Leitlinien ist insbesondere für den Sektor HWP wichtig, da es aktualisierte methodische Richtlinien und Emissionsfaktoren bereitstellt. Siehe: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html> (zuletzt geprüft am 31.10.2024)

aufheben, ist der Nettoeffekt in etwa vergleichbar mit dem der CH₄-Emissionen. N₂O-Emissionen spielen eine untergeordnete Rolle.

Eine korrekte Erfassung der naturbasierten Lösung betrifft vor allem den LULUCF-Sektor (neben der Landwirtschaft).

In Deutschland sind die Netto-Emissionen aus dem LULUCF-Sektor in manchen Jahren leicht positiv, in anderen leicht negativ. Die Emissionen von CH₄ (und N₂O) wirken als Quellen, der Netto-CO₂-Effekt als Senke. Dabei sind Grün- und Ackerland CO₂-Quellen, während vor allem Wälder CO₂-Senken sind. Darüber hinaus wirken in geringem Umfang auch verbaute Holzprodukte als CO₂-Senken.

Der LULUCF-Sektor ist somit ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Kategorien und Treibhausgase. Zudem ist die Unsicherheit fast aller Komponenten deutlich höher als in anderen Sektoren, in denen die Emissionen oft genau gemessen werden können. Im Gegensatz dazu werden Quellen und Senken im LULUCF-Sektor in der Regel auf der Grundlage einer Reihe von Annahmen und unsicheren Parametern modelliert.

CRT-Sektor 5: Abfall

Der Abfall-Sektor wird in Volume 5 der Richtlinie beschrieben. Er umfasst in Deutschland weniger als 1 % der THG-Emissionen (ohne LULUCF), vor allem aus Methanemissionen durch die Abfalldeponierung sowie Behandlung von Abwasser und festen Abfällen. Historisch waren die Emissionen durch Abfalldeponierung dominierend. Diese sind jedoch stark rückläufig, da die Deponierung organischer Frachten seit 2005 verboten ist (teilweise durch Aufbereitung und Abfallverbrennung ersetzt). Die Abfallverbrennung wiederum ist in Deutschland vollständig an die Energieerzeugung gekoppelt. Um Doppelzählungen zu vermeiden, werden die Emissionen aus der Abfallverbrennung daher im Energieteil ausgewiesen (CRT 1), v.a. in Müllverbrennungsanlagen (CRT 1.A.1.a). Auch eine Verwendung als alternativer Brennstoff in der Zementindustrie wird berichtet (CRT 1.A.2.f).

Der Abfallsektor ist derzeit kein Fokus für die Fehlstellenanalyse im Zusammenhang mit Kohlenstoffflüssen in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft, da seine Rolle eher gering ist. Allerdings könnte seine Bedeutung in Zukunft zunehmen, zum Beispiel wenn neuartige, inerte, kohlenstoffangereicherte Baumaterialien im Abfall landen, bei denen die langfristige Kohlenstoffspeicherung gewährleistet werden muss.

2.2.3 Weitere relevante Grundregeln

Die IPPC-Richtlinien haben des Weiteren folgende relevante Grundregeln.

Territorialprinzip und Absatzprinzip

Das Territorialprinzip ist ein zentrales Konzept in der internationalen Emissionsberichterstattung und den IPPC-Richtlinien. Es bildet die Grundlage für die Berechnung der Treibhausgasemissionen eines Landes (nationale Gesamtemissionen). Dabei werden alle Emissionen berücksichtigt, die innerhalb der geografischen Grenzen des Landes entstehen. Emissionen, die außerhalb der Landesgrenzen entstehen, werden nicht angerechnet (aber teilweise berechnet und nachrichtlich ausgewiesen wie bei internationalen Verkehren).

Beim Kraftstoffverbrauch gilt das Absatzprinzip, d.h. es wird die Menge an Kraftstoffen angerechnet, die während des Jahres im Inland abgesetzt wurde. Unabhängig davon, ob diese im Inland verbraucht werden oder nicht (z. B. im Straßenverkehr). Eine Ausnahme bildet der Flug- und Schiffsverkehr. Bei diesem wird nur der Kraftstoffverbrauch für die inländischen Anteile

den nationalen Gesamtemissionen zugerechnet. Der internationale Anteil wird separat als Memo Item im Treibhausgasinventar ausgewiesen.

Biogene CO₂-Emissionen

CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse in Anlagen der Sektoren 1 werden zwar erhoben und im Treibhausgasinventar ausgewiesen, allerdings werden diese nicht den nationalen Gesamtemissionen angerechnet. Findet bei einer Anlage zur Verbrennung von Biomasse zusätzliche eine CO₂-Abscheidung statt (z. B. BECCS), können gemäss Richtlinien für die jeweilige Anlage beim CO₂ negative Werte ausgewiesen werden⁴. Davon ausgehend, dass die Biomassenutzung im Gleichgewicht ist (Sektor 3 Landwirtschaft und Sektor 4 LULUCF)⁵, entspricht dies einer potenziellen negativen Emission. Die nach der Abscheidung folgenden Emissionen aus CO₂-Transport, CO₂-Verpressung und CO₂-Speicherung sind zu erfassen, unabhängig davon, ob der Kohlenstoff fossilen oder biogenen Ursprungs ist.

2.3 Visualisierung von möglichen Kohlenstoffpfaden

2.3.1 Rahmen der Analyse

Mit der zukünftig zu erwartenden Kohlenstoffkreislaufwirtschaft ergeben sich Herausforderungen an die Erfassung im THG-Inventar. Die folgende Analyse hat das Ziel, die aus Inventarsicht relevanten Flüsse einer solchen Wirtschaft zu erfassen und geeignet abzubilden. Die tatsächlichen Kohlenstoffflüsse innerhalb der einzelnen Herstellungsprozesse und Verfahrensschritte sind vielfältig und kleinteilig. Für die Darstellung und Bewertung der Flüsse hinsichtlich ihrer THG-Wirkung und ihre Aufnahme in nationale Inventare ist diese Kleinteiligkeit jedoch nicht erforderlich, sondern verhindert die Übersicht. Daher werden die einzelnen Prozessschritte und Wege in geeigneten Pfaden zusammengefasst. Der Fokus liegt auf der Abbildung jener Umwandlungsschritte, an denen Emissionen frei werden (können). Zudem sind Pools für die Abbildung erforderlich, d.h. Zwischenspeicher, in denen Kohlenstoff temporär in Biomasse, Energieträger, diversen Produkten oder Rest- und Abfallstoffen gebunden ist. Diese können für den Zeitraum ihrer Nutzung als vorübergehende Kohlenstoffspeicher dienen und werden emissionsrelevant, sobald der Kohlenstoff wieder freigesetzt wird. Schließlich orientieren sich die verwendete Sektorklassifizierung sowie die Flüsse an den Vorgaben der Inventare.

Zur Bewertung der Emissionswirkung von Kohlenstoffpfaden ist es erforderlich, den Ursprung des Kohlenstoffs zu erfassen. Soweit möglich wird dabei differenziert nach atmosphärisch, biogen, geogen, fossil und rezykliert. Der Ursprung des Kohlenstoffs wird in den Flüssen separat abgebildet. Derzeit ist diese Nachverfolgbarkeit oftmals bereits möglich (bspw. hinsichtlich biogener Brennstoff-Anteile). In anderen Fällen wie bei atmosphärischem Kohlenstoff dagegen erfolgt bisher im Inventar überhaupt keine Erfassung. An manchen Stellen insbesondere in den Pools verliert sich (derzeit) die Nachverfolgbarkeit des Kohlenstoffursprungs (bspw. in der Herstellung von Kunststoffen, die dann als Abfall in der Müllverbrennung eingesetzt werden). In der Fehlstellenanalyse in Abschnitt 4 wird dieser Punkt aufgegriffen.

Der Fokus der Analyse liegt auf solchen Pfaden, die bilanzierungsrelevant sind. Unterjährig anfallende Nutzungen wie bspw. Kohlenstoff in Getränken oder Gewächshäusern werden in der

⁴ Siehe dazu folgende Fußnote aus CRT-Tabelle 1A(a)s4: „(3) Although CO₂ emissions from biomass are reported in this table, they will not be included in the total CO₂ emissions from fuel combustion. The value for total CO₂ emissions from biomass is recorded in table1 under the memo items. If CO₂ is captured from biomass combustion and transferred to long-term storage, the recovered amounts should be reflected in the total emission for the sector, i.e. contribute with a negative emission. See the 2006 IPCC Guidelines (vol. 2, chap.2, p2.37; and chap. 5, p.5.8).“

⁵ Emissionen aus der Biomasseproduktion werden im Sektor 3 oder 4 berücksichtigt.

Regel ausgeklammert. Kraftstoffe (mit biogenem, atmosphärischem oder rezykliertem Kohlenstoff) verbleiben jedoch im Untersuchungsrahmen, da sie insbesondere hinsichtlich synthetischer Treibstoffe und CCU eine relevante Rolle spielen, auch wenn ihre Nutzung und Emissionswirkung unterjährig sein könnte (siehe auch Abschnitt 4).

Obwohl grundsätzlich der Versuch unternommen wurde, alle relevanten Emissionsquellen in die Abbildungen aufzunehmen, gibt es eine Ausnahme, um die Übersichtlichkeit der Abbildungen nicht weiter einzuschränken: nicht in den Abbildungen berücksichtigt sind Emissionen aus Leckagen bei der Förderung von fossilen Energieträgern und dem Transport von Energieträgern (fossil oder synthetisch) und CO₂ (CRT 1.B).

2.3.2 Methodik der Grafischen Aufbereitung

Zur Visualisierung der Flüsse werden Sankey-Diagramme verwendet. Die Sankey-Diagramme verbinden die Kohlenstoffquellen über verschiedene Zwischenschritte mit den Kohlenstoffsenken und -speichern. Eine spezielle Rolle kommt dabei der Atmosphäre und dem Ozean zu: einerseits stellen sie Quellen zur Gewinnung von Kohlenstoff dar (z. B. bei biogenem Kohlenstoff oder CO₂-Abscheidung aus der Luft oder dem Ozean (direct air capture (DAC)/ direct ocean capture (DOC))), andererseits stellen sie Speicher dar, die ausgestoßenes CO₂ aufnehmen.

Die Sankey-Diagramme sind in der derzeitigen Version rein qualitativ, d.h. sie beinhalten keine Information über die Relevanz (d.h. Menge) der Flüsse. Der Fluss kann gasförmig, flüssig oder fest sein oder in Produkten gebundenen Kohlenstoff beinhalten. In einem späteren Schritt könnten Mengeninformationen ergänzt werden. Da es für die Bewertung der THG-Relevanz eines Pfades zentral ist, welchen Ursprung der Kohlenstoff hat, wird diese Information soweit möglich in den Abbildungen hinterlegt (unterschiedliche Farbe der Flüsse). Emissionsleckagen im Zusammenhang mit der Speicherung von CO₂ sind unabhängig vom Kohlenstoffursprung zu erfassen und als Emissionen auszuweisen. Ebenso kann es vorkommen, dass bei «rezykliertem CO₂» die Information welchen Ursprung das rezyklierte CO₂ hat, nicht immer bekannt ist. Zur Verdeutlichung der Tatsache, dass der Ursprung teilweise unbekannt ist, wurde ein Mix-Pfad für Kohlenstoff unklarer Herkunft hinzugefügt. In den Abbildungen wird jedoch nicht zwischen verschiedenen Unterarten einer Quelle (z. B. Anbau- vs. Abfall-Biomasse) oder dem Aggregatzustand des Kohlenstoffs (gasförmig oder gebunden) unterschieden.

An den Enden der Pfade werden Speicher und Senken in der Visualisierung getrennt dargestellt, um eine klare Differenzierung zwischen Negativemissionen und Speicherung von aufgefangenen fossilen und geogenen Emissionen aufzuzeigen („Senke“ vs. „Speicher“).

Es werden verschiedene Aggregationsniveaus der Kohlenstoffwirtschaft in den Sankeys abgebildet, um einerseits ausreichend Detail abbilden zu können und andererseits ein Gesamtbild zu ermöglichen. Dafür wurden folgende Detailabbildungen („Zoom-Ins“) erstellt:

- ▶ **Kohlenstoffquellen**, als Input in den Kreislauf. Mögliche Quellen sind die Atmosphäre, der Ozean, Biomasse, fossile Energieträger, Gesteine/ Mineralien aus der Lithosphäre oder Stoffströme aus der Abscheidung an verschiedenen Prozessen;
- ▶ **Kohlenstoffsenken und -speicher**, in denen der Kohlenstoff gebunden wird und den Kreislauf (temporär oder dauerhaft) verlässt;
- ▶ Kohlenstoffflüsse in der **Industrie** inklusive abgeschiedenem Kohlenstoff, der als rezyklierter Kohlenstoff erneut in den Kreislauf geht;
- ▶ Kohlenstoffflüsse der **Chemischen Industrie inklusive Teilen der Energiewirtschaft**;

Eine **Übersichtsabbildung** stellt alle Sektoren dar. Zur Übersichtlichkeit blendet diese Abbildung einige Detailinformationen aus.

Zur Erstellung der Sankeys wurde die frei verfügbare Software R Studio und das R package Panta Rhei für die Programmiersprache R (<https://www.r-project.org>) genutzt.

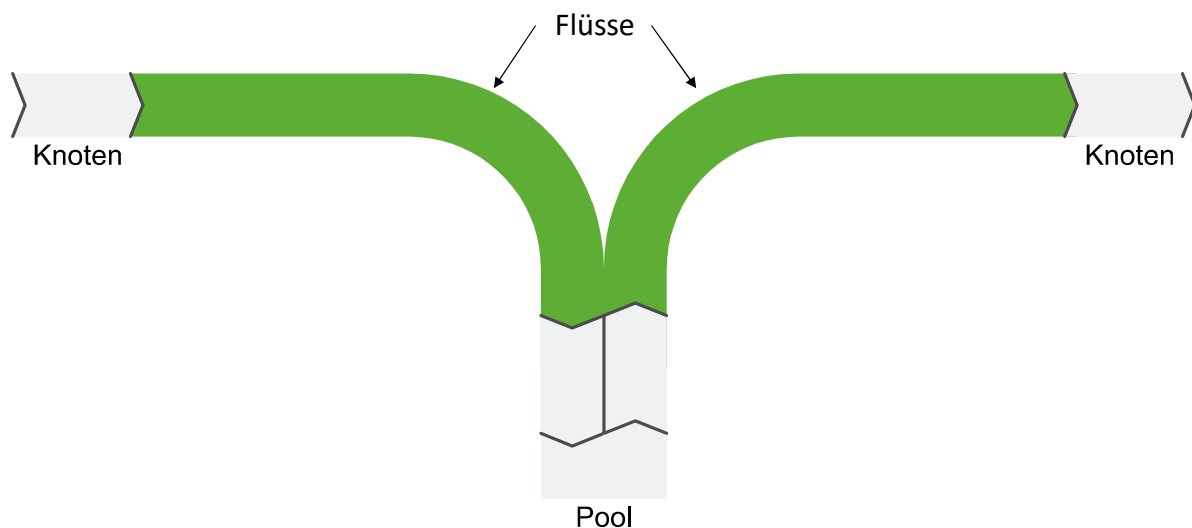
3 Kohlenstoffflüsse in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft

3.1 Elemente der Abbildungen

Die Diagramme setzen sich aus vier grafischen Elementen zusammen (siehe Abbildung 1):

- **Knoten** bilden alle für die Darstellung relevanten Zwischenschritte ab. Im Fokus sind solche Zwischenschritte, in denen Umwandlungsprozesse stattfinden, bei denen Emissionen entstehen können, da nur diese relevant für die Erfassung im Inventar sind. Ergänzend gibt es Hilfsknoten, die das Prozessverständnis erleichtern, wie bspw. „Rezyklierung“ im Zoom-In für die Chemische Industrie. Dieser Pfad verdeutlicht, dass hier Kohlenstoff gebunden im Produkt im Rahmen der Rezyklierung zurück in den Prozess geführt wird. Die Emissionen aus der Rezyklierung werden im jeweiligen Industriesektor erfasst.
- **Pools** bilden ab, wenn Kohlenstoff gespeichert wird, bspw. gebunden in Form eines Produkts wie Holz, Produkte der Industrie oder Kraftstoff/Energieträger und zu einem späteren Zeitpunkt weiterfließt. Diese Pools sind insbesondere für die Diskussion um die Nachverfolgbarkeit des Kohlenstoffursprungs relevant.
- **Flüsse** bilden ab, wie der Kohlenstoff zwischen den verschiedenen Knoten wandert.
- Die **Farbe der Flüsse** verdeutlicht den Ursprung des Kohlenstoffs eines Flusses.

Abbildung 1: Elemente der Sankey-Diagramme



Quelle: eigene Darstellung, IREES

Von den Quellen ausgehend werden durch Flüsse zu und zwischen unterschiedlichen Knoten bis zu den Senken und Speichern die verschiedenen Kohlenstoffpfade aufgespannt. Als Pfade werden dabei kombinierte Flüsse von Quelle zu Senke/ Speicher verstanden. Durch Rückführungen von Kohlenstoff (Abscheidung und Rezyklierung) bilden sich Kohlenstoffkreisläufe.

Die Breite der Flüsse hat in den Darstellungen KEINEN Informationsgehalt. Zu einem späteren Zeitpunkt können Mengeninformationen ergänzt werden, sofern vorhanden.

3.2 Visualisierung der Flüsse innerhalb der Kohlenstoffwirtschaft

Im Folgenden werden schrittweise, von der Quelle über die Nutzungsphase bis zu dauerhaften Senken und Speichern, die einzelnen Bausteine der grafischen Aufbereitung eingeführt, bevor diese in einer Übersichtsgrafik zusammengefasst werden. Aus Verständlichkeitsgründen werden nach den Quellen zunächst die möglichen Senken und Abscheidungen in Speichern dargestellt, um die Anfänge mit den möglichen Enden zu verknüpfen.

3.2.1 Zoom-In: Kohlenstoffquellen

Der im Kohlenstoffkreislauf enthaltene Kohlenstoff kann fünf Quellen zugeordnet werden:

► **Atmosphäre**

Kohlenstoff kann auf unterschiedlichen Wegen aus der Atmosphäre entnommen werden. Um Doppelerfassungen zu vermeiden ist hier nur die durch Technik herbeigeführte Abscheidung (Direct Air Capture - DAC) gemeint.

► **Ozean**

Im Ozean sind große Mengen atmosphärisches CO₂ gebunden.⁶ Neuere Ansätze untersuchen die Möglichkeit (analog zu DAC aus der Atmosphäre) CO₂ aus Ozeanwasser zu entnehmen (Direct Ocean Capture - DOC). Analog zu der Gewinnung von CO₂ aus der Atmosphäre umschließt diese Kategorie ausschließlich die direkte Entnahme von CO₂ aus dem Ozean. Farblich wird in den Visualisierungen nicht zwischen Kohlenstoff aus Atmosphäre und Ozean unterschieden.

► **Biomasse**

Kohlenstoff, der aus der Atmosphäre oder dem Ozean in organischem Material (insbesondere Pflanzen, Algen, aber auch z. B. Tierkadaver oder Phytoplankton) gebunden wurde, wird in den Abbildungen als biogener Kohlenstoff dargestellt.

► **Fossile Energieträger**

Fossile Energieträger (Stein- und Braunkohle, Erdgas, Erdöl) stellen die aktuell größte Quelle an CO₂-Emissionen dar. Fossile Energieträger kommen neben der Energiegewinnung auch als Kohlenstoffquelle für eine stoffliche Nutzung zum Einsatz. Dabei wird Kohlenstoff in Produkten gebunden.

► **Lithosphäre/ Mineralien**

In Gesteinen und Mineralien ist Kohlenstoff gebunden. Insbesondere bei der Herstellung von Zementklinker und Kalk wird dieser Kohlenstoff durch thermische Einwirkung in Form von CO₂ emittiert.

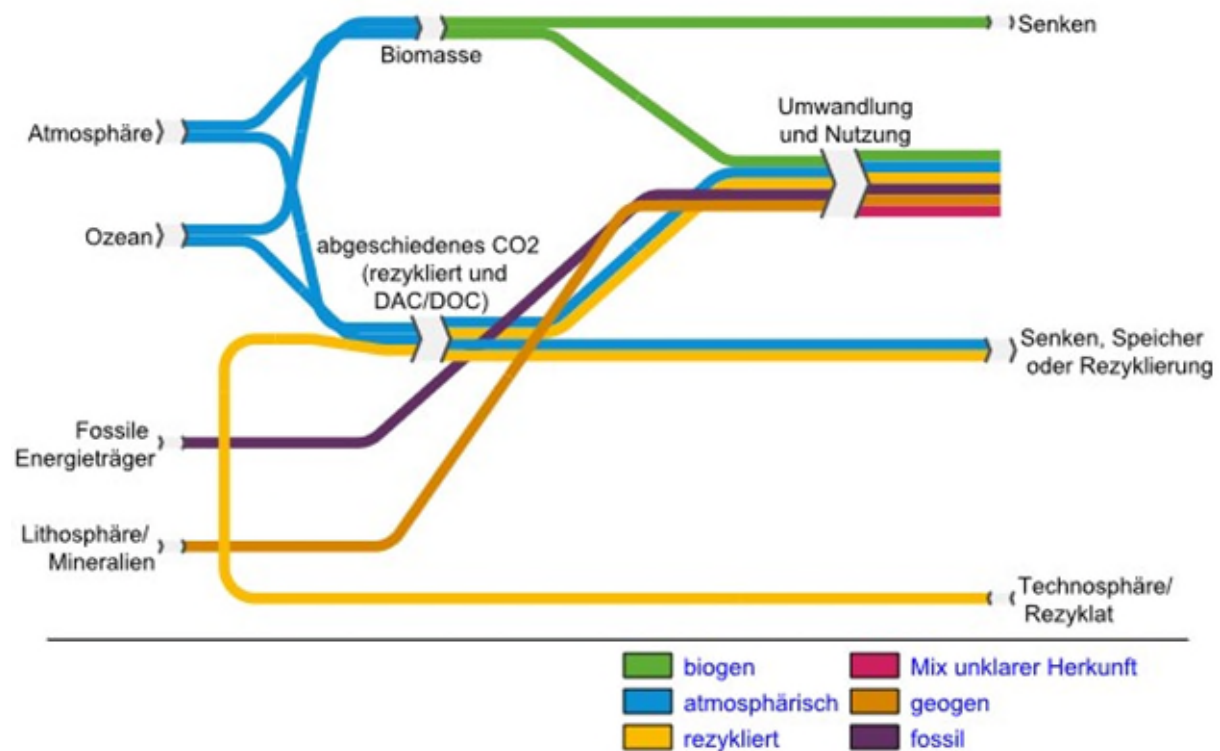
Neben diesen natürlichen Kohlenstoffquellen tritt in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft **recykliertes CO₂** als weitere Quelle auf. CO₂ kann an verschiedenen Stellen in der Kohlenstoffwirtschaft abgeschieden werden: einerseits an großen Punktquellen z. B. im Umwandlungssektor, Industriesektor oder der öffentlichen Energieversorgung einschließlich der Abfallverbrennung. Andererseits gibt es aber auch Überlegungen und technische Ansätze an kleineren Emissionsquellen wie im Transportsektor (Seeverkehr) oder im Gebäudesektor (Lüftungsanlagen oder Heizungsanlagen) CO₂ abzuscheiden. Eine Rückführung dieses CO₂ in den

⁶ Dabei reagieren (Bi-)Karbonat-Ionen mit CO₂-Molekülen aus der Luft und lösen sie zunächst im Oberflächenwasser. Das gelöste CO₂ wird dann über Strömungen auch in die Tiefe verteilt. Gleichzeitig ändert sich die Ozeanchemie und die Meere werden saurer, je mehr CO₂ sie aus der Luft aufnehmen. (IPCC, 2022)

Kohlenstoffkreislauf bezeichnen wir als rezykliertes CO₂. Das rezyklierte CO₂ kann unterschiedlichen Ursprungs sein (atmosphärisch, biogen, fossil oder geogen).

Die folgende Abbildung zeigt die Visualisierung zum Thema Kohlenstoffquellen. Das rezyklierte CO₂ kommt aus der Abscheidung und befindet sich in einem Kreislauf innerhalb der Technosphäre, ohne diese zu verlassen. Im Unterschied dazu bringen die anderen Quellen Kohlenstoff von außen in die Pfade ein. Durch eine Vermischung von CO₂ unterschiedlichen Ursprungs während der Verwendung (zusammengefasst im Knoten „Umwandlung und Nutzung“) ist der Kohlenstoffursprung oder sind zumindest die genauen Anteile der unterschiedlichen Ursprünge im Rezyklierungsfluss nicht erfassbar. Wenn die Information über den Ursprung verloren geht, wird der Fluss als Mix dargestellt. Rezyklierungsströme werden separat dargestellt. Es ist vorstellbar, dass es Rezyklierungsflüsse mit bekanntem Ursprung (bspw. BECCS oder Abscheidung aus fossilen Quellen) gibt, ebenso wie Rezyklierungsflüsse mit unklarem Ursprung.

Abbildung 2: Zoom-In Kohlenstoffquellen



Quelle: eigene Darstellung, IREES

„Umwandlung und Nutzung“ ist in dieser Abbildung der Sammelknoten für (sämtliche) Nutzungen: energetische (z. B. als Raffinerieunterfeuerungen) und stoffliche (z. B. als Raffinerieprodukte) Nutzungen. Die Pfade Biomasse sowie (teils) rezykliertes und abgeschiedenes CO₂ beziehen sich auf die direkte Zuführung des abgeschiedenen CO₂ in Senken oder Speicher, ohne eine Umwandlung oder Nutzung zu durchlaufen. In diesem Fall ist ggf. eine Nachverfolgbarkeit möglich.⁷

⁷ Die Erfassbarkeit ergibt sich ggf. auf bilanzieller Ebene, da es bei dem Transport von CO₂-Strömen unterschiedlichen Ursprungs im gleichen Netz unvermeidbar zu einer Vermischung der Moleküle kommen. Bilanziell ist jedoch denkbar, den entnommenen CO₂-Mengen entsprechende Ursprünge zuzuweisen.

3.2.2 Zoom-In: Kohlenstoffspeicher und -senken

Kohlenstoffspeicher und -senken werden in den Inventaren nur dann berücksichtigt, wenn sie ein aktives Eingreifen der Menschen beinhalten. Natürliche Speicherprozesse stellen eine passive Kohlenstoffentnahme dar und werden im vorliegenden Bericht daher als nicht Inventar-relevant eingestuft, vgl. auch den aktuellen Bericht zu „The State of Carbon Dioxide Removal“ (Geden et al., 2024) und die Definition des UNFCCC (UNFCCC, 2022). Somit werden im Folgenden nur anthropogene („aktive“) Senken behandelt, während natürliche („passive“) Senken nicht genauer betrachtet werden.

Kohlenstoffspeicher unterscheiden sich generell stark hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Einbindung des Kohlenstoffs. Sowohl im 6ten Sachstandsbericht des IPCC als auch im genannten Bericht werden die verfügbaren Speicher in drei Zeiträume eingeteilt (Geden et al., 2024; IPCC et al., 2022):

- ▶ Jahrzehnte bis Jahrhunderte
- ▶ Jahrhunderte bis Jahrtausende
- ▶ Zehntausend Jahre und länger

Im von der EU-Kommission entwickelten Framework zur Zertifizierung von negativen Emissionen wird eine dauerhafte Einspeicherung von CO₂ als eine Einspeicherung über mehrere Jahrhunderte definiert und in der Praxis mit mindestens 200 Jahren angesetzt. Entsprechend betrachten wir nachfolgend die Kohlenstoffspeicher und -senken basierend auf der IPCC-Klassifizierung in zwei Gruppen:

- ▶ Gruppe 1: Kohlenstoffspeicher mit einer Einspeicherung von Jahrzehnten bis Jahrhunderte
- ▶ Gruppe 2: Kohlenstoffspeicher mit einer Einspeicherung von Jahrhunderten bis Jahrtausende und länger

Insbesondere die Speicher der zweiten Gruppe sind nach der Definition des EU Carbon Removal Certification Framework (CRCF) als dauerhaft eingespeichert anzusehen und sind zum Erhalt von dauerhaften Senken-Zertifikaten geeignet. Senken in der Gruppe 1 dagegen können, müssen aber nicht gemäß CRCF, als dauerhafte Senken anerkannt werden. (EU parliament & EU council, 2024).

Kohlenstoffspeicher mit einer Einspeicherung von Jahrzehnten bis Jahrhunderten (vorübergehende Kohlenstoffspeicher)

Zu den vorübergehenden Kohlenstoffspeichern gehören laut IPCC die Umweltmedien Vegetation, Böden und Sedimente. Diese Speicher werden durch folgende anthropogene Tätigkeiten aktiviert:

- ▶ Aufforstung
- ▶ Verbesserte Waldbewirtschaftung
- ▶ Agroforstwirtschaft
- ▶ Kohlenstoffspeicherung in Acker- und Grünland
- ▶ Pflanzenkohle/ feste Biomasse (die Speicherdauer und der netto Emissionseffekt hängen vom Einzelfall ab, Einordnung daher umstritten)

- ▶ Wiederherstellung und Bewirtschaftung von Moor- und Küstenfeuchtgebieten
- ▶ Blauer Kohlenstoff in Küstengebieten (wird in Visualisierung unter der Senke Küstenfeuchtgebiete abgebildet).

Kohlenstoffspeicher mit einer Einspeicherung von mind. zwei Jahrhunderten bis Jahrtausende und länger (dauerhafte Kohlenstoffspeicher)

Zu den dauerhaften Kohlenstoffspeichern gehören laut IPCC die Medien geologische Formationen, Mineralisation und Meeressedimente. Diese werden durch nachfolgende menschliche Aktivitäten genutzt:

- ▶ Vergraben von Biomasse an Land (z. B. Bäume ernten und luftdicht vergraben) oder Versenken von Biomasse im Ozean
- ▶ Pflanzenkohle (die Speicherdauer und der netto Emissionseffekt hängen vom Einzelfall ab, Einordnung daher umstritten)
- ▶ Meeresdüngung
- ▶ Speicherung in geologischen Formationen (u.a. saline Aquifere, Basaltgesteine oder ehemalige Öl- und Gasspeicherstätten)
- ▶ Mineralprodukte (u.a. mit CO₂ oder Kohlenstoff angereicherter Zement oder Beton, Bitumenhaltiger Asphalt)
- ▶ Beschleunigte Verwitterung
- ▶ Erhöhung der Ozeanalkalität.

Die verschiedenen Speicheroptionen weisen unterschiedliche Unsicherheiten bzgl. der Beständigkeit der Speicherung (z. B. Austritte von gasförmigem CO₂ aus unterirdischen Speichern oder Waldbrände) auf. Gleichzeitig bergen unterschiedliche Speichermethoden mehr oder weniger gravierende Auswirkungen auf damit verbundene Systeme (z. B. das Ökosystem Meer bei der Speicherung von CO₂ im Ozean durch Düngung oder Erhöhung der Alkalinität). Nicht zuletzt sind die aufgeführten Methoden unterschiedlich gut erforscht und es fehlt Wissen über die Unsicherheiten, Auswirkungen und teilweise den tatsächlichen Aufwand zur (dauerhaften) Speicherung einer t CO₂ zu kommen. Diese Aspekte sind in der Visualisierung nicht berücksichtigt.

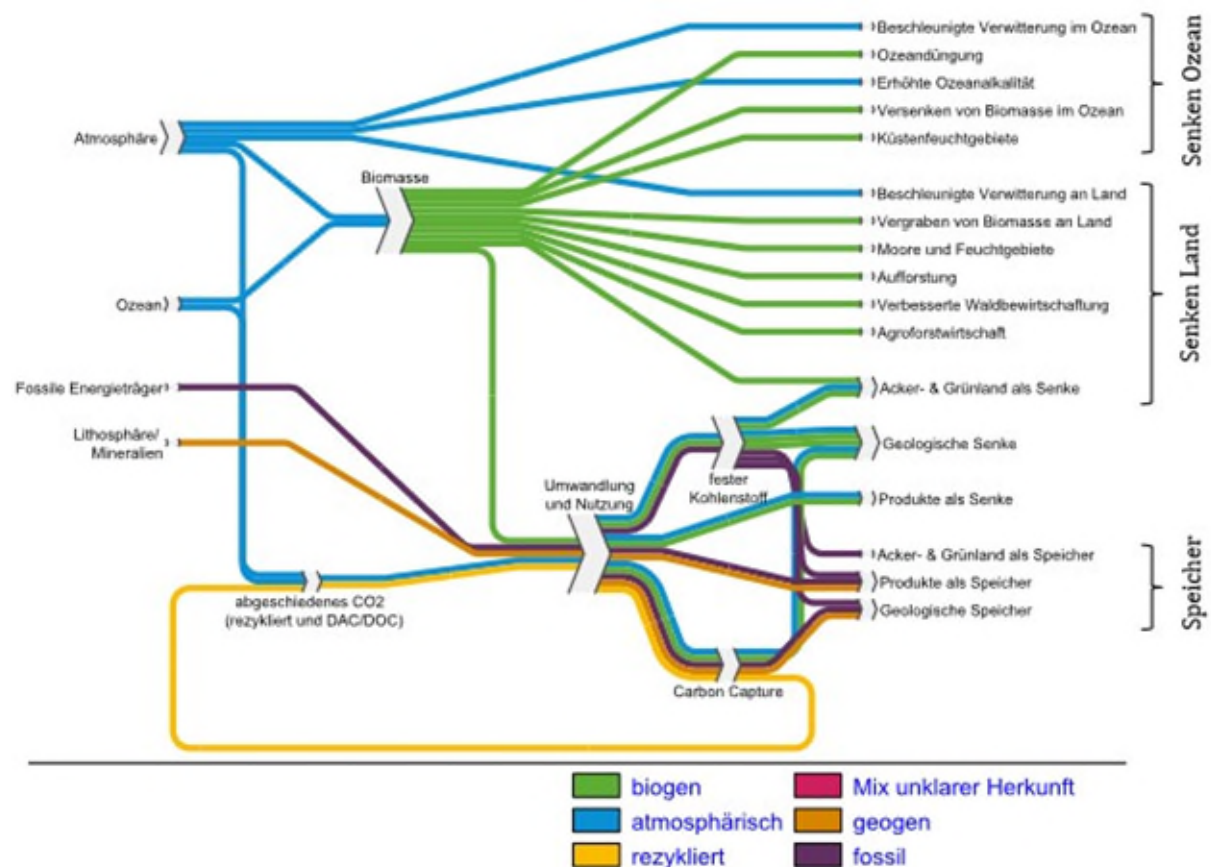
Folgende Abbildung ordnet die Kohlenstoffspeicher hinsichtlich ihrer Speicherdauer und nach Speichermedium (Land, Ozean, geologische Speicherung) ein. Senken, die durch die Entnahme und dauerhafte Speicherung von atmosphärischem oder biogenem CO₂ entstehen, sind gegenüber Speichern gesondert gekennzeichnet. Senken und damit negative Emissionen können somit nur dort entstehen, wo atmosphärischer oder biogener Kohlenstoff dauerhaft eingespeichert wird. Die Speicherung von fossilem oder geogenem CO₂ stellt immer nur eine Vermeidung des Ausstoßes dar und kann nicht zu negativen Emissionen führen.

Die Inventarerhebung berücksichtigt das **Territorialprinzip**, sodass Speicher im Ozean, die territorial nur schwer oder gar nicht zuzuordnen sind, eine andere Bedeutung haben als Speicher, die einem Staat nach dem Territorialgebiet uneingeschränkt zugeordnet werden können. Meeresdüngung und erhöhte Ozeanalkalität können klar keinem Territorium zugeordnet werden. Beim Versenken von Biomasse im Ozean und beschleunigter Verwitterung im Ozean könnte eine Zuordnung hingegen möglich sein. Bislang können solche Ozean-basierten Senken im THG-Inventar - analog zum Umgang mit extra-territorialen Emissionsquellen - nicht

berücksichtigt werden. Da sich dies in Zukunft ändern kann, werden die Speicher im Ozean (sowohl territorial nur schwer sowie nicht zuordenbare) in den Visualisierungen aufgenommen. Die Wirkmechanismen dieser Senken und deren Unsicherheiten erfordern erheblichen Forschungsbedarf, bis sie im THG-Inventar erfasst werden können.

Aufbauend auf der dargestellten Systematisierung zeigt Abbildung 3 die Kohlenstoffspeicher und -senken in einer Kohlenstoffwirtschaft sowie die Zuflüsse und den Ursprung des Kohlenstoffs.

Abbildung 3: Zoom-In Kohlenstoffspeicher und -senken



Quelle: eigene Darstellung, IREES

Die **Senken** sind grob nach Ozean und Land getrennt. Dabei wird selten atmosphärischer Kohlenstoff direkt abgeschieden, sondern zumeist in Biomasse eingebunden und dann als biogener Kohlenstoff eingespeichert. Blauer Kohlenstoff als Senke ist nicht gesondert aufgelistet, sondern in „Küstenfeuchtgebiete“ sowie in „Moore & Feuchtgebieten“ mitgedacht.

„**Umwandlung und Nutzung**“ sowie „**Carbon Capture**“ beziehen sich sowohl auf Energiewirtschaft, Industrie, Gewerbe als auch den Gebäudebereich und beinhalten auch Raffinerien. Die Nachverfolgbarkeit des Ursprungs des Kohlenstoffs verliert sich an dieser Stelle teilweise. In der Regel ist die Nachvollziehbarkeit der biogenen und geogenen Anteile aber möglich (z. B. für BECCS oder CCS an Zementwerken). Dabei können in der Regel nicht alle Emissionen aus den Prozessen abgeschieden werden, sodass ein Teil des CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt wird. Solche Leckagen sind in der Abbildung nicht dargestellt.

Die Nutzung von atmosphärischem Kohlenstoff mit Hilfe von DAC & DOC wird abgebildet über „abgeschiedenes CO₂“ und geht dann als atmosphärischer Fluss in „Umwandlung und Nutzung“ ein und im Anschluss entweder direkt als fester oder gebundener Kohlenstoff in eine Senke oder

wird nach erfolgter stofflicher Nutzung des Kohlenstoffs durch Carbon Capture im Kreis geführt (im Mischfluss „rezykliertes CO₂“) oder ebenfalls in eine Senke eingebracht.

Aus „Umwandlung und Nutzung“ können einerseits Emissionen frei werden. Andererseits kann Kohlenstoff abgeschieden und gespeichert (Flüsse in Senken und Speicher) oder genutzt werden (zirkulärer Rückfluss). Der Fluss zum Knoten „fester Kohlenstoff“ bezieht sich auf Pyrolyse. Diese kann mit fossilen, biogenen Einsatzstoffen und perspektivisch mit synthetischem Erdgas unter Nutzung von rezykliertem oder atmosphärischem Kohlenstoff erfolgen. Dabei entstehen Wasserstoff und fester Kohlenstoff. Der Kohlenstoff in fester Form kann als Pulver oder Granulat sowie Kohle in Senken und Speicher eingebracht werden. In „Ackerland- und Grünland“ kann auch Biomasse direkt und Pflanzenkohle aus Kohlenstoff biogener Art eingebracht werden. Dieser Pfad beinhaltet auch Humusaufbau. In „geologischen Senken“ kann auch gasförmiges CO₂ aus der CO₂-Abscheidung eingelagert werden. Beide Senken haben Äquivalente für die Speicherung von Kohlenstoff fossilen und geogenen Ursprungs. Zudem kann Kohlenstoff in Produkten gebunden werden (z. B. „fester Kohlenstoff“ als Betonzuschlagsstoff in „Produkte als Speicher“).

Das **abgeschiedene CO₂** aus Umwandlungs- und Nutzungsprozessen kann in die Verwendung zurückgeführt werden, siehe gelber Fluss „rezykliert“. Dieser Fluss kann alle Kohlenstoffquellen beinhalten. Dadurch werden Kohlenstoffkreisläufe geschaffen, die den Kohlenstoff länger in der Nutzungsphase halten und somit Emissionen verzögern bzw. reduzieren. Gleichzeitig werden unterschiedliche Kohlenstoffquellen langfristig vermischt (abgeschiedenes CO₂ aus Abfallverbrennungsanlagen hat auch in Zukunft z. B. fossile Bestandteile aus Plastikprodukten und biogene Bestandteile aus Holzprodukten), sodass eine spätere Einspeicherung nur schwer als reine Senke angerechnet werden kann. Für die Bewertung ist daher die **Nachverfolgbarkeit** des Kohlenstoffursprungs wichtig. Gerade bei rezykliertem Kohlenstoff ist davon auszugehen, dass die Information über den Ursprung schwer nachzuverfolgen ist und möglicherweise teilweise verloren geht. Hierfür sollten zukünftig Ansätze für Nachverfolgung und Bewertung entwickelt werden. Zentral dabei ist, bei einer Emission oder Senke zu wissen, wie viel des Kohlenstoffs biogenen oder atmosphärischen Ursprungs und wie viel fossilen oder geogenen Ursprungs ist.

Biomasse ist Teil unterschiedlicher Pfade, wobei Biomasse ausgehend vom eigenen Knoten als Anbau-Biomasse zu verstehen ist, während biogene Ströme aus „Umwandlung und Nutzung“ auch Biomasse aus Abfall und Reststoffen abbilden. Eine solche Unterteilung der biogenen Ströme wird im Reporting bislang nicht vorgenommen. Die Information wird jedoch bei der Emissionsberechnung mit den für Biomasse angesetzten Emissionsfaktoren berücksichtigt.

3.2.3 Zoom-In: Kohlenstoffpfade und Kohlenstoffpools in der Industrie

Die Nutzung von Kohlenstoff in der Industrie ist vielfältig und besteht aus einer energetischen Nutzung und einer stofflichen Nutzung als Rohstoff. Letzteres ist insbesondere in der chemischen Industrie relevant. Zudem gibt es noch Prozesse, in denen Prozessemissionen entstehen: In der Herstellung von Zement wird Kohlenstoff aus Kalkstein freigesetzt. In der Metallerzeugung und -bearbeitung wird Kohlenstoff zum Einstellen der Materialeigenschaften benötigt und (derzeit noch) als Reduktionsmittel eingesetzt. In beiden Fällen wird CO₂ emittiert.

Eine besondere Herausforderung in der Erfassung von Kohlenstoff ist, dass Kohlenstoff in **Produkten** temporär gebunden sein kann. Wir sprechen daher von einem **Produktepool** zum Beispiel dem **Holzproduktepool** (Harvested Wood Products - HWP). Wird das Produkt nach Ende der Nutzung rezykliert (entweder stofflich oder chemisch) verbleibt der Kohlenstoff im Kreislauf. Eine mögliche Deponierung von Produkten ermöglicht eine Einspeicherung des im

Produkt gebundenen Kohlenstoffs. Im Falle einer Verbrennung des Produktes wird der gebundene Kohlenstoff wieder freigesetzt. In der Regel geschieht dies am Ende der Lebenszeit des Produktes, wenn dieses dem Abfall zugeführt wird. Dann erfolgt i.d.R. eine energetische Verwertung entweder in der öffentlichen Energieversorgung oder als Ersatzbrennstoff in der Industrie. In beiden Fällen kann eine CO₂-Abscheidung erfolgen, aus der Kohlenstoff entweder einer erneuten Nutzung oder einer Speicherung zugeführt wird.

Biomasse nimmt in ihrer Poolfunktion eine Sonderrolle ein, da sie entweder als Zwischenspeicher oder als Senke fungieren kann (siehe Kapitel 3.2.2). Jede Entnahme von Biomasse steht im Konflikt mit ihrer möglichen Senkenleistung.

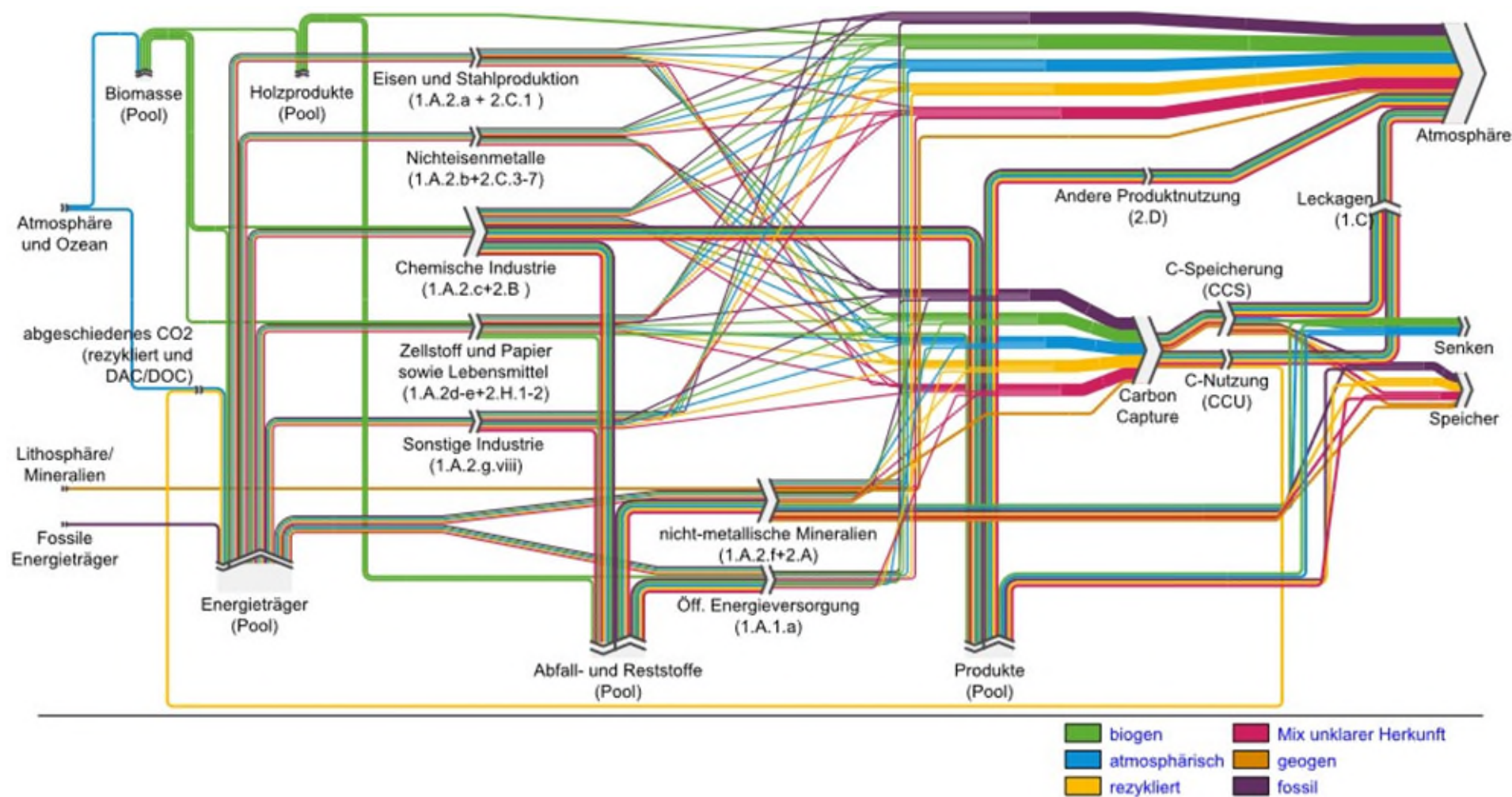
Zudem gibt es einen **Energieträgerpool**. Dort ist es zukünftig wichtig, den Ursprung des gebundenen Kohlenstoffs nachzuverfolgen. Für Biokraftstoffe ist dies bereits möglich, auch die Anforderungen an erneuerbare strombasierte Kraftstoffe (renewable fuels of non-biological origin – RFNBO) machen dies zukünftig notwendig. Erfolgt eine Abscheidung des CO₂ aus biogenen Kraftstoffen oder u. U. RFNBO, resultieren Negativemissionen. Nachfolgende Emissionen bei Transport und Speicherung (Leckagen) mindern die Negativemission und sind demzufolge buchhalterisch als nicht THG-neutral zu erfassen. Für atmosphärischen oder rezyklierten Kohlenstoff ist derzeit noch keine Nachverfolgbarkeit gegeben (siehe Fehlstellenanalyse in Abschnitt 4). Das gilt auch für rezyklierten Kohlenstoff biogenen Ursprungs.

In Zukunft könnte eine Nachverfolgbarkeit von atmosphärischem und rezykliertem Kohlenstoff möglich werden. Ansätze ergeben sich aus den bereits vorhandenen Regulierungs- und Zertifizierungsansätzen für biogene Kraftstoffe, RFNBO und rezyklierte kohlenstoffhaltige Kraftstoffe (recycled carbon fuels). Diese erlauben zumindest in Teilen eine Identifikation des Ursprungs des Kohlenstoffs. Im Fall von rezyklierten kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen ist laut RED II dabei nicht ausschließlich der Ursprung des Kohlenstoffs relevant, sondern die Tatsache, dass die Abscheidung des sonst freigesetzten CO₂ in definierten Anwendungen des EU ETS erfolgt und diese CO₂-Emissionen bereits einer CO₂-Bepreisung und damit einer offiziellen Erfassung unterlegen haben, um bei erneuter Nutzung als THG-neutral zu gelten. Besonderes Merkmal des Energieträgerpools ist die zeitliche Beschränkung der Bindung des Kohlenstoffs im Energieträger mit dem Zweck des Verbrennens und damit das Freisetzen des Kohlenstoffs.

Für Produktpools, in denen Kohlenstoff über mehrere Jahrzehnte in einem Produkt gebunden ist und dann am Ende seiner Lebensdauer entweder (i) einer Rezyklierung in direkter Form zugeführt wird, (ii) energetisch ggf. mit CO₂-Abscheidung genutzt wird oder (iii) in den Abfallpool verschoben wird oder (iv) durch Deponierung als Speicherung wirkt, ist eine große Herausforderung, den wechselnden Anteil der C-Quellen nachzuverfolgen. Eine physische Nachverfolgbarkeit ist in vielen Fällen nicht möglich, z. B. weil beim Einsatz als Rohstoff in der chemischen Industrie oder beim Transport in Pipelines die Vermischung bereits auf Ebene der Moleküle erfolgt.⁸ Über Mengenanteile ist eine Nachverfolgbarkeit bilanziell auf systemischer Ebene aber durchaus vorstellbar. In der Chemieindustrie wird bspw. ein Massenbilanz-Ansatz zur Zertifizierung von biogenen oder rezyklierten Produktanteilen vorangetrieben. Bereits jetzt ist die Produktion von chemischen Produkten über Aktivitätsdaten im CRT erfasst und könnte in Verbindung mit statistischen Daten zur Ableitung von Kohlenstoff-Pools verwendet werden. Die Nachverfolgung der C-Quellen-Anteile im Produktpool ist zusätzlich durch jährlich variierende und i.d.R. nicht exakt oder vollständig erfassbare Ein- und Ausflüsse in den Pool erschwert.

⁸ Über eine C-Datierung in Abgasen ist es möglich, biogene Anteile zu bestimmen, da fossile Energieträger keinen 14C-Anteil haben. Solche Bestimmungen erfolgen jedoch nur stichprobenartig und nicht kontinuierlich. (Lorenz et al., 2022)

Abbildung 4 zeigt die zur Industrie gehörenden Kohlenstoffflüsse. Insbesondere sind dabei die Kohlenstoffflüsse nach Ursprung differenziert, auch wenn diese im Rahmen der heutigen Berichterstattung teilweise noch nicht gegeben sind. Zukünftig werden diese nachvollziehbar sein müssen, um die tatsächliche Minderungs- oder Senkenleistung bewerten zu können. Diese Problematik wird im weiteren Verlauf des Projektes näher diskutiert. Zur derzeitigen Abbildbarkeit siehe die Fehlstellenanalyse in Abschnitt 4.

Abbildung 4: Zoom-In Kohlenstoffpfade und Kohlenstoffpools in der Industrie mit differenzierten C-Flüssen

Hinweise: In der Darstellung wird vereinfachend der Fluss von abgeschiedenem CO₂ aus Atmosphäre und Ozean direkt in Speicherung nicht abgebildet. Die Nutzung von abgeschiedenem atmosphärischen CO₂ wird über den Fluss „abgeschiedenes CO₂ in Energieträger“ symbolisiert. Es ist auch eine stoffliche Nutzung möglich. Diese ist in der Abbildung nicht separat als Knoten dargestellt.

Quelle: eigene Darstellung, IREES

3.2.4 Zoom-In: Kohlenstoffflüsse der Chemischen Industrie

Die chemische Industrie ist einer der größten Verbraucher von fossilen Energieträgern und nutzt diese nicht nur als Energiequelle, sondern auch als Kohlenstoffquelle für verschiedenste Kohlenwasserstoffketten (Kunststoffe). Daher wird die chemische Industrie als eigenes Zoom-In in Abbildung 5 dargestellt. Die genaue Nachverfolgung nicht-fossiler Kohlenstoffquellen ist in der chemischen Industrie eine besonders große Herausforderung und wird im weiteren Projektverlauf genauer diskutiert.

In der Chemischen Industrie wird bezüglich der CRT-Codes unterschieden zwischen „Energiesektor“ (CRT 1) und „Industrieprozesse und Produktnutzung“ (CRT 2). Somit werden auch Raffinerien in ihrer Funktion der Fraktionierung und Aufbereitung fossiler Energieträger differenziert nach einer energetischen Kohlenstoffnutzung in der Energieindustrie (1.A.1) und nach einer stofflichen Nutzung in Chemieanlagen (2.B.8). Raffinerien produzieren im Energiebereich zum einen Kraftstoffe wie Diesel und Benzin, die derzeit in verschiedensten Industriezweigen (1.A.2), im Verkehr (1.A.3) und auch in der öffentlichen Energieversorgung (1.A.1.a) zum Einsatz kommen. Zum anderen spielen Raffinerien für Chemieanlagen⁹ (2.B.8) eine Kernrolle, da sie die Basis der Grundchemikalien wie Methanol und Ethylen herstellen, aus denen die chemische Industrie (1.A.2.c + 2.B.) ihre Produkte herstellt. (UNFCCC, 2021)

Im Sankey und in der weiteren Diskussion des Berichts werden Raffinerien des Energiesektors und als Chemieanlagen unter „Kraft- und Grundstofferzeugung“ zusammengefasst. Sowohl „Energieträger & Grundchemikalien“ als auch „Produkte“ der chemischen Industrie sowie entstehende „Abfall- und Reststoffe“ bilden dabei Pools, die den Kohlenstoff zwischenspeichern, bis die entsprechenden Bestandteile eines Pools weiter genutzt werden. Kraft- und Grundstoffe können dabei direkt in der „chemischen Industrie“ zum Einsatz kommen, um daraus Produkte herzustellen. Diese Produkte kommen nach einer Verweildauer im Produkte-Pool in die „andere Produktnutzung“ (2.D), die die Nutzungsphase von nicht-energetischen Produkten aus Kraft- und Grundstoffen beschreibt. So gibt es bspw. für Bitumen/Asphalt einen Pfad von den Raffinerien der Kraft- und Grundstofferzeugung zur anderen Produktnutzung über den Produkte-Pool.

Kraftstoffe können nach einer Verweildauer im Pool „Energieträger“ neben der Chemischen Industrie zudem auch in der öffentlichen Energieversorgung und im Sektor der nicht-metallischen Mineralien (1.A.2.f + 2.A) zum Einsatz kommen. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen können in keinem der genannten Prozesse die gesamten Emissionen abgeschieden werden, sodass auch bei der effizientesten CO₂-Abscheidung (Carbon Capture) immer ein gewisser Restfluss in die Atmosphäre bestehen bleibt (siehe Sankey-Knoten Leckagen).

Der massive Einsatz an fossilen Energieträgern und dadurch große Ausstoß an THG muss in einer klimaneutralen Zukunft umgestellt werden. Als alternative stoffliche Kohlenstoffquellen kommen dabei Biomasse sowie Kohlenstoff aus Atmosphäre und Ozean (DAC und DOC) in Frage. Über die Pyrolyse von biogenen Roh- und Reststoffen sowie von Holzprodukten kann der enthaltene Kohlenstoff technisch aufgeschlossen werden, um potenziell nachwachsende Rohstoffe in chemische (Vor-)Produkte umzuwandeln¹⁰. Mit Hilfe von Strom können Wasserstoff und Kohlendioxid in erneuerbare Basischemikalien (Kohlenwasserstoffketten) umgewandelt

⁹ Chemieanlagen für die Prozessierung der petrochemischen Grundchemikalien (CRT 2.B.8.a-e) spielen eine Kernrolle für die vielfältigen Produkte der Fein- und Spezialchemie. Dabei werden (a) Methanol, (b) Ethylen, (c) Ethylendichlorid und Vinylchlorid, (d) Ethylenoxid und (e) Acrylnitril aufgrund ihrer potenziellen CO₂- und Methan-Emissionen als Grundchemikalien einzeln betrachtet. (UNFCCC, 2021)

¹⁰ <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/nachwachsende-rohstoffe-und-holz/bioraffinerieprozesse-und-biobasierte-produkte/biomasseaufschluss-und-pyrolyseverfahren> (zuletzt geprüft am 31.10.2024)

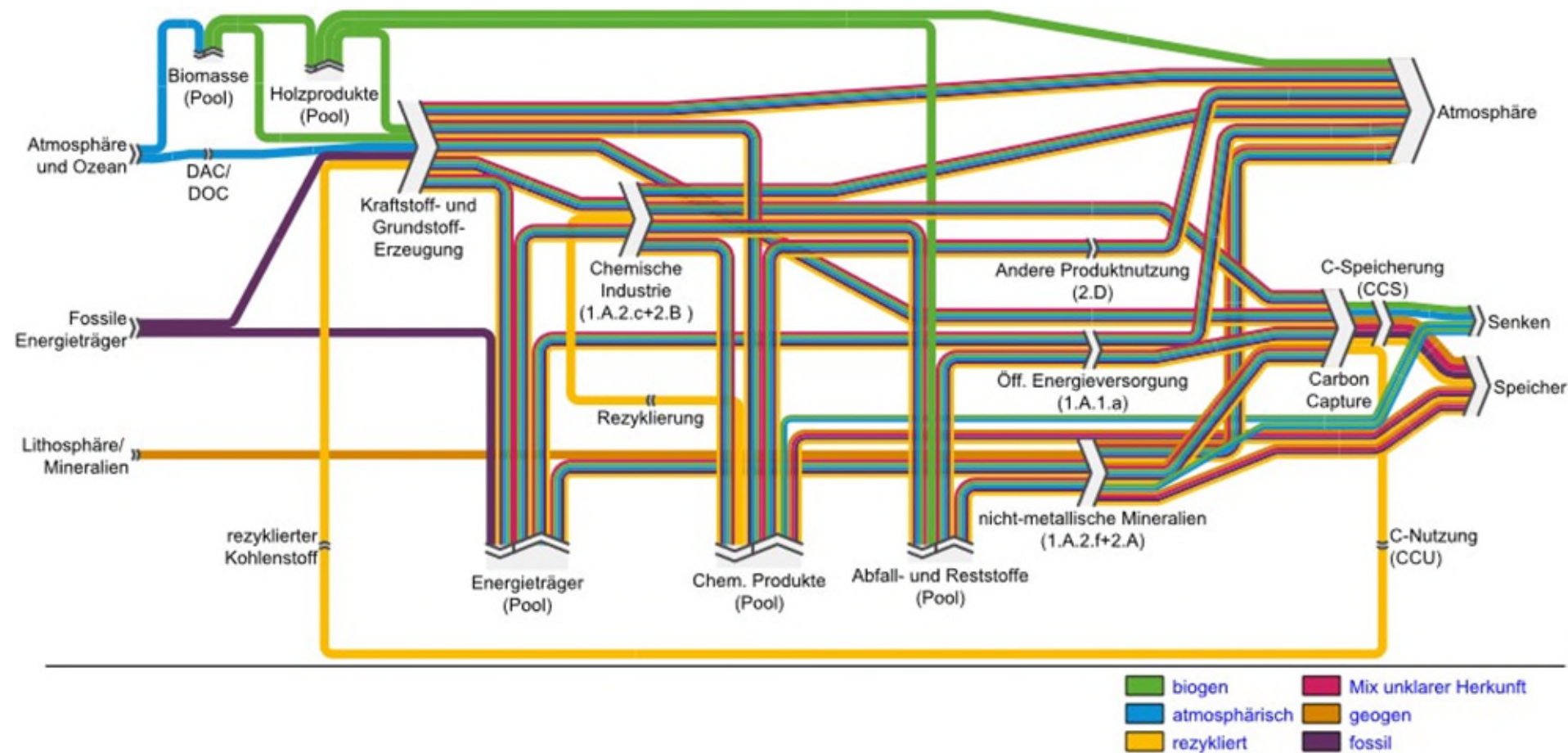
werden. Zudem wird die Rezyklierung von Produkten und Kunststoffabfällen eine wachsende Rolle spielen, um den enthaltenen Kohlenstoff wiederzuverwenden. (Geres, R. et al., 2023)

Ein weiterer Ursprung für Kohlenstoff ist die CO₂-Abscheidung mit einer anschließenden Kohlenstoff-Nutzung (CCU) in Chemieanlagen. Dabei kann in verschiedenen Industriezweigen, in der Energieversorgung sowie in der Abfallverbrennung, emittiertes CO₂ abgeschieden und zu Grundchemikalien bzw. Energieträgern umgewandelt werden. Vor allem die Industriezweige der nicht-metallischen Mineralien sind dafür relevant, da sie weiterhin prozessbedingt geogenes CO₂ emittieren werden, das abgeschieden werden muss. (acatech, 2018)

Daher wird der Fluss von rezyklierten Kohlenstoff aus der CO₂-Abscheidung eine immer wichtigere Rolle spielen und potenziell nicht nur Kohlenstoff in Form von CO₂ umfassen, sondern auch in Form von Kohlenstoffwasserketten aus Rezyklierungsprozessen und Biomasse aus Abfall- und Reststoffen. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen können jedoch nicht die gesamten Emissionen abgeschieden werden, sodass aus den genannten Sektoren auch bei bestehender Abscheidung ein gewisser Reststrom in die Atmosphäre bestehen bleibt. Gleichzeitig wird der Kohlenstoff länger in Kreisläufen gehalten, sodass die fossilen Emissionen einerseits zwar zurückgehen, andererseits aber ebenfalls in die Zukunft verlagert werden. Nach abgeschlossener Transformation werden diese fossilen Anteile nach und nach verschwinden.

In einer netto-THG-neutralen Kohlenstoffwirtschaft müssen somit fossile und geogene Kohlenstoffe nach ihrer Umwandlung und Nutzung abgeschieden und eingespeichert oder weiter genutzt werden. Emissionen, die bei dieser Nutzung und Umwandlung weiterhin freiwerden (z.T. unvermeidbar durch Emissionen bei Förderung, Schlupf und Leckagen, sowie bei der Abscheidung) müssen mit CDR-Maßnahmen ausgeglichen werden. Dabei sind die Potenziale sowohl für Speicherung als auch CDR begrenzt.

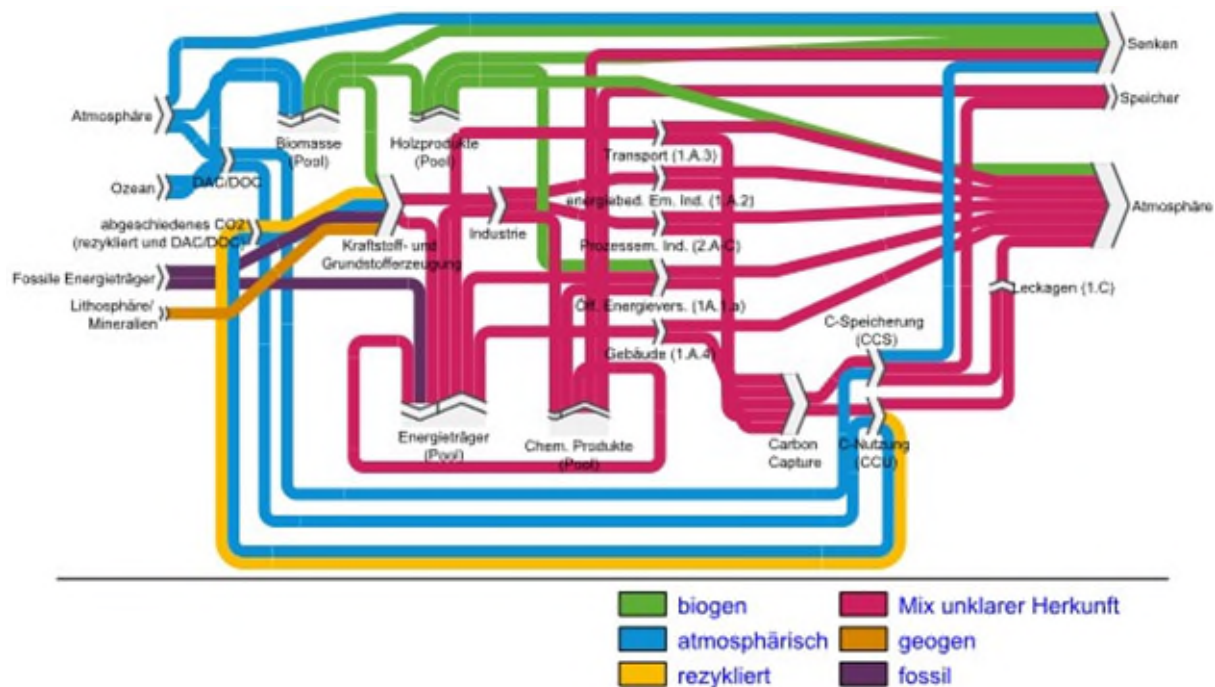
Abbildung 5: Zoom-In Kohlenstoffflüsse der Chemischen Industrie mit Teilen der Energiewirtschaft



Quelle: eigene Darstellung, IREES

3.2.5 Übersichtsabbildung

Abbildung 6: Kohlenstoffflüsse in der Transformation zu einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft im Überblick



Hinweis: Die Kategorie Mix repräsentiert hier vereinfachend alle anderen Kategorien, um die Übersichtlichkeit zu erhalten.

Quelle: eigene Darstellung, IREES

Auch wenn der fossile Anteil an den Quellen vor allem im energetischen Bereich in Zukunft zurückgeht, wird die rohstoffliche Nutzung von Materialien mit gebundenem Kohlenstoff aus geogenen Quellen (z. B. Kalkstein in der Zementbranche) sowie möglicherweise von fossilen Trägern (z. B. für organische Grundchemikalien oder als Anoden in der Metallerzeugung) weiterhin zu THG-relevanten Emissionen führen. Diese fossilen und geogenen Kohlenstoffe müssen nach ihrer Nutzung abgeschieden und gespeichert oder genutzt werden (CCS/CCU). Anfallende unvermeidbare Emissionen und Leckagen müssen zudem ausgeglichen werden.

Die energetische Umwandlung umfasst die Herstellung von türkischem Wasserstoff in Hochtemperaturreaktoren über die Methanpyrolyse. Der entstehende Kohlenstoff aus fossilem Erdgas kann in Form von festem Kohlenstoff als Granulat z. B. geologisch eingelagert werden. Der Pfad existiert über Bio-Methan oder synthetisches Methan auch mit biogenem, atmosphärischem oder rezykliertem CO₂.

Die Abscheidung von CO₂ wird auch für einen Einsatz in Gebäuden diskutiert, z. B. durch DAC an der Lüftungsanlage (Teil des atmosphärischen Pfades „Atmosphäre“ – „CO₂-Abscheidung“) oder durch Carbon Capture an Heizungen (Teil des fossilen Pfades „Umwandlung und Nutzung“ – „CO₂-Abscheidung“). Ebenso wird Carbon Capture für internationalen Seeverkehr diskutiert (OCC-Onboard Carbon Capture), („Transport“ – „CO₂-Abscheidung“).

Aus dem Industriesektor entstehende Emissionen sind als energiebedingte Emissionen und prozessbedingte Emissionen kategorisiert (für Details zu den Sektoren siehe Zoom-In Industrie, Abschnitt 3.2.3). Weiterhin verlässt Kohlenstoff in Form von Produkten den Industriesektor. Diese Produkte bilden einen temporären Speicher. Dies ist für die Nachverfolgbarkeit der C-Quelle eine Herausforderung. Wenn Produkte dann bspw. als Abfall genutzt als Brennstoff zur

öffentlichen Energieversorgung eingesetzt werden (Müllverbrennungsanlage), ist bis auf den biogenen Anteil der Ursprung des Kohlenstoffs (derzeit) nicht nachvollziehbar (siehe Zoom-In Industrie). Gleiches gilt, wenn ein energetischer Einsatz der Abfallstoffe in der Industrie erfolgt (in der Abbildung dargestellt über den Fluss der Chemischen Produkte in den Energieträgerpool) oder die als Abfallstoffe deklarierten Kunststoffe eingelagert werden (dargestellt als Fluss der Chemischen Produkte in Speicher im Falle einer Minderung und Senken).

4 Fehlstellenanalyse

Im vorangehenden Kapitel wurden die Kohlenstoffflüsse einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft skizziert. Nun soll analysiert werden, welche dieser Kohlenstoffflüsse in den heutigen THG-Inventaren (basierend auf den IPCC-Richtlinien und den CRT-Tabellen, siehe Kapitel 2.2) nicht abgebildet werden können. Solche Inkonsistenzen zwischen einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft und den heutigen THG-Inventaren werden im Folgenden als „Fehlstellen“ bezeichnet.

4.1 Vorgehen für die Identifikation und Beurteilung von Fehlstellen

Die Kohlenstoffflüsse aus dem übergeordneten Sankey-Diagramm (Abbildung 6) wurden tabellarisch erfasst und für jeden Fluss Quelle und Speicher bzw. Senke sowie die Prozessbeschreibung dokumentiert. Soweit möglich, ist jeder Fluss den entsprechenden Kategorien des CRT zugeordnet. Schließlich wird für jeden Fluss der mögliche Ursprung des enthaltenen Kohlenstoffs erfasst, unterteilt in fossil, geogen, biogen, atmosphärisch, rezykliert.

Auf dieser Basis wird für jeden Fluss die Fehlstellenanalyse anhand folgender Hauptkriterien durchgeführt:

1. Ist der Fluss in den IPCC-Richtlinien definiert (Ja/Nein)?
Ist die Erfassung des Flusses im CRT in den IPCC-Richtlinien eindeutig und konkret definiert? Kann der Fluss in der Struktur des CRT abgebildet werden?
2. Sind erforderliche Datengrundlagen (insb. Lagerbestände) verfügbar (Ja/Nein)?
Gibt es statistische Datengrundlagen (z. B. Lagerbestände), die für den Fluss wichtig sind? Sind diese Datengrundlagen im CRT abgebildet? Sind sie genügend detailliert?

Wird für einen Fluss eine der beiden Fragen mit „Nein“ beantwortet, liegt eine Fehlstelle vor.

Zusätzlich werden für jeden Fluss die folgenden weiteren Kriterien bewertet:

- Kann der Fluss mit den Berechnungsmethoden aus den IPCC-Richtlinien genügend genau abgebildet werden? (Ja/Nein)
Bilden alle vorgeschlagenen IPCC-Berechnungsmethoden (alle Tiers) den Fluss genügend genau ab? Sind die Berechnungsmethoden genügend detailliert, um den Fluss abzubilden? Ja = durch alle Tiers genügend genau abgedeckt
- Wird der Ursprung des Kohlenstoffs im CRT ausgewiesen (Ja/Nein)?
Ist es möglich, den Ursprung des Kohlenstoffs aus den im CRT enthaltenen Informationen abzuleiten? Wenn nein, ist es möglich, den Ursprung des biogenen Kohlenstoffs und/oder des atmosphärischen/rezyklierten Kohlenstoffs zu bestimmen?
- Ist der Fluss beeinflusst durch andere Fehlstellen?
Qualitative Beschreibung des Einflusses anderer Flüsse mit Fehlstellen.

Wird für einen Fluss eines oder mehrere der weiteren Kriterien mit „Nein“ beantwortet, ist im Einzelfall zu entscheiden, ob eine Fehlstelle vorliegt.

Ausgehend von den oben beschriebenen Kriterien werden die Kohlenstoffflüsse in folgende drei Kategorien unterteilt:

- Abbildbar, bestehend: „Klassische“ Kohlenstoffflüsse, die in den heutigen THG-Inventaren erfasst/abgebildet werden können (z. B. energetische Emissionen fossiler Brennstoffe, Prozessemissionen Industrie, Landwirtschaft)

- Abbildbar, neu: „Neue“ Kohlenstoffflüsse, die in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft relevant werden und in den heutigen THG-Inventaren bereits erfasst werden können (z. B. HWP¹¹-Pool, Recovery von Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen (MVA))
- Fehlstellen: „Neue“ Kohlenstoffflüsse, die in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft relevant werden, aber in den heutigen THG-Inventaren nicht erfasst werden können (z. B. E-Fuels, DAC, CCU; Kohlenstoff-Pools)

Die Fehlstellen lassen sich größtenteils auf Basis des übergeordneten Sankey-Diagramms (Abbildung 6) identifizieren und analysieren. Die Zoom-In Sankey-Diagramme für einzelne Sektoren (Abbildung 2 bis Abbildung 5) bringen für die Fehlstellen in den meisten Fällen keine Mehrinformation und werden deshalb für die Fehlstellenanalyse nicht näher betrachtet. Ausnahme sind die Flüsse rund um Pflanzenkohle/ feste Biomasse, die im übergeordneten Sankey-Diagramm nicht alleinstehend sichtbar sind, in der Fehlstellenanalyse aber explizit aufgenommen werden.

Grundlagen für die Fehlstellenanalyse waren die IPCC-Richtlinien (IPCC, 2006) und die Vorlagen für die Common Reporting Tables (CRT) der UNFCCC (UNFCCC, 2021). Die Ergebnisse der Analyse wurden zudem mit einem Working Paper des Öko-Instituts (Challenges for the accounting of emerging negative and zero/low emission technologies) plausibilisiert (Jörß et al., 2022).

4.2 Ergebnisse der Fehlstellenanalyse

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der Fehlstellenanalyse summarisch. Detaillierte Informationen zu den einzelnen Flüssen und deren Beurteilung finden sich in der angehängten Excel-Datei.

4.2.1 Übersicht

Das Sankey-Diagramm der Übersicht über die zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft (vgl. Kapitel 3.2.5, Abbildung 6) beinhaltet 39 übergeordnete Flüsse. Die meisten Flüsse können in den CRT-Tabellen der heutigen THG-Inventare gut abgebildet werden, insbesondere wenn es um die Bestimmung einer Emission geht (diese ist der Hauptzweck der Inventare). 9 Flüsse weisen Fehlstellen auf. Diese Flüsse haben gemeinsam, dass die IPCC-Richtlinien nicht festlegen, wie sie in den THG-Inventaren berücksichtigt werden müssen. Zudem fehlen bei den meisten dieser Flüsse die Datengrundlagen, um sie in den CRT-Tabellen korrekt abzubilden.

Die Fehlstellen eines Flusses haben auch Auswirkungen auf weitere (nachfolgende) Flüsse. Beispielsweise ist in den IPCC-Richtlinien nicht vorgegeben, wie mit DAC und CCU umzugehen ist. Dies führt dazu, dass für atmosphärischen (DAC) oder rezyklierten (CCU) Kohlenstoff der Ursprung in den CRT-Tabellen nicht ausgewiesen werden kann. In der folgenden Tabelle wurde für jeden Fluss eruiert, welchen möglichen Ursprung ein Kohlenstoffatom haben kann (fossil, geogen, biogen, atmosphärisch, rezykliert) und ob eine Fehlstelle vorliegt. Als Fehlstelle sind nur Flüsse markiert, bei welchen eine Fehlstelle erstmalig eintritt – davon betroffene, nachfolgende Flüsse sind nicht als Fehlstelle gekennzeichnet (siehe dazu Bsp. in Abbildung 8).

¹¹ Harvested Wood Products, d.h. Holzprodukte

Tabelle 1: Fehlstellen und möglicher Ursprung des Kohlenstoffs in der zirkulären Kohlenstoffwirtschaft

Legende: fos. = fossil, geo. = geogen, bio. = biogen, atm. = atmosphärisch, rez. = rezykliert

Nr.	Pfad	CRT-Kategorie(n)	Möglicher Ursprung des Kohlenstoffs					Fehlstellen
			fos.	geo.	bio.	atm.	rez.	
1	Langfristige (natürliche) CO ₂ - Speicherung aus Atmosphäre (nicht als Biomasse; z. B. enhanced weathering)	-						
2	CO ₂ wird aus der Atmosphäre in Biomasse gebunden	4 (ohne 4G)						
3	CO ₂ aus Biomasse in Atmosphäre	4 (ohne 4G)						
4	CO ₂ -Abscheidung aus der Atmosphäre durch DAC	-						
5	CO ₂ -Abscheidung aus den Ozeanen durch DOC	-						
6	Herstellung von Holzprodukten (Möbel, Papier, Gebäude etc.)	4G						
7	Biomasse (Holz etc.) als Rohstoff (nicht Energieträger) in der Industrie	2H						
8	Import und Herstellung von biogenen Kraftstoffen	Energie-statistik						
9	CO ₂ wird aus dem Ozean in Biomasse gebunden	-						
10	Import und Herstellung fossiler Energieträger	Energie-statistik						
11	Verwendung von Energieträgern in der Industrie	1A2a bis 1A2gvii						
12	Nutzung von abgeschiedenem CO ₂ (DAC/DOC/CCU) als Rohstoff für die Industrie (stofflich) oder als Energieträger (synthetischer Kraftstoff)	-						
13	Flüchtige Emissionen aus der Lagerung/Transport der Kraftstoffe in die Atmosphäre	1B						
14	Herstellung synthetischer Kraftstoffe mit CO ₂ aus DAC/CCU	Energie-statistik						
15	C in chemischen Produkten (z. B. Plastik)	2B						

Nr.	Pfad	CRT-Kategorie(n)	Möglicher Ursprung des Kohlenstoffs					Fehlstellen
			fos.	geo.	bio.	atm.	rez.	
16	Verwendung von Energieträgern für Transport (inkl. Internationaler Transport)	1A3, 1A4cii, 1A2gvii, 1D						
17	Verwendung von Energieträgern für die Beheizung von Gebäuden	1A4						
18	Emissionen aus der Beheizung von Gebäuden	1A4						
19	CO ₂ -Abscheidung aus Gebäuden	1A4						
20	Emissionen aus dem Transport in die Atmosphäre (inkl. Internationaler Transport)	1A3, 1A4cii, 1A2gvii, 1D						
21	Emissionen aus der öffentlichen Energieversorgung in die Atmosphäre	1A1, 1A4a bis 1A4cii						
22	Nutzung von Energieträgern für die öffentliche Energieversorgung (Strom-/Wärmebereitstellung etc.) und in Gebäuden sowie zur Herstellung von Energieträgern	1A1, 1A4a bis 1A4cii						
23	Nutzung von Abfällen/Stoffen für die öffentliche Energieversorgung (Strom-/Wärmebereitstellung etc.)	1A1a						
24	Dauerhafte Speicherung von CO ₂ aus CCS	1C						
25	CO ₂ -Abscheidung aus der öffentlichen Energieversorgung	1A1						
26	Holz als Energieträger (Teil des Abfalls) in der Energieversorgung	1A1a						
27	energiebedingte Emissionen der Industrie in die Atmosphäre	1A2						
28	CO ₂ -Abscheidung in der Industrie (energiebedingte Emissionen)	1A2						
29	Prozessemissionen der Industrie in die Atmosphäre	2						
30	CO ₂ -Abscheidung in der Industrie (Prozessemissionen)	2						
31	Herstellung von Pflanzenkohle aus Biomasse	1B1bi						
32	Einbringung von Pflanzenkohle in Acker- und Grünland	4						

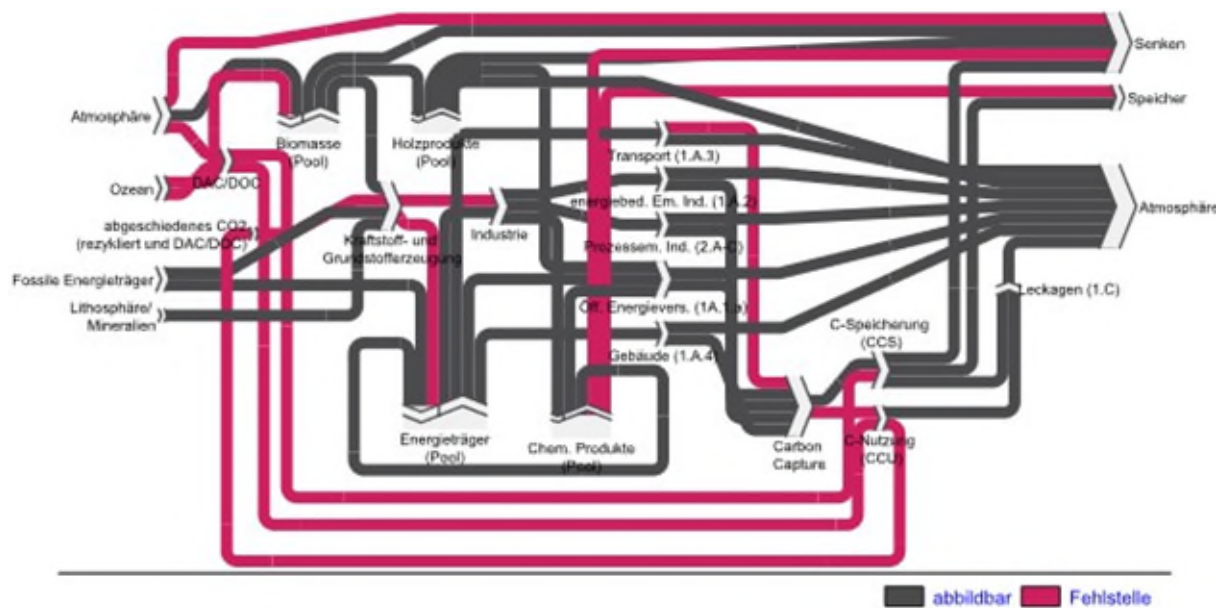
Nr.	Pfad	CRT-Kategorie(n)	Möglicher Ursprung des Kohlenstoffs					Fehlstellen
			fos.	geo.	bio.	atm.	rez.	
33	Einbringung von Pflanzenkohle in geologischen Speichern	-						
34	Flüchtige Emissionen aus dem Transport und der Speicherung von CO ₂ in der Atmosphäre	1C						
35	Netto-Emissionen/Senken aus dem HWP-Pool	4G						
36	Wiederverwendung von abgeschiedenem CO ₂	-						
37	Flüchtige Emissionen aus CO ₂ - Transport und Aufbereitung für Wiederverwendung in Atmosphäre	1C						
38	C aus geologischen Quellen für industrielle Prozesse (z. B. Beton)	2A						
39	CO ₂ -Abscheidung aus internationalem Transport	Bunker fuels						

Quelle: eigene Darstellung, INFRAS

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Berechnungsmethoden in den IPCC-Richtlinien für die meisten Pfade ausreichend sind. In wenigen Fällen, z. B. für das Einbringen von Pflanzenkohle/ fester Biomasse in geologische Speicher oder für die Nutzung von abgeschiedenem CO₂ (energetisch oder stofflich) sind die in den IPCC-Richtlinien verfügbaren Berechnungsmethoden jedoch noch nicht ausreichend.

Ebenfalls kann in den CRT-Tabellen in den meisten Fällen angegeben werden, ob der Ursprung des Kohlenstoffs biogen oder geogen ist. Eine wichtige Ausnahme bildet der Kohlenstoff, der in chemischen Produkten gespeichert ist (z. B. Plastik) – dort kann ein allfälliger biogener Ursprung des Kohlenstoffs in den heutigen CRT-Tabellen nicht ausgewiesen werden. Die Unterscheidung zwischen atmosphärischem und rezykliertem Ursprung ist nicht möglich.

Die Fehlstellen aus obiger Tabelle sind in der folgenden Abbildung grafisch dargestellt (Ausnahme: Die Fehlstelle beim Einbringen von Pflanzenkohle/ fester Biomasse in geologischen Speichern).

Abbildung 7: Grafische Darstellung der Fehlstellen in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft

Quelle: eigene Darstellung, IREES

4.2.2 In den THG-Inventaren (CRT) abbildbare Kohlenstoffpfade

Der Hauptzweck der THG-Inventare ist die Berichterstattung über die Emissionen eines Jahres. Entsprechend lassen sich Kohlenstoffpfade, die mit Emissionen zusammenhängen, in den CRT-Tabellen meist gut abbilden (insb. fossile Quellen). Dazu gehören energetische und prozessbezogene Emissionen in die Atmosphäre (aus Gebäuden, Industrie, Transport und öffentlicher Energieversorgung inkl. Abfallverbrennung). Es können zudem weitere Angaben zu den Emissionen gemacht werden:

- ▶ Biogener Ursprung von Kraftstoffen: Verschiedene Energieträger können unterschieden werden. Dabei kann auch Biomasse ausgewiesen werden, die zu biogenen Emissionen führt. Eine detaillierte Aufschlüsselung nach Art der Biomasse ist hingegen nicht möglich. Auch bei der Abfallverbrennung kann der Anteil der Biomasse angegeben werden.
- ▶ Abscheidung von CO₂: Die Abscheidung von CO₂ kann pro Energieträger angegeben werden. Bei anderen Prozessen (z. B. Abfallverbrennung, Abwasserbehandlung oder industriellen Prozessen) können teilweise zurückgewonnene THG-Emissionen („recovery“) angegeben werden (z. B. Methan).
- ▶ Der Transport von CO₂ und allfällige damit zusammenhängende Leckagen sind im CRT abbildbar (Sektor 1C).

Kohlenstoff-Pools lassen sich in den THG-Inventaren in manchen Fällen abbilden (i.d.R. in Kombination mit statistischen Daten der Länder, die im National Inventory Document NID festgehalten werden). So werden im CRT die Verbräuche von verschiedenen Energieträgern angegeben oder die Produktion von chemischen Produkten (Aktivitätsdaten im CRT). Ergänzt mit statistischen Daten aus dem NID können daraus auch Kohlenstoff-Pools abgeleitet werden. Im Sektor LULUCF wird zudem der Pool von Holzprodukten („Harvested Wood Products HWP“) abgebildet.

Darüber hinaus gibt es in den CRT-Tabellen für die meisten Prozesse eine Möglichkeit, weitere (länderspezifische) Kategorien anzugeben (Kategorie „Other“ in den Tabellen). In diesen

„Other“-Kategorien können beispielsweise weitere Energieträger, weitere industrielle Prozesse oder auch weitere Landnutzungen rapportiert werden.

4.2.3 Fehlstellen

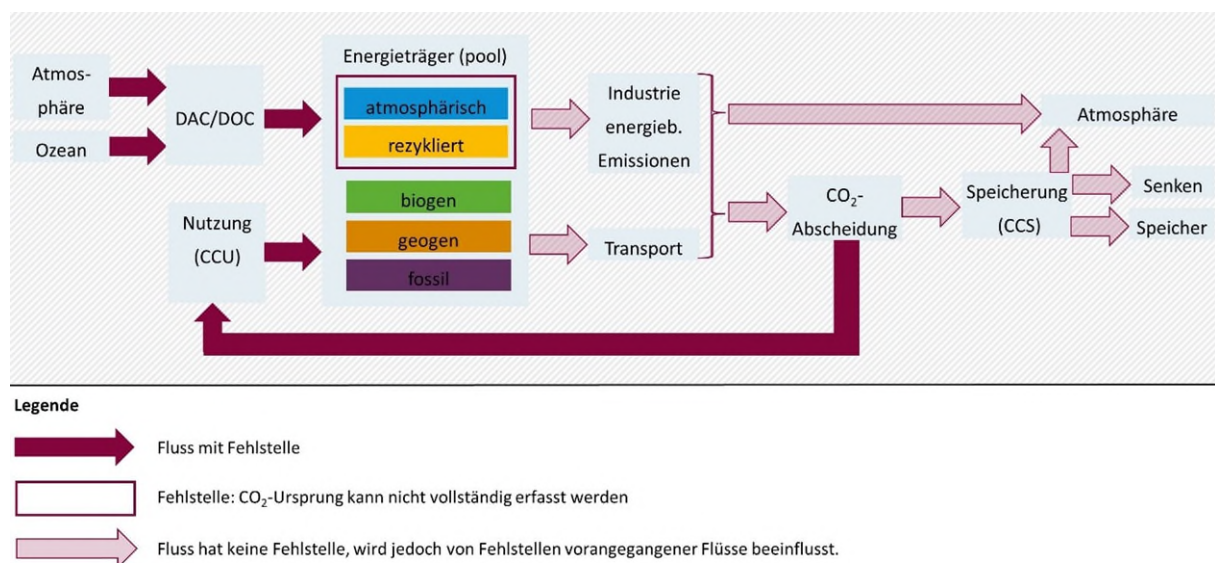
Eine zentrale Fehlstelle in den THG-Inventaren ist, dass die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre oder aus Ozeanen und die Nutzung von rezykliertem CO₂ nicht abgebildet werden kann.

- ▶ DAC/DOC: Zur Erfassung von CO₂, welches durch DAC direkt aus der Atmosphäre oder durch DOC direkt aus den Ozeanen entnommen wird, gibt es in den IPCC-Richtlinien keine Vorgaben. Denkbar ist, dass DAC/DOC in den CRT-Kategorien 4 (LULUCF) oder 6 (Others) rapportiert werden, eine formelle Vorgabe gibt es aber nicht.
- ▶ CCU: Es kann nur abgeschiedenes CO₂ rapportiert werden, welches für die langfristige Speicherung bestimmt ist. Wird das CO₂ nur kurz gespeichert oder später wiederverwendet, darf es nicht von den ausgewiesenen Emissionen abgezogen werden – es sei denn, die abgeschiedenen CO₂-Emissionen werden bei der Wiederverwendung an einer anderen Stelle im Inventar berücksichtigt.
Dies betrifft auch synthetische Treibstoffe. Für diese gibt es in den CRT-Tabellen noch keine Kategorie. Es wäre möglich, sie unter der Kategorie der flüssigen Kraftstoffe („liquid fuels“) zu rapportieren. Dafür müsste der Emissionsfaktor für die flüssigen Kraftstoffe entsprechend angepasst werden. Eine formelle Vorgabe dafür gibt nicht.
Die stoffliche Verwendung von rezykliertem CO₂ in der Industrie (z. B. für chemische Produkte) ist nicht abbildbar.

Dass DAC, DOC und CCU in den heutigen THG-Inventaren nicht abgebildet werden können, hat Folgen für die weiteren Flüsse (siehe Abbildung 8). So kann beispielsweise der Ursprung des CO₂ nicht ausreichend genau definiert werden. Zwar kann zwischen biogenem und fossilem bzw. geogenem CO₂ unterschieden werden, die Ausweisung von atmosphärischem oder rezykliertem CO₂ (nur kurz gespeichert) ist jedoch nicht möglich.

Bei nachfolgenden Flüssen wie der CO₂-Emission in die Atmosphäre oder der CO₂-Abscheidung und -Speicherung bzw. -Wiederverwendung kann daher nicht bestimmt werden, welcher Anteil des CO₂ aus fossilen, geogenen, biogenen, atmosphärischen oder rezyklierten Quellen stammt.

Der Ursprung des CO₂ spielt jedoch für die THG-Bilanzierung in einer zirkulären Kreislaufwirtschaft eine zentrale Rolle: Beispielsweise wird die Speicherung von atmosphärischem CO₂ als „negative“ Emission gewertet, da es zur Reduktion der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre beiträgt. Die Speicherung von biogenem CO₂ kann ebenfalls als negative Emission betrachtet werden, wenn die Biomassenutzung im Gleichgewicht ist. Im Gegensatz dazu wird die Speicherung von fossilem oder geogenem CO₂ als neutral betrachtet, da sie die Konzentration in der Atmosphäre weder erhöht noch senkt. Eine THG-Bilanzierung ist daher ohne vollständige Erfassung des Ursprungs des CO₂ nicht zielführend.

Abbildung 8: Grafische Darstellung der Auswirkungen von Fehlstellen auf weitere Flüsse

Quelle: eigene Darstellung, INFRAS

Bei einigen langfristigen Senken gibt es ebenfalls Fehlstellen. So können Negativemissionstechnologien, die nicht direkt mit Biomasse zu tun haben, nicht in den Inventaren abgebildet werden (z. B. CO₂-Speicherung durch beschleunigte Verwitterung). Auch das Einlagern von Pflanzenkohle/ fester Biomasse in geologischen Speichern kann nicht abgebildet werden.

Weitere Fehlstellen betreffen Pfade, die sich nicht mit dem Territorialprinzip vereinbaren lassen. Dazu gehört CO₂, welches aus dem Ozean in Biomasse gebunden wird und die CO₂-Abscheidung aus dem internationalen Transport. Während zu den Ozeanen in den THG-Inventaren kaum Daten verfügbar sind, werden Kraftstoffe für den internationalen Transport rapportiert (aber nicht angerechnet). Ausgehend von den sogenannten „Bunker fuels“ für den internationalen Transport könnte die CO₂-Abscheidung in den THG-Inventaren grundsätzlich abgebildet werden, es gibt dafür aber keine Vorgaben.

Quellenverzeichnis

acatech. (2018). *CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz (acatech POSITION)*. acatech.

EU parliament & EU council. (2024). *REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a Union certification framework for permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products* (Code: 2022/0394 (COD)).

Geden, O., Gidden, M., Lamb, W. F., Minx, J., Nemet, G. F., Smith, S., Vaughan, N., Fuss, S., Buck, H., Schenuit, F., Pongratz, J., Schulte, I., Probst, B., Edwards, M., Cox, E., Iny Johnstone, Burke, J., Roe, S., & Müller-Hansen, F. (2024). *The State of Carbon Dioxide Removal—2nd Edition*. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/F85QJ>

Geres, R., Ausfelder, F., & Bazzanella, Alexis Michael. (2023). *Chemistry 4 Climate—Wie die Transformation der Chemie gelingen kann* [Abschlussbericht]. VCI & VDI.

IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

IPCC. (2022). *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (1. Aufl.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>

IPCC, Shukla, P. R., Skea, J., & Slade, R. (2022). *Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Assessment report]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Jörß, W., Emele, L., Moosmann, L., & Graichen, J. (2022). *Challenges for the accounting of emerging negative and zero/low emission technologies* [Working Paper]. Öko-Institut.
<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-NET-accounting.pdf>

Lorenz, G. D., Voerkelius, S., & Huxol, S. (2022). *Bestimmung der biogenen Kohlenstoffgehalte von Klärschlamm und Faulgas und Untersuchung von Abhängigkeiten zu Kläranlagen-Basisdaten, Abwasserwerten und Klärschlammzusammensetzung*. Hydroisotop GmbH.

UNFCCC. (2021). *Common Reporting Tables (CRT) on NIRs* [Dataset]. <https://unfccc.int/documents/311076>

UNFCCC. (2022). *Recommendations on guidance for activities involving removals under the Article 6.4 Mechanism*. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb003-a03.pdf>