

CLIMATE CHANGE

54/2026

Abschlussbericht

Bilanzierungsoptionen von Kohlenstoffpfaden einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft

**Konzeptionelle Grundlagen und Beispiele für fossilen
und atmosphärischen Kohlenstoff**

von:

Vicki Duscha

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe

Quirin Oberpriller; Felix Weber

INFRAS, Zürich

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 54/2026

KLIFOPLAN des Bundesministeriums für Wirtschaft und
Klimaschutz

Forschungskennzahl 37K2 34 110 0

Abschlussbericht

Bilanzierungsoptionen von Kohlenstoffpfaden einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft

Konzeptionelle Grundlagen und Beispiele für fossilen und
atmosphärischen Kohlenstoff

von

Vicki Duscha

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung
(ISI), Karlsruhe

Quirin Oberpriller; Felix Weber
INFRAS, Zürich

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 Straße 48
76139 Karlsruhe

INFRAS AG
Binzstrasse 23
8045 Zürich

Abschlussdatum:

April 2026

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-8503>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Oktober 2026

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

Kurzbeschreibung: Bilanzierungsoptionen von Kohlenstoffpfaden einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft

Mit den Zielen des Übereinkommens von Paris (ÜvP) und den daraus abgeleiteten Treibhausgasneutralitätszielen für Deutschland (2045) und die EU (2050) kommt dem Kohlenstoff zukünftig eine neue Rolle in unserem Wirtschaftssystem zu. Dies betrifft etwa die Abscheidung von Kohlenstoff und anschließende permanente Speicherung oder wiederholte Nutzung. Vor diesem Hintergrund entwickelt der vorliegende Bericht ein Regelwerk der attributbasierten Bilanzierung von Kohlenstoff (C-0, C-1) und damit verbundener Vorgaben bei Emissionen bzw. permanenter Speicherung. Das Regelwerk bildet den Effekt von Treibhausgasemissionen auf die Konzentration in der Atmosphäre systematisch und physikalisch korrekt ab.

Anhand von mehreren Anwendungsbeispielen zeigt der Bericht, dass das Regelwerk es ermöglicht, eine Reihe von konsistenten und nachvollziehbaren Bilanzierungsoptionen für zukünftige Kohlenstoffkreisläufe in nationalen Treibhausgasinventaren abzuleiten. Insbesondere ermöglicht es eine korrekte Erfassung bisher unzureichend abgebildeter Kohlenstoffflüsse sowie eine differenziertere Zuordnung von Emissionen entsprechend ihres Ursprungs (fossil vs. atmosphärisch). Auch der Umgang mit Kohlenstoff biogenen Ursprungs und mögliche Alternativen zur bestehenden Bilanzierung werden diskutiert.

Die Analyse verdeutlicht Zielkonflikte zwischen kompakter und detaillierter Inventarisierung, sowie zwischen einheitlicher und differenzierter Attribution. Eine Bilanzierungsoption kann jeweils nur eines dieser Ziele erfüllen. Im Hinblick auf die Zielarchitektur der Treibhausgasneutralitätsziele für Deutschland erlauben die Optionen, die möglichen Emissionskategorien (erzeugte Emissionen, ausgestoßene Emissionen, technische Senken) abzubilden.

Schlussendlich zeigen die Ergebnisse, dass die Behandlung grenzüberschreitender Wertschöpfungsketten, sowie die Anwendung des Territorialprinzips entscheidende Auswirkungen auf die Konsistenz und Aussagekraft von Inventaren haben.

Abstract: Options for future carbon pathway accounting

With the objectives of the Paris Agreement (PA) and the derived greenhouse gas neutrality targets for Germany (2045) and the EU (2050), carbon will assume a new role in our economic system in the future. This concerns, for example, the capture of carbon and its subsequent permanent storage or repeated use. Against this background, this report develops a framework for attribute-based accounting (C-0, C-1) and the associated rules for emissions and permanent storage. The framework systematically and physically accurately represents the effect of greenhouse gas (GHG) emissions on atmospheric concentrations.

Using several application examples, the report demonstrates that this framework enables the derivation of a range of consistent and transparent accounting options for future carbon cycles in GHG inventories. In particular, it allows for a more accurate recording of carbon flows that have so far been insufficiently represented, as well as a more differentiated attribution of emissions according to their origin (fossil or atmospheric). The handling of carbon of biogenic origin and possible alternatives to existing accounting approaches are also discussed.

The analysis highlights trade-offs between compact vs. detailed inventorying, as well as uniform vs. differentiated attribution. Any given accounting option can only fulfill one of these objectives. With regard to the target architecture of GHG neutrality goals for Germany, the options make it

possible to represent different emission categories (generated emissions, emitted emissions, and technical sinks).

Finally, the results show that the treatment of cross-border value chains, as well as the application of territorial principle, have decisive impacts on the consistency and explanatory power of inventories.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis.....	12
Zusammenfassung.....	13
Summary	30
Glossar.....	45
1 Einleitung.....	48
1.1 Ausgangslage.....	48
1.2 Zirkuläre Kohlenstoffpfade und THG-Berichterstattung.....	48
1.3 Auftrag und Ziel.....	49
2 Konzeptionelle Grundlagen zur Bilanzierung.....	51
2.1 Regeln und Attribute.....	51
2.2 Ursprungsphase	54
2.3 Nutzungsphase (Kohlenstoffwirtschaft)	56
2.4 Endphase (Emission oder permanente Speicherung).....	56
2.5 Bilanzierung Methanemissionen	57
3 Anwendung der Bilanzierungsoptionen in der Emissionsberichterstattung.....	59
3.1 Grundsätze für die weiteren Arbeiten	59
3.2 Bilanzierungsoptionen Ursprungsphase	60
3.3 Bilanzierungsoptionen Nutzungsphase.....	61
3.4 Kombinierte Bilanzierungsoptionen	62
4 Sonderfall Biomasse	65
4.1 Heutige Praxis	65
4.2 Rechtfertigungen für C-0-Attribut.....	67
4.3 Mögliche Bilanzierungsoption mit C-1-Attribut.....	68
4.3.1 Beschreibung Bilanzierungsoption	68
4.3.2 Beispiel 1: Netto-Biomassereduktion	70
4.3.3 Beispiel 2: Netto-Biomassewachstum	73
4.4 Zusammenfassung und Diskussion	74
4.4.1 Zusammenfassung	74
4.4.2 Diskussion	75

5	Anwendungsbeispiel 1: Technische CO ₂ -Entnahme aus Atmosphäre und Speicherung (DACCS)	77
5.1	Beschreibung.....	77
5.2	Bilanzierungsoptionen	77
5.3	Inventarisierung	78
6	Anwendungsbeispiel 2: Verbrennung, Abscheidung und Speicherung von Energieträgern (CCS)	81
6.1	Beschreibung.....	81
6.2	Bilanzierungsoptionen	81
6.3	Inventarisierung	81
6.3.1	Szenario für die Fallbeispiele	81
6.3.2	Beispiel 2a: Fossiler Energieträger.....	83
6.3.3	Beispiel 2b: Synthetischer Energieträger.....	87
7	Anwendungsbeispiel 3: Verbrennung, Abscheidung und Rezyklierung (CCU).....	91
7.1	Beschreibung.....	91
7.2	Bilanzierungsoptionen	91
7.3	Inventarisierung	91
7.3.1	Szenario für Fallbeispiele	91
7.3.2	Beispiel 3a: Synthetischer Energieträger aus atmosphärischem Kohlenstoff im Kreislauf	93
7.3.3	Beispiel 3b: Synthetischer Energieträger aus fossilem und atmosphärischem Kohlenstoff im Kreislauf.....	96
8	Anwendungsbeispiel 4: Langlebige (chemische) Produkte.....	100
8.1	Beschreibung.....	100
8.2	Bilanzierungsoptionen	100
8.3	Ansätze zur korrekten Bilanzierung langlebiger Produkte.....	101
8.3.1	Ansatz 1: Modellierung Verhältnis C-0 zu C-1-Attribut (Produkte-Pool).....	101
8.3.2	Ansatz 2: Einheitliches C-Attribut für langlebige Produkte in der Nutzungsphase	103
9	Eigenschaften der Bilanzierungsoptionen.....	104
9.1	Kompakte versus detaillierte Inventarisierung.....	104
9.2	Einheitliche versus differenzierte C-Attribution in der Nutzungsphase	106
9.3	Einfluss der Bilanzierungsoptionen auf die in Kapitel 3.1 definierten Grundsätze	108
9.4	Bedeutung der Bilanzierungsoptionen für Zielarchitekturen	110
10	Bedeutung der Bilanzierungsoptionen für Territorialprinzip, nationale Inventare und Sektoren	113
10.1	Rolle des Territorialprinzips	114

10.2	Bilanzen für länderübergreifende Prozesse.....	116
10.3	Ergebnisse für ausgewählte Sektoren.....	119
11	Diskussion der Bilanzierungsoptionen	125
12	Ausblick	129
13	Quellenverzeichnis	130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung der Option U1-N1 und U1-N2 für DACC(U)S	21
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Option U1-N4 für DACC(U)S	22
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der Option U2-N1 für DACC(U)S	23
Abbildung 4:	Schematische Darstellung der Option U2-N3 für DACC(U)S	24
Figure 5:	Schematic representation of options U1-N1 and U1-N2 for DACC(U)S	37
Figure 6:	Schematic representation of option U1-N4 for DACC(U)S.....	38
Figure 7:	Schematic representation of option U2-N1 for DACC(U)S.....	39
Figure 8:	Schematic representation of option U2-N3 for DACC(U)S.....	40
Abbildung 9:	Legende der Icons.....	47
Abbildung 10:	Ursprungsphase: Bilanzierung und daraus folgende Attribute	55
Abbildung 11:	Nutzungsphase: Bilanzierung und daraus folgende Attribute	56
Abbildung 12:	Bilanzierung Endphase	57
Abbildung 13:	Praxis Bilanzierung Biomasse	65
Abbildung 14:	Bilanzierungsoption für Biomasse mit C-1-Attribut	69
Abbildung 15:	Bilanzierungsoptionen DACCS.....	78
Abbildung 16:	Bilanzierungsoptionen der Verbrennung eines fossilen Energieträgers mit Abscheidung	84
Abbildung 17:	Bilanzierungsoptionen der Verbrennung eines synthetischen Energieträgers mit Abscheidung	88
Abbildung 18:	Bilanzierungsoptionen der Verbrennung eines synthetischen Energieträgers mit Abscheidung und erneuter Nutzung	94
Abbildung 19:	Bilanzierungsoptionen synthetischer und fossiler Energieträger CCU	97
Abbildung 20:	Matrix zur Einordnung der vier relevanten Bilanzierungsoptionen.....	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Regeln zur Bilanzierung von gebundenem, attributiertem Kohlenstoff	15
Tabelle 2:	Überblick über und Ausschluss möglicher Kombinationen von Bilanzierungsoptionen.....	17
Tabelle 3:	Fallbeispiel Energieträger: Betrachtete Kohlenstoffmengen in tCO ₂	19
Tabelle 4:	Bilanzierungsoptionen für synthetische Energieträger	24
Tabelle 5:	Überblick über die Charakteristika der betrachteten Bilanzierungsoptionen.....	28
Table 6:	Rules for accounting of bound, attributed carbon.....	32
Table 7:	Overview and exclusion of possible combinations of accounting options.....	34
Table 8:	Case study: energy sources: carbon quantities considered in tCO ₂	36
Table 9:	Accounting options for synthetic energy sources	40
Table 10:	Overview of the characteristics of the accounting options considered	44
Tabelle 11:	Bilanzierungsoptionen.....	45
Tabelle 12:	Regeln zur Bilanzierung von gebundenem Kohlenstoff (Ursprungsphase)	53
Tabelle 13:	Regeln zur Bilanzierung von gebundenem Kohlenstoff (Nutzungsphase).....	54
Tabelle 14:	Regeln zur Bilanzierung von gebundenem Kohlenstoff (Endphase).....	54
Tabelle 15:	Bilanzierungsoptionen Nutzungsphase	62
Tabelle 16:	Überblick über mögliche Kombinationen von Bilanzierungsoptionen und im Weiteren betrachtete Optionen	63
Tabelle 17:	Bilanzierungsoptionen Biomasse – Beispiel 1 (Netto-Biomassereduktion).....	71
Tabelle 18:	Bilanzierungsoptionen Biomasse – Beispiel 1 mit Sektor X als Teil des LULUCF-Sektors (verkürzt)	73
Tabelle 19:	Bilanzierungsoptionen Biomasse – Beispiel 2 (Netto Biomasse Wachstum)	73
Tabelle 20:	Fallbeispiel DACCS: Betrachtete Kohlenstoffmengen in t CO ₂	79
Tabelle 21:	Bilanzierungsoptionen für DACCS	80
Tabelle 22:	Fallbeispiel Energieträger: Betrachtete Kohlenstoffmengen in tCO ₂	82

Tabelle 23:	Bilanzierungsoptionen der Verbrennung eines fossilen Energieträgers mit Abscheidung (vereinfacht: ohne Energiebedarfe und nicht-CO ₂) 86
Tabelle 24:	Bilanzierungsoptionen für synthetische Energieträger 90
Tabelle 25:	Fallbeispiel Energieträger: Betrachtete Kohlenstoffmengen in tCO ₂ 92
Tabelle 26:	Eignung der Bilanzierungsoptionen für eine kompakte vs. detaillierte Inventarisierung 106
Tabelle 27:	Eignung der Bilanzierungsoptionen für einheitliche vs. differenzierte Attribution in der Nutzungsphase 107
Tabelle 28:	Bilanzierungsregeln und Kohlenstoffattribute in den verschiedenen Schritten der Wertschöpfungskette 114
Tabelle 29:	Bilanzierungsregeln zur Umsetzung des Territorialprinzips...115
Tabelle 30:	Umsetzung des Territorialprinzips in den einzelnen Bilanzierungsoptionen nach Phasen.....115
Tabelle 31:	THG-Bilanzierung der Länderbeispiele unter der Annahme, dass entstehende CO ₂ -Emissionen abgeschieden werden 118
Tabelle 32:	Sektorbeispiele und ihre Inventar-Einträge bei Einbindung, Verbrennung und Abscheidung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern.....122
Tabelle 33:	Notwendigkeit neuer CRT-Einträge nach Bilanzierungsoptionen 123
Tabelle 34:	Überblick über die Charakteristika der betrachteten Bilanzierungsoptionen.....125

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BECCS	Bioenergy Carbon Capture and Storage
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CH₄	Methan
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CRT	Common Reporting Tables
DAC	Direct Air Capture
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage
DACCU	Direct Air Carbon Capture and Utilization
DOC	Direct Ocean Capture
EED	EU-Richtlinie für erneuerbare Energien
GWP	Global Warming Potential
HWP	Harvested Wood Products
IPPU	Industrial Processes and Product Use
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry
NDC	Nationally Determined Contribution
NET	Negativemissionstechnologie
THG	Treibhausgase
ÜvP	Übereinkommen von Paris

Zusammenfassung

Mit den Zielen des Übereinkommens von Paris (ÜvP) und den daraus abgeleiteten Treibhausgasneutralitätszielen für Deutschland (2045) und für die EU (2050) sowie den teilweise schon bestehenden und angekündigten Zielen für negative Emissionen kommt dem Kohlenstoff zukünftig eine neue Rolle in unserem Wirtschaftssystem zu. Dabei steht die schnelle und möglichst vollumfängliche Vermeidung von Emissionen von Treibhausgasen (THG) im Zentrum klimapolitischer Überlegungen. Dies erstreckt sich über alle Sektoren und beinhaltet Veränderungen im Einsatz von Energieträgern, Produkten oder Produktionsprozessen (z. B. Elektrifizierung). In vielen Bereichen kann in Zukunft die Erzeugung von Emissionen durch Effizienz, Suffizienz und Substitution vermieden werden. In den übrigen Bereichen (mit sog. „schwer vermeidbaren Emissionen“), stellen der Einsatz von CO₂-Abscheidung aus dem Abgasstrom und die erneute Nutzung des abgeschiedenen CO₂ (Carbon Capture and Utilization – CCU) bzw. dessen Einspeicherung (Carbon Capture and Storage – CCS) eine weitere Möglichkeit dar, eine direkte Emission des CO₂ in die Atmosphäre zu verhindern. Zum Ausgleich verbleibender Restemissionen erhalten Negativemissionstechnologien (NET) eine wichtige Rolle, da sie es ermöglichen, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen. Dabei können sowohl natürliche Prozesse wie z. B. das Einbinden von CO₂ 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 spielen. Zudem ist die Speicherung in geologischen Formationen oder in Form von gebundenem Kohlenstoff in Pflanzenkohle in Böden oder in Form von Biomasse in dauerhaft bestehenden Wäldern relevant.

Gleichzeitig ist Kohlenstoff in vielen Bereichen, in denen zurzeit keine praktikablen Alternativen zur Verfügung stehen, ein wichtiger Einsatzstoff, z. B. als Basis für Kunststoffe und andere chemische Produkte oder als Bestandteil von flüssigen Kraftstoffen für den Flugverkehr. In diesen Bereichen kann CCU dazu beitragen, CO₂-Emissionen zu reduzieren, auch wenn momentan damit keine Treibhausgasneutralität erreicht wird.

Zentrales Element auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität ist die Erstellung nationaler THG-Inventare. Unter dem ÜvP und dem damit verbundenen Transparenzrahmen wurden die Guidelines zur Berichterstattung von THG-Emissionen überarbeitet und angepasst. Technische Senken außerhalb des Landnutzungssektors (land use, land-use change and forestry – LULUCF) und Kohlenstoffkreisläufe spielten in den bisherigen Überarbeitungen der Regelungen jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Entsprechend sind für diese Prozesse bisher keine Regeln definiert bzw. die bestehenden Regeln führen gegebenenfalls zu Problemen. Daher besteht der Bedarf, neben Guidelines zur Berechnung von Quellen und Senken auch Anforderungen zum Berichtswesen zu überarbeiten.

In dem vorliegenden Bericht entwickeln wir ein Regelwerk für Optionen der Bilanzierung basierend auf Attributen (C-0, C-1) von Kohlenstoff. Diese Attribute C-0 und C-1 spiegeln vereinfacht gesagt den Effekt auf die Atmosphäre bei einer Freisetzung von Treibhausgasen wieder. Mit Hilfe der Attribute und Bilanzierungsregeln stellen wir systematisch Bilanzierungsoptionen vor, mit deren Hilfe eine schlüssige Bilanzierung von zukünftigen Kohlenstoffkreisläufen in nationalen THG-Inventaren erfolgen kann.

Regeln und Attribute

Kohlenstoff kommt in der Natur in verschiedenen Formen vor und es ist üblich, zwischen dem natürlichen und dem anthropogenen Kreislauf zu unterscheiden. Dieser Bericht konzentriert sich auf den anthropogenen Kohlenstoffkreislauf und thematisiert die Bilanzierung in einer

künftigen (zirkulären) Kohlenstoffwirtschaft. Hierfür ist es nützlich, von den Komplexitäten dieser Kohlenstoffkreisläufe zu abstrahieren und zur Vereinfachung folgende drei Formen zu unterscheiden: Kohlenstoff in der Atmosphäre (CO₂), Kohlenstoff in Biomasse, Produkten oder Energieträgern; Kohlenstoff in Böden, Ozeanen oder geologischen Speicherstätten.

Für die Analysen und Diskussionen im vorliegenden Bericht werden drei zentrale Bausteine verwendet:

- ▶ **Bilanzierung von Kohlenstoff:** Ein zentraler Baustein für die spätere Diskussion ist, dass THG-Inventare grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten bieten, Umwandlungsprozesse von Kohlenstoff zwischen diesen drei Formen sowie innerhalb der gebundenen Form abzubilden:
 - Positive Bilanzierung: Ein Umwandlungsprozess wird im Inventar mit positivem Vorzeichen inventarisiert und wird dem nationalen Total hinzugerechnet (z. B. Emission in die Atmosphäre).
 - Neutrale Bilanzierung: Ein Umwandlungsprozess wird nicht oder nur nachrichtlich berichtet und dem nationalen Gesamtemissionen weder hinzugerechnet noch von diesen abgezogen (z. B. Umwandlung innerhalb der gebundenen Form, Emissionen in die Atmosphäre oder permanente Speicherung). Diese Form der neutralen Bilanzierung hat Überschneidungen sowohl mit der positiven als auch mit der negativen Bilanzierung (siehe Abbildung 1).
 - Negative Bilanzierung: Ein Umwandlungsprozess wird mit negativem Vorzeichen inventarisiert und wird von den nationalen Gesamtemissionen abgezogen (z. B. permanente Speicherung von Kohlenstoff).

Derzeit erfordert nur eine positive oder negative Bilanzierung eine Aktivität im Inventar. Eine neutrale Bilanzierung muss teils gar nicht oder nur nachrichtlich abgebildet werden (Memo-Item).

- ▶ **Phasen der Kohlenstoffwirtschaft:** Wir unterscheiden aus didaktischen Gründen zwischen drei Phasen der Kohlenstoffwirtschaft:
 - Die «Ursprungphase» beschreibt den Schritt, in welchem der Kohlenstoff in die Kohlenstoffwirtschaft gebracht wird (z. B. Förderung von Erdöl oder Abscheidung aus der Atmosphäre durch DAC).
 - Die «Nutzungsphase» beschreibt die (zirkuläre) Kohlenstoffwirtschaft. Dies beinhaltet vor allem auch die Abscheidung und anschließende erneute Nutzung von Kohlenstoff.
 - Die «Endphase» beschreibt schließlich entweder die Emission in die Atmosphäre oder die permanente Speicherung (Austritt aus der Kohlenstoffwirtschaft).
- ▶ **Attribute für gebundenen Kohlenstoff:** Ein weiterer zentraler Baustein dieser Studie ist, dass wir für gebundenen Kohlenstoff zwei Attribute einführen: Das Attribut C-0 und das Attribut C-1. **Ausgangspunkt dieser Attribution ist, dass Kohlenstoff fossilen Ursprungs zu Beginn der Bilanzierungskette das C-1-Attribut hat und Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs das C-0 Attribut.** Nach weiteren Bilanzierungsschritten (d. h. im weiteren Verlauf der Kohlenstoffwirtschaft) kann sich das Attribut des Kohlenstoffs ändern, abhängig davon, ob das Einbringen in die Kohlenstoffwirtschaft bzw. ein

Umwandlungsprozess positiv, neutral oder negativ bilanziert wird. Die Attribute sind ein Hilfsmittel, das es einfach erlaubt, sicherzustellen, dass die Bilanzierungsregeln über die gesamte Bilanzierungskette korrekt sind. Die Attribute tauchen aber nicht im THG-Inventar auf.

Die Regeln für die Bilanzierung von gebundenem Kohlenstoff mit den Attributen C-1 und C-0 sind in Tabelle 1 aufgeführt.

In der Ursprungsphase sind die Bilanzierungsregeln abhängig davon, ob der Kohlenstoff einen fossilen oder atmosphärischen Ursprung¹ hat. Pro Attribut gibt es zwei Optionen, wie die Umwandlung des Kohlenstoffs und/oder seine Einbringung in die Kohlenstoffwirtschaft bilanziert werden kann.

In der Nutzungs- und Endphase ist die weitere Bilanzierung abhängig davon, welches Attribut der Kohlenstoff zu Beginn hat. Der Ursprung des Kohlenstoffs (fossil oder atmosphärisch) ist ab diesem Moment für die Inventarisierung und Bilanzierung nicht mehr relevant. Die Attribute C-0 und C-1 stellen — über die gesamte Bilanzkette — eine korrekte Bilanzierung sicher.

Für die Nutzungsphase gilt: Eine neutrale Bilanzierung in der Nutzungsphase ändert das Attribut nicht. Eine positive Bilanzierung ändert hingegen das Attribut von C-1 auf C-0 und eine negative Bilanzierung von C-0 auf C-1. Eine negative Bilanzierung eines C-1 Kohlenstoffs ist somit nicht möglich (und umgekehrt).

In der Endphase gibt es hingegen jeweils nur eine Möglichkeit, die zwingend durch das Attribut vorgegeben ist (z. B. muss die Emissionen eines C-1 Kohlenstoffs zwingend positiv bilanziert werden).

Tabelle 1: Regeln zur Bilanzierung von gebundenem, attributiertem Kohlenstoff

Phase	Fossiler Ursprung	Atmosphärischer Ursprung
Ursprungsphase (Einbringung C in Kohlenstoffwirtschaft)	Falls neutral bilanziert → Attribut C-1 Falls positiv bilanziert → Attribut C-0 (negative Bilanzierung nicht möglich)	Falls neutral bilanziert → Attribut C-0 Falls negativ bilanziert → Attribut C-1 (positive Bilanzierung nicht möglich)
Umwandlungsprozess in der Nutzungsphase (kann auch mehrmals hintereinander stattfinden)	Falls neutral bilanziert → Attribut bleibt C-1 Falls positiv bilanziert → Attribut ändert sich zu C-0 (negative Bilanzierung nicht möglich)	Falls neutral bilanziert → Attribut bleibt C-0 Falls negativ bilanziert → Attribut ändert sich zu C-1 (positive Bilanzierung nicht möglich)
Endphase - Emission	Positiv bilanziert	Neutral bilanziert
Endphase - Permanente Speicherung	Neutral bilanziert	Negativ bilanziert

Quelle: Eigene Darstellung.

¹ Kohlenstoff geogenen Ursprungs wird in diesem Bericht hinsichtlich der Bilanzierung gleich behandelt wie fossil. Biogener Kohlenstoff wird in diesem Bericht gesondert diskutiert und hier daher nicht mitberücksichtigt

Bilanzierungsoptionen in Ursprungsphase

Entsprechend der obigen Annahmen gibt es für die Bilanzierung von Kohlenstoff in der Ursprungsphase somit zwei Optionen (kurz als U1 und U2).

- ▶ **Option U1:** Kohlenstoff mit Ursprung Atmosphäre wird in der Ursprungsphase neutral bilanziert, so dass der Kohlenstoff in der Folge das Attribut C-0 erhält. Kohlenstoff fossilen Ursprungs wird bei der Förderung neutral bilanziert und hat daher das C-1-Attribut. Kohlenstoff biogenen Ursprungs (Holz) würde entsprechend dem geltenden Biomasseprivileg (Kapitel 4) analog zu Kohlenstoff mit Ursprung Atmosphäre ein C-0 Attribut erhalten. Dieser Fall wird in diesem Bericht nicht vertieft.

Wenn Kohlenstoff unterschiedlicher Ursprünge parallel genutzt wird, muss aufgrund der unterschiedlichen Attribute in der folgenden Nutzungsphase bekannt sein, welche Mengen ein C-0-Attribut und welche ein C-1-Attribut haben. Die Bilanzierung muss mengenpräzise und attributkonform nachverfolgt werden.

- ▶ **Option U2:** Kohlenstoff mit Ursprung Atmosphäre wird in der Ursprungsphase negativ bilanziert, so dass der Kohlenstoff in der Folge das Attribut C-1 erhält. Kohlenstoff fossilen Ursprungs wird bei der Förderung neutral bilanziert und hat daher das C-1-Attribut.

In der Nutzungsphase hat aller Kohlenstoff das C-1-Attribut. Der Ursprung des Kohlenstoffs (Fossil vs. Atmosphäre) muss daher nicht zwangsläufig nachverfolgt werden. Diese Situation vereinfacht die Nachverfolgung und wäre ein großer Vorteil dieser Option in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft. Nachgelagerte Emissionen werden immer positiv bilanziert. Eine dauerhafte Speicherung wird neutral bilanziert. Dieses Vorgehen ist jedoch inkompatibel mit dem geltenden Biomasseprivileg. Ein C-1 Attribut ist jedoch prinzipiell denkbar (siehe Option 1, Kapitel 4). Herausforderungen, die sich aus einer Bilanzierung gemäß der Option U2 bei Aufrechterhaltung der heutigen Biomassebilanzierung mit C-0 Attribut ergeben, werden in diesem Bericht nicht vertieft.

Bilanzierungsoptionen in Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase lassen sich die möglichen Bilanzierungsoptionen aus den Permutationen der möglichen Bilanzierungen ableiten. Dabei fokussieren wir auf die Verbrennung und die Abscheidung. Folgende Bilanzierungen sind nicht möglich bzw. nicht als sinnvoll erachtet und werden daher ausgeschlossen.

- ▶ Verbrennung:
 - Negative Bilanzierung nicht möglich
 - Positive Bilanzierung bei C-0 nicht möglich
- ▶ Abscheidung
 - Positive Bilanzierung nicht möglich
 - Negative Bilanzierung bei C-1 nicht möglich

Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen, ergeben sich die folgenden vier Optionen der Nutzungsphase (kurz als N1 bis N4):

- **Option N1:** Verbrennung und Abscheidung werden sowohl für C-0 als auch für C-1 Kohlenstoff neutral bilanziert. Dadurch bleibt jeweils das Attribut erhalten, mit dem der Kohlenstoff in die Nutzungsphase eintritt. Unter dieser Option werden keine Bilanzierungsschritte in der Nutzungsphase berichtet. Auch die Verbrennung von Kohlenstoff mit dem Attribut C-1 wird — vorerst — neutral bilanziert. **Positive und negative Bilanzierungen fallen ausschließlich in der Ursprungsphase und Endphase an.**
- **Option N2:** Die Verbrennung von C-0 und C-1 Kohlenstoff wird so bilanziert, dass jeweils das C-0 Attribut resultiert. Dazu wird Kohlenstoff mit dem Attribut C-0 bei der Verbrennung neutral bilanziert und Kohlenstoff mit dem C-1-Attribut positiv bilanziert. Die folgende Abscheidung und Einbindung wird neutral bilanziert, womit das C-0 Attribut erhalten bleibt. **Diese Option sorgt dafür, dass Kohlenstoff in der Nutzungsphase schnellstmöglich das C-0 Attribut erhält und dieses in der Nutzungsphase beibehält.**
- **Option N3:** Die Verbrennung von C-0 und C-1 Kohlenstoff wird so bilanziert, dass anschließend jeweils das C-0 Attribut resultiert. Die folgende Abscheidung wird negativ bilanziert und die Einbindung neutral. Daher resultiert im Anschluss wiederum das C-1-Attribut. Diese Option erzeugt daher wechselnde Attribute und gleichzeitig eine wo möglich nicht-neutrale Bilanzierung der Verbrennung bzw. Abscheidung in der Nutzungsphase. **Diese Option führt daher dazu, dass jeder die Umwandlungsschritt in der Nutzungsphase, wo möglich, positiv oder negativ bilanziert wird.** Der Aufwand für die Bilanzierung der Nutzungsphase über alle Anwendungen und Lebenszyklen hinweg ist daher hoch. Dafür ist auch die Transparenz hoch.
- **Option N4:** Diese Option ist wie N3 nur mit dem Unterschied, dass die der Verbrennung folgende Abscheidung neutral bilanziert wird und die Einbindung negativ (also entgegengesetzt zum Vorgehen in N3).

Kombinationen der Bilanzierungsoptionen

Von den acht denkbaren Kombinationen aus Regelungen zur Bilanzierung in der Ursprungs- und der Nutzungsphase sind nicht alle schlüssig für alle Schritte umsetzbar. In manchen Fällen ergeben sich Inkonsistenzen oder nicht-erwünschte Effekte. Tabelle 2 gibt einen Überblick über alle Kombinationsmöglichkeiten, erläutert kurz die Gründe für den Ausschluss einer Kombination und beschreibt die Eigenschaften der verbleibenden Optionen.

Tabelle 2: Überblick über und Ausschluss möglicher Kombinationen von Bilanzierungsoptionen

Abkürzung	Name	Beschreibung
U1-N1	„kompakt, differenziert“	Ursprungsattribut des Kohlenstoffs bleibt über alle Phasen erhalten, Freisetzung von CO ₂ wird einmalig erfasst
U1-N2	„kompakt, vereinfacht“	Einheitliche C-0-Attributierung von Kohlenstoff nach der ersten Nutzungsphase, Entstehung von CO ₂ wird einmalig erfasst

Abkürzung	Name	Beschreibung
U1-N3	ausgeschlossen, da atmosphärischer Kohlenstoff in der ersten Nutzungsphase ein C-0-Attribut erhalten würde und in späteren Nutzungsphase ein C-1-Attribut (inkonsistent)	
U1-N4	„detailliert, einheitlich“	Einheitliche C-1-Attributierung bei der Verbrennung, Negativ-Bilanzierung bei der Einbindung, Entstehung von CO ₂ wird mehrfach erfasst
U2-N1	„kompakt, einheitlich“	Einheitliche C-1-Attributierung in der gesamten Nutzungsphase, Freisetzung von CO ₂ wird einmalig erfasst
U2-N2	ausgeschlossen, da atmosphärischer Kohlenstoff in der ersten Nutzungsphase ein C-1-Attribut erhalten würde und in späteren Nutzungsphase ein C-0-Attribut (inkonsistent)	
U2-N3	„detailliert, einheitlich“	Einheitliche C-1-Attributierung bei der Verbrennung, Negativ-Bilanzierung bei der Abscheidung, Entstehung von CO ₂ wird mehrfach erfasst
U2-N4	Ausgeschlossen, da atmosphärischer Kohlenstoff sowohl in der Ursprungsphase als auch bei Einbindung in ein Produkt in der Nutzungsphase negativ bilanziert werden müsste (doppelt negativ bilanziert)	

Quelle: Eigene Darstellung.

Anwendungsbeispiele

Anhand von vier Anwendungsbeispielen werden im vorliegenden Bericht die Bilanzierungsoptionen im Detail vorgestellt. Die Anwendungsbeispiele bauen in weiten Teilen aufeinander auf und umfassen:

- ▶ Technische CO₂-Entnahme aus Atmosphäre und Speicherung (DACCS)
- ▶ Verbrennung, Abscheidung und Speicherung von Energieträgern (CCS)
- ▶ Verbrennung, Abscheidung und Rezyklierung (CCU) und
- ▶ Langlebige chemische Produkte.

In dieser Zusammenfassung fokussieren wir uns auf das zweite Anwendungsbeispiel. Die weiteren Details zum gewählten Anwendungsbeispiel wie auch zu den drei weiteren Anwendungsbeispielen finden sich in den Kapiteln 6-9.

Alle Anwendungsbeispiele basieren auf einem numerischen Fallbeispiel. Für die Fallbeispiele gehen wir zur Vereinfachung zunächst davon aus, dass alle Schritte der Wertschöpfungskette – angefangen bei der Förderung der fossilen Energieträger bis zur Speicherung des CO₂ – im gleichen Land stattfinden.

Die Fallbeispiele zu Anwendungsbeispiel 2 haben folgende Eigenschaften, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind.

- ▶ Es wird eine Kohlenstoffmenge gefördert, die Emissionen von 530 tCO₂ entspricht (die Art der Förderung unterscheidet sich je nach Beispiel). Bei dem synthetischen Energieträger ist die geförderte Menge 540 tCO₂.
- ▶ Für den Ursprung Atmosphäre fallen in der Vorkette (Schritte 1 bis 4 vor Nutzung) Leckagen im Umfang von 10 tCO₂ an. Bei fossilen Energieträgern werden Leckagen (v. a. Methan) zur Vereinfachung nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 6.3 zur Inventarisierung im Anwendungsbeispiel 2).
- ▶ In einem Kraftwerk wird der Energieträger verbrannt und so Strom und Wärme bereitgestellt. Dies führt zur Emission von 530 tCO₂.
- ▶ Ist das Kraftwerk mit einer Abscheideanlage (carbon capture) ausgestattet, werden 300 tCO₂ abgeschieden
- ▶ Nach der Abscheidung resultieren CO₂-Leckagen in Höhe von insgesamt 5 tCO₂ (= 3 + 2 tCO₂) aus Transport und Speicherung. Von den abgeschiedenen 300 tCO₂ können daher nur 295 tCO₂ eingespeichert werden.

Um auf Inventarisierung und Bilanzierung der Kohlenstoffflüsse fokussieren zu können, sind alle Emissionen, die aufgrund von Energiebedarfen (u. a. Eigenverbräuche von Kraftwerken, Energiebedarfe für Kohlenstoffabscheidung, Energiebedarfe für den Transport von CO₂ oder Kohlenstoffhaltigen Produkten) anfallen, zur Vereinfachung im Weiteren nicht aufgeführt. Auch Leckagen werden zur Vereinfachung vernachlässigt, wenn sie nicht in Form von CO₂ anfallen.²

Tabelle 3: Fallbeispiel Energieträger: Betrachtete Kohlenstoffmengen in tCO₂

Schritte	ohne Abscheidung	mit Abscheidung
1) Förderung		
Kohlenstoffmenge	530 (für Ursprung Atmosphäre: 540)	530 (für Ursprung Atmosphäre: 540)
2) Transport I (Förderung zu Umwandlung)		
Kohlenstoffmenge	530 (540)	530 (540)

² Das heißt, Leckagen/ flüchtige Emissionen aus Energieträgern (1.B) weisen wir nicht aus. Hier handelt es sich häufig nicht um CO₂, sondern um andere THG (v. a. Methan), entsprechend kommen hier andere Anrechnungsregeln zum Tragen.

Schritte	ohne Abscheidung	mit Abscheidung
Leckagen	10 (nur für Ursprung Atmosphäre)	10 (nur für Ursprung Atmosphäre)
3) Umwandlung (z. B. Raffinerie)		
Kohlenstoffmenge	530	
4) Transport II (Umwandlung zu Nutzung)		
Kohlenstoffmenge	530	
5) Verbrennung & Abscheidung		
Verbrennung	530	
Abscheidung		300
Emission in die Atmosphäre	530	230
6) Transport III (Abscheidung zu Speicherung)		
Kohlenstoffmenge		300
Leckagen		3
7) Speicherung		
Kohlenstoffmenge		297
Leckagen		2
Einspeicherung		295

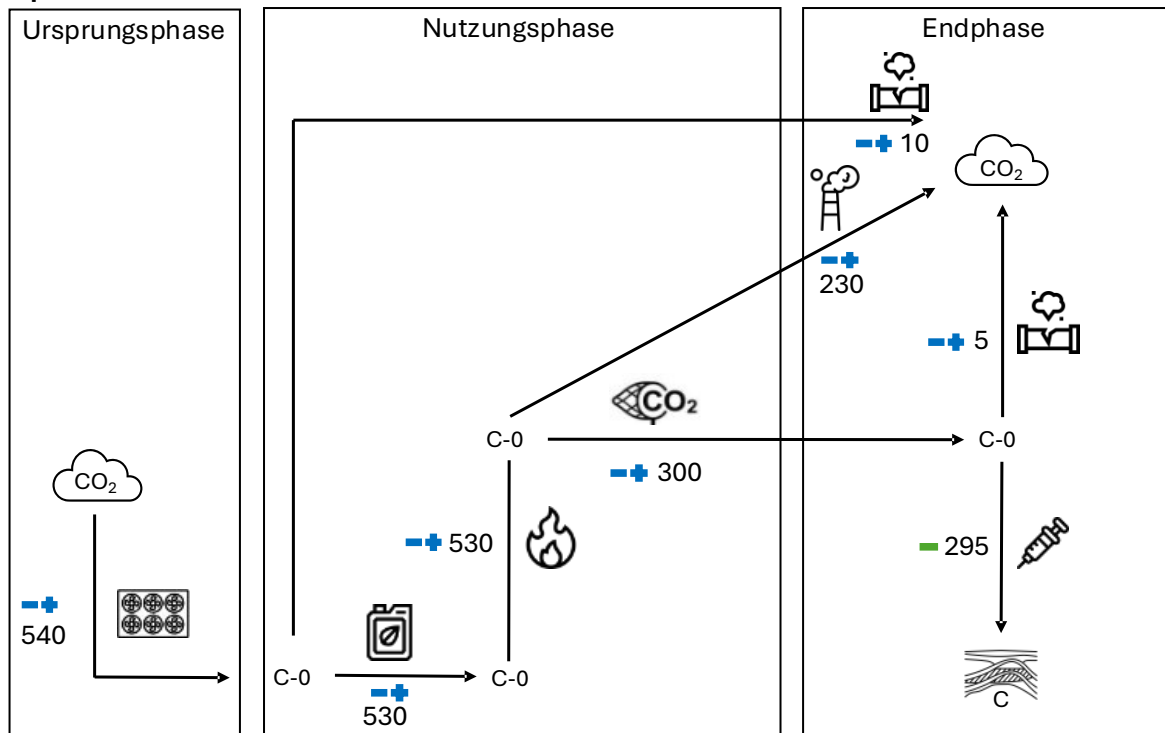
Quelle: Eigene Darstellung.

Im Falle eines synthetischen Energieträgers aus atmosphärischem CO₂ stehen die folgenden fünf Bilanzierungsoptionen zur Verfügung (die folgenden Abbildungen 1-4) veranschaulichen die Optionen grafisch. Tabelle 4 fasst die notwendigen Inventareinträge je Option zusammen):

- **In Option U1-N1 („kompakt, differenziert“) und U1-N2 („kompakt, vereinfacht“)** werden alle Schritte der Ursprungs- und Nutzungsphase neutral bilanziert und daher im Inventar nicht erfasst. Nur die finale Speicherung wird negativ bilanziert und im Inventar erfasst. Hier fallen die Optionen U1-N1 und U1-N2 zusammen.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Option U1-N1 und U1-N2 für DACC(U)S³

Option U1-N1/U1-N2



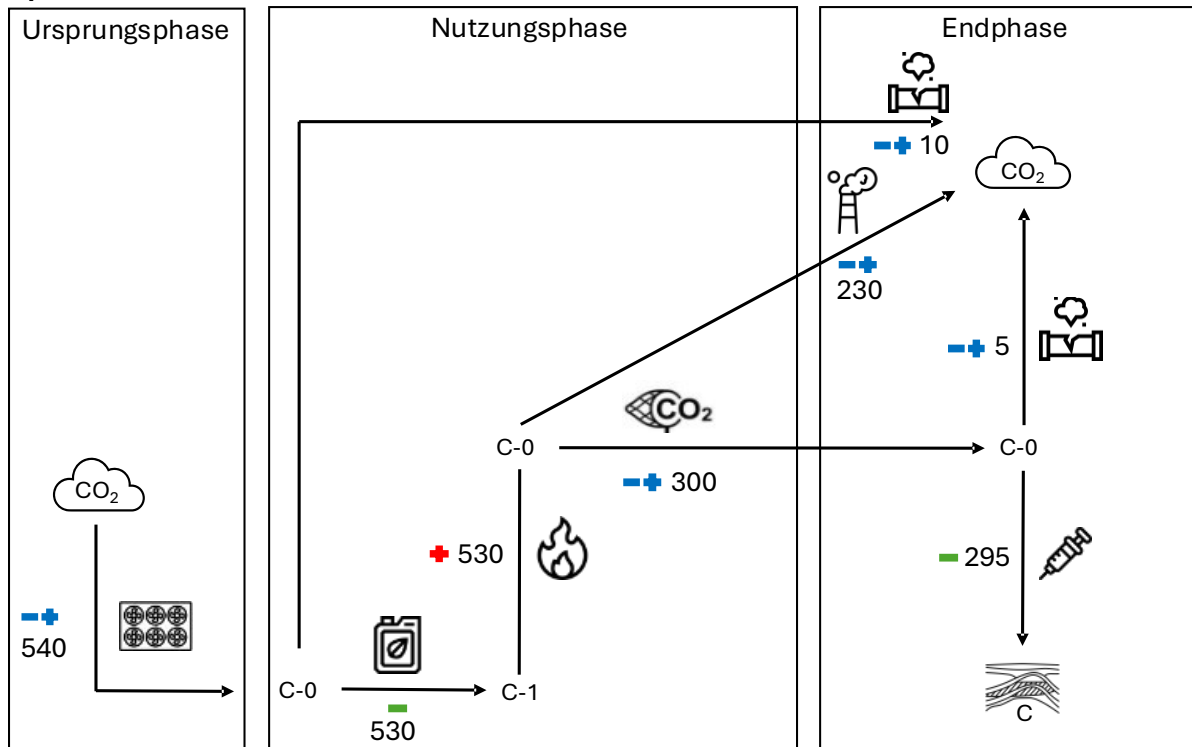
Quelle: Eigene Darstellung; Legende siehe Abbildung 9 im Glossar

- In **Option U1-N4** („detailliert, einheitlich“) wird die Einbindung des Kohlenstoffs im Energieträger negativ bilanziert. Daraus resultiert das C-1-Attribut in der Verbrennungsphase. Entsprechend wird die Verbrennung positiv bilanziert. Damit liegt der Kohlenstoff dann wieder mit C-0 Attribut vor, d. h. ausgestoßenes CO_2 wird neutral bilanziert, geologisch gespeichertes CO_2 wird negativ bilanziert.

³ Direct Air Carbon Capture and (Use) Storage.

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Option U1-N4 für DACC(U)S

Option U1-N4

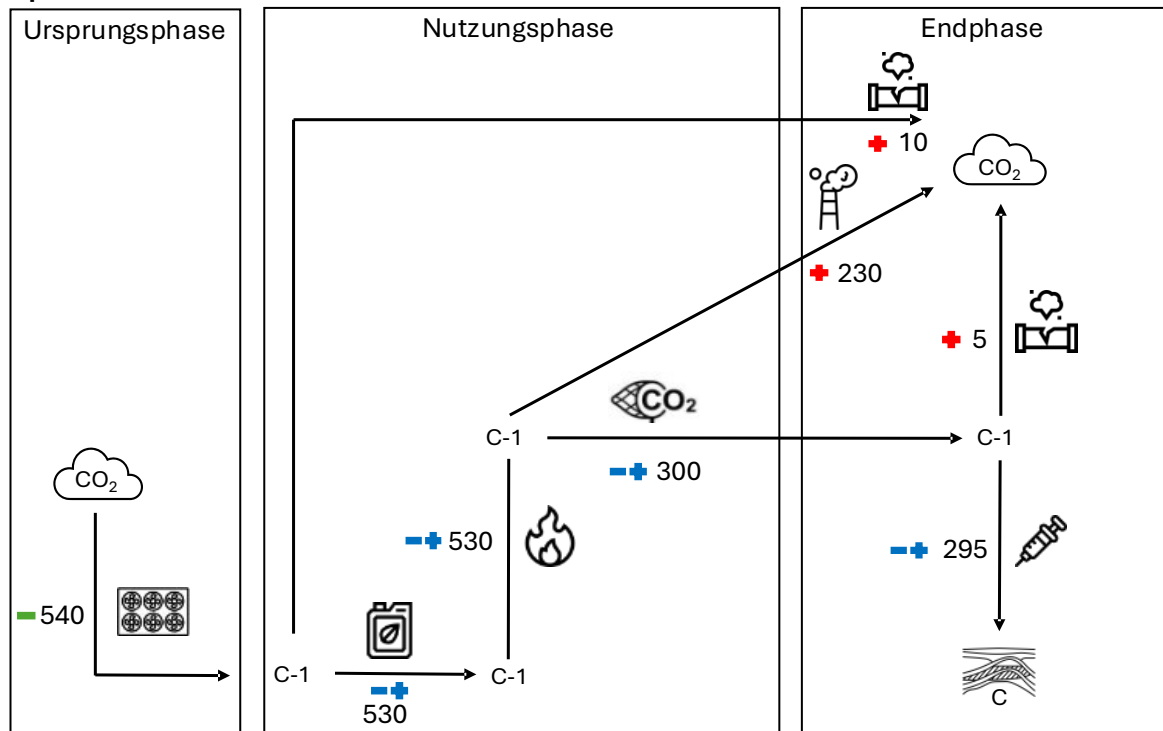


Quelle: Eigene Darstellung.

- Die **Option U2-N1** („kompakt, einheitlich“) bilanziert bereits die Abscheidung des Kohlenstoffs aus der Luft negativ, woraus sich das C-1-Attribut für den bereitgestellten Energieträger ergibt. Einbindung, Verbrennung und Abscheidung werden neutral bilanziert. Entsprechend muss ausgestoßenes CO₂ positiv bilanziert werden, geologisch gespeichertes CO₂ wird ebenfalls neutral bilanziert.

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Option U2-N1 für DACC(U)S

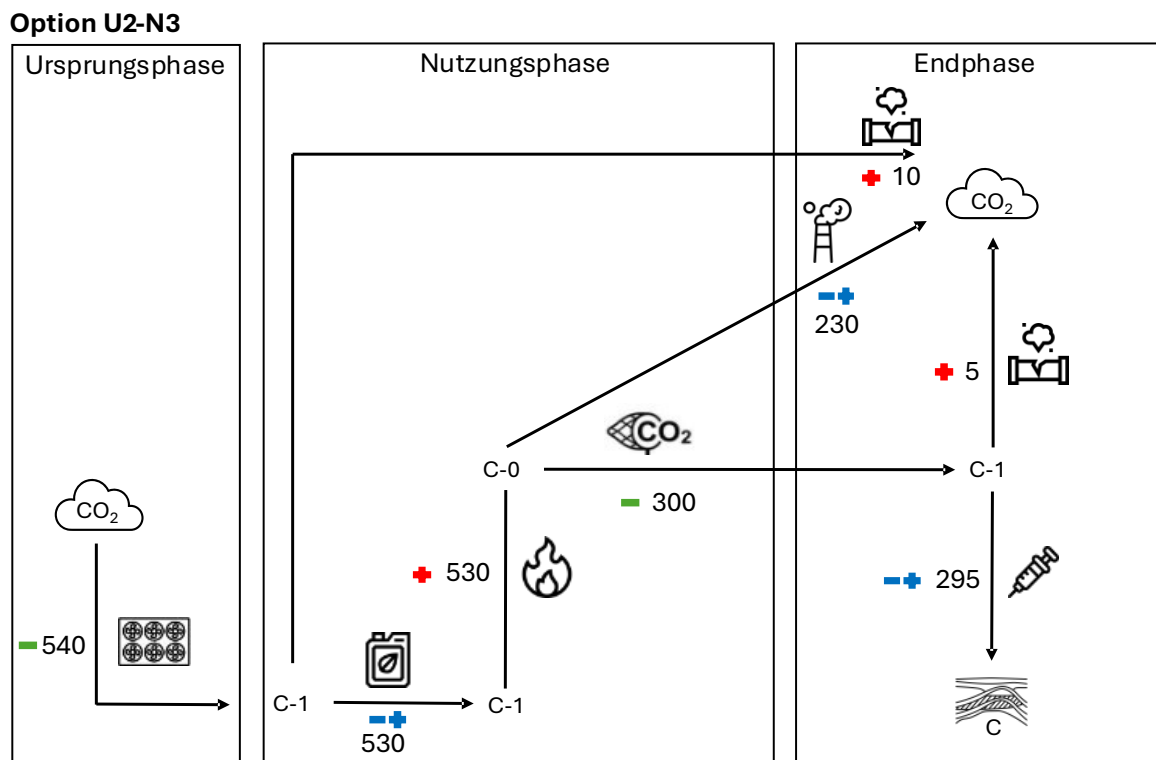
Option U2-N1



Quelle: Eigene Darstellung.

Im Gegensatz dazu ist die **Option U2-N3** („detailliert, einheitlich“) komplexer, da mehr Flüsse positiv und negativ bilanziert werden und sich daher die Attribute mehrmals wechseln. Das führt zu mehreren Einträgen in das Inventar, die sich aber in der Summe wieder kompensieren. Zu bemerken ist, dass die Summe der negativen Emissionen mit -840 tCO_2 höher ist als der eigentliche Kohlenstofffluss von ursprünglich 540 tCO_2 . Das liegt daran, dass derselbe Kohlenstoff mehrmals erfasst wird (positiv und negativ bilanziert).

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Option U2-N3 für DACC(U)S



Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 4: Bilanzierungsoptionen für synthetische Energieträger

	U1-N1/U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
GREENHOUSE GAS SOURCE AND SINK CATEGORIES	Net CO ₂ emissions/removals			
	(kt)			
Total national emissions and removals (with LULUCF)	-295	-295		-295
1. Energy	0	530	245	545
1.A. Fuel combustion				
1.A.1.a. Public electricity and heat production	0	530	230	530
1.A.1.b Petroleum refining				
1.A.1.c Manufacture of solid fuels and other energy industries				
1.C. CO ₂ Transport and storage	0	0	15	15
2. Industrial processes and product use				
3. Agriculture				

	U1-N1/U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
4. Land use, land-use change and forestry				
5. Waste				
6. Other (please specify)				
X. New categories				
X.1 CO ₂ captured				-300
X.2 CO ₂ injected at storage sites	-295	-295		
X.3 Direct Air Capture			-540	-540
X.4 Carbon bound in products and fuels		-530		

Quelle: Eigene Darstellung.

Diskussion der Bilanzierungsoptionen

Für die Diskussion der Bilanzierungsoptionen wurden verschiedene Aspekte herangezogen. Einerseits stützen wir uns auf vier Grundsätze und Annahmen, welche wir für die Entwicklung der Bilanzierungsoptionen gesetzt haben (siehe Kapitel 3.1). An zentraler Stelle steht dabei insbesondere die Beseitigung der identifizierten Fehlstellen (Grundsatz 2). Gewisse Fehlstellen sind darauf zurückzuführen, dass **die CRT-Tabellen der heutigen Treibhausgasinventare keine Erfassungsmöglichkeit für die entsprechenden Kohlenstoffflüsse vorsehen** (z. B. bei der technischen CO₂-Entnahme bei DAC, siehe Tabelle 21 in Kapitel 5.3). Andere **Fehlstellen hängen damit zusammen, dass der Ursprung des CO₂ (fossil oder atmosphärisch) nicht bekannt** ist. Vor diesem Hintergrund lassen sich zwei „Analyseelemente“ ableiten:

- **Kompakte versus detaillierte Inventarisierung:** Die Bilanzierungsoptionen unterscheiden sich darin, wie detailliert die Kohlenstoffpfade in den nationalen THG-Inventaren erfasst werden. Eine kompakte Inventarisierung kommt mit einer Reduktion auf relevante Flüsse und entsprechend wenig Einträgen aus. Dies entspricht in der Regel einer einmaligen Erfassung der Entstehung (Option U1-N2 („kompakt, vereinfacht“) oder Freisetzung (Option U1-N1 („kompakt, differenziert“), U2-N1 („kompakt, einheitlich“) von CO₂. Eine detaillierte Inventarisierung erfasst ggf. jede einzelne Umwandlung von Kohlenstoff in CO₂ (in Verbrennungsprozessen mit und ohne CCS), und daher auch jede Einbindung in Produkten oder jede permanente Speicherung. Es wird daher deutlich, an welchen Stellen in der Wirtschaft weiterhin Kohlenstoff eingesetzt wird (Option U1-N4 („detailliert, einheitlich“), U2-N3 („detailliert, einheitlich“)).
- **Einheitliche vs. differenzierte C-Attribute:** Je nach Bilanzierungsoption unterscheidet eine Option möglichst lange entlang des abgebildeten Kohlenstoffflusses nach unterschiedlichen Ursprüngen (Option U1-N1 („kompakt, differenziert“), teilweise U1-N2 („kompakt, vereinfacht“) oder sie vereinheitlicht möglichst zügig die vergebenen Attribute (Option U1-N4 („detailliert, einheitlich“), U2-N1 („kompakt, einheitlich“), U2-N3 („detailliert, einheitlich“)). Wenn weit vorne im Kohlenstoffpfad nur noch ein C-0 oder C-1 Attribut vorliegt, sprechen wir von einheitlichen C-Attributen. Im anderen Fall muss entlang der abgebildeten Kohlenstoffflüsse zwischen den Attributen C-0 und C-1 differenziert werden

und deren Aufteilung muss in der Kohlenstoffwirtschaft bekannt sein bekannt sein (siehe Kapitel 8).

Ebenfalls haben wir in Hinblick auf mögliche Zielarchitekturen untersucht, welche Emissionen im Inventar ausgewiesen werden. Ausgestoßene Emissionen und technische Senken sind ausschließlich unter Option U1-N1 („kompakt, differenziert“) abgebildet. Erzeugte Emissionen werden unter Option U1-N2 („kompakt, vereinheitlicht“) abgebildet. Die übrigen drei Optionen liefern keine Rückschlüsse auf die betrachteten möglichen Zielgrößen bzw. Emissionsgruppen.

In einem weiteren Schritt haben wir zudem die Rolle des Territorialprinzips, die Auswirkungen auf Ländergrenzen/ geteilte Wertschöpfungsketten, Sektor-Einträge im Inventar und auf Zielarchitekturen untersucht. Nachfolgend fassen wir die wichtigsten Erkenntnisse zusammen und diskutieren ihre Auswirkungen:

- ▶ Die Beispiele zum **Territorialprinzip, insbesondere die Beispiele aus dem Bereich der Nutzung von atmosphärischem Kohlenstoff haben gezeigt, dass eine einfache Auslegung des Territorialprinzips wie bisher nur schwer möglich ist.** Am konsistentesten mit dem aktuellen Regelwerk wäre, die Letztfreisetzung von fossilem Kohlenstoff (unabhängig von den zuvor erfolgten Nutzungsschritten) positiv zu bilanzieren. Damit einhergehend müsste das Biomasseprivileg zumindest auf synthetische Energieträger atmosphärischen Ursprungs ausgeweitet werden. Beides ist ausschließlich in Bilanzierungsoption U1-N1 („kompakt, differenziert“) umgesetzt. Gleichzeitig ist U1-N1 („kompakt, differenziert“) jedoch hinsichtlich des Datenerfassungsaufwand am aufwändigsten, da jeder Kohlenstofffluss über seine kompletten Nutzungszyklus nachverfolgt werden müsste. Eng ausgelegt wäre nicht einmal eine statistische Erfassung mit Hilfe von Produkt-Pool-Lösungen korrekt, da physisch bei einer solchen Lösung nicht zwischen den Herkünften unterschieden wird.
- ▶ Die Untersuchung auf **Länderebene/ geteilten Wertschöpfungsketten hat deutlich gemacht, dass keine der vorgeschlagenen Bilanzierungsoptionen für alle betrachteten Länder (und es wurden nur drei Fälle betrachtet) das Erreichen eines ausgeglichenen Inventars zulassen würde.** Einige Länder erhalten positive bzw. negative Inventareinträge aufgrund der neuen Wertschöpfungsketten rund um das Einbinden von CO₂ in Produkten, die dauerhafte geologische Speicherung bzw. die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen. Es erfolgt also in allen Fällen eine Zuordnung von positiven oder negativen Effekten. Das verdeutlicht, dass es in dieser Hinsicht keine wissenschaftlich einheitliche Methode zur Bilanzierung gibt. Die politische Konsensfähigkeit der Methoden wird an dieser Stelle nicht betrachtet. Entsprechend ist es vor diesem Hintergrund wichtig hervorzuheben, dass das Ablesen der Zielerreichung ausschließlich über die Emissionen des Inventars zu Schwierigkeiten führen kann.
- ▶ Die Untersuchungen zu **Sektoren und Zielarchitekturen** wiederum haben gezeigt, dass einige Bilanzierungsoptionen besser geeignet sind, um neutral bilanzierte Sektor-Einträge im Inventar abzubilden oder THG-Emissionen in Kombination mit natürlichen und technischen Senken auszuweisen als andere. Um neutral bilanzierte Sektor-Einträge im Inventar abzubilden oder THG-Emissionen in Kombination mit natürlichen und technischen Senken auszuweisen als andere. Auch hier hat sich wiederum die Option U1-N1 („kompakt, differenziert“) ausgezeichnet.

Basierend auf diesen Ergebnissen (vgl. Tabelle 5 für eine Zusammenfassung der Ergebnisse) und aufbauend auf den Analysen fassen die folgenden Punkte die relevanten Erkenntnisse aus den vorliegenden Arbeiten zusammen:

- ▶ Zunächst soll mit Blick auf die Zielsetzung des Projektes auf Folgendes hingewiesen sein: alle vorgestellten und untersuchten Bilanzierungsoptionen sind geeignet, um die in Duscha et al. (2025) identifizierten Fehlstellen zu schließen. Die vorgestellten Optionen unterscheiden sich dabei aber z. T. deutlich in der Herangehensweise. Im Folgenden werden dafür die untersuchten Ansätze durchgegangen und es wird auf Basis der Untersuchungen dargestellt, welche der vorgeschlagenen Optionen besonders vielversprechend scheinen.
- ▶ **U1-N1** („kompakt, differenziert“) scheint in mehrerlei Hinsicht eine präferierte Option zu sein, da sie (i) eine kompakte Inventarisierung erlaubt, die die Freisetzung von fossilem Kohlenstoff erfasst und (ii) entsprechend in der Lage ist, technische Senken (und ausgestoßene Emissionen) zu identifizieren. Die Erstellung eines solchen Inventars erfordert allerdings genaue Kenntnisse über die Kohlenstoffflüsse entlang der gesamten Nutzungskette. Der Ursprung des Kohlenstoffs – hier untersucht für fossil und atmosphärisch – muss jederzeit nachverfolgbar bleiben. Messverfahren zur Identifikation der Kohlenstoffherkunft existieren zwar für biogenen Kohlenstoff, jedoch nicht für atmosphärischen Kohlenstoff. Eine Umsetzung ist teuer und aufwändig. Entsprechend müsste bei der Datenbeschaffung für die Inventare in jedem Fall auf statistische Verfahren zurückgegriffen werden, um die Menge und Herkunft von im Kreis geführten Kohlenstoff abzubilden. Die vorgestellte Produkt-Pool-Lösung könnte als Näherung herangezogen werden. Auch sie erfordert aber einen nicht unerheblichen Aufwand, um die zugrundeliegenden Daten regelmäßig (d. h. mind. jährlich) zu erfassen
- ▶ Schließt man Option U1-N1 („kompakt, differenziert“) aufgrund der Datenanforderungen als nicht praktikabel aus, so stehen nur noch Bilanzierungsoptionen zur Verfügung, bei denen in gewissem Umfang die Kohlenstoffherkunft vereinfacht mitgeführt wird. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal der verbliebenen Optionen ist der Detailgrad der Erfassung von Kohlenstoffpfaden. **Dabei muss grundsätzlich entschieden werden, ob eine möglichst kompakte Abbildung der Kohlenstoffpfade oder eine sehr detaillierte Erfassung möglichst vieler einzelner Kohlenstoffflüsse in den CRT-Tabellen erfolgen soll.** Die kompakte Inventarisierung legt den Fokus auf Freisetzung in die Luft bzw. Einspeicherung. Die detaillierte Inventarisierung dagegen zeigt auf in welchen Schritten jeweils noch Kohlenstoff zum Einsatz kommt und schafft ggf. Gegenpositionen, um die Nicht-Freisetzung durch Abscheidung kenntlich zu machen.
- ▶ Sollte der Fokus stärker auf der Nutzung von Kohlenstoff liegen, also eine **detaillierte Inventarisierung** präferiert werden, bleiben die Optionen U1-N4 („detailliert, einheitlich“) und U2-N3 („detailliert, einheitlich“) zur Wahl. Aus der Kombination von detaillierter Inventarisierung und einheitlicher C-Attribution sind die Anforderungen an die Datenerhebung geringer. Zwar müssen alle eingesetzten Energieträger für alle Kohlenstoffflüsse berichtet werden. Allerdings erlaubt die einheitliche C-Attribution einen Verzicht auf die Unterscheidung zwischen Kohlenstoff atmosphärischen und fossilen Ursprungs. Grundsätzlich ist die Wahl einer detaillierten Erfassung mit deutlich mehr Reporting von Daten verbunden. Dies steigert die Möglichkeit, dass passende Daten für die nationale oder Europäische Zielarchitektur in den Inventaren enthalten sind und zur Berechnung von Zielgrößen verwendet werden können.

- ▶ U2-N3 („detailliert, einheitlich“) zeichnet sich zusätzlich dadurch aus, dass das Territorialprinzip darin umgesetzt ist und somit eine gewisse Nähe zur aktuellen Praxis besteht. Ein Effekt des Territorialprinzips ist dabei, dass Inverkehrbringer von kohlenstoffhaltigen, synthetischen Energieträgern, die atmosphärischen Kohlenstoff abscheiden und einbinden, negative Inventareinträge erzielen. Gleichzeitig kann Inventar-seitig der Transportsektor (insbesondere der internationale Verkehr) keine ausgeglichene THG-Bilanz erzielen, solange kohlenstoffhaltige Energieträger eingesetzt werden und die resultierenden Emissionen nicht über Abscheidung aufgefangen werden können. Der Industriesektor wiederum könnte bei entsprechender Zuordnung neuer Kategorien in den CRT-Tabellen eine negative THG-Bilanz ausweisen (auch wenn wie in Kapitel 10.3 diskutiert, diese Zuordnung nicht unbedingt zu empfehlen ist). Die Option benötigt zwei neuen Kategorien: X.1 CO₂ captured enthält Werte, die heute bereits in einer Spalte der CRT-Tabellen berichtet werden müssen, wenn sie aus dem Inventar herausgerechnet werden sollen. X.2 CO₂ injected at storage site erfasst zusätzlich die Injektionsmenge in die Speicherstätte.
- ▶ Auch U1-N4 („detailliert, einheitlich“) garantiert eine detaillierte und einheitliche Bilanzierung, ist aber die weniger zu favorisierende Option: Neben der fehlenden Nähe zum heutigen Inventar ergibt sich auch aus Länder- und Sektorensicht eine deutliche Ungleichheit.
- ▶ Eine **kompakte Inventarisierung** fokussiert dagegen auf die Erfassung der Freisetzung. Insbesondere Option U2-N1 („kompakt, einheitlich“) ist hier geeignet, aber auch Option U1-N2 („kompakt, vereinfacht“) erlaubt zumindest eine in Teilen kompakte Inventarisierung. U1-N2 („kompakt, vereinfacht“) kombiniert die kompakte Inventarisierung mit einer zumindest in Teilen differenzierten C-Attribution, während U2-N1 („kompakt, einheitlich“) eine einheitliche C-Attribution nutzt. Die teilweise differenzierte C-Attribution bedeutet dabei einen höheren Aufwand für U1-N2 („kompakt, vereinfacht“) bei der Datenerfassung. Allerdings erlaubt U1-N2 („kompakt, vereinfacht“) im Gegensatz zu U2-N1 („kompakt, einheitlich“) eine Aussage darüber, in welchen Ländern fossiler Kohlenstoff in den Kreislauf eingespeist wird. Sie liefert als einzige Option eine Ausweisung der erzeugten THG-Emissionen. Auf Sektorebene ermöglichen beide Optionen ausgeglichene Einträge auch bei Nutzung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern. Auch aus Länderperspektive sind beide Optionen vergleichbar. Der Unterschied liegt ausschließlich darin, ob die negative Bilanzierung bei Abscheidung aus der Luft (U2-N1 („kompakt, einheitlich“)) oder bei der dauerhaften Speicherung (U1-N2 („kompakt, vereinfacht“)) erfolgt. Dadurch wird der negative Bilanzeintrag zwischen Energieexporteur und Speicherland verschoben.

Tabelle 5: Überblick über die Charakteristika der betrachteten Bilanzierungsoptionen

	U1-N1	U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
Kompakt vs. detailliert	Kompakt	teilweise kompakt	detailliert	kompakt	detailliert
Einheitlich vs. differenziert	Differenziert	Mischform	einheitlich	einheitlich	einheitlich

	U1-N1	U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
Erzeugte Emissionen darstellbar	Nicht erfüllt/ Erkennbar	Erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar
Ausgestoßene Emissionen darstellbar	Erfüllt/ Erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar
Technische Senken direkt darstellbar	Erfüllt/ Erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar
Territorial- prinzip	Nicht erfüllt/ Erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Nicht erfüllt/ erkennbar	Erfüllt/ erkennbar
Erfüllt/erkennbar					
Nicht erfüllt/erkennbar					

Quelle: Eigene Darstellung.

Biomasse

Ein Sonderfall ist die Bilanzierung von Kohlenstoff biogenen Ursprungs, die im Kapitel 4 näher betrachtet wird. Dieser ist bisher nach den internationalen Vereinbarungen mit dem C-0 Attribut behaftet, was auch Biomasseprivileg genannt wird. Der Bericht zeigt auf, welche Rechtfertigungen diesem Vorgehen explizit oder implizit zugrunde liegen. Vor diesem Hintergrund werden auch mögliche Bilanzierungsoptionen unter der Prämisse analysiert, dass das Biomasseprivileg abgeschafft wird, somit Biomasse in der Nutzungsphase das C-1-Attribut erhält und eine Gleichbehandlung von Kohlenstoff erfolgt. Dies ist prinzipiell möglich und würde bei einer der möglichen Optionen lediglich die Bilanzen einzelner Sektoren verändern, aber nichts am nationalen Total ändern. In anderen Optionen würde sich auch das nationale Total ändern, da berücksichtigt bzw. angenommen würde, dass Biomasse (teilweise) nicht nachhaltig gewonnen wird. In jedem Fall würde Biomasse bei dieser Option mit einem C-1-Attribut die Anreize zur energetischen Nutzung von Biomasse senken, da deren Verbrennung dann buchhalterisch am Ort der Verbrennung mit der Verbrennung von z. B. Kohle gleichgesetzt wäre.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob biogener Kohlenstoff analog zu atmosphärischem Kohlenstoff behandelt werden sollte, da es sich in beiden Fällen um den Ursprung Atmosphäre handelt. Es unterscheiden sich lediglich die Formen, in denen der Kohlenstoff aus der Atmosphäre abgeschieden wird. Mit den Varianten der U1 Bilanzierung könnte das heutige Biomasseprivileg aufrechterhalten werden und zugleich wäre die Gleichbehandlung mit atmosphärischem Kohlenstoff sichergestellt. Für alle Varianten der U2 Bilanzierung wäre das Biomasseprivileg aufzuheben, da andernfalls eine Ungleichbehandlung von atmosphärischem Kohlenstoff und biogenem Kohlenstoff aus mehrjähriger Biomasse (Holz) vorgenommen würde. Ein C-1 Attribut (siehe Option 1, Abbildung 14) wäre anzuwenden. Die Frage, welche Auswirkungen eine Ungleichbehandlung oder eine Gleichbehandlung durch Abschaffung des Biomasseprivileg nach sich ziehen würde, wird im vorliegenden Bericht jedoch nicht weiterverfolgt, sollten jedoch an anderer Stelle systematisch diskutiert werden.

Summary

Carbon will play a new role in our economic system in the future due to 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 existing and planned targets for negative emissions. Climate policy considerations focus on the rapid and preferably complete avoidance of greenhouse gas emissions (GHGs). This applies to all sectors and includes changes in the use of energy sources, products or production processes (e.g., electrification). In many areas, emissions can be avoided in the future through efficiency, sufficiency and substitution processes. In other areas (with so-called "hard-to-abate emissions"), capturing CO₂ from flue gases and reusing it (Carbon Capture and Utilization - CCU) or storing it (Carbon Capture and Storage - CCS) is another way of preventing direct emissions of CO₂ into the atmosphere. Negative emission technologies (NET) play an important role in offsetting residual emissions, as they make it possible to remove CO₂ from the atmosphere. Both natural processes, such as sequester carbon dioxide in biomass, and technical approaches, such as removing carbon dioxide from the air (direct air capture – DAC) or from the ocean (direct ocean capture – DOC), can play a role here. Storage in geological formations or in the form of bound carbon in biochar in soils, or in the form of biomass in permanent forests, is also relevant. At the same time, carbon is an important input material in many areas where no practicable alternatives are currently available, e.g., as a basis for plastics and other chemical products or as a component of liquid fuels for aviation. In these areas, CCU can help to reduce CO₂ emissions, even if complete decarbonization is not currently possible.

The key element on the road to greenhouse gas neutrality is the creation of national GHG inventories. Under the PA and the transparency framework associated with it, the guidelines for reporting greenhouse gas emissions have been revised and adapted. However, technical sinks outside the land-use sector (land use, land-use change and forestry - LULUCF) and carbon cycles have so far only played a subordinate role in the revisions of these regulations. Accordingly, no rules have yet been defined for these processes, and the existing rules may lead to problems. Therefore, there is a need to revise the reporting requirements in addition to the guidelines for calculating sources and sinks.

In this report, we develop a set of rules for accounting options based on carbon attributes (C-0, C-1). In simple terms, these attributes, C-0 and C-1, reflect the effect on the atmosphere when greenhouse gases are emitted. With the help of these attributes and accounting rules, we systematically present accounting options that can be used for consistent accounting of future carbon cycles in national GHG inventories.

Rules and attributes

Carbon occurs naturally in various forms, and it is common to distinguish between natural and anthropogenic cycles. This report focuses on the anthropogenic carbon cycle and addresses its accounting in a future (circular) carbon economy. For this purpose, it is useful to abstract from the complexities of these carbon cycles and to distinguish between the following three forms to simplify matters: Carbon in the atmosphere (CO₂); carbon contained in biomass, products or energy sources; carbon in the soil, the oceans or geological reservoirs.

Three key components are used for the analyses and discussions in this report:

► **Carbon accounting:** A key component for the subsequent discussion is that GHG inventories basically offer three different ways of mapping carbon conversion processes between these three forms and within the bound form:

- Positive carbon accounting: A conversion process is recorded in the inventory with a positive sign and is added to the national total (e.g., emissions into the atmosphere).
- Neutral carbon accounting: A conversion process is not reported or only reported for information purposes and is neither added to nor subtracted from the national total emissions (e.g., conversion within the bound form, emissions into the atmosphere or permanent storage). This neutral carbon accounting overlaps with both positive and negative accounting (Table 6).
- Negative carbon accounting: A conversion process is recorded in the inventory with a negative sign and is deducted from the national total emissions (e.g., permanent storage of carbon).

Currently, only positive or negative carbon accounting requires action in the inventory. In some cases, neutral carbon accounting does not have to be shown at all or only for information purposes (memo item).

► **Phases of the carbon economy:** For didactic purposes, we distinguish between three phases of the carbon economy:

- The "origin phase" describes the step in which carbon is introduced into the carbon economy (e.g. extraction of crude oil or captured from the atmosphere using DAC).
- The "utilization phase" describes the (circular) carbon economy. This includes, above all, the capture and subsequent reuse of carbon.
- The "final phase" describes either its emission into the atmosphere or its permanent storage (exits the carbon economy).

► **Attributes for bound carbon:** Another key component of this study is that we introduce two attributes for bound carbon: C-0 and C-1. The **starting point is that carbon of fossil origin has the C-1 attribute at the beginning of the accounting chain and carbon of atmospheric origin has the C-0 attribute**. After further accounting steps (i.e., over the course of the carbon economy), the carbon attribute can change, depending on whether the introduction into the carbon economy or a conversion process is accounted for as positive, neutral or negative. The attributes are a tool that makes it easy to ensure that the accounting rules are correct across the entire accounting chain. However, the attributes do not appear in the GHG inventory.

The rules for the accounting of bound carbon with the attributes C-1 and C-0 are listed in Table 6.

In the origin phase, the accounting rules depend on whether the carbon has a fossil or atmospheric origin⁴. For each attribute, there are two options for accounting for the conversion of carbon and/or its introduction into the carbon economy.

⁴ In this report, carbon of geogenic origin is treated in the same way as fossil carbon in terms of accounting. Biogenic carbon is discussed separately in this report and is therefore not included here

In the utilization and final phases, the subsequent accounting depends on which attribute the carbon had to start with. From this moment on, the origin of the carbon (fossil or atmospheric) is no longer relevant for inventory and accounting. Attributes C-0 and C-1 ensure correct accounting across the entire accounting chain.

The following applies in the utilization phase: A neutral carbon accounting in the utilization phase does not change the attribute. A positive carbon accounting, on the other hand, changes the attribute from C-1 to C-0, and a negative carbon accounting changes the attribute from C-0 to C-1. A negative carbon accounting of a C-1 carbon is therefore not possible (and vice versa).

In the final phase, on the other hand, there is only one option, which is determined by the attribute (e.g., the emissions of a C-1 carbon must be positive in the balance sheet).

Table 6: Rules for accounting of bound, attributed carbon

Phase	Fossil origin	Atmospheric origin
Origin phase (introduction of C into the carbon economy)	If accounted neutrally → Attribute C-1 If accounted positively → Attribute C-0 (negative accounting not possible)	If accounted neutrally → Attribute C-0 If accounted negatively → Attribute C-1 (positive accounting not possible)
Conversion process in the utilization phase (can also take place several times in succession)	If accounted neutrally → Attribute C-1 If accounted positively → Attribute changes to C-0 (negative accounting not possible)	If accounted neutrally → Attribute C-0 If accounted negatively → Attribute changes to C-1 (positive accounting not possible)
Final phase - emission	Accounted positively	Accounted neutrally
Final phase - permanent storage	Accounted neutrally	Accounted negatively

Source: Authors' own description

Accounting options in the origin phase

In line with the above assumptions, there are two options for accounting for carbon in the origin phase (referred to as U1 and U2 for short).

- **Option U1:** Carbon originating from the atmosphere is accounted for neutrally in the origin phase, so that the carbon subsequently receives the attribute C-0. Carbon of fossil origin is accounted for neutrally during extraction and therefore has the C-1 attribute. Carbon of biogenic origin (Wood) would be attributed with C-0 according to the existing biomass privilege, analogous to carbon of atmospheric origin. This case is not examined further in this report.

If carbon of different origins is used at the same time, it must be known which quantities have a C-0 attribute and which have a C-1 attribute due to the different attributes in the subsequent utilization phase. The accounting must be tracked precisely in terms of quantity and in accordance with the attributes.

- **Option U2:** Carbon originating from the atmosphere is accounted for neutrally in the origin phase, so that the carbon subsequently receives the attribute C-1. Carbon of fossil origin is accounted for neutrally during extraction and therefore has the C-1 attribute.

In the utilization phase, all carbon has the C-1 attribute. The origin of carbon (fossil vs. atmosphere) does not therefore necessarily have to be tracked. This situation simplifies tracking and would be a major advantage of this option in a circular carbon economy. Downstream emissions are always accounted for positively. Permanent storage is accounted for neutrally. However, this approach is incompatible with the current biomass privilege. A C-1 attribute is, in principle, conceivable (see Option 1, Chapter 4). Challenges arising from accounting under Option U2 while maintaining the current biomass accounting with a C-0 attribute are not examined further in this report.

Accounting options in the utilization phase

For the utilization phase, the possible accounting options can be determined from the permutations of the possible accounting options. Our focus is on combustion and capture. The following accounting methods are not possible or not considered appropriate and are therefore excluded.

Combustion:

- Negative accounting is not possible
- Positive accounting is not possible with C-0

Capture:

- Positive accounting is not possible
- Negative accounting is not possible with C-1

Taking these facts into account, the following four options result for the utilization phase (abbreviated as N1 to N4):

- **Option N1:** Combustion and capture are accounted for as carbon neutral for both C-0 and C-1. This means that the attribute with which the carbon enters the utilization phase is retained in each case. No accounting steps are reported in the utilization phase under this option. The combustion of carbon with the attribute C-1 is also – initially – accounted for neutrally. **Positive and negative accounting occur exclusively in the origin and final phases.**
- **Option N2:** The combustion of C-0 and C-1 carbon is accounted for in such a way that the C-0 attribute results in each case. For this purpose, carbon with the attribute C-0 is accounted for neutrally during combustion and carbon with the C-1 attribute is accounted for positively. The subsequent capture and integration is accounted for neutrally, which means that the C-0 attribute is retained. **This option ensures that carbon receives the C-0 attribute as quickly as possible during the utilization phase and retains it during this phase.**
- **Option N3:** The combustion of C-0 and C-1 carbon is accounted for in such a way that the C-0 attribute results in each case. The subsequent capture is accounted for negatively and integration is accounted for neutrally. This results in the C-1 attribute. This option therefore generates changing attributes and at the same time, where possible, a non-neutral

accounting of combustion or capture in the utilization phase. **This option therefore means that each conversion step in the utilization phase is accounted for positively or negatively where possible.** The accounting effort involved in the utilization phase across all applications and life cycles is therefore high, but transparency is also high.

- **Option N4:** This option is like N3, the difference being that the capture following combustion is accounted for neutrally and integration is accounted for negatively (i.e., opposite to the procedure in N3).

Combination of accounting options

Of the eight conceivable combinations of regulations for accounting in the origin and utilization phases, not all can be implemented conclusively for all steps. In some cases, inconsistencies or unwanted effects occur. Table 7 provides an overview of all possible combinations, briefly explains the reasons for excluding a combination and describes the properties of the remaining options.

Table 7: Overview and exclusion of possible combinations of accounting options

Abbreviation	Name	Description
U1-N1	"compact, differentiated"	The original attribute of carbon is retained across all phases; emission of CO ₂ is recorded once
U1-N2	"compact, simplified"	Uniform C-0 attribute of carbon after the first utilization phase, generation of CO ₂ is recorded once
U1-N3	excluded, as atmospheric carbon would receive a C-0 attribute in the first utilization phase and a C-1 attribute in later utilization phases (inconsistent)	
U1-N4	"detailed, uniform"	Uniform C-1 attribute during combustion, negative accounting for integration; generation of CO ₂ is recorded multiple times
U2-N1	"compact, uniform"	Uniform C-1 attribute throughout the entire utilization phase; CO ₂ emissions are recorded once.
U2-N2	excluded, as atmospheric carbon would be assigned a C-1 attribute in the first utilization phase and a C-0 attribute in later utilization phases (inconsistent)	
U2-N3	"detailed, uniform"	Uniform C-1 attribute during combustion, negative accounting for integration; generation of CO ₂ is recorded multiple times

Abbreviation	Name	Description
U2-N4	excluded, as atmospheric carbon would have to be negatively accounted for in the origin phase and when incorporated into a product in the utilization phase (double negative accounting)	

Source: Own illustration

Application examples

The accounting options are presented in detail in this report based on four application examples. The application examples are largely based on each other and include:

- Technical CO₂ removal from the atmosphere and storage (DACCS)
- Combustion, capture and storage of energy sources (CCS)
- Combustion, capture and recycling (CCU) and
- Durable chemical products.

In this summary, we focus on the second application example. Further details on the selected application example and the three other application examples can be found in chapters 6-9.

All the application examples are based on a numerical case study. To simplify matters, we initially assume for the case studies that all steps in the value chain - from the extraction of fossil fuels to the storage of CO₂ - take place in the same country.

The case studies for application example 2 have the following properties, which are summarized in Table 8.

A quantity of carbon is extracted that corresponds to emissions of 530 tCO₂ (the type of extraction differs depending on the example). For the synthetic energy source, the quantity extracted is 540 tCO₂.

For the atmospheric origin, leakages of 10 tCO₂ occur in the upstream chain (steps 1 to 4 before utilization). In the case of fossil fuels, leakages (especially methane) are not taken into account to simplify matters.

The energy source is combusted in a power plant to provide electricity and heat. This results in emissions of 530 tCO₂.

If the power plant is equipped with a carbon capture system, 300 tCO₂ are captured.

After capture, CO₂ leakages totaling 5 tCO₂ (= 3 + 2 tCO₂) result from transport and storage. Of the 300 tCO₂ captured, only 295 tCO₂ can therefore be stored.

In order to focus on the inventory and accounting of carbon flows and to simplify the procedure, all emissions that occur due to energy requirements (including power plants' own consumption, energy requirements for carbon capture, energy requirements for the transportation of CO₂ or

products containing carbon) are not listed and leakages are also neglected if they do not occur in the form of CO₂.⁵

Table 8: Case study: energy sources: carbon quantities considered in tCO₂

Steps:	without capture	with capture
1) Extraction		
Carbon quantity	530 (for atmosphere as the origin: 540)	530 (for atmosphere as the origin: 540)
2) Transport I (extraction to conversion)		
Carbon quantity	530 (540)	530 (540)
Leakages	10 (only for atmosphere as the origin)	10 (only for atmosphere as the origin)
3) Conversion (e.g., refinery)		
Carbon quantity	530	
4) Transport II (conversion to utilization)		
Carbon quantity	530	
5) Combustion & capture		
Combustion	530	
capture		300
Emission into the atmosphere	530	230
6) Transport III (capture to storage)		
Carbon quantity		300
Leakages		3
7) Storage		
Carbon quantity		297
Leakages		2
Storage		295

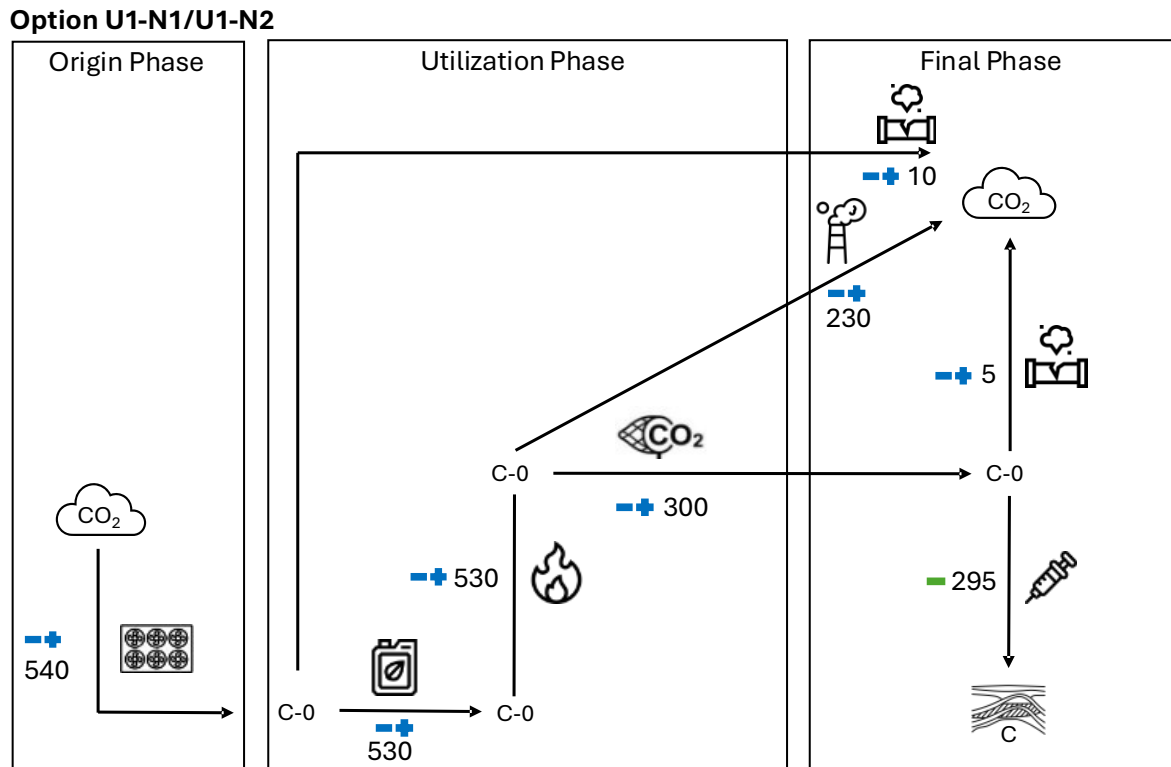
Source: Authors' own illustration

⁵ This means that we do not report leakages/volatile emissions from energy sources (1.B). These are often not CO₂, but other GHGs (especially methane), so different accounting rules apply here.

In the case of a synthetic energy source from atmospheric CO₂, the following five accounting options are available (Figure 5 illustrates the options graphically, Table 8 summarizes the necessary inventory entries for each option):

In **options U1-N1** (“compact, differentiated”) and **U1-N2** (“compact, simplified”), all steps in the origin and utilization phase are accounted for neutrally and are therefore not included in the inventory. Only the final storage is accounted for negatively and recorded in the inventory. The options U1-N1 and U1-N2 coincide here.

Figure 5: Schematic representation of options U1-N1 and U1-N2 for DACC(U)S

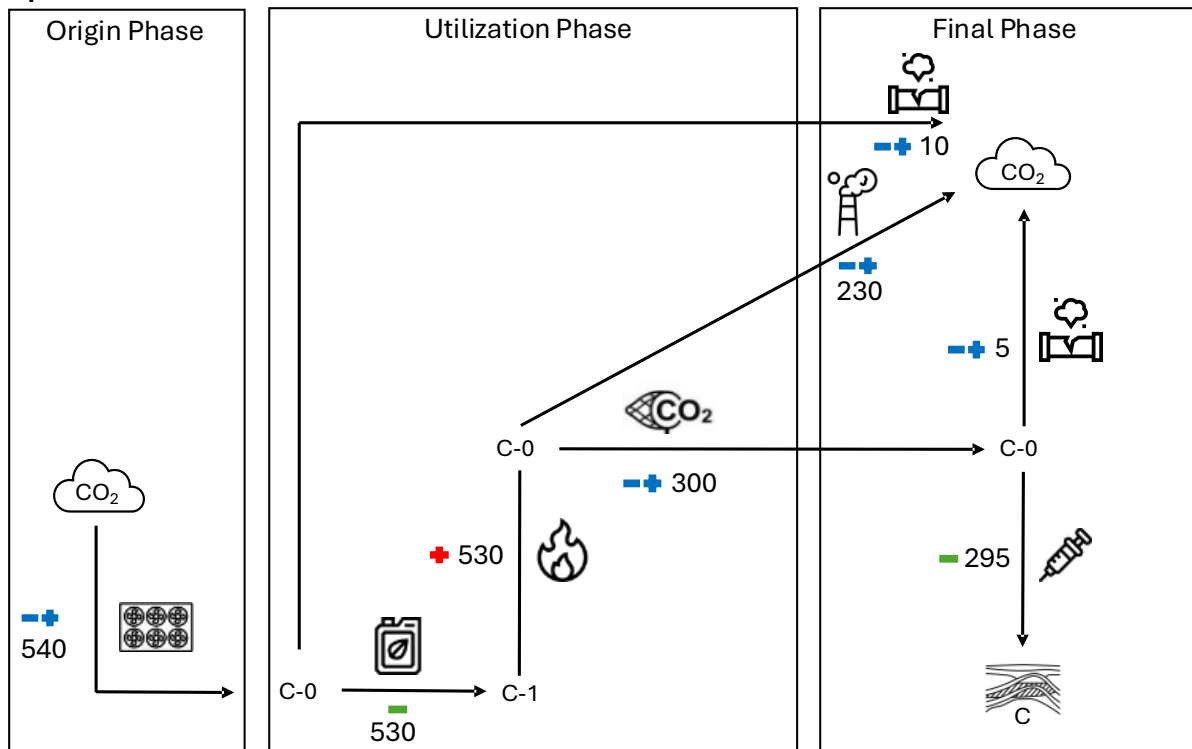


Source: Own representation.

In **option U1-N4** (“detailed, uniform”), the integration of carbon in the energy source is accounted for negatively. This results in the C-1 attribute in the combustion phase. Accordingly, combustion is accounted for positively. This means that the carbon is again present with a C-0 attribute, i.e., emitted CO₂ is accounted for neutrally, geologically stored CO₂ is accounted for negatively.

Figure 6: Schematic representation of option U1-N4 for DACC(U)S

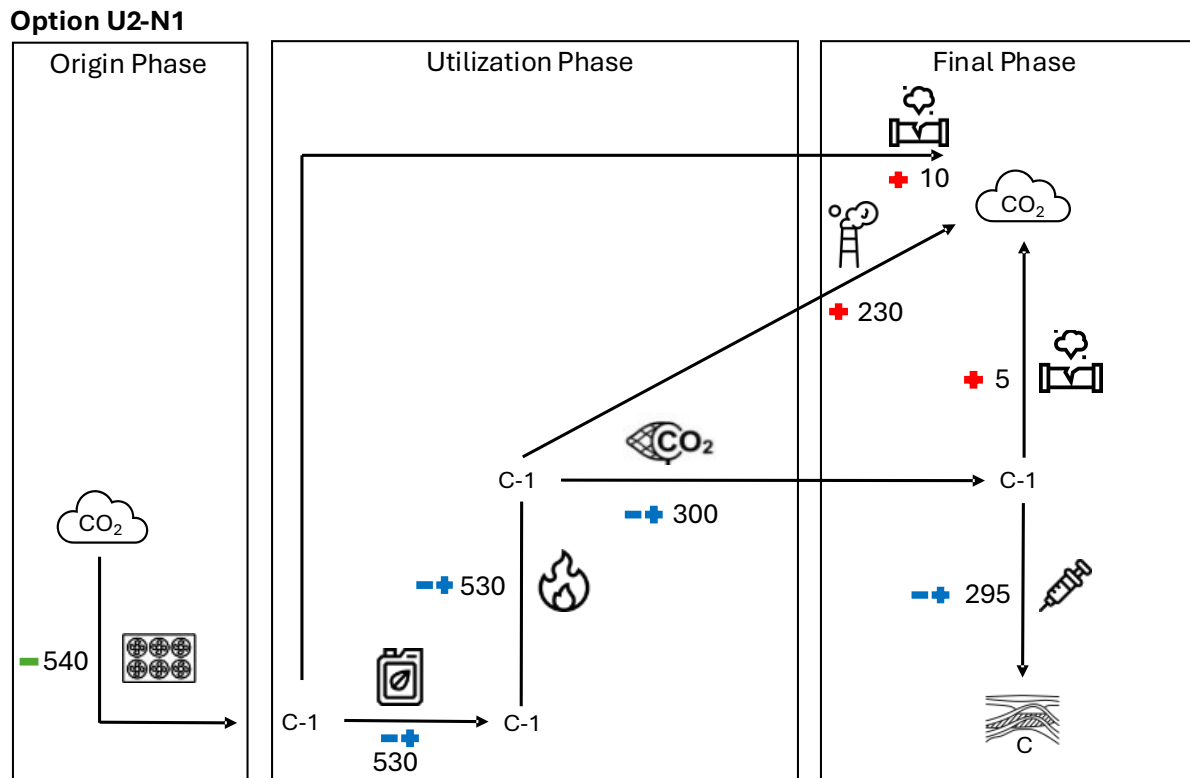
Option U1-N4



Source: Own representation.

Option U2-N1 ("compact, uniform") already accounts for the capture of carbon from the air negatively, resulting in the C-1 attribute for the energy source provided. Integration, combustion and capture are accounted for neutrally. Accordingly, CO₂ emissions must be accounted for positively; geologically stored CO₂ is also accounted for neutrally.

Figure 7: Schematic representation of option U2-N1 for DACC(U)S



Source: Own representation.

In contrast, **option U2-N3** (“detailed, uniform”) is more complex, as more flows are accounted for positively and negatively, and the attributes therefore change several times. This leads to several entries in the inventory, but these offset each other in the final total. It should be noted that the sum of negative emissions of -840 tCO₂ is higher than the actual original carbon flow of 540 tCO₂. This is due to the fact that the same carbon is recorded several times (positive and negative accounting).

	U1-N1/U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
4 Land use, land-use change and forestry				
5 Waste				
6 Other (please specify)				
X. New categories				
X.1 CO ₂ captured				-300
X.2 CO ₂ injected at storage sites	-295	-295		
X.3 Direct air capture			-540	-540
X.4 Carbon bound in products and fuels		-530		

Source: Authors' own illustration

Discussion of accounting options

Various aspects were taken into account in the discussion of the accounting options. On the one hand, we rely on four principles and assumptions that we set for the development of accounting options (see chapter 3.13.1). The elimination of known errors (principle 2) is of key importance. Certain errors are due to the fact that the CRT tables of today's greenhouse gas inventories do not provide a means for documenting the corresponding carbon flows (e.g., for technical CO₂ removal in DAC, see Tabelle 21 in chapter 5.3). Other errors are related to the fact that the origin of CO₂ (fossil or atmospheric) is unknown. In light of this, two "elements of analysis" can be derived:

- **Compact vs. detailed inventory:** These accounting options differ in terms of the level of detail with which carbon pathways are recorded in the national GHG inventories. A compact inventory can be achieved by reducing it to relevant flows and correspondingly few entries. This generally corresponds to a one-off recording of the origin (option U1-N2 („compact, simplified")) or emission (option U1-N1 („compact, differentiated"), U2-N1 („compact, uniform")) of CO₂. A detailed inventory may record every single conversion of carbon into CO₂ (in combustion processes with and without CCS), and therefore also its binding into products or every permanent storage. It therefore becomes clear where carbon continues to be used in the economy (options U1-N4 („detailed, uniform"), U2-N3 („detailed, uniform").
- **Uniform vs. differentiated C attributes:** Depending on the accounting option, one option distinguishes between different origins for as long as possible along the carbon flow shown (option U1-N1 („compact, differentiated"), partially U1-N2 („compact, simplified")), while another option standardizes the assigned attributes as quickly as possible (options U1-N4 („detailed, uniform"), U2-N1 („compact, uniform"), U2-N3 („detailed, uniform")). If there is only one C-0 or C-1 attribute far upstream in the carbon path, we speak of uniform C attributes. In the other case, a distinction must be made between the attributes C-0 and C-1 along the mapped carbon flows, and their distribution must be documented in the carbon economy (see chapter 8).

With regard to possible target architectures, we also examined which emissions are reported in the inventory. Emissions and technical sinks are only illustrated in option U1-N1 (“compact, differentiated”). Generated emissions are shown in option U1-N2 (“compact, uniform”). The remaining three options do not provide any conclusions about the possible target values or emission groups considered.

In another step, we also examined the role of the territorial principle, the effects on national borders/shared value chains, sector entries in the inventory and target architectures. We summarize the most important findings and discuss their implications below:

- ▶ The examples relating to the **territorial principle**, in particular those relating to the use of atmospheric carbon, have shown that a simple interpretation of the territorial principle, as has been done so far, is difficult to achieve. The approach most consistent with current regulations would be to positively account for the final emissions of fossil carbon (irrespective of the previous utilization steps). At the same time, the biomass privilege should at least be extended to synthetic energy sources of atmospheric origin. Both are implemented exclusively in accounting option U1-N1 („compact, differentiated “). At the same time, however, U1-N1 („compact, differentiated“) is the most complex in terms of data collection, as each carbon flow would have to be tracked over its entire utilization cycle. Strictly speaking, even statistical recording with the help of product pool solutions would not be correct, as such solutions do not make physical distinctions between origins.
- ▶ The analysis at **country level/shared value chains** has made it clear that none of the proposed accounting options would allow a balanced inventory to be achieved for all the countries considered (and only three cases were considered). Some countries receive positive or negative inventory entries as a result of the new value chains relating to the incorporation of CO₂ into products, permanent geological storage or the use of synthetic fuels. In all cases, therefore, positive or negative effects are assigned. This illustrates that, in this respect, there is no scientifically uniform method of accounting, nor one that would meet with broad political consensus. In this context, it is important to emphasize that assessing target achievement based solely on inventory emissions can lead to difficulties.
- ▶ The studies on **sectors and target architectures** have in turn shown that some accounting options are better suited than others to reflect neutrally accounted for sector entries in the inventory or to report GHG emissions in combination with natural and technical sinks. Here, too, the U1-N1 option has proven to be excellent.

Based on these results (cf. Table 10 for a summary of the results) and building on the analyses, the following points summarize the relevant findings from these studies:

- ▶ First, with regard to the project's objective, it should be noted that all of the accounting options presented and examined are suitable for closing the gaps identified in Duscha et al. (2025). However, some of the options presented differ significantly in their approach. In the following, we will go through the approaches examined and, on the basis of the studies, show which of the proposed options appear particularly promising.
- ▶ **U1-N1** („compact, differentiated“) seems to be a preferred option for several reasons, as it (i) allows a compact inventory that captures the emissions of fossil carbon and (ii) is accordingly able to identify technical sinks (and emissions). However, drawing up such an inventory requires precise knowledge of the carbon flows along the entire utilization chain.

The origin of the fossil and atmospheric carbon analyzed here must remain traceable at all times. There are methods for identifying the origin of carbon for biogenic carbon, but not for atmospheric carbon. Implementing such methods, on the other hand, is expensive and complex. Accordingly, statistical methods would have to be used in all cases when collecting data for inventories in order to map the quantity and origin of the carbon in circulation. The product pool solution presented could be used as an approximation. However, this also requires considerable effort to collect the underlying data on a regular basis (i.e., at least annually).

- ▶ If option U1-N1 („compact, differentiated“) is excluded as impracticable due to the data requirements, the only options available are accounting options that simplify the tracking of carbon origin to a certain extent. Another distinguishing feature of the remaining options is the level of detail when recording carbon pathways. A fundamental decision must be made as to whether **the carbon pathways** should be **mapped as compactly as possible or whether a very detailed record of as many individual carbon flows as possible** should be made in the CRT tables. The compact inventory focuses on emissions into the air and storage. The detailed inventory, on the other hand, shows the steps in which carbon is still used and, if necessary, creates offsetting items that indicate where capture prevents emissions.
- ▶ If the emphasis is more on carbon use, meaning a **detailed inventory** is preferred, the options U1-N4 („detailed, uniform“) and U2-N3 („detailed, uniform“) are still available. The combination of a detailed inventory and standardized C-attribution reduces the requirements for data collection. Although all energy sources used must be reported for all carbon flows, uniform C-attribution dispenses with the distinction between atmospheric and fossil carbon. In principle, choosing to use a detailed recording method involves significantly more data reporting. This increases the likelihood that suitable data for the national or European target architecture are contained in the inventories and can be used to calculate target values.
- ▶ **U2-N3** („detailed, uniform“) is also characterized by the fact that it implements the territorial principle and is therefore close to current practice. One effect of the territorial principle is that the distributors of synthetic energy sources containing carbon that capture and bind atmospheric carbon achieve negative inventory entries. At the same time, the transport sector (especially international transport) cannot achieve a balanced GHG balance sheet as long as energy sources containing carbon are used and the resulting emissions cannot be captured. The industrial sector, on the other hand, could show a negative GHG balance if new categories are assigned accordingly in the CRT tables (even if, as discussed in Chapter 10.3, this assignment is not necessarily recommended). This option requires two new categories: X.1 CO₂ captured contains values that must already be reported at present in a column of the CRT tables if they are to be excluded from the inventory. X.2 CO₂ injected at storage site additionally records the quantity injected into the storage site.
- ▶ **U1-N4** („detailed, uniform“) also guarantees detailed and uniform accounting but is the less favored option: In addition to the lack of correlation with current inventories, there is also significant disparity from a country and sector perspective.
- ▶ A **compact inventory**, on the other hand, focuses on recording emissions. Option U2-N1 („compact, uniform“) is particularly suitable here, but option U1-N2 („compact, simplified“)

also allows at least a partially compact inventory. U1-N2 („compact, simplified“) combines the compact inventory with an at least partially differentiated C-attribution, while U2-N1 („compact, uniform“) uses uniform C-attribution. The partially differentiated C-attribution means that U1-N2 („compact, simplified“) involves more effort for data collection. However, in contrast to U2-N1 („compact, uniform“), U1-N2 („compact, simplified“) allows conclusions to be drawn about the countries in which fossil carbon is introduced into the cycle. It is the only option that provides a report of the GHG emissions generated. At sector level, both options allow for balanced entries even when energy sources containing carbon are used. Both options are also comparable from a country perspective. The only difference is whether negative accounting takes place for capture from the air (U2-N1 („compact, uniform“)) or for permanent storage (U1-N2 („compact, simplified“)). This shifts the negative accounting entry between the energy exporter and the storage country.

Table 10: Overview of the characteristics of the accounting options considered

	U1-N1	U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
Compact vs.detailed	compact	partially compact	detailed	compact	Detailed
Uniform vs.differentiated	differentiated	mixed	uniform	uniform	Uniform
Generated emissions can be displayed	Not fulfilled/ recognizable	Fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable
Emissions can be displayed	Fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable
Technical sinks can be displayed directly	Fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable
Territorial principle	Fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Not fulfilled/ recognizable	Fulfilled/ recognizable
Fulfilled/recognizable					
Not fulfilled/recognizable					

Source: Authors' own illustration

Biomass

Accounting for carbon of biogenic origin is a special case, which is discussed in more detail in Chapter 4. This has so far been subject to the C-0 attribute, which is also known as the biomass privilege, according to international agreements. The report outlines which justifications explicitly or implicitly underlie this approach. According to this, we analyze possible accounting options under the premise that the biomass privilege is abolished and biomass in the utilization phase therefore receives the C-1 attribute and carbon is treated uniformly. This is possible in principle and, in the case of one of the options, would only change the balance sheets of individual sectors, but not the national total. In other options, the national total would also

change, as it would be taken into account or assumed that biomass is (partly) not sustainably produced. Either way, biomass with a C-1 attribute would reduce the incentives to use biomass for energy, as its combustion would then be equated in accounting terms with the combustion of coal, for example.

In principle, the question arises whether biogenic carbon should be treated analogously to atmospheric carbon, since in both cases the origin is the atmosphere. The only difference lies in the forms in which the carbon is removed from the atmosphere.

Under the U1 accounting variants, the current biomass privilege could be maintained while at the same time ensuring equal treatment with atmospheric carbon. For all U2 accounting variants, however, the biomass privilege would have to be abolished, as otherwise atmospheric carbon and biogenic carbon from perennial biomass (wood) would be treated unequally. A C-1 attribute (see Option 1, Figure 14) would need to be applied.

The question of what effects unequal treatment, or equal treatment through the abolition of the biomass privilege, would entail is not pursued further in this report, but should be discussed systematically elsewhere.

Glossar

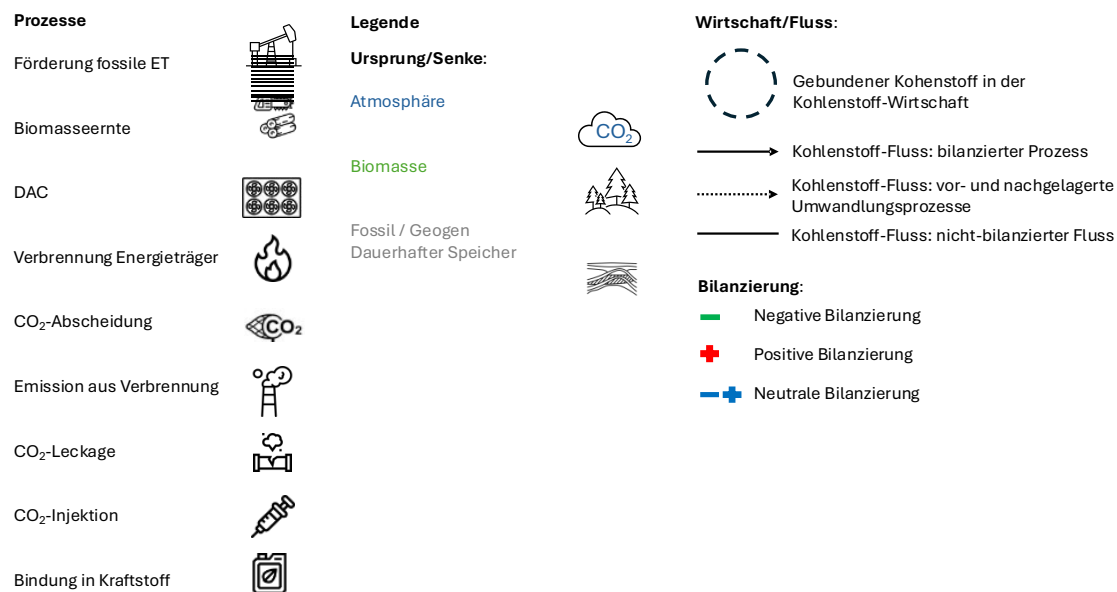
Tabelle 11: Bilanzierungsoptionen

Abkürzung	Name	Beschreibung
U1-N1	„kompakt, differenziert“	Ursprungsattribut des Kohlenstoffs bleibt über alle Phasen erhalten, Freisetzung von CO ₂ wird einmalig erfasst
U1-N2	„kompakt, vereinfacht“	Einheitliche C-0-Attributierung von Kohlenstoff nach der ersten Nutzungsphase, Entstehung von CO ₂ wird einmalig erfasst
U1-N3	ausgeschlossen, da atmosphärischer Kohlenstoff in der ersten Nutzungsphase ein C-0-Attribut erhalten würde und in späteren Nutzungsphase ein C-1-Attribut (inkonsistent)	
U1-N4	„detailliert, einheitlich“	Einheitliche C-1-Attributierung bei der Verbrennung, Negativ-Bilanzierung bei der Einbindung, Entstehung von CO ₂ wird mehrfach erfasst
U2-N1	„kompakt, einheitlich“	Einheitliche C-1-Attributierung in der gesamten Nutzungsphase, Freisetzung von CO ₂ wird einmalig erfasst
U2-N2	ausgeschlossen, da atmosphärischer Kohlenstoff in der ersten Nutzungsphase ein C-1-Attribut erhalten würde und in späteren Nutzungsphase ein C-0-Attribut (inkonsistent)	
U2-N3	„detailliert, einheitlich“	Einheitliche C-1-Attributierung bei der Verbrennung, Negativ-Bilanzierung bei der

Abkürzung	Name	Beschreibung
		Abscheidung, Entstehung von CO ₂ wird mehrfach erfasst
U2-N4		ausgeschlossen da atmosphärischer Kohlenstoff sowohl in der Ursprungsphase als auch bei Einbindung in ein Produkt in der Nutzungsphase negativ bilanziert werden müsste (doppelt negativ bilanziert)
Bilanzierung von Kohlenstoff		Möglichkeiten, Umwandlungsprozesse zwischen den drei Formen in THG-Inventaren abzubilden; positiv, neutral oder negativ
Drei betrachtete Formen von auftretendem Kohlenstoff		(i) Kohlenstoff in der Atmosphäre (CO ₂), (ii) gebundener Kohlenstoff in Produkten oder Energieträgern oder Biomasse und (iii) permanent gespeicherter Kohlenstoff (nur teilweise als CO ₂ , z. B. geologisch, in Böden oder im Ozean)
Fehlstellen		Prozessschritte oder Kohlenstoffflüsse in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft, welche in den heutigen THG-Inventaren (basierend auf den IPCC-Richtlinien und den CRT-Tabellen) nicht abgebildet werden können.
Attribute für gebundenen Kohlenstoff		Unterscheidung zwischen zwei Attributen für gebundenen Kohlenstoff (C-0 und C-1)
Phasen der Kohlenstoffwirtschaft		didaktische Unterscheidung nach «Ursprungsphase», «Nutzungsphase» und «Endphase» von Kohlenstoff in der Kohlenstoffwirtschaft
erzeugte Emissionen		Emissionen, die entstehen, aber nicht zwangsweise in die Atmosphäre gelangen (z. B. aufgrund einer Abscheidung)
ausgestoßene Emissionen		Emissionen, die in die Atmosphäre gelangen
Kohlenstofffluss		Ein Kohlenstofffluss bezeichnet den Weg des Kohlenstoffs von einem zum nächsten Umwandlungspunkt
Kohlenstoffpfad		Die Summe der Kohlenstoffflüsse von Ursprung bis Ende ergibt einen Kohlenstoffpfad

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 9: Legende der Icons



Quelle: Eigene Darstellung (Piktogramme: PowerPoint und Flaticon).

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Mit den Zielen des Übereinkommens von Paris (ÜvP) und den daraus abgeleiteten Treibhausgasneutralitätszielen für Deutschland (2045) und für die EU (2050) sowie den teilweise schon bestehenden und angekündigten Zielen negativer Emissionen kommt dem Kohlenstoff zukünftig eine neue Rolle in unserem Wirtschaftssystem zu. Dabei steht die schnelle und möglichst vollumfängliche Vermeidung von Emissionen von Treibhausgasen (THG), allen voran Kohlendioxid (CO₂), im Zentrum klimapolitischer Überlegungen. Dies erstreckt sich über alle Sektoren und beinhaltet Veränderungen im Einsatz von Energieträgern, Produkten oder Produktionsprozessen (z. B. Elektrifizierung). In vielen Bereichen sollte in Zukunft die Erzeugung von Treibhausgasen durch Effizienz, Suffizienz und Substitution vermieden werden können. In den übrigen Bereichen (mit sog. „schwer vermeidbaren Emissionen“), stellen der Einsatz von CO₂-Abscheidung aus dem Abgasstrom und die erneute Nutzung des abgeschiedenen CO₂ (Carbon Capture and Utilization – CCU) bzw. dessen Einspeicherung (Carbon Capture and Storage – CCS) eine weitere Möglichkeit dar, eine direkte Emission des CO₂ in die Atmosphäre zu verhindern. Zum Ausgleich verbleibender Restemissionen bekommen Negativemissionstechnologien (NET) eine wichtige Rolle, da sie es ermöglichen, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen. Dabei können sowohl natürliche Prozesse wie z. B. das Einbinden von CO₂ 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 spielen. Außerdem ist die Speicherung in geologischen Formationen, sowie in Pflanzenkohle in Böden oder in Biomasse in dauerhaft bestehenden Wäldern, relevant.

Gleichzeitig ist Kohlenstoff in vielen Bereichen ein wichtiger Einsatzstoff, z. B. als Basis für Kunststoffe und andere chemische Produkte oder als Bestandteil von flüssigen Kraftstoffen für den Flugverkehr (in dem derzeit Optionen zur direkten Elektrifizierung fehlen). Derzeit ist dieser Kohlenstoff überwiegend fossilen Ursprungs. Zwar gibt es biomasse-basierte Alternativen, jedoch ist Biomasse eine begrenzt verfügbare Ressource, da die Flächen zu deren Herstellung begrenzt sind und Nutzungskonkurrenzen bestehen (z. B. mit der Nahrungsmittelherstellung oder dem Naturschutz). Die Kreislaufführung von abgeschiedenem und in Produkten gebundenem CO₂ sind daher essenzielle Elemente einer zukünftigen THG-neutralen Kohlenstoffwirtschaft.

Zentrales Instrument auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität ist die Erstellung nationaler THG-Inventare. Unter dem ÜvP und dem damit verbundenen Transparenzrahmen wurden die Guidelines zur Berichterstattung von THG-Emissionen überarbeitet und angepasst. Technische Senken außerhalb des Landnutzungssektors (Land Use, Land Use-Change and Forestry – LULUCF) und Kohlenstoffkreisläufe spielten in den bisherigen Überarbeitungen der Regelungen jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Entsprechend sind für diese Prozesse bisher keine Regeln definiert bzw. die bestehenden Regeln führen gegebenenfalls zu Problemen. Daher besteht der Bedarf, neben Guidelines zur Berechnung von Quellen und Senken auch Anforderungen zum Berichtswesen zu überarbeiten.

1.2 Zirkuläre Kohlenstoffpfade und THG-Berichterstattung

Ein erster, veröffentlichter Teilbericht zum Forschungsvorhaben identifiziert mögliche Kohlenstoffflüsse in einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft und thematisiert deren Erfassung

in den nationalen THG-Inventaren (Fraunhofer ISI, INFRAS, IREES, 2025). Der Bericht zeigt, dass sich unter den internationalen Berichtspflichten des ÜvP und dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verschiedene Herausforderungen für eine transparente Erfassung neuer, zirkulärer Kohlenstoffpfade ergeben.

Zunächst schafft der Teilbericht eine Visualisierung und damit ein Gesamtverständnis über zukünftig mögliche Kohlenstoffflüsse. Darauf aufbauend werden im Teilbericht Hindernisse bezeichnet, die derzeit eine adäquate Erfassung in den nationalen THG-Inventaren verhindern. Zusammenfassend wurden folgende Fehlstellen bei Kohlenstoffflüssen in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft mit wesentlichen Auswirkungen auf die Inventarisierung von THG-Emissionen unter dem ÜvP identifiziert:

- ▶ **Ursprung des Kohlenstoffs:** Übergeordnet ergibt sich eine Fehlstelle daraus, dass in den heutigen THG-Inventaren in gewissen Fällen nicht mehr festgestellt werden kann, ob der Kohlenstoff bzw. das CO₂ atmosphärischen, biogenen oder fossil/geogenen Ursprungs ist.
- ▶ **Technische CO₂-Entnahme (z. B. DAC, DOC):** Die Guidelines zur Berechnung und Berichterstattung von THG-Emissionen enthalten keine klaren Vorgaben, wie diese Kohlenstoffpfade erfasst werden sollen. Auch Empfehlungen oder Vorgaben zur Messung, Berechnung und Berichterstattung sind Stand heute nicht gegeben.
- ▶ **CCU:** Stand heute kann abgeschiedenes CO₂ in nationalen THG-Inventaren nur dann berichtet werden, wenn es für die langfristige Speicherung bestimmt ist⁶, nicht aber bei einer kurzfristigen Bindung. Dies betrifft beispielsweise synthetische Kraftstoffe, die aktuell in den THG-Inventaren nicht erfasst werden können. Gleiches gilt für die stoffliche Verwendung von rezykliertem CO₂ in der Industrie (z. B. in chemischen Produkten).

Ergänzend gibt es mögliche Fehlstellen rund um beschleunigte natürliche Prozesse (z. B. beschleunigte Gesteinsverwitterung), bei der CO₂-Abscheidung aus internationalem Transport (z. B. Schifffahrt) oder beim Einbringen von Pflanzenkohle in Böden oder geologischen Speichern.

1.3 Auftrag und Ziel

Auf Basis dieser Ausgangslage orientiert sich der vorliegende Bericht an zwei übergeordneten Fragestellungen:

- ▶ Welche Möglichkeiten bestehen bei der Inventarisierung und Bilanzierung von zukünftigen Kohlenstoffpfaden („Bilanzierungsoptionen“)? Inwiefern tragen verschiedene dieser Bilanzierungsoptionen dazu bei, Fehlstellen bei Kohlenstoffflüssen in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft zu beheben?
- ▶ Welche Auswirkungen sowie Vor- und Nachteile haben die Bilanzierungsoptionen für Nutzer*innen von THG-Inventaren, insbesondere im Hinblick auf Klimaziele und Zielarchitekturen?

⁶ Kurzfristig gespeichertes CO₂ oder wiederverwendetes CO₂ darf i.d.R. 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.

Ziel des vorliegenden Berichtes ist, konzeptionelle Grundlagen zu entwickeln, welche zur Debatte um die zukünftige Ausgestaltung von nationalen THG-Inventaren und für die Klimazielssetzung beitragen.

Dabei zeigen die Bilanzierungsoptionen theoretische Möglichkeiten auf, wie die Inventarisierung und Bilanzierung in den THG-Inventaren zukünftig funktionieren könnte (siehe Kapitel 3). Als Basis für dieses Rahmenwerk legt der Bericht wichtige konzeptionelle Grundlagen fest (Kapitel 2). Ergänzend wird der Sonderfall von CO₂ biogenen Ursprungs erläutert (Kapitel 4). Der Bericht konkretisiert die Bilanzierungsoptionen in Anwendungsbeispielen, welche ausgewählte Fehlstellen bei Kohlenstoffflüssen in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft adressieren, und mögliche Anwendungen des konzeptionellen Rahmenwerks illustrieren: Technische CO₂-Entnahme, CCS, CCU sowie langlebige (chemische) Produkte. Für die Anwendungsbeispiele und im Allgemeinen zeigt der Bericht auf, wie praktikabel verschiedene Bilanzierungsoptionen sind und welche Vor- und Nachteile sie aufweisen (siehe Kapitel 4 bis 9).

Ergänzend und darauf aufbauend thematisiert der Bericht die Auswirkungen der Bilanzierungsoptionen auf Inventare, Inventareinträge und Zielarchitekturen (siehe Kapitel 10). Dabei geht es u.a. um folgende Fragestellungen:

- ▶ Wie beeinflussen Importe und Exporte das nationale Total der Emissionen eines Landes abhängig von den verschiedenen Bilanzierungsoptionen? (Unterschiede für Länder, die viel CO₂ speichern, viel Energie exportieren oder eher Energieimporteure ohne Speicherkapazitäten sind)
- ▶ Welche Auswirkungen haben die Bilanzierungsoptionen auf verschiedene Sektoren (Energie, Transport, Industrie, etc.)?
- ▶ Welche Zielarchitekturen sind denkbar (z. B. Betrachtung der Netto-Emissionen oder von gesonderten CCS-Mengen und Negativemissionen bei der Zielsetzung)? Wie beeinflussen die Bilanzierungsoptionen die verschiedenen Zielarchitekturen?

Übergeordnete Schlussfolgerungen und ein Fazit aus Sicht der Autorinnen und Autoren folgen im Kapitel 11.

Die Arbeiten basieren soweit möglich auf vereinfachten Anwendungsbeispielen. Ziel ist es dabei, die generellen Prinzipien möglichst klar darstellen zu können. Uns ist dabei bewusst, dass die Realität dabei deutlich komplexer aussehen wird. Die volle Komplexität darzustellen, würde in unseren Augen aber zu stark von den Ideen, die in diesem Bericht vorgestellt werden, ablenken. Zugleich ergibt sich daraus die Notwendigkeit, in einem weiterführenden Schritt komplexere Fälle zu betrachten.

2 Konzeptionelle Grundlagen zur Bilanzierung

Dieses Kapitel beschreibt den methodischen Rahmen, um Bilanzierungsoptionen in THG-Inventaren systematisch zu analysieren. In den folgenden Kapiteln wird dieser Rahmen dazu genutzt, verschiedene Optionen vorzustellen, wie die Regeln künftig verändert werden könnten, um aktuelle Fehlstellen bei Kohlenstoffflüssen in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft zu beheben.

2.1 Regeln und Attribute

Kohlenstoff kommt in der Natur in verschiedenen Formen vor und es ist üblich, zwischen dem natürlichen und dem anthropogenen Kreislauf zu unterscheiden. Dieser Bericht thematisiert die Bilanzierung in einer künftigen (zirkulären) Kohlenstoffwirtschaft. Hierfür ist es nützlich, von den Komplexitäten dieser Kohlenstoffkreisläufe zu abstrahieren und zur Vereinfachung folgende drei Formen zu unterscheiden:

- ▶ Kohlenstoff in der Atmosphäre (CO₂)
- ▶ Gebundener Kohlenstoff in Produkten oder Energieträgern oder Biomasse
- ▶ Permanent gespeicherter Kohlenstoff (nur teilweise als CO₂, z. B. geologisch, in Böden oder im Ozean)

Für die Analysen und Diskussionen im vorliegenden Bericht gibt es drei zentrale Bausteine:

- ▶ **Bilanzierung von Kohlenstoff:** Möglichkeiten, Umwandlungsprozesse zwischen den drei Formen in THG-Inventaren abzubilden
- ▶ **Phasen der Kohlenstoffwirtschaft:** didaktische Unterscheidung nach «Ursprungsphase», «Nutzungsphase» und «Endphase» von Kohlenstoff in der Kohlenstoffwirtschaft
- ▶ **Attribute für gebundenen Kohlenstoff:** Unterscheidung zwischen zwei Attributen für gebundenen Kohlenstoff (C-0 und C-1).

Diese Bausteine werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Bilanzierung

Ein zentraler Baustein für die spätere Diskussion ist, dass THG-Inventare grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten bieten, Umwandlungsprozesse von Kohlenstoff zwischen diesen drei Formen sowie innerhalb der gebundenen Form abzubilden:

- ▶ **Positive Bilanzierung:** Ein Umwandlungsprozess wird im Inventar mit positivem Vorzeichen inventarisiert und wird dem nationalen Total hinzugerechnet (z. B. Emission in die Atmosphäre)
- ▶ **Neutrale Bilanzierung:** Ein Umwandlungsprozess wird nicht oder nur nachrichtlich berichtet und dem nationalen Gesamtemissionen weder hinzugerechnet noch von diesen abgezogen (z. B. Umwandlung innerhalb der gebundenen Form, Emissionen in die Atmosphäre oder permanente Speicherung)

- Negative Bilanzierung: Ein Umwandlungsprozess wird mit negativem Vorzeichen inventarisiert und wird von den nationalen Gesamtemissionen abgezogen (z. B. permanente Speicherung von Kohlenstoff oder Umwandlungen innerhalb der gebundenen Form).

Diese Bilanzierungen sind teilweise auf den ersten Blick nicht intuitiv (z. B. positive Inventarisierung innerhalb der gebundenen Form). In den Kapiteln 4 bis 8 sind daher zahlreiche Beispiele für jeden dieser Fälle zu finden.

Derzeit erfordert nur eine positive oder negative Bilanzierung eine Aktivität im Inventar. Eine neutrale Bilanzierung muss teils gar nicht oder nur nachrichtlich abgebildet werden (Memo-Item).

Phasen der Kohlenstoffwirtschaft

Wir unterscheiden im Folgenden aus didaktischen Gründen zwischen drei Phasen der Kohlenstoffwirtschaft: Die «Ursprungphase» beschreibt den Schritt, in welchem der Kohlenstoff in die Kohlenstoffwirtschaft gebracht wird (z. B. Förderung von Erdöl oder Abscheidung aus der Atmosphäre durch DAC). Die «Nutzungsphase» beschreibt die (zirkuläre) Kohlenstoffwirtschaft. Dies beinhaltet vor allem auch die Abscheidung und anschließende erneute Nutzung von Kohlenstoff. Die «Endphase» beschreibt schließlich entweder die Emission in die Atmosphäre oder die permanente Speicherung⁷ (Austritt aus der Kohlenstoffwirtschaft).

Attribute für gebundenen Kohlenstoff

Ein weiterer zentraler Baustein dieser Studie ist, dass wir für gebundenen Kohlenstoff zwei Attribute einführen: Das Attribut C-0 und das Attribut C-1. Ausgangspunkt dieser Attribution ist, dass Kohlenstoff fossilen⁸ Ursprungs zu Beginn der Bilanzierungskette das C-1-Attribut hat und Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs das C-0-Attribut. Nach weiteren Bilanzierungsschritten (d. h. im weiteren Verlauf der Kohlenstoffwirtschaft) kann sich das Attribut des Kohlenstoffs ändern, abhängig davon, ob das Einbringen in die Kohlenstoffwirtschaft bzw. ein Umwandlungsprozess positiv, neutral oder negativ bilanziert wird. Die Attribute sind ein Hilfsmittel, das es einfach erlaubt, sicherzustellen, dass die Bilanzierungsregeln über die gesamte Bilanzierungskette korrekt sind. Die Attribute tauchen aber nicht im THG-Inventar auf.

Attribute C-0 und C-1: Erklärungen und Intuition

Die Kohlenstoff-Attribute C-0 und C-1 sind eine bilanztechnische Hilfestellung. Sie erlauben es, sich vom Ursprung des Kohlenstoffs zu lösen und erleichtern die korrekte Bilanzierung einer längeren Bilanzkette mit mehreren Schritten in der Nutzungsphase, um so schlussendlich die Endphase korrekt zu bilanzieren.

Es gibt zwei Pfade, die zu Kohlenstoff mit dem C-1-Attribut in der Nutzungsphase führen:

- Kohlenstoff fossilen Ursprungs wurde im bisherigen Verlauf der Bilanzkette nicht bzw. neutral bilanziert. Somit wurde (noch) nicht berücksichtigt, dass eine potenzielle Emission dieses Kohlenstoffs die atmosphärische CO₂-Konzentration erhöhen würde.
- Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs wurde im bisherigen Verlauf der Bilanzkette bereits negativ bilanziert. Somit wurde bereits berücksichtigt, dass die Entnahme/Abscheidung zu

⁷ Permanente Speicherung setzt voraus, dass der gespeicherte Kohlenstoff auch langfristig nicht wieder in die Atmosphäre entweicht.

⁸Dasselbe gilt für Kohlenstoff geogenen Ursprungs. Zur Vereinfachung wird dies im Folgenden nicht mehr erwähnt.

einer Reduktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration führen würde. Folglich erhält dieser Kohlenstoff das Attribut C-1, weil eine Emission bilanztechnisch wieder zu einer Erhöhung der CO₂-Konzentration führen würde (bzw. die Entnahmen rückgängig machen würde).

Analog gibt es zwei Pfade, die zu Kohlenstoff mit dem C-0-Attribut in der Nutzungsphase führen:

- ▶ Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs wurde im bisherigen Verlauf der Bilanzkette nicht negativ bilanziert. Somit wurde (noch) nicht berücksichtigt, dass dieser Kohlenstoff aus der Atmosphäre entnommen wurde und eine potenzielle Emission dieses Kohlenstoffs die atmosphärische CO₂-Konzentration daher nicht erhöhen würde.
- ▶ Kohlenstoff fossilen Ursprungs wurde im bisherigen Verlauf der Bilanzkette bereits positiv bilanziert. Somit wurde bereits berücksichtigt, dass eine potenzielle Emission dieses Kohlenstoffs die atmosphärische CO₂-Konzentration erhöhen würde. Die Emission dieses Kohlenstoffs als CO₂ hat zwar noch nicht stattgefunden, trotzdem wurde sie bereits inventarisiert. Folglich erhält der Kohlenstoff daher das C-0-Attribut, damit bei einer potenziellen Emission die Erhöhung der CO₂-Konzentration nicht doppelt verbucht wird.

Obige Pfade belegen, dass es möglich ist, dass Kohlenstoff fossilen Ursprungs in der Nutzungsphase aufgrund vorher erfolgter positiver Bilanzierung das C-0-Attribut hat. Und Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs kann aufgrund vorher erfolgter negativer Bilanzierung das C-1-Attribut erhalten. Daher ist es nicht zielführend, in der Nutzungsphase die Information über den Ursprung des Kohlenstoffs zu bewahren.

Die Regeln für die Bilanzierung von gebundenem Kohlenstoff mit den Attributen C-1 und C-0 sind in Tabelle 12 (Ursprungsphase) und in Tabelle 14 (Nutzungs- und Endphase) aufgeführt sowie in den Abbildungen der Kapitel 2.2 bis 2.4 illustriert.

In der Ursprungsphase sind die Bilanzierungsregeln abhängig davon, ob der Kohlenstoff einen fossilen oder atmosphärischen Ursprung hat. Pro Attribut gibt es zwei Optionen, wie die Umwandlung des Kohlenstoffs und/oder seine Einbringung in die Kohlenstoffwirtschaft bilanziert werden kann.

Tabelle 12: Regeln zur Bilanzierung von gebundenem Kohlenstoff (Ursprungsphase)

Ursprungsphase	Fossiler Ursprung	Atmosphärischer Ursprung
Einbringung C in Kohlenstoffwirtschaft	Falls neutral bilanziert → Attribut C-1 Falls positiv bilanziert → Attribut C-0 (negative Bilanzierung nicht möglich)	Falls neutral bilanziert → Attribut C-0 Falls negativ bilanziert → Attribut C-1 (positive Bilanzierung nicht möglich)

Quelle: Eigene Darstellung.

In der Nutzungs- und Endphase ist die weitere Bilanzierung abhängig davon, welches Attribut der Kohlenstoff zu Beginn hat. Der Ursprung des Kohlenstoffs (fossil oder atmosphärisch) ist ab diesem Moment für die Inventarisierung und Bilanzierung nicht mehr relevant. Die Attribute C-0 und C-1 stellen — über die gesamte Bilanzkette — eine korrekte Bilanzierung sicher.

Für die Nutzungsphase gilt: Eine neutrale Bilanzierung in der Nutzungsphase ändert das Attribut nicht. Eine positive Bilanzierung ändert hingegen das Attribut von C-1 auf C-0 und eine

negative Bilanzierung von C-0 auf C-1. Eine negative Bilanzierung eines C-1 Kohlenstoffs ist somit nicht möglich (und umgekehrt).

Nach heutigen Regeln würde beispielsweise gelten:

- ▶ Kohlenstoff fossilen Ursprungs wird bei der Einbringung in den Kohlenstoffkreislauf (Förderung oder Abbau/ Entnahme aus der Lagerstätte) neutral bilanziert, und erhält in der Kohlenstoffwirtschaft das Attribut C-1.⁹
- ▶ Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs wird bei der Einbringung (Entnahme aus der Luft) neutral bilanziert, und erhält in der Kohlenstoffwirtschaft das Attribut C-0.

Tabelle 13: Regeln zur Bilanzierung von gebundenem Kohlenstoff (Nutzungsphase)

Nutzungsphase	Ausgangsattribut C-1	Ausgangsattribut C-0
Umwandlungsprozess (kann auch mehrmals hintereinander stattfinden)	Falls neutral bilanziert → Attribut bleibt C-1 Falls positiv bilanziert → Attribut ändert sich zu C-0 (negative Bilanzierung nicht möglich)	Falls neutral bilanziert → Attribut bleibt C-0 Falls negativ bilanziert → Attribut ändert sich zu C-1 (positive Bilanzierung nicht möglich)

Quelle: Eigene Darstellung.

In der Endphase gibt es hingegen jeweils nur eine Möglichkeit, die zwingend durch das Attribut vorgegeben ist (z. B. müssen die Emissionen eines C-1-Kohlenstoffs zwingend positiv bilanziert werden).

Tabelle 14: Regeln zur Bilanzierung von gebundenem Kohlenstoff (Endphase)

Endphase	Ausgangsattribut C-1	Ausgangsattribut C-0
Emission	Positiv bilanziert	Neutral bilanziert
Permanente Speicherung	Neutral bilanziert	Negativ bilanziert

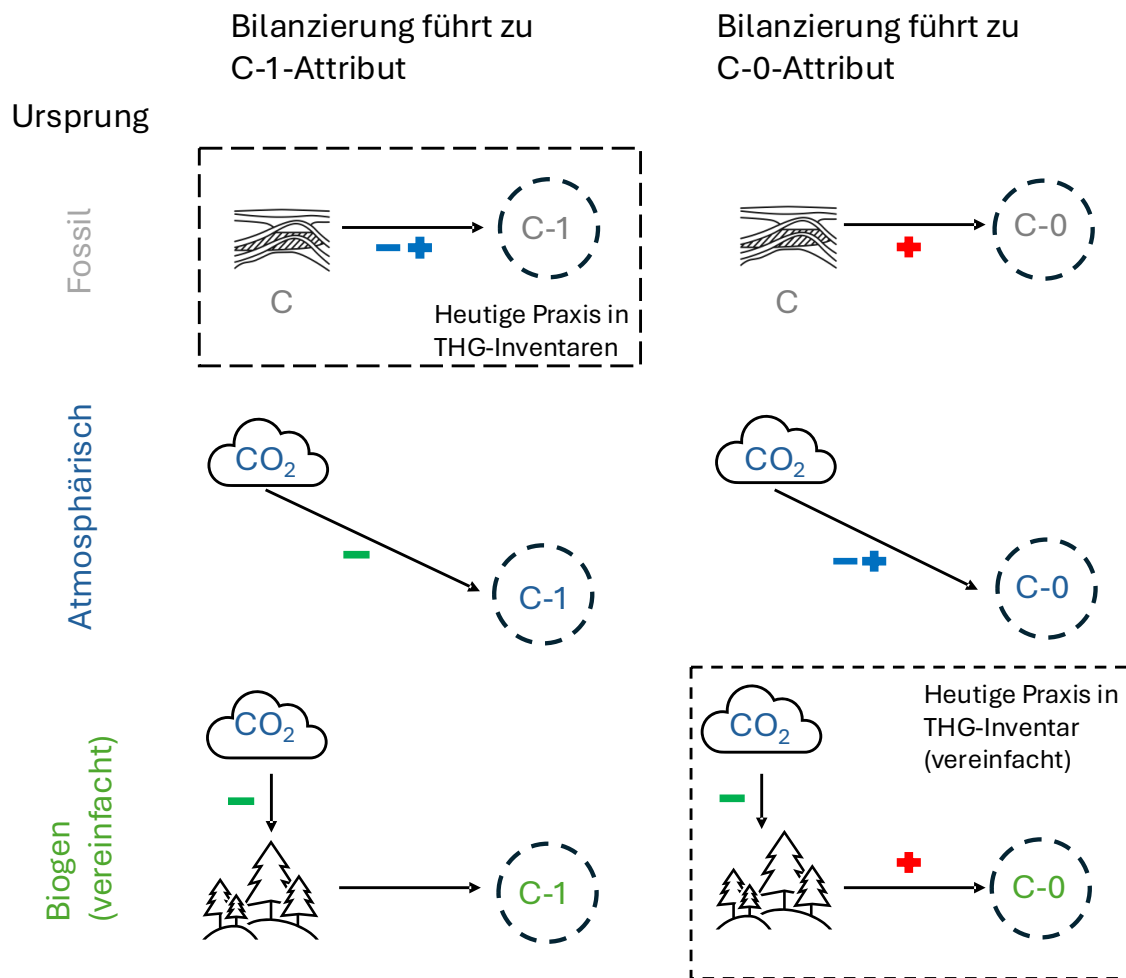
Quelle: Eigene Darstellung.

2.2 Ursprungsphase

Abbildung 10 zeigt die Bilanzierungsoptionen in der Ursprungsphase. Dafür unterscheiden wir zwischen zwei Ursprungsarten des Kohlenstoffs: fossil oder atmosphärisch. Die Ursprungsphase ist der Schritt, an dem die Entnahme aus der Atmosphäre oder aus den fossilen Lagerstätten, stattfindet.

⁹ Kohlenstoff geogenen Ursprungs wird in diesem Bericht hinsichtlich der Bilanzierung gleich behandelt wie fossil.

Abbildung 10: Ursprungsphase: Bilanzierung und daraus folgende Attribute



Quelle: Eigene Darstellung. Ursprung Biogen: Vereinfachte Darstellung. Siehe Kapitel 4 für mehr Details.

Kohlenstoff **fossilen Ursprungs** erhält in der Kohlenstoffwirtschaft (angedeutet durch den gestrichelten Kreis) das Attribut C-1, falls die Förderung neutral bilanziert wird (oben links). Dies entspricht der heute gängigen Praxis in den THG-Inventaren. Würde die Förderung fossiler Energieträger hingegen positiv bilanziert, ist die zukünftige Wirkung auf die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bereits bilanztechnisch erfasst. In einem solchen Fall müsste die Förderung mit positivem Vorzeichen inventarisiert und dem nationalen Total hinzugerechnet werden. Das Attribut für den weiteren Verlauf wäre somit C-0 (oben rechts). Dieser Fall ist zwar theoretisch möglich, allerdings gehen wir nicht davon aus, dass dies umsetzbar ist. Daher wird diese Möglichkeit im Weiteren nicht näher betrachtet.¹⁰

Aus der **Atmosphäre entnommener Kohlenstoff** erhält in der Kohlenstoffwirtschaft das Attribut C-0, wenn die Entnahme neutral bilanziert wird (Mitte rechts). Wird die Entnahme hingegen negativ bilanziert (Mitte links), ist die Reduktion der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bereits bilanztechnisch erfasst. Das Attribut wäre für den weiteren Verlauf deshalb C-1 und der gebundene Kohlenstoff würde in diesem Fall in der Kohlenstoffwirtschaft

¹⁰ Interessanterweise wird die Entnahme von Biomasse bei dem Produzenten bilanziert und nicht bei dem Nutzer. Der Nutzer kann Biomasse dann neutral bilanzieren. Allerdings bilanziert der Produzent nicht direkt die Entnahme, sondern den kompletten LULUCF-Sektor (siehe Pulles et al. (2022) und auch die Diskussion in Kapitel 4 des vorliegenden Berichts).

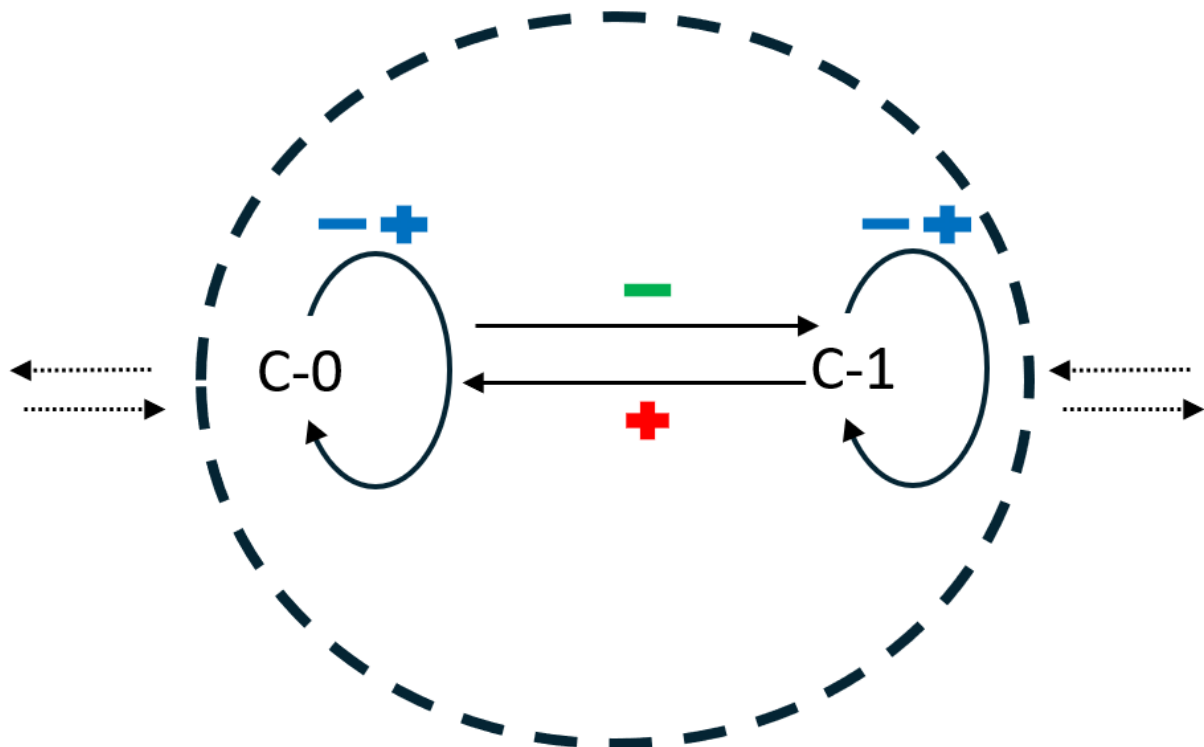
bilanztechnisch gleich behandelt wie fossiler Kohlenstoff. In den THG-Inventaren gibt es heute noch keine gängige Praxis zur Inventarisierung von atmosphärischem Kohlenstoff.

Für Kohlenstoff **biogenen Ursprungs (Holz)** ist es derzeit gängige Praxis, in der Kohlenstoffwirtschaft das Attribut C-0 zu verwenden (unten rechts). Prinzipiell vorstellbar wäre es auch, diesem Kohlenstoff das Attribut C-1 zu geben (unten links). Die Ursprungsphase von biogenem Kohlenstoff ist in der Darstellung nicht komplett abgebildet, da diese komplexer ist als in den anderen beiden Fällen. Dieser Fall wird daher in dem separaten Kapitel 4 im Detail besprochen. Relevant für das Verständnis ist aber vor allem, dass auch biogener Kohlenstoff das Attribut C-0 oder C-1 erhalten kann.

2.3 Nutzungsphase (Kohlenstoffwirtschaft)

In der Ursprungsphase gewonnener Kohlenstoff gelangt in die Nutzungsphase, d. h. in die (zirkuläre) Kohlenstoffwirtschaft. Abbildung 11 zeigt, dass der Kohlenstoff — je nach Ursprung und vorgängiger Bilanzierung — zu Beginn der Nutzungsphase entweder das Attribut C-0 (Eintritt in den Kreis von links) oder das Attribut C-1 (Eintritt in den Kreis von rechts) hat. Finden Umwandlungsprozesse statt, ändert sich das Attribut des Kohlenstoffs gemäß den Regeln aus Tabelle 12. Kohlenstoff kann sich theoretisch sehr lange im Kreislauf (oder einem Pool) befinden.

Abbildung 11: Nutzungsphase: Bilanzierung und daraus folgende Attribute

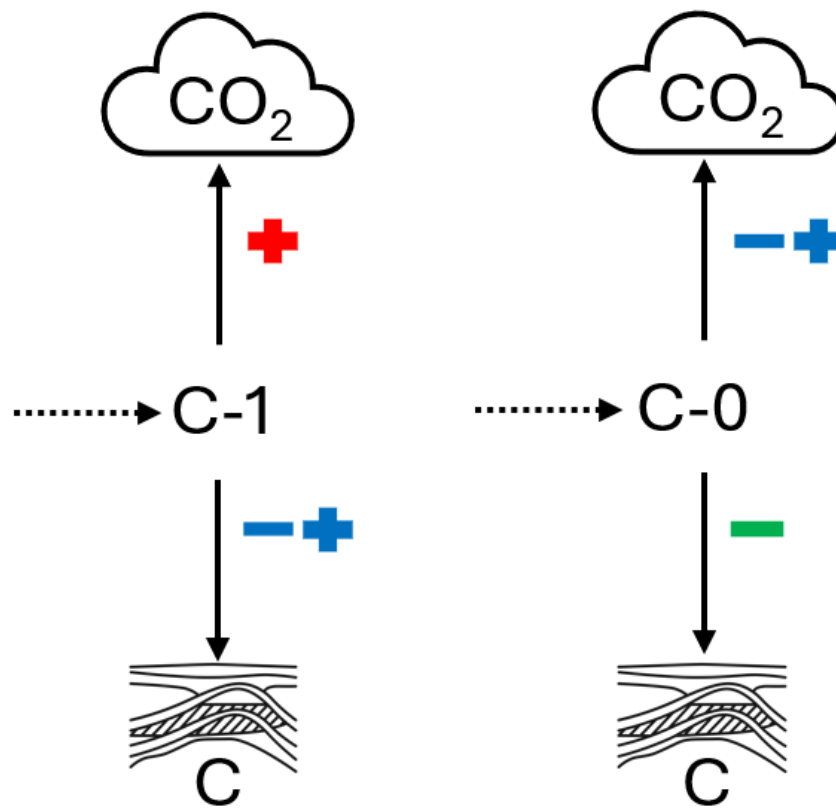


Quelle: Eigene Darstellung.

2.4 Endphase (Emission oder permanente Speicherung)

Schlussendlich wird Kohlenstoff entweder emittiert oder permanent gespeichert. Abbildung 12 zeigt die Bilanzierungsoptionen für diesen letzten Schritt (siehe auch die Regeln in Tabelle 12).

Abbildung 12: Bilanzierung Endphase



Quelle: Eigene Darstellung.

In Abhängigkeit vom Attribut aus der Nutzungsphase muss eine Emission positiv bilanziert werden (C-1-Attribut) oder neutral (C-0-Attribut). Entsprechend muss eine dauerhafte Speicherung bei einem C-1-Attribut neutral und bei einem C-0-Attribut negativ bilanziert werden.

In dieser vereinfachten Betrachtung gehen wir davon aus, dass die Speicherung permanent ist und daher keine Leckagen auftreten. Würde man die Leckage aus dem gespeicherten Kohlenstoff einbeziehen wollen, dann wäre dies anhand der eingeführten Regeln auch möglich: Der gespeicherte Kohlenstoff würde in beiden Fällen das C-1-Attribut erhalten (links wird C-1 neutral bilanziert und rechts wird C-0 negativ bilanziert). Leckagen müssten sodann positiv bilanziert werden.¹¹

2.5 Bilanzierung Methanemissionen

CH₄ (Methan) ist wie CO₂ ein THG, das Kohlenstoff enthält und daher Teil des Kohlenstoffkreislaufs ist. Auch Methan kann fossilen oder biogenen Ursprungs sein: Es ist Hauptbestandteil von Erdgas, entsteht aber auch bei vielen natürlichen Prozessen wie beim Abbau von organischen Materialien unter Sauerstoffmangel (z. B. in Deponien, beim Reisanbau, oder in Kläranlagen) oder in Mägen von Rindern.

Methan hat allerdings eine andere Klimawirkung als CO₂: Ist Methan in der Atmosphäre, hat es im Vergleich zu CO₂ eine weitaus höhere erwärmende Wirkung pro Tonne. Es baut sich aber mit

¹¹ Dies wird heute schon so in CRT-Kategorie 1.C erfasst

einer atmosphärischen Lebensdauer von rund 12 Jahren (siehe IPCC (2021) Table 7.15 und IPCC (2014) Table 8.A.1) wieder zu CO₂ ab, sodass die starke erwärmende Wirkung von Methan nur über diesen Zeitraum zum Tragen kommt. Im Gegensatz dazu kumuliert sich CO₂ langfristig in der Atmosphäre und die erwärmende Wirkung hält über mehrere Jahrhunderte an. Methan ist daher ein „flow“-Schadstoff, während CO₂ ein „stock“-Schadstoff ist.

Für die Inventarisierung ist es gängige Praxis, Methan in CO₂-Äquivalenten auszudrücken. Der Umrechnungsfaktor ist das „Global Warming Potential“ (GWP). Das GWP ist definiert als der aggregierte Strahlungsantrieb (ein Maß für den Erwärmungseffekt) von Methan im Verhältnis zu dem aggregierten Strahlungsantrieb von CO₂. Es können dabei unterschiedliche Zeiträume betrachtet werden. International üblich und in den Berichterstattungsrichtlinien des ÜvP vorgegeben sind 100 Jahre (GWP-100). Das IPCC AR5 berechnet zwei Werte¹², deren Unterschied auch für unseren Kontext relevant ist:

- ▶ **GWP_{CH4}-non fossil= 28.** Dieser Wert berücksichtigt nur den zusätzlichen Strahlungsantrieb von Methan. Das heißt, der Strahlungsantrieb des atmosphärischen CO₂, das nach dem Abbau des Methans entsteht, wird nicht berücksichtigt. Dieser Wert ist vom IPCC für Methanemissionen konzipiert, die durch nicht-fossilen Kohlenstoff entstehen. In unserem Kontext bedeutet dies, dass dieser Wert **für Emissionen von Methan ausgehend von einem C-0-Kohlenstoff** angewendet werden muss.
- ▶ **GWP_{CH4}-fossil= 30.** Dieser Wert berücksichtigt zusätzlich das atmosphärische CO₂, das nach dem Abbau des Methans entsteht.¹³ Dieser Wert ist vom IPCC für Methanemissionen konzipiert, die durch fossilen Kohlenstoff entstehen. In unserem Kontext bedeutet dies, dass dieser Wert **für Emissionen von Methan ausgehend von einem C-1 Kohlenstoff** angewendet werden muss. Dabei spielt der Ursprung keine Rolle. So muss dieser Wert beispielsweise auch angewendet werden, wenn eine DAC- Abscheidung negativ bilanziert wird und aus diesem CO₂ synthetisches Methan hergestellt wird, das dann beim Transport entweicht.

Alternativ kann bei der Emission von Methan ausgehend von einem C-1 Kohlenstoff auch GWP_{CH4}-non fossil = 28 verwendet werden und zusätzlich noch entsprechende Emissionen von CO₂ positiv bilanziert werden.

¹² Siehe IPCC AR5, Table 8.A.1. In IPCC AR6, Table 7.15 sind aktueller Werte zu finden. Diese sind allerdings noch nicht in das Regelwerk der Berichterstattung übernommen worden. Inventarrelevant bleiben die Werte aus AR5.

¹³ Da aus jeder Tonne Methan bei Abbau aufgrund der Stöchiometrie und den Atomgewichten $44/18 = 2.4$ Tonnen CO₂ entstehen ist dieser Wert gerundet 2 Einheiten größer als GWP_{CH4}-non fossil.

3 Anwendung der Bilanzierungsoptionen in der Emissionsberichterstattung

Im Folgenden werden allgemeine Bilanzierungsoptionen vorgestellt. In den folgenden Kapiteln werden diese Optionen anhand von illustrativen Anwendungsbeispielen veranschaulicht.

3.1 Grundsätze für die weiteren Arbeiten

Nachfolgend fassen wir zunächst kurz die wichtigsten Grundsätze zusammen, die als Leitgedanke für die Entwicklung der Bilanzierungsoptionen dienen und die in den hinteren Teilen zur Einordnung der entwickelten Vorschläge wieder aufgegriffen werden. Dies sind insbesondere die folgenden vier Grundsätze bzw. Annahmen:

1. **In einer geschlossenen Volkswirtschaft muss jede Bilanzierungsoption zum gleichen nationalen Total führen**, da das Total ausschließlich durch die realen Gegebenheiten bestimmt wird und nicht durch die Bilanzierungsoption. Die Optionen führen allerdings dazu, dass die Inventarisierung und Bilanzierung der einzelnen Sektoren bzw. Phasen unterschiedlich sind. In einer offenen Volkswirtschaft können die Importe und Exporte von CO₂ oder Zwischenprodukten hingegen dazu führen, dass die Bilanzierungsoptionen das nationale Total beeinflussen¹⁴ (siehe hierzu die ausführliche Diskussion in Kapitel 10).

Das grundsätzliche Ziel der entwickelten Bilanzierungsoptionen ist es, die im ersten Teil des Projektes identifizierten Fehlstellen bei Kohlenstoffflüssen in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft zu beheben (vgl. Duscha et al. (2025)). Die durchgeführte Fehlstellenanalyse basiert insbesondere auf zwei Kriterien:

- a) Ist der Fluss in den IPCC-Richtlinien definiert, insbesondere kann der Fluss in der Struktur des CRT abgebildet werden?
- b) Sind erforderliche Datengrundlagen verfügbar, insbesondere sind die Datengrundlagen im CRT abgebildet und sind sie genügend detailliert?

Im Anschluss an die Vorstellung der Bilanzierungsoptionen und der Beispiele greift die Analyse daher insbesondere diese beiden Kriterien wieder auf und untersucht in welcher Form es gelingt mit Hilfe der Bilanzierungsoptionen die Fehlstellen im Inventar zu beheben.

2. **Die nachfolgend vorgestellten Bilanzierungsoptionen stellen eine sehr grundsätzliche Herangehensweise an die Inventarerstellung dar.** Wir verfolgen also im Folgenden nicht die einzelnen identifizierten Fehlstellen zu betrachten und einzeln Optionen für deren Behebung vorzuschlagen. Stattdessen stellen wir ein schlüssiges Bilanzierungssystem vor und zeigen später, warum es den hier formulierten Grundsätzen folgt. Dieses Vorgehen eröffnet ein sehr breites Spektrum die Inventarerstellung anzupassen. Dies scheint vor dem Hintergrund der bereits bestehenden Erfahrungen mit der Erstellung und Nutzung der THG-Inventare jedoch nur begrenzt sinnvoll. Hier scheint uns auch eine gewisse Nähe zu den aktuell geltenden Regelungen eine relevante Zielgröße zu sein, um im internationalen Kontext Anpassungen begründet und gezielt diskutieren zu können.

¹⁴ Das Total wäre dann nur auf globaler Ebene das Gleiche (falls alle betroffenen Länder die gleichen Regeln verwenden).

Aus diesem Grund erfolgen die nachfolgenden Überlegungen auf Basis von zwei zentralen Festlegungen:

- a) Wir gehen in der Folge davon aus, dass Kohlenstoff fossilen Ursprungs bei der Förderung neutral bilanziert wird und somit in der ersten Nutzungsphase immer das C-1-Attribut hat (gemäß gängiger Praxis).
 - b) Theoretisch wäre es zwar möglich, Kohlenstoff fossilen Ursprungs bereits bei der Förderung positiv zu bilanzieren (siehe Abbildung 10). Dies halten wir allerdings für nicht umsetzbar, da es der gängigen Praxis fundamental widerspricht.
3. **Kohlenstoff aus Biomasse weist grundsätzlich die gleichen Eigenschaften auf wie atmosphärischer Kohlenstoff**, es unterscheidet sich lediglich der Vorgang der Abscheidung. Der Zwischenschritt über die Biomasse und die damit verbundenen bestehenden Regelungen zur Inventarerstellung verursachen allerdings Komplexitäten, von denen wir an dieser Stelle zur Vereinfachung vorerst abstrahieren. Für die Beschreibung der Bilanzierungsoptionen fokussieren wir uns daher auf Kohlenstoff mit direktem Ursprung Atmosphäre, um die zugrunde liegende Idee zu beschreiben. Die Bilanzierung von Biomasse wird im Detail in Kapitel 4 diskutiert sowie in der abschließenden Diskussion am Ende dieses Berichts nochmals aufgegriffen.
4. **Für die Endphase müssen keine Bilanzierungsoptionen berücksichtigt werden**, da die Inventarisierung von Emissionen bzw. permanenter Speicherung eindeutig durch das Attribut bestimmt ist (siehe Tabelle 15). Im Folgenden werden daher nur die Optionen für die Ursprungsphase und die Nutzungsphase gezeigt.

3.2 Bilanzierungsoptionen Ursprungsphase

Gegeben den obigen Annahmen, gibt es für die Bilanzierung von Kohlenstoff in der Ursprungsphase somit zwei Optionen.

Option U1

Kohlenstoff mit Ursprung Atmosphäre wird in der Ursprungsphase neutral bilanziert, sodass der Kohlenstoff in der Folge das Attribut C-0 erhält. Kohlenstoff fossilen Ursprungs wird bei der Förderung neutral bilanziert und hat daher das C-1-Attribut. Kohlenstoff biogenen Ursprungs (Holz) würde entsprechend dem geltenden Biomasseprivileg (Kapitel 4) analog zu Kohlenstoff mit Ursprung Atmosphäre ein C-0 Attribut erhalten. Dieser Fall wird im weiteren Bericht nicht vertieft.

Wenn Kohlenstoff unterschiedlicher Ursprünge parallel genutzt wird, muss aufgrund der unterschiedlichen Attribute in der folgenden Nutzungsphase bekannt sein, welche Mengen ein C-0-Attribut und welche ein C-1-Attribut haben.

Option U2

Kohlenstoff mit Ursprung Atmosphäre wird in der Ursprungsphase negativ bilanziert, sodass der Kohlenstoff in der Folge das Attribut C-1 erhält. Kohlenstoff fossilen Ursprungs wird bei der Förderung neutral bilanziert und hat daher das C-1-Attribut.

In der Nutzungsphase hat aller Kohlenstoff das C-1-Attribut. Der Ursprung des Kohlenstoffs (Fossil vs. Atmosphäre) muss daher nicht zwangsläufig nachverfolgt werden. Diese ist ein großer Vorteil dieser Option in einer zirkulären Kohlenstoffwirtschaft. Nachgelagerte Emissionen werden immer positiv bilanziert. Eine dauerhafte Speicherung wird neutral

bilanziert. Dieses Vorgehen ist jedoch inkompatibel mit dem geltenden Biomasseprivileg. Ein C-1 Attribut ist jedoch prinzipiell denkbar (siehe Option 1, Kapitel 4). Herausforderungen, die sich aus einer Bilanzierung gemäß der Option U2 bei Aufrechterhaltung der heutigen Biomassebilanzierung als C-0 ergeben, werden im weiteren Bericht nicht vertieft.

3.3 Bilanzierungsoptionen Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase lassen sich die möglichen Bilanzierungsoptionen aus den Permutationen der möglichen Bilanzierungen ableiten. Dabei fokussieren wir auf die Verbrennung und die Abscheidung. Folgende Bilanzierung sind nicht möglich bzw. erachten wir als nicht sinnvoll und werden daher im Folgenden ausgeschlossen.

► Verbrennung:

- Negative Bilanzierung nicht möglich
- Positive Bilanzierung bei C-0 nicht möglich

► Abscheidung

- Positive Bilanzierung nicht möglich
- Negative Bilanzierung bei C-1 nicht möglich

Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen ergeben sich die folgenden drei Optionen:

Option N1

Verbrennung und Abscheidung werden sowohl für C-0 als auch für C-1 Kohlenstoff neutral bilanziert. Dadurch ändert sich das Attribut des Kohlenstoffs in die Nutzungsphase nicht.

Unter dieser Option werden keine Bilanzierungsschritte in der Nutzungsphase berichtet. Auch die Verbrennung von Kohlenstoff mit dem Attribut C-1 wird — vorerst — neutral bilanziert. Positive und negative Bilanzierungen fallen ausschließlich in der Ursprungsphase und Endphase an. Für das Verständnis dieser Aussage ist zu berücksichtigen, dass unsere Bilanzierungsmethodik die Verbrennung (Nutzungsphase) konzeptionell von der Emission in die Atmosphäre (Endphase) trennt.

Option N2

Die Verbrennung von C-0 und C-1-Kohlenstoff wird so bilanziert, dass jeweils das C-0-Attribut resultiert. Dazu wird Kohlenstoff mit dem Attribut C-0 bei der Verbrennung neutral bilanziert und Kohlenstoff mit dem C-1-Attribut positiv bilanziert. Die folgende Abscheidung und Einbindung werden neutral bilanziert, womit das C-0-Attribut erhalten bleibt. Diese Option sorgt dafür, dass Kohlenstoff in der Nutzungsphase schnellstmöglich das C-0-Attribut erhält und dieses in der Nutzungsphase beibehält.

Option N3

Die Verbrennung von C-0 und C-1-Kohlenstoff wird so bilanziert, dass anschließend jeweils das C-0-Attribut resultiert. Die folgende Abscheidung wird negativ bilanziert und die Einbindung neutral. Daher resultiert im Anschluss wiederum das C-1-Attribut. Diese Option erzeugt daher wechselnde Attribute und gleichzeitig eine wo möglich nicht-neutrale Bilanzierung der Verbrennung bzw. Abscheidung in der Nutzungsphase. Diese Option führt daher dazu, dass jeder die Umwandlungsschritt in der Nutzungsphase, wo möglich, positiv oder negativ bilanziert wird.

Der Aufwand für die Bilanzierung der Nutzungsphase über alle Anwendungen und Lebenszyklen hinweg ist daher hoch. Dafür ist auch die Transparenz hoch.

Option N4

Diese Option ist wie N3, nur mit dem Unterschied, dass die der Verbrennung folgende Abscheidung neutral bilanziert wird und die Einbindung negativ (also entgegengesetzt zum Vorgehen in N3).

Tabelle 15 zeigt die genauen Regeln der vier Optionen.

Tabelle 15: Bilanzierungsoptionen Nutzungsphase

Prozess/ Attribut	Option N1	Option N2	Option N3	Option N4
Verbrennung C-0	Neutral (zwingend)	Neutral (zwingend)	Neutral (zwingend)	Neutral (zwingend)
Verbrennung C-1	Neutral	Positiv	Positiv	Positiv
Abscheidung C-0	Neutral	Neutral	Negativ	Neutral
Abscheidung C-1	Neutral / Neutral	N/A	N/A	N/A
Einbindung C-0	Neutral	Neutral	Neutral	Negativ
Einbindung C-1	Neutral	N/A	N/A	N/A

Quelle: Eigene Darstellung.

Für den Fall, dass die Nutzungsphase mit dem C-0-Attribut beginnt, muss die Verbrennung zwingend neutral bilanziert werden. Daher gibt es in einem solchen Fall in der ersten Nutzungsphase nur die beiden Möglichkeiten, die Abscheidung neutral (N1 oder N2) oder negativ (N3) zu bilanzieren. Die Optionen N1 und N2 sind in diesem Fall identisch. Hat der Kohlenstoff hingegen zu Beginn das C-1-Attribut sind in der ersten Nutzungsphase alle drei Optionen für Verbrennung und Abscheidung möglich (neutral/neutral; positive/neutral; positive/negativ).

Sind mehrere Nutzungsphasen relevant (CCU) sind immer alle Optionen differenzierbar. Die folgenden Anwendungsbeispiele dienen dazu, diese Sachverhalte zu illustrieren. So sind für einfachere Anwendungsbeispiele mit nur einem Ursprung des Kohlenstoffs jeweils mehrere Optionen identisch (siehe Beispiele in den Kapiteln 4 und 6). Nur in komplexen — aber auch realistischen Fällen mit mehreren Ursprüngen des Kohlenstoffs lassen sich alle Optionen aufzeigen (siehe Kapitel 7).

3.4 Kombinierte Bilanzierungsoptionen

Von den acht denkbaren Kombinationen aus Regelungen zur Bilanzierung in der Ursprungs- und der Nutzungsphase sind nicht alle schlüssig für alle Schritte umsetzbar. In manchen Fällen ergeben sich Inkonsistenzen oder nicht-erwünschte Effekte. Tabelle 16 gibt einen Überblick

über alle Kombinationsmöglichkeiten, erläutert kurz die Gründe für den Ausschluss einer Kombination und beschreibt die Eigenschaften der verbleibenden Optionen.

Tabelle 16: Überblick über mögliche Kombinationen von Bilanzierungsoptionen und im Weiteren betrachtete Optionen

Kombination	Bezeichnung ¹⁵	Beschreibung
U1-N1	„kompakt, differenziert“	Ursprungsattribut des Kohlenstoffs bleibt über alle Phasen erhalten, Freisetzung von CO ₂ wird einmalig erfasst
U1-N2	„kompakt, vereinfacht“	Einheitliche C-0-Attributierung von Kohlenstoff nach der ersten Nutzungsphase, Entstehung von CO ₂ wird einmalig erfasst
U1-N3	ausgeschlossen, da atmosphärischer Kohlenstoff in der ersten Nutzungsphase ein C-0-Attribut erhalten würde und in späteren Nutzungsphase ein C-1-Attribut (inkonsistent)	
U1-N4	„detailliert, einheitlich“	Einheitliche C-1-Attributierung bei der Verbrennung, Negativ-Bilanzierung bei der Einbindung, Entstehung von CO ₂ wird mehrfach erfasst
U2-N1	„kompakt, einheitlich“	Einheitliche C-1-Attributierung in der gesamten Nutzungsphase, Freisetzung von CO ₂ wird einmalig erfasst
U2-N2	ausgeschlossen, da atmosphärischer Kohlenstoff in der ersten Nutzungsphase ein C-1-Attribut erhalten würde und in späteren Nutzungsphase ein C-0-Attribut (inkonsistent)	
U2-N3	„detailliert, einheitlich“	Einheitliche C-1-Attributierung bei der Verbrennung, Negativ-Bilanzierung bei der Abscheidung, Entstehung von CO ₂ wird mehrfach erfasst
U2-N4	ausgeschlossen da atmosphärischer Kohlenstoff sowohl in der Ursprungsphase als auch bei Einbindung in ein Produkt in der Nutzungsphase negativ bilanziert werden müsste (doppelt negativ bilanziert)	

Quelle: Eigene Darstellung.

Drei Kombinationsmöglichkeiten sind demnach ausgeschlossen:

- U1-N3 zeigt den Effekt, dass Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs in der ersten Nutzungsphase ein C-0-Attribut hätte, in weiteren Nutzungsphasen (d. h. rezyklierter Kohlenstoff) dann ein C-1-Attribut erhalten würde. Dies ist zwar grundsätzlich möglich, widerspricht jedoch der Logik, wonach atmosphärischer Kohlenstoff vorteilhaft gegenüber fossilem Kohlenstoff gesehen wird. Dies gilt auch bezüglich Kohlenstoffs in der rezyklierten Form, welcher in weiteren Nutzungsphasen bilanziell nicht schlechter abschneiden sollte als in der ersten Nutzungsphase. Daher schließen wir diese Option im Folgenden aus.
- Auch bei U2-N2 ergibt sich ein unerwünschter Effekt. Nach den Bilanzierungsregeln würde dort Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs bei erstmaliger Nutzung ein C-1-Attribut

¹⁵ Die Bezeichnungen ergeben sich aus den weiteren Überlegungen zu den untersuchten Optionen in Kapitel 9.

bekommen, in späteren Nutzungsphasen (d. h. rezyklierter Kohlenstoff), dann ein C-0-Attribut.

- In Option U2-N4 würde Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs sowohl bei der Entnahme aus der Atmosphäre als auch bei der erstmaligen Einbindung negativ bilanziert werden müssen. Eine solche doppelte Negativ-Bilanzierung ist jedoch in dem vorgeschlagenen Bilanzierungssystem nicht möglich.

In den nachfolgenden Kapiteln fokussieren wir die Analyse auf die fünf verbleibenden Optionen. In den ab Kapitel 9 folgenden Betrachtungen werden jedoch alle denkbaren Optionen noch einmal aufgegriffen.

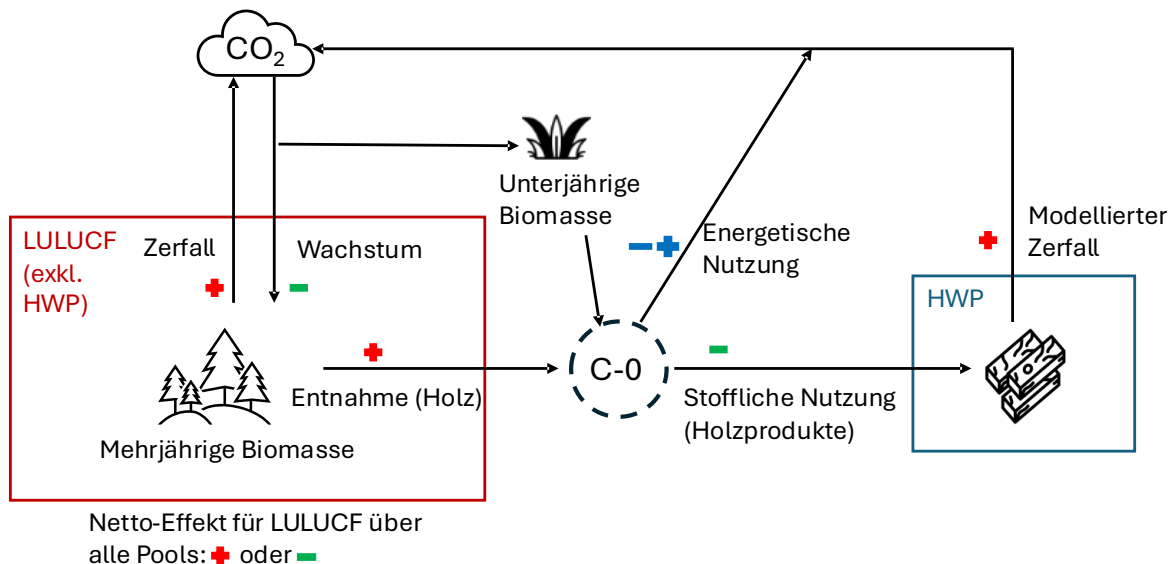
4 Sonderfall Biomasse

Für Kohlenstoff biogenen Ursprungs gibt es zwei aufeinanderfolgende Umwandlungsschritte: Erstens wird Kohlenstoff aus der Atmosphäre durch Photosynthese in Biomasse gebunden und zweitens wird diese Biomasse entnommen und gelangt in die Kohlenstoffwirtschaft. Beim fossilen oder (direkten) atmosphärischen Ursprung gelangt der Kohlenstoff in nur einem Schritt in die Kohlenstoffwirtschaft. Daher ist die Bilanzierung von Biomasse komplizierter.

4.1 Heutige Praxis

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ist es für Kohlenstoff biogenen Ursprungs derzeit gängige Praxis, in der Kohlenstoffwirtschaft das Attribut C-0 zu verwenden. Entsprechend werden CO₂-Emissionen aus biogenen Quellen in den THG-Inventaren neutral bilanziert und nur nachrichtlich berichtet. Abbildung 13 zeigt unsere Interpretation der heutigen Praxis der Bilanzierung.

Abbildung 13: Praxis Bilanzierung Biomasse



Quelle: Eigene Darstellung. Siehe folgende Erläuterungen zum LULUCF Sektor.

Im LULUCF-Sektor des THG-Inventars exklusive des HWP-Pools (roter Kasten) wird der Kohlenstoff-Bestand (carbon stock) **mehrfähriger Biomasse** erfasst. Dieser Bestand ändert sich durch **Wachstum** (Photosynthese) sowie durch natürlichen (und klimawandelbedingten) **Zerfall**. Dies ist in der Abbildung durch die Pfeile von der Wolke in den LULUCF-Sektor sowie in die andere Richtung dargestellt. Zudem verringert sich der Kohlenstoff-Bestand durch die **Entnahme** von Biomasse (v. a. Holz). Dies ist durch den Pfeil in die Kohlenstoffwirtschaft dargestellt. Die Abbildung zeigt für jeden dieser Kohlenstoffflüsse ein entsprechendes Bilanzierungssymbol. Allerdings werden im LULUCF-Sektor des THG-Inventars diese drei abgebildeten Kohlenstoffflüsse nicht explizit in den CRT-Tabellen erfasst (daher sind die Bilanzierungssymbole in Klammern gesetzt). Stattdessen werden die daraus resultierenden Änderungen des Kohlenstoff-Bestands anhand diverser Pools bilanziert (siehe auch Box am Ende dieses Kapitels). Als **Netto-Effekt** über alle Pools kann der Bestand abnehmen oder

zunehmen, je nachdem, welche Flüsse dominieren. Dies ist in der Abbildung als positives oder negatives Bilanzierungssymbol außerhalb der Box gezeigt.

Die entnommene Biomasse wird entweder der **energetischen Nutzung** oder der **stofflichen Nutzung** zugeführt. In der energetischen Nutzung wird die Biomasse zeitnah verbrannt. In der stofflichen Nutzung wird die Biomasse vor allem als Baustoff oder als industrieller Rohstoff genutzt und der enthaltene Kohlenstoff temporär gespeichert. Für die Nutzung als Baustoff oder als industrieller Rohstoff wird der LULUCF-interne Pool in Abbildung 13 separat dargestellt, ist aber definitorisch Teil des LULUCF-Sektors.

Für die entnommene Biomasse im LULUCF-Sektor zeigt die Abbildung eine positive Bilanzierung. Diese Form der Darstellung wurde gewählt, um hervorzuheben, dass die entnommene Biomasse zu einer Abnahme des Kohlenstoff-Bestands führt und somit indirekt als Emission gewertet wird. Bei stofflicher Nutzung kann es zwar sein, dass die Biomasse faktisch nicht zeitnah emittiert wird (temporäre Speicherung). Allerdings schreibt die IPCC-Guideline die Annahme der „instantanen Oxidation“ vor: Man nimmt an, dass die entnommene Kohlenstoffmenge zum Zeitpunkt der Ernte in die Atmosphäre freigesetzt wird. Für definierte Holzprodukte kann innerhalb des LULUCF-Sektors ein Holzproduktespeicher modelliert werden („harvested wood products“ **HWP**¹⁶), in welchem Inputs negativ und Outputs positiv bilanziert werden. Diese führt schlussendlich dazu, dass die Emissionen aufgrund der Entnahme von Biomasse dieser Produkte im LULUCF-Sektor zeitversetzt ausgewiesen werden.

Schließlich wird auch **unterjährige Biomasse** (englisch: annual plants) genutzt. Dies ist ein Sammelbegriff für organische (Rest)Stoffe, die innerhalb eines Jahres entstehen und dann teils als Energiequelle genutzt werden oder sich wieder zersetzen. Dazu gehören Energiepflanzen sowie Reststoffe aus der Landwirtschaft (z. B. Ernterückstände), Forstwirtschaft (z. B. Restholz), Industrie und Haushalten (z. B. Gülle, Bioabfälle). Für unterjährige Biomasse gilt, dass sowohl die Aufnahme von CO₂ durch Photosynthese als auch dessen Wiederfreisetzung innerhalb eines Jahres stattfinden. Solche Prozesse können und müssen daher nicht inventarisiert werden (daher hat dieser Fluss kein Bilanzierungssymbol).¹⁷ Da unterjährige Biomasse nicht im LULUCF-Sektor erfasst wird, ist sie in Abbildung 13 mit einem Pfeil aus der Atmosphäre direkt in die Kohlenstoffwirtschaft symbolisiert (der LULUCF-Sektor wird „übersprungen“). Unterjährige Biomasse erhält gemäß heutiger Praxis das Attribut C-0, weil der darin gespeicherte Kohlenstoff erst kürzlich aus der Atmosphäre aufgenommen wurde. Es gibt keine sinnvolle Möglichkeit unterjährige Biomasse anders zu behandeln.

¹⁶ Für eine Beschreibung der Modellierung von harvested wood products HWP siehe die Box in Kapitel 8.28.2.

¹⁷ Die Bilanzierung des LULUCF-Sektors erfasst nur Änderungen innerhalb der Pools, die sich über mehr als ein Jahr bemerkbar machen. Nicht-CO₂ Emissionen, d. h. die Emissionen von CH₄ und N₂O werden zum Teil in der Landwirtschaft (Gülle, Wirtschaftsdünger) oder im Abfallsektor (Kompost; Bioabfälle) berichtet.

Inventarisierung LULUCF-Sektor

Nicht illustriert sind weitere Details der Inventarisierung des LULUCF-Sektors. Der LULUCF-Sektor besteht aus unterschiedlichen Landnutzungskategorien¹⁸. Zwischen diesen Kategorien sind Übergänge möglich. So wird Aufforstung mit dem Übergang von Biomasse aus der Kategorie „Ackerland“ in die Kategorie „Waldfläche“ abgebildet. Für die Bilanzierung ist jede Landnutzungskategorie in separate Pools unterteilt¹⁹. Diese Pools werden modelliert bzw. gemessen und die Zu- bzw. Abnahme des Kohlenstoff-Bestands wird separat ausgewiesen. Die Gesamtänderung des Kohlenstoff-Bestands des LULUCF-Sektors ergibt sich aus der Summe über alle Landnutzungskategorien und deren Pools.

Beim THG-Inventar werden stets zwei unterschiedliche Gesamtsummen der nationalen Emissionen ausgewiesen. Das Nationale Total inklusive LULUCF-Sektor und das Nationale Total exklusive LULUCF-Sektor. Jedes Land kann im Rahmen seiner international festgelegten Klimaziele (Nationally Determined Contribution, NDC) selbst entscheiden, ob es das nationale Total inkl. oder exkl. Berücksichtigung des LULUCF-Sektors anrechnet. Oftmals werden für den LULUCF-Sektor auch eigene Klimaziele festgelegt (siehe z. B. §3a Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)).

4.2 Rechtfertigungen für C-0-Attribut

Sowohl unterjährige als auch mehrjährige Biomasse hat in der Kohlenstoffwirtschaft gemäß der heute gängigen Praxis das Attribut C-0. Das bedeutet, dass Emissionen aus der Verbrennung von jeglicher Biomasse derzeit neutral bilanziert und nicht dem nationalen Total angerechnet werden (siehe auch Bilanzierungsregeln in Kapitel 2.1). Für unterjährige Biomasse ist diese Praxis, wie oben beschrieben, sinnvoll und unumstritten.

Für mehrjährige Biomasse wird die Verwendung des C-0-Attribut in diesem Zusammenhang auch „Biomasse-Privileg“ genannt²⁰. Es gibt unseres Wissens keine allgemeingültige formale Rechtfertigung für dieses Vorgehen. Allerdings lassen sich zwei Arten von Rechtfertigungen identifizieren, die je nach Land explizit oder implizit geltend gemacht werden:²¹

- ▶ Eine langfristige Reduktion von Biomasse durch Entnahme würde dazu führen, dass der LULUCF-Sektor eine Reduktion des gespeicherten Kohlenstoffs ausweist. Dies rechtfertigt das Biomasse-Privileg, wenn ein sinkender Bestand im LULUCF-Sektor entsprechende Konsequenzen hat (z. B. die Emissionen bzw. die Senkenleistung aus dem LULUCF-Sektor für die Klimaziele berücksichtigt werden).
- ▶ Stammt die Biomasse aus forstwirtschaftlich nachhaltig genutzten Wäldern, wird entnommener Kohlenstoff wieder aus der Atmosphäre aufgenommen (zumindest langfristig). So ist es z. B. in der Schweiz gesetzlich vorgeschrieben, dass der Waldbestand nicht abnehmen darf (siehe Art.3 Waldgesetz (WaG)). Falls diese Vorgabe glaubhaft

¹⁸ Waldflächen (CRT: 4.A.1), Ackerland (4.B.1), Grünland (4.C.1), Feuchtgebiete (4.D.1) oder Siedlungen (4.E.1)

¹⁹ Oberirdische und unterirdische Biomasse, tote organische Substanz oder organische und mineralische Böden. Außerdem „harvested wood products“ HWP

²⁰ In der Regel gilt in Treibhausgasinventaren das Quellprinzip, welches besagt, dass Treibhausgasemissionen jeweils dem Sektor zugeordnet werden, in dem sie physisch in die Atmosphäre entweichen. Von dem Quellprinzip wird im Fall von Biomasse abgewichen, da beispielsweise bei der Verbrennung CO₂ in die Atmosphäre entweicht, diese aber nicht positiv bilanziert wird. Daher stammt der Ausdruck des „Biomasse-Privileg“.

²¹ Wird Biomasse importiert, müssen für die Länder, aus denen die Importe stammen, dieselben Voraussetzungen gelten.

umgesetzt wird, kann Biomasse das C-0-Attribut erhalten, auch wenn der Kohlenstoff-Bestand im LULUCF-Sektor nicht erhoben würde. Diese Auslegung setzt eine funktionierende Kontrolle der nachhaltigen Waldbewirtschaftung voraus.

Wir verwenden hier den Begriff „nachhaltig“ in folgender Bedeutung: Eine Forstwirtschaft ist nachhaltig, wenn der Kohlenstoffpool im Zeitverlauf nicht abnimmt.²² Nicht eingeschlossen in diese enge Definition sind weitergehende Bedeutungen von Nachhaltigkeit.²³

Sind die Voraussetzungen für das „Biomasse-Privileg“ nicht erfüllt, unterschätzt das National Total die tatsächlichen Emissionen im Territorium. Effektiv wird mehr Kohlenstoff emittiert, weil der Kohlenstoff-Pool des LULUCF-Sektors kleiner wird. Dieser Effekt kann gravierend sein. So kann die Verbrennung von Holz — am Ort der Verbrennung — zu höheren Emissionen führen als die Verbrennung von Kohle.²⁴

Historische Genese des Biomasse-Privilegs

Gemäß den aktuellen Vorgaben für THG-Inventare werden CO₂-Emissionen aus der Verbrennung biogener Brennstoffe nicht zu den nationalen Gesamtemissionen hinzugezählt. Die zugrunde liegende Annahme ist, dass diese Emissionen die vorgelagerte CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre während des Wachstums der Biomasse wieder aufheben. Ein potenzielles Ungleichgewicht zwischen Entnahmen und Wachstum würde sich in der Inventarisierung des LULUCF Sektors des Landes widerspiegeln. Diese Vorgaben wurden in den 1990er Jahren entwickelt, zu einer Zeit, in der Biomasse hauptsächlich im informellen Sektor genutzt wurde. Industrielle Energiegewinnung durch Biomasse, Importe und Exporte über Ländergrenzen hinweg, sowie Negativemissionstechnologien auf der Basis von Biomasse spielten zu diesem Zeitpunkt keine Rolle. Die Behandlung von Biomasse in den THG-Inventaren ist daher teils nicht mehr zeitgemäß und kann zu Fehlbilanzierungen führen (siehe Pulles et al. 2022). Auch der vorliegende Bericht greift eine Reihe dieser Aspekte auf.

4.3 Mögliche Bilanzierungsoption mit C-1-Attribut

4.3.1 Beschreibung Bilanzierungsoption

Ausgangspunkt dieses Kapitels ist die Frage, welche Bilanzierungsoptionen es gäbe, das Biomasse-Privileg für mehrjährige Biomasse abzuschaffen. Mehrjährige Biomasse würde in jeder dieser Optionen in der ersten Nutzung der Kohlenstoffwirtschaft das C-1-Attribut erhalten. Für unterjährige Biomasse ist das C-1-Attribut hingegen keine sinnvolle Option.²⁵ Die folgenden Überlegungen beziehen sich daher nur auf mehrjährige Biomasse.

Im Folgenden stellen wir drei theoretisch denkbare Bilanzierungsoptionen vor (weitere solcher Bilanzierungsoptionen sind vorstellbar). Dies ist als Gedankenexperiment zu verstehen, welches die möglichen Konsequenzen eines solchen Vorgehens aufzeigen soll. Die tatsächliche

²² Diese Definition ist in Anlehnung an die Definition der «fraction of non renewable biomass» fNRB, zu der es eine umfangreiche Literatur im Kontext der Verwendung im Kohlenstoffmarkt gibt (siehe z. B. Bailis, R. und Pemberton-Pigott, C. (2020) und Ghilardi, A. und Bailis, R. (2024)).

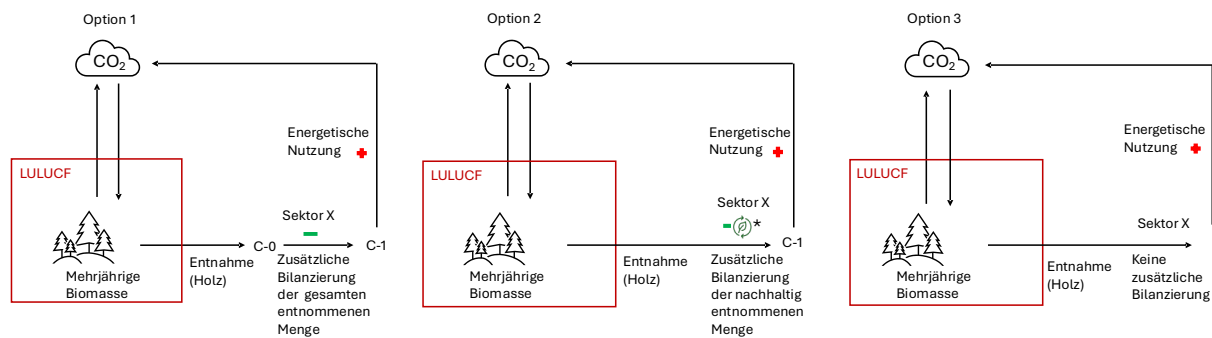
²³ Beispielsweise inwiefern die Forstwirtschaft zum Erhalt der Biodiversität beiträgt (Stichwort Monokulturen).

²⁴ Beispielsweise hat Braunkohle als CO₂-intensivste Form der Kohle einen Emissionsfaktor zwischen rund 93 und 99 tCO₂/TJ (siehe Juhlich, K. (2022), Kapitel 4), während Holz direkte Emissionen von ca. 100 tCO₂/TJ verursacht (Siehe Fehrenbach, H. et al. (2024) Tabelle 3).

²⁵ Falls für mehrjährige Biomasse das C-1 Attribut eingeführt würde, müsste daher zwischen diesen beiden Arten unterschieden werden.

Umsetzbarkeit wird dabei vorerst nicht berücksichtigt. In allen drei Optionen gilt die Prämisse, dass Biomasse in der Kohlenstoffwirtschaft in der ersten Nutzungsphase das C-1-Attribut hat und somit die energetische Nutzung positiv als Emission bilanziert wird. Zudem gehen wir davon aus, dass keine Biomasse importiert oder exportiert wird.

Abbildung 14: Bilanzierungsoption für Biomasse mit C-1-Attribut



* Option 2: Negativ bilanziert wird nur der Anteil nachhaltig entnommener Biomasse.

Quelle: Eigene Darstellung.

Aufbauend auf der Darstellung in Abbildung 13 zeigt Abbildung 14 diese drei möglichen Bilanzierungsoptionen²⁶. Die Optionen unterscheiden sich in der Umsetzung eines zusätzlichen Bilanzierungsschritt außerhalb des LULUCF-Sektors, welcher die Entnahme von Biomasse bilanziert. Dieser Bilanzierungsschritt kann verschiedenen Sektoren im Inventar zugewiesen werden. Wir lassen die konkrete Zuordnung offen und verwenden die Bezeichnung «Sektor X». Um keine Überlappung mit der Bilanzierung und Zielsetzung des LULUCF-Sektors zu bewirken, sollte der Sektor X nicht der LULUCF-Sektor sein. Pulles et al. (2022) schlagen hierfür eine neuen Sektor 1B3 „Biomass Harvesting and Treatment“ innerhalb des Sektors 1 „Energy“ vor.

In **Option 1** wird in Sektor X eine zusätzliche negative Bilanzierung in Höhe der gesamten Entnahme von Biomasse vorgenommen. Somit ist bereits nach der Entnahme berücksichtigt, dass Biomasse CO₂ aus der Atmosphäre aufgenommen hat.²⁷ Im Gegenzug muss im Anschluss das C-1-Attribut verwendet werden und die energetische Nutzung wird positiv als Emission bilanziert.²⁸

In **Option 2** wird in Sektor X eine zusätzliche negative Bilanzierung in Höhe der nachhaltigen Entnahme von Biomasse vorgenommen. Der Anteil, der in der bilanzierten Region nachhaltig gewonnen wird, bestimmt sich aus dem Wachstum von Biomasse gegenüber dem Zerfall. Auch hier wird die energetische Nutzung von Biomasse vollständig positiv als Emission bilanziert.

In **Option 3** wird nur die Bilanzierung der energetischen Nutzung von Biomasse zusätzlich vollständig positiv vorgenommen, aber keine weitere Bilanzierung vorgenommen.

²⁶ Zur Vereinfachung der Darstellung sind nur die relevanten Elemente aus Abbildung 11 aufgegriffen.

²⁷ Dies ist in der Abbildung mit dem zwischenzeitlichen C-0 Attribut gekennzeichnet, welches durch die negative Bilanzierung zu einem C-1 Attribut wird. Dieser Fall ist analog zu der Option N4 für den CCU-Fall in Kapitel 7, in dem die Einbindung von aus der Atmosphäre gewonnenem CO₂ in Energieträger negativ bilanziert wird und der entsprechende Energieträger im Nachgang das C-1 Attribut hat.

²⁸ Diese Option entspricht im Wesentlichen dem Vorschlag aus Pulles et al. (2022) zur Anpassung der Behandlung von Biomasse in Inventaren.

Die Berechnungsmethodik des LULUCF-Sektors ist durch die Optionen nicht tangiert. Der Netto-Effekt des LULUCF-Sektors kann anschließend weiterhin in das nationale Total einfließen bzw. separat ausgewiesen werden.

Die Auswirkungen dieser drei Optionen werden im Folgenden anhand von zwei illustrativen Beispielen diskutiert.

4.3.2 Beispiel 1: Netto-Biomassereduktion

Tabelle 17 zeigt das erste illustrative Beispiel, in dem wir annehmen, dass sich der Bestand an Biomasse um 20 ktC reduziert, als Netto-Effekt aus Wachstum, Zerfall und Entnahme.²⁹³⁰ Die entnommene Biomasse beträgt 50 ktC und wird zur Energiegewinnung verbrannt. Nachhaltig entnommen werden könnten allerdings nur 30 ktC (Unterschied zwischen Wachstum und Zerfall). Dies ist in den blau markierten Spalten dargestellt. Zur Vereinfachung sind weitere Emissionen aus anderen Quellen nicht dargestellt (z. B. Transport der Biomasse).

²⁹ Nachhaltigkeit in der Forstwirtschaft ist in Form des fNRB-Wertes ein zentraler Parameter bei der Berechnung der Wirkung von Klimaschutzprojekten, bei denen die Nachfrage nach Wald-Biomasse reduziert wird (z. B. Cookstove Projekte). Die Bestimmung des fNRB-Wertes ist allerdings methodisch sehr umstritten (siehe z. B. Bailis, R. und Pemberton-Pigott, C. (2020)).

³⁰ Wachstum und Zerfall werden allerdings nicht einzeln gemessen und können daher nicht erfasst werden. Die Entnahme der Biomasse ist prinzipiell bekannt, wird aber im LULUCF-Sektor nicht als separater Posten erfasst.

Tabelle 17: Bilanzierungsoptionen Biomasse – Beispiel 1 (Netto-Biomassereduktion)

Kategorie	Physische Kohlenstoffflüsse	C-0-Attribut	Bilanzierungsoptionen mit C-1-Attribut		
		Heute	Option 1	Option 2	Option 3
LULUCF-Sektor					
Netto-Effekt	+20 ktC (Reduktion)	+20 ktC	+20 ktC	+20 ktC	+20 ktC
Wachstum	-70 ktC	Erfasst wird nur der Netto-Effekt. Diese Elemente werden daher nicht explizit erfasst.			
Zerfall	+40 ktC				
Entnahme Biomasse	+50 ktC				
Zusätzliche Bilanzierung Sektor X (nicht LULUCF-Sektor)					
Entnahme	N/A	N/A	-50 ktC	-30 ktC	N/A
Energiesektor					
Nutzung Biomasse*	+50 ktC	0 ktC	+50 ktC	+50 ktC	+50 ktC
Summe (ohne/mit LULUCF-Sektor)					
Summe	+20 ktC	0 ktC (ohne) +20 ktC (mit)	0 ktC (ohne) +20 ktC (mit)	+20 ktC (ohne) +40 ktC (mit)	+50 ktC (ohne) +70 KtC (mit)
«+»: Kohlenstofffluss aus Sektor in einen anderen Sektor oder in die Atmosphäre; «-»: Kohlenstofffluss aus Atmosphäre in LULUCF-Sektor bzw. bilanztechnische Senke; * Annahme: Die gesamte im Land entnommene Biomasse wird im Land verbrannt. Keine Importe oder Exporte.					

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 17 zeigt die Bilanzierung gemäß der heutigen Praxis (C-0-Attribut) und den Optionen 1-3 (C-1-Attribut). In allen Bilanzierungsoptionen mit C-1-Attribut wird die Nutzung von Biomasse vollständig positiv bilanziert (+50 ktC).

Sowohl unter der Bilanzierung „**Heute**“ als auch unter **Option 1** entspricht die Summe ohne den LULUCF-Sektor nicht den physischen Gegebenheiten. Der Grund ist, dass die verbrannte Biomasse teilweise nicht nachhaltig entnommen wurde. Die Summe inklusive LULUCF-Sektor ist hingegen korrekt. Daher ist es für diese beiden Optionen wichtig, dass bei teilweise nicht-nachhaltiger Nutzung der LULUCF-Sektor berücksichtigt wird. In Option 1 wird die Entnahme von Biomasse vollständig negativ bilanziert (-50 ktC im Sektor X). Der Unterschied zwischen der Option heute und Option 1 ist daher eine zusätzliche Bilanzierung der Biomasse sowohl als Senke (im Sektor X) als auch als Quelle (in der Energiewirtschaft/Industrie) außerhalb des LULUCF-Sektors.³¹

Unter **Option 2** wird nur die nachhaltig gewonnene Biomasse zusätzlich im Sektor X negativ bilanziert (-30 ktC). Entsprechend ist die Summe in diesem Beispiel bereits ohne den LULUCF-

³¹ Die Verbrennung von Biomasse würde somit nicht mehr nur als memo item aufgeführt.

Sektor korrekt. Eine zusätzliche Berücksichtigung des LULUCF-Sektors würde zu einer Doppelzählung der Emissionen aus der Nutzung von nicht-nachhaltiger Biomasse führen und somit zu einem falschen Ergebnis.

Es ist allerdings methodisch äußerst komplex und umstritten, den Anteil nachhaltig gewonnener Biomasse zu bestimmen.³² Entsprechend sind auch die Verifizierung, das Monitoring und das Reporting dieser Option anspruchsvoll und die Vergleichbarkeit zwischen den Ländern bzw. die korrekte Handhabung bei Importen und Exporten würde erschwert.

In **Option 3** ist die Summe gegenüber der Realität zu hoch, da keine Gegenposition in Sektor X geschaffen wird. Zudem führt die Berücksichtigung des LULUCF-Sektors wiederum zu einer Doppelzählung. Nur für den — in den Beispielen nicht gezeigten Fall —, dass die Entnahme von Biomasse in der Realität vollständig nicht nachhaltig ist, würde diese Option ohne den LULUCF-Sektor das korrekte Ergebnis liefern.

Sektor X als Teil des LULUCF Sektors

Für das Beispiel sind wir davon ausgegangen, dass die negative Bilanzierung der Entnahme von Biomasse außerhalb des LULUCF-Sektors inventarisiert wird, um keine Überlappung mit der Bilanzierung und Zielsetzung des LULUCF-Sektors zu bewirken. Zudem ist das Beispiel dadurch besser verständlich. Prinzipiell ist es allerdings auch möglich, den Sektor X innerhalb des LULUCF-Sektors zu verorten. Die folgende Tabelle zeigt die entsprechenden Resultate für das Beispiel 1. Die Summe ohne LULUCF-Sektor wäre in diesem Fall immer eine (zu hohe) Emission von +50 ktC, weil die korrigierende Gegenposition des Sektors X nun im LULUCF-Sektor verortet ist. Im Gegenzug wären die ausgewiesenen Emissionen im LULUCF-Sektor geringer. Diese Summe mit LULUCF-Sektor wäre wie im Grundbeispiel.

³² Die Nachhaltigkeit der Forstwirtschaft lässt sich in Realität kaum an einem einzelnen Jahr festmachen, da der Bestand natürlichen Schwankungen unterworfen ist. Zudem kann der Bestand auch bei nachhaltiger Bewirtschaftung temporär kleiner werden, in Anhängigkeit der Altersstruktur (siehe Strengler et al. 2024).

Tabelle 18: Bilanzierungsoptionen Biomasse – Beispiel 1 mit Sektor X als Teil des LULUCF-Sektors (verkürzt)

Kategorie	Physische Kohlenstoff-flüsse	C-0-Attribut Heute	Bilanzierungsoptionen mit C-1-Attribut		
			Option 1*	Option 2*	Option 3*
LULUCF-Sektor inkl. Sektor X					
Netto-Effekt und Entnahme	+20 ktC (Reduktion)	+20 ktC	20 ktC - 50 ktC = -30 ktC	20 ktC - 30 ktC = -10 ktC	+20 ktC
Energiesektor					
Nutzung Biomasse*	+50 ktC	0 ktC	+50 ktC	+50 ktC	+50 ktC
Summe (ohne/mit LULUCF-Sektor inkl. Sektor X)					
Summe	+20 ktC	0 ktC (ohne) +20 ktC (mit)	+50 ktC (ohne) +20 ktC (mit)	+50 ktC (ohne) +40 ktC (mit)	+50 ktC (ohne) +70 KtC (mit)

«+»: Kohlenstofffluss aus Sektor in einen anderen Sektor oder in die Atmosphäre; «-»: Kohlenstofffluss aus Atmosphäre in LULUCF-Sektor bzw. bilanztechnische Senke;

* Annahme: Die gesamte im Land entnommene Biomasse wird im Land verbrannt. Keine Importe oder Exporte.

Quelle: Eigene Darstellung.

4.3.3 Beispiel 2: Netto-Biomassewachstum

In Beispiel 2 (siehe Tabelle 19) wird die gleiche Menge Biomasse entnommen und anschließend im Energiesektor verbrannt wie in Beispiel 1. Allerdings erhöht sich in diesem Beispiel der Bestand, weil der Netto-Effekt aus Wachstum und Zerfall höher ist (z. B. größere Fläche) und somit bis zu 60 ktC nachhaltig entnommen werden könnten.

Tabelle 19: Bilanzierungsoptionen Biomasse – Beispiel 2 (Netto Biomasse Wachstum)

Kategorie	Physische Kohlenstoff-flüsse	C-0-Attribut	Bilanzierungsoptionen mit C-1-Attribut		
		Heute	Option 1	Option 2	Option 3
LULUCF-Sektor					
Netto-Effekt	-10 ktC (Wachstum)	-10 ktC	-10 ktC	-10ktC	-10 ktC
Wachstum	-140 ktC	Erfasst wird nur der Netto-Effekt. Diese Elemente werden daher nicht explizit erfasst.			
Zerfall	+80 ktC				
Entnahme Biomasse	+50 ktC				
Zusätzliche Bilanzierung Sektor X (nicht LULUCF-Sektor)					
Entnahme	N/A	N/A	-50 ktC	-50 ktC	N/A

		C-0-Attribut	Bilanzierungsoptionen mit C-1-Attribut		
Energiesektor					
Nutzung Biomasse*	+50 ktC	0 ktC	+50 ktC	+50 ktC	+50 ktC
Summe (ohne/mit LULUCF-Sektor)					
Summe	-10 ktC	0 ktC (ohne) -10 ktC (mit)	0 ktC (ohne) -10 ktC (mit)	0 ktC (ohne) -10 ktC (mit)	+50 ktC (ohne) +40 ktC (mit)

«+»: Kohlenstofffluss aus Sektor in einen anderen Sektor oder in die Atmosphäre; «-»: Kohlenstofffluss aus Atmosphäre in LULUCF-Sektor bzw. bilanztechnische Senke;

* Annahme: Die gesamte im Land entnommen Biomasse wird im Land verbrannt (d. h. in der Realität entspricht die Verbrennung von Biomasse der Entnahme von Biomasse). Keine Importe oder Exporte.

Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Optionen heute, Option 1 und Option 2 ist die Summe ohne LULUCF je 0 ktC, was die realen Emissionen überschätzt. Eine Situation, in welcher der Kohlenstoff-Bestand des LULUCF-Sektors wächst, kann daher nur unter Einbezug des LULUCF-Sektors abgebildet werden. Das gilt auch für die Option 2, welche in Beispiel 1 den richtigen Wert ohne LULUCF ausgewiesen hatte. Aufgrund der vollständig nachhaltigen Entnahme dieses Beispiels, ist Option 3 auch in diesem Fall mit ausgewiesenen Emissionen von +50 ktC bzw. +40 ktC weit von der Realität entfernt.

4.4 Zusammenfassung und Diskussion

4.4.1 Zusammenfassung

Die Bilanzierung von Biomasse ist dahingehen speziell, dass sowohl der LULUCF-Sektor als auch der Sektor betroffen sind, in dem die Biomasse genutzt wird. Zudem hat der LULUCF-Sektor eine Sonderstellung, da er nicht mit den anderen Sektoren aggregiert wird, sondern in der Regel die Summe mit und ohne diesen Sektor erstellt wird. Derzeit gilt das «Biomasse-Privileg», welches zu Folge hat, dass Biomasse das C-0 Attribut hat und folglich die Verbrennung von Biomasse neutral bilanziert werden kann. Dies ist bei unterjähriger Biomasse in jedem Fall sinnvoll, bei mehrjähriger Biomasse aber zu hinterfragen.

Daher haben wir in diesem Kapitel drei hypothetische Bilanzierungsoptionen diskutiert, bei welchen mehrjährige Biomasse jeweils das C-1-Attribut erhält — und die Nutzung in der Kohlenstoffwirtschaft folglich positiv bilanziert wird. Biomasse hätte dann bei der Nutzung buchhalterisch die gleichen Eigenschaften wie fossile Energieträger und es würden die tatsächlich in dem Sektor entstandenen Emissionen gemäß Quellprinzip dargestellt. Die drei Bilanzierungsoptionen unterscheiden sich darin, wie die Entnahme von Biomasse ausserhalb des LULUCF Sektors in einem Sektor X bilanziert wird.

In Option 1 würde die gesamte Entnahme in Sektor X zusätzlich negativ bilanziert. Die ausgewiesenen Emissionen individueller Sektoren wären somit unabhängig von der Entwicklung des LULUCF-Sektors (Reduktion oder Wachstum) höher und es gäbe mehr Einträgen in das THG-Inventar, die sich allerdings gegenseitig aufheben. Das Total (ohne und mit LULUCF-Sektor) würde nach wie vor dasselbe Ergebnis ausweisen wie unter der gängigen Praxis. Für Option 1 benötigt die negative Bilanzierung in Sektor X die gleichen Rechtfertigungen, die heute für das Biomasse-Privileg (Biomasse hat C-0 Attribut) genutzt werden (siehe Kapitel 4.2). Nur dann kann die gesamte Entnahme in Sektor X negativ bilanziert

werden. Zudem müsste (wie heute) der LULUCF-Sektor im nationalen Total berücksichtigt werden, um das korrekte Ergebnis zu erhalten.

In Option 2 würde nur der nachhaltig entnommene Anteil der Biomasse (also der Anteil, der entnommen werden kann, ohne dass der Kohlenstoffbestand langfristig abnimmt) im Sektor X zusätzlich negativ bilanziert. Diese Option kann die physischen Kohlenstoffflüsse somit auch dann korrekt ab, wenn Biomasse nicht nachhaltig gewonnen wird. In einem solchen Fall ist der korrekte Wert die Summe ohne den LULUCF-Sektor. Würde der Biomasse-Bestand jedoch wachsen, würde die Summe mit LULUCF-Sektor den korrekten Wert ergeben (vgl. Tabelle 17 und Tabelle 19). Diese Komplexität würde die Verwendung dieser Option erschweren. Zudem ist die Bestimmung des nachhaltig entnommenen Anteils in der Praxis methodisch komplex.

In Option 3 würde keine Gegenposition geschaffen. Biomasse würde außerhalb des LULUCF-Sektors buchhalterisch so behandelt, als ob sie fossilen Ursprungs wäre. Dieser Ansatz geht also implizit davon aus, dass Biomasse vollständig nicht-nachhaltig gewonnen wird und überschätzt daher in der Regel die Summe. Man könnte das dahingehend interpretieren, dass eine solche Option maximal konservativ ist, weil die Emissionen in der Regel überschätzt werden. Sie könnte prinzipiell auch nur für solche Biomasse zum Einsatz kommen, für die die Herkunft unbekannt bzw. die Nachhaltigkeit nicht gewährleistet ist.

4.4.2 Diskussion

Aufgrund der besonderen Bedeutung von Biomasse und des damit verbundenen Ökosystems Wald sollte mehrjährige Biomasse in jedem Fall nur dann genutzt werden dürfen, wenn sie nachhaltig gewonnen werden kann und die Nutzung keinen Anstieg der Emissionen an anderer Stelle verursacht (sogenanntes „Leakage“). Dies hat allerdings keinen direkten Bezug zum Regelwerk der THG-Inventare, sondern muss in anderweitigen Regelwerken der Nutzung verankert und sichergestellt werden (z. B. EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (RED III) im Bereich Bioenergie).

Ist dies erfüllt, kann zudem diskutiert werden, ob die Nutzung von Biomasse gegenüber der heutigen Praxis angepasst werden sollte. Obige Beispiele zeigen, dass dies möglich ist und die Gedankenexperimente interessante Zusammenhänge veranschaulichen. Gleichzeitig helfen sie, die Implikationen des bisherigen Systems besser zu verstehen. Auch wenn die Daten dazu verfügbar sind (siehe Pulles et al. 2022), wäre eine Änderung allerdings im internationalen Kontext nicht trivial.

Für alle drei Optionen hätte die Abschaffung des Biomasse-Privilegs und die damit verbundene Verwendung des C-1-Attributs von mehrjähriger Biomasse in der Kohlenstoffwirtschaft zur Konsequenz, dass auf Basis der Bilanzierungsregel kein Vorteil bestünde, Biomasse zu verwenden. Biomasse wäre dann bei der Nutzung bilanztechnisch mit fossilem Kohlenstoff gleichgesetzt. Das heißt beispielsweise auch, dass auch die Abscheidung und geologische Speicherung von biogenem Kohlenstoff (Bioenergy Carbon Capture and Storage - BECCS) bilanztechnisch nicht zu unterscheiden wäre von der Abscheidung und geologischen Speicherung fossilen Kohlenstoffs.

Am realistischsten umsetzbar halten wir die Option 1, welche für Biomasse zusätzliche Bilanzierungen einführt, deren Effekte sich für das nationale Total gegenseitig aufheben. Zu diskutieren wäre in diesem Fall, welcher Sektor sich die negative Bilanzierung der Entnahme anrechnen lassen kann. Zudem bestünde hoher Aufklärungsbedarf, weil es auf den ersten Blick

nicht intuitiv ist, dass die Entnahme von Biomasse zu einer negativen Bilanzierung berechtigt. Allerdings ist dies indirekt (durch das Biomasse-Privileg) auch schon heute der Fall.

Option 2 oder 3 würde weitergehende Änderungen verursachen. Option 3 wäre zwar einfach umsetzbar, würde aber in fast allen Fällen zu einer Überschätzung der Emissionen führen. Einzig das Argument, dass bei einer akuten Gefährdung des Ökosystems Wald die Nutzung von mehrjähriger Biomasse maximal unattraktiv gemacht wird und somit Ökosysteme geschützt werden, könnte ins Feld geführt werden. Eine nachhaltige Nutzung von Biomasse könnte aber mit dieser Option nicht mehr abgebildet werden. Option 2 ist dahingehend komplex, als der nachhaltig genutzte Anteil bestimmt werden muss und zudem die Interpretation der Nationalen Total mit und ohne LULUCF-Sektore an die jeweilige Situation angepasst werden muss.

5 Anwendungsbeispiel 1: Technische CO₂-Entnahme aus Atmosphäre und Speicherung (DACCS)

5.1 Beschreibung

Bei der technischen CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (DAC) wird Umgebungsluft mithilfe von Ventilatoren angesaugt und durch spezielle Filter geleitet, um CO₂-Moleküle zu binden. Sobald die Filter gesättigt sind, werden sie erhitzt, wodurch das gebundene CO₂ als konzentriertes, reines Gas freigesetzt wird, welches im Anschluss in der Regel verflüssigt wird. Das so eingefangene CO₂ kann in dauerhaften Senken (wie geologischen Formationen) gespeichert werden (Carbon Storage). Die Verbindung aus CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre und dauerhafter Speicherung (DACCS) wird im Folgenden besprochen.

CO₂ aus der Atmosphäre kann auch in den Kohlenstoffkreislauf eingeführt werden, etwa zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe oder zur stofflichen Nutzung in industriellen Prozessen (DACCU). Dies wird in den Kapiteln 6 und 7 besprochen.

Direct Ocean Capture (DOC)

Bei der CO₂-Abscheidung aus den Ozeanen (DOC) wird analog zu DAC CO₂ aus dem Ozean entnommen.³³ Die Quantifizierung von DOC ist komplexer als die von DAC, da der Effekt auf die Atmosphäre bei DOC darauf beruht, dass sich erst nachgelagert ein neues Gleichgewicht zwischen Atmosphäre und Ozean einstellt. Die grundlegenden Fragestellungen sind aber ähnlich wie bei DAC. Im Folgenden wird daher primär DAC behandelt. Bei DOC kann es Problemen mit dem Territorialprinzip geben, wenn die Wirkung im offenen Meer eintritt. Dieser zusätzliche Aspekt wird kurz besprochen.

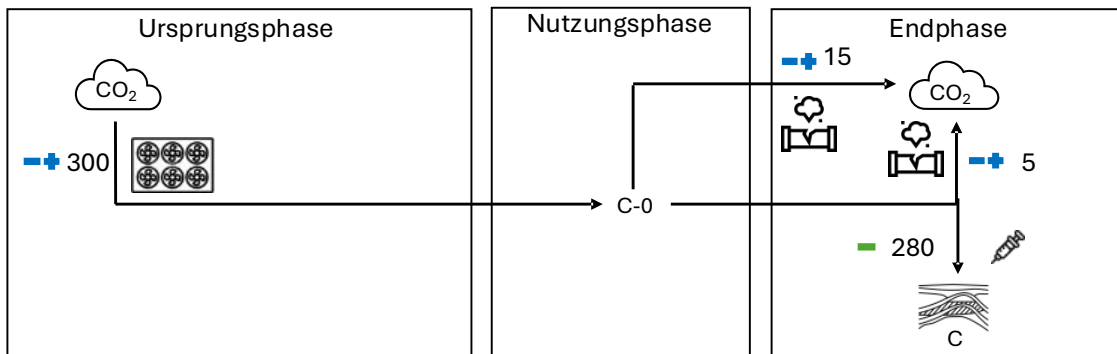
5.2 Bilanzierungsoptionen

Im Folgenden sind die beiden möglichen Bilanzierungsoptionen skizziert. Die Optionen unterscheiden sich in diesem Beispiel nur in der Ursprungsphase, da keine Nutzung des Kohlenstoffs erfolgt (wie in Kapitel 4 dargestellt ist die Endphase nicht relevant, sondern ergibt sich schlüssig aus der Attribuierung nach der Nutzungsphase). Entsprechend sind also U1-N1, U1-N2 und U1-N4 („Option U1“) sowie U2-N1 und U2-N3 („Option U2“) gemeinsam betrachtet.

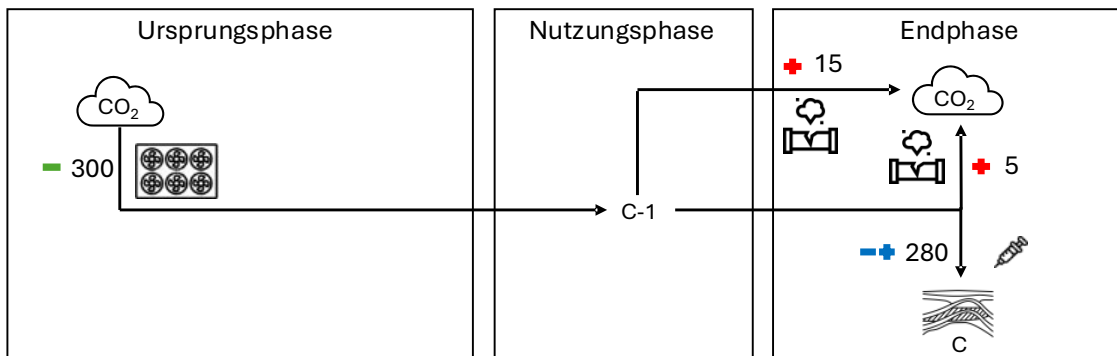
³³ Dazu kommen verschiedene Technologien infrage, die allerdings noch kaum erprobt sind und hier nicht näher beschrieben werden.

Abbildung 15: Bilanzierungsoptionen DACCS

Option U1



Option U2



Quelle: Eigene Darstellung.

Option U1

Aus der Atmosphäre entnommenes CO₂ wird neutral bilanziert. Der Kohlenstoff erhält in der Folge das Attribut C-0. Emissionen bei Transport, der Injektion und der Speicherung des CO₂ (Leckagen) sind daher neutral zu bilanzieren. Die permanente Speicherung ist negativ zu bilanzieren.³⁴

Option U2

Aus der Atmosphäre entnommenes CO₂ wird negativ bilanziert. Der Kohlenstoff erhält in der Folge das Attribut C-1. Emissionen bei Transport, der Injektion und der Speicherung des CO₂ (Leckagen) sind daher positiv zu bilanzieren. Die permanente Speicherung ist neutral zu bilanzieren.³⁵

5.3 Inventarisierung

Folgendes Beispiel illustriert die Erfassung im Inventar unter den beiden Optionen.

- ▶ Mit Hilfe einer Luftabscheideanlage werden 300 Tonnen atmosphärisches CO₂ abgeschieden.

³⁴ Diese Option ist kompatibel mit dem geltende Biomasseprivileg für Kohlenstoff aus mehrjähriger Biomasse (Holz) (Kapitel 4).

³⁵ Diese Option ist inkompatibel mit dem geltenden Biomasseprivileg als C-0-Bilanzierung für Kohlenstoff aus mehrjähriger Biomasse (Holz). Ein C-1 Attribut ist jedoch prinzipiell denkbar (siehe Option 1, Kapitel 4). Herausforderungen, die sich aus einer Bilanzierung gemäß der Option U2 bei Aufrechterhaltung der heutigen Biomassebilanzierung als C-0 ergeben, werden im weiteren Bericht nicht vertieft.

- Für diesen Prozess fallen Emissionen aus dem Energieverbrauch in Höhe von 15 tCO₂ an.
- Der Energieverbrauch für den Transport des CO₂ zur Speicherstätte führt zu Emissionen in Höhe von 5 tCO₂. Leckagen im Transportsystem belaufen sich auf 15 tCO₂.
- Entsprechend erreichen noch 285 tCO₂ die Anlage zur Injektion. Weitere Leckagen reduzieren diese Menge auf 280 tCO₂, welches in die Speicherstätte injiziert wird. Dafür fallen Emissionen aus Energiebereitstellung in der Höhe von 10 tCO₂ an.
- Nachfolgende Leckagen aus der Speicherstätte selbst werden nicht betrachtet. Diese müssten in beiden Bilanzierungsoptionen positiv bilanziert werden.

Tabelle 20: Fallbeispiel DACCS: Betrachtete Kohlenstoffmengen in t CO₂

Gewinnung	
Kohlenstoffmenge	300
(Energiebedarf)	(15)
Transport	
Kohlenstoffmenge	300
(Energiebedarf)	(5)
Leckagen	15
Speicherung	
Kohlenstoffmenge	285
(Energiebedarf)	(10)
Leckagen	5
Injektion	280

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Emissionen aus dem Energieverbrauch sind zwar in der Realität relevant, nicht aber für die Illustration der Bilanzierungsoptionen³⁶. Daher verzichten wir im Folgenden auf eine Darstellung dieser Emissionen, um auf die Kohlenstoffflüsse fokussieren zu können. Der Vollständigkeit halber sind sie in Tabelle 20 enthalten, allerdings in Klammern, um die Nicht-Ausweisung im Weiteren kenntlich zu machen. Energieträger-Leckagen (v. a. Methan) wurden bereits in einem vorherigen Kapitel (2.5) betrachtet. Zur Vereinfachung werden sie hier daher ebenfalls weggelassen.

Tabelle 21 zeigt die Bilanzierungsoptionen für das oben dargestellte DACCS-Beispiel:

- In beiden Optionen ist die ausgewiesene Netto-Entnahme 280 tCO₂.

³⁶ Die Bilanzierung des Energieeinsatzes erfolgt analog zur heutigen Bilanzierung von Energieeinsatz, es ergeben sich keine Veränderungen gegenüber der heutigen Praxis bzw. zwischen den verschiedenen vorgeschlagenen Optionen.

- Unter Option U1 wird die Entnahme des CO₂ nicht verbucht, im Gegenzug aber die Injektion in die Speicherstätte. Die Menge beläuft sich auf 280 tCO₂ und wird in einer neu zu schaffenden Kategorie „X.2 CO₂ injected at storage sites“ erfasst. In diesem Fall müssen die Leckagen in der Berichterstattung unter 1.C.1 und 1.C.2 nicht berichtet werden, da das CO₂ mit einem C-0-Attribut versehen ist.
- Unter Option U2 wird die gesamte aus der Luft abgeschiedene Menge an CO₂ in Höhe von 300tCO₂ im Inventar erfasst. Dafür wird eine neue Kategorie „X.1 CO₂ captured“ geschaffen. Die Kategorien 1.C.1 und 1.C.2 erfassen nun im Gegenzug die Emissionen aus Leckagen.

Die CO₂-Flüsse sind zudem auch in Abbildung 15 enthalten.

Tabelle 21: Bilanzierungsoptionen für DACCS

GREENHOUSE GAS SOURCE AND SINK CATEGORIES	Option U1	Option U2
	Net CO ₂ emissions/removals	
	(t)	
Total national emissions and removals (with LULUCF)	-280	-280
1. Energy	0	20
1.A.3 Transport		
1.C. CO ₂ Transport and storage		
1.C.1. Transport of CO ₂	0	15
1.C.2. Injection and storage	0	5
2. Industrial processes and product use		
3. Agriculture		
4. Land use, land-use change and forestry		
5. Waste		
6. Other (please specify)		
X. New categories		
X.1 CO ₂ captured		-300
X.2 CO ₂ injected at storage sites	-280	

Quelle: Eigene Darstellung.

6 Anwendungsbeispiel 2: Verbrennung, Abscheidung und Speicherung von Energieträgern (CCS)

6.1 Beschreibung

In diesem Beispiel besprechen wir die Verbrennung sowie nachfolgenden Abscheidung und Speicherung von Energieträgern (carbon capture and storage CCS). Berücksichtigt werden Energieträger mit dem Ursprung fossil und Atmosphäre (d. h. synthetische Energieträger). Diese Energieträger haben chemisch ähnliche Eigenschaften und können daher bis zu einem gewissen Grad gemischt werden (z. B. Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren). Eine nachträgliche Zuordnung des Ursprungs ist dann kaum mehr möglich. Allerdings sind insbesondere bei Kraftstoffen für den Verkehrsbereich häufig detaillierte Daten zur Zusammensetzung verfügbar (u.a. aus den Regelungen zur Beimischung von Bio-Kraftstoffen oder von – zukünftig – synthetischen Kraftstoffen).

Energieträger, die durch die Abscheidung von CO₂ aus Abgasen hergestellt werden (carbon capture and utilization, CCU) werden in Kapitel 7 besprochen.

6.2 Bilanzierungsoptionen

Die Optionen betreffen in diesem Beispiel sowohl die Ursprungsphase als auch die Nutzungsphase. Fossilen Energieträger beginnen in der Nutzungsphase immer mit dem C-1-Attribut, daher gibt es für fossile Energieträger nur die drei Bilanzierungsoptionen aus der Nutzungsphase.

Für synthetische Energieträger gibt es 2 Optionen in der Ursprungsphase und dann 3 Optionen für C-1-Attribute und 2 Optionen für das C-0-Attribut zu Beginn der Nutzungsphase und somit insgesamt 5 Bilanzierungsoptionen.

6.3 Inventarisierung

6.3.1 Szenario für die Fallbeispiele

Im Folgenden werden anhand von zwei Fallbeispielen unterschiedliche Bilanzierungsoptionen und deren Einträge in das Inventar aufgezeigt. Die zwei Fallbeispiele beinhalten einen fossilen Energieträger und einen synthetischen Energieträger aus atmosphärischem CO₂. Die Zahlen der Beispiele sind in Tabelle 22 dargestellt. Sie sind weitgehend identisch und generisch, um den Fokus auf die Bilanzierungsmöglichkeiten im Inventar zu legen. Betrachtet wird jeweils ein Fall ohne Abscheidung und ein Fall mit Abscheidung (carbon capture). Für die Fallbeispiele gehen wir davon aus, dass alle Schritte der Wertschöpfungskette – angefangen bei der Förderung der fossilen Energieträger bis zur Speicherung des CO₂ – im gleichen Land stattfinden. Dies ist in der Realität selten der Fall. Die Auswirkungen von derartigen Im- und Exportbeziehungen und ihre Auswirkungen auf die Inventare verschiedener Länder wird in Kapitel 10 diskutiert.

Die Beispiele haben folgende Eigenschaften.

- Es wird eine Kohlenstoffmenge gefördert, die Emissionen von 530 tCO₂ entspricht (die Art der Förderung unterscheidet sich je nach Beispiel). Bei dem synthetischen Energieträger ist die geförderte Menge 540 tCO₂.

- ▶ Für den Ursprung Atmosphäre fallen in der Vorkette (Schritte 1 bis 4 vor Nutzung) Leckagen im Umfang von 10 tCO₂ an. Bei fossilen Energieträgern werden Leckagen (v. a. Methan) zur Vereinfachung nicht berücksichtigt.
- ▶ In einem Kraftwerk wird der Energieträger verbrannt und so Strom und Wärme bereitgestellt. Dies führt zur Emission von 530 tCO₂.
- ▶ Ist das Kraftwerk mit einer Abscheideanlage (carbon capture) ausgestattet, werden 300 tCO₂ abgeschieden
- ▶ Nach der Abscheidung resultieren CO₂-Leckagen in Höhe von insgesamt 5 tCO₂ (= 3 + 2 tCO₂) aus Transport und Speicherung. Von den abgeschiedenen 300 tCO₂ können daher nur 295 tCO₂ eingespeichert werden.

Um auf Inventarisierung und Bilanzierung der Kohlenstoffflüsse fokussieren zu können, sind alle Emissionen, die aufgrund von Energiebedarfen (u.a. Eigenverbräuche von Kraftwerken, Energiebedarfe für Kohlenstoffabscheidung, Energiebedarfe für den Transport von CO₂ oder Kohlenstoffhaltigen Produkten) anfallen, zur Vereinfachung im Weiteren nicht aufgeführt. Auch Leckagen werden zur Vereinfachung vernachlässigt, wenn sie nicht in Form von CO₂ anfallen.³⁷

Tabelle 22: Fallbeispiel Energieträger: Betrachtete Kohlenstoffmengen in tCO₂

Schritte	ohne Abscheidung	mit Abscheidung
1) Förderung		
Kohlenstoffmenge	530 (für Ursprung Atmosphäre: 540)	530 (für Ursprung Atmosphäre: 540)
2) Transport I (Förderung zu Umwandlung)		
Kohlenstoffmenge	530 (540)	530 (540)
Leckagen	10 (nur für Ursprung Atmosphäre)	10 (nur für Ursprung Atmosphäre)
3) Umwandlung (z. B. Raffinerie)		
Kohlenstoffmenge	530	
4) Transport II (Umwandlung zu Nutzung)		
Kohlenstoffmenge	530	
5) Verbrennung & Abscheidung		
Verbrennung	530	
Abscheidung		300
Emission in die Atmosphäre	530	230

³⁷ Das heißt, Leckagen/ flüchtige Emissionen aus Energieträgern (1.B) weisen wir nicht aus. Hier handelt es sich häufig nicht um CO₂, sondern um andere THG (v. a. Methan), entsprechend kommen hier andere Anrechnungsregeln zum Tragen.

Schritte	ohne Abscheidung	mit Abscheidung
6) Transport III (Abscheidung zu Speicherung)		
Kohlenstoffmenge		300
Leckagen		3
7) Speicherung		
Kohlenstoffmenge		297
Leckagen		2
Einspeicherung		295

Quelle: Eigene Darstellung.

Nur positiv oder negativ bilanzierte Pfade werden im Inventar erfasst. Neutral bilanzierte Pfade sind im Inventar nicht oder nur nachrichtlich ausgewiesen. Daher sind in den folgenden Inventar-Tabellen zur Übersichtlichkeit neutral bilanzierte Flüsse nicht enthalten (in den Abbildungen hingegen schon).

6.3.2 Beispiel 2a: Fossiler Energieträger

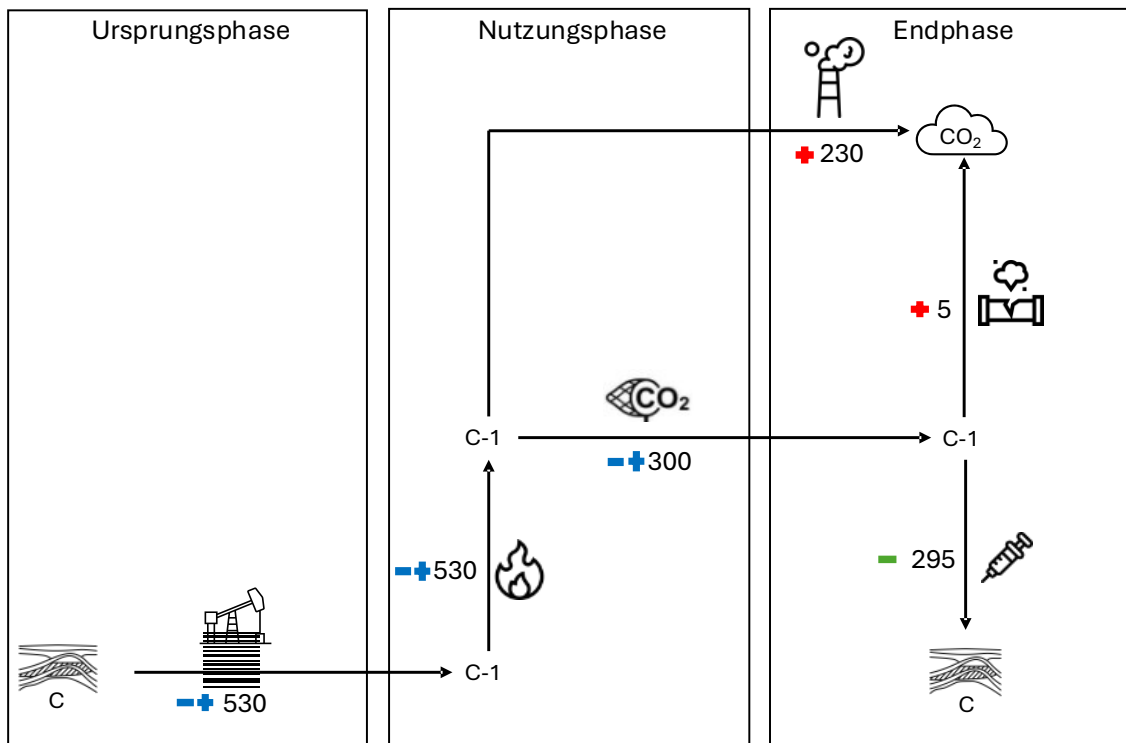
In dem Beispiel eines fossilen Energieträgers spielt die Ursprungsphase keine Rolle, da in beiden Fällen die Bilanzierung für einen fossilen Energieträger gleichbleibt. Entsprechend konzentrieren wir uns in der folgenden Darstellung auf die Nutzungsphase. Zudem verzichtet das Beispiel (noch) auf den Schritt einer Einbindung von Kohlenstoff. Daher ist auch die Bilanzierungsoption N4 hier nicht von Bedeutung.

In dem Beispiel wird ein fossiler Energieträger gewonnen und verbrannt. Im Fall „Fossil ohne Abscheidung“ resultieren **totale Emissionen von 530 tCO₂**, welche alle im **Sektor 1.A.1.a Public electricity and heat production** anfallen (oder einem anderen Sektor, in dem der Energieträger eingesetzt wird, z. B. in einem Industriekraftwerk, das unter Sektor 1.A.2 berichtet wird).

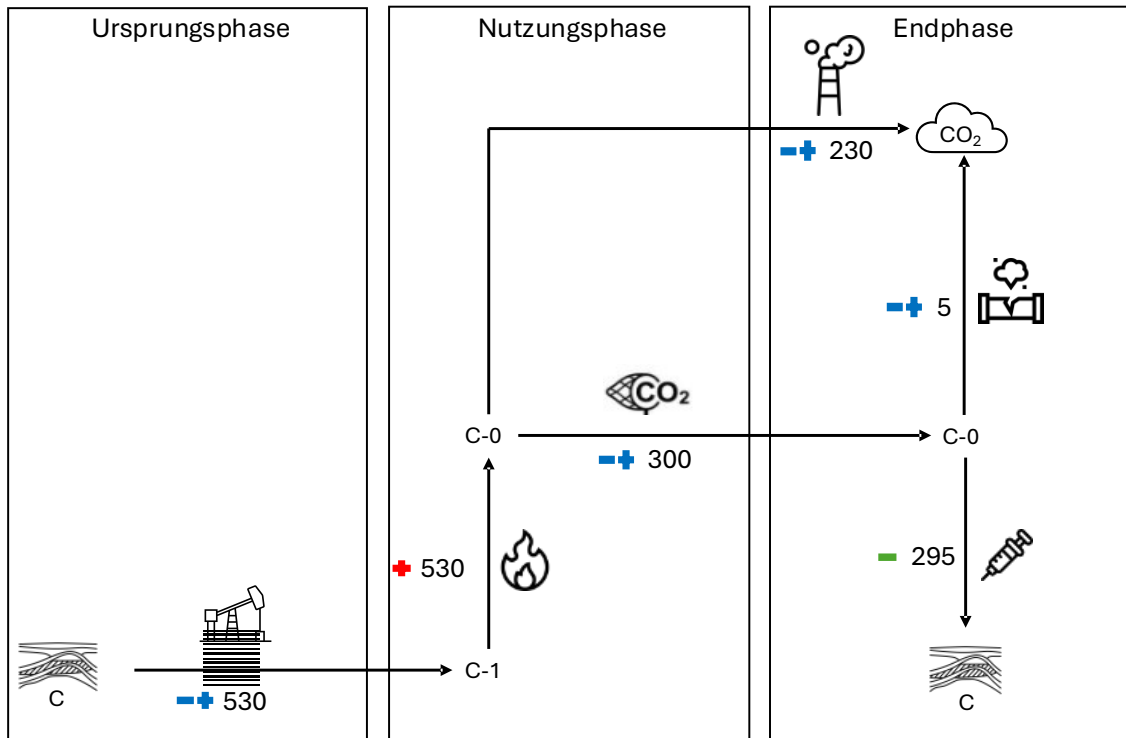
Der Fall „Fossil mit Abscheidung“ führt zu einer Verringerung der Gesamtemissionen auf **Total 235 tCO₂**. Dieses Total ist unabhängig von der Bilanzierungsmethode immer identisch, aber die einzelnen Einträge ändern sich (siehe Tabelle 23 und Abbildung 16).

Abbildung 16: Bilanzierungsoptionen der Verbrennung eines fossilen Energieträgers mit Abscheidung

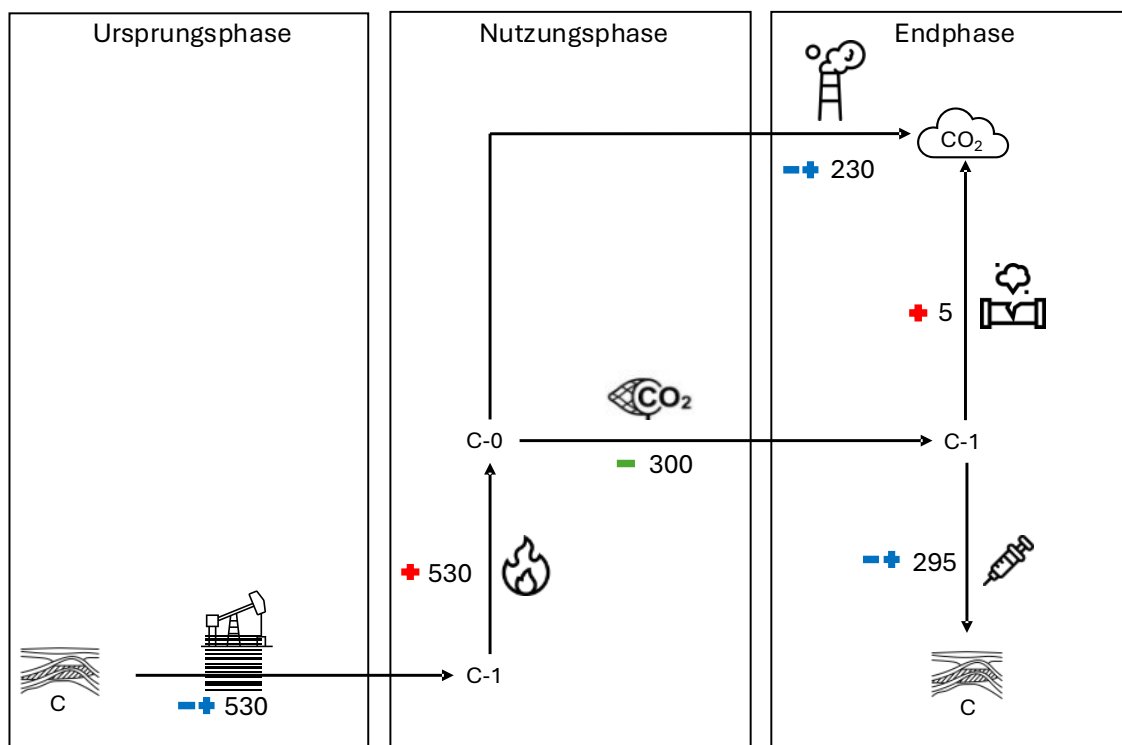
Option N1



Option N2



Option N3



Quelle: Eigene Darstellung.

Option N1 weist ausschließlich die Emission in die Atmosphäre aus. Entsprechend werden im **Sektor 1.A.1.a Public electricity and heat production**³⁸ Emissionen von **230 tCO₂** ausgewiesen. Hinzu kommen Emissionen für den **Sektor 1.C** aus den Leckagen bei Transport und Einspeicherung des CO₂ in Höhe von **5 tCO₂**. Im Ergebnis entspricht diese Option N1 damit der heute gängigen Praxis, bei der die Abscheidung direkt mit den erzeugten Emissionen verrechnet werden ($230 \text{ tCO}_2 = 530 + (-300) \text{ tCO}_2$).

Option N2 weist im Sektor **1.A.1.a Public electricity and heat production** die kompletten Emissionen in Höhe von **530 tCO₂** aus. Die injizierten **295 tCO₂** an der CO₂-Speicherstätte werden erfasst und negativ bilanziert. Während diese heute nur nachrichtlich im Inventar ausgewiesen werden, ist dies unter dieser Option ein fester Bestandteil des Inventars und geht in das nationale Total ein. Die Leckagen des Transports und der Speicherung müssen nicht im Inventar berücksichtigt werden (neutrale Bilanzierung), da dieser Kohlenstoff noch der positiven Bilanzierung der Verbrennung das C-0-Attribut hat.

Option N3 weist im Sektor **1.A.1.a Public electricity and heat production** auch **530 tCO₂** aus. Die abgeschiedene Menge wird mit einer negativen Bilanzierung von **300 tCO₂** berücksichtigt. Dazu haben wir einen neuen Sektor **X.1 CO₂ captured** geschaffen (alternativ könnte dies auch im Sektor 1.A.1.a separat erfasst werden). Der **Sektor 1.C** beinhaltet die Leckagen beim Transport und Einspeicherung des CO₂ in Höhe von **5 tCO₂**, da der Kohlenstoff noch der neutralen Bilanzierung der Abscheidung das C-1-Attribut hat.

³⁸ Möglich wäre auch der Sektor 1.A.2, wenn es sich um ein Industriekraftwerk handelt.

In allen drei Optionen ergibt sich somit das gleiche Total für diese Aktivität, solange alle Schritte der Wertschöpfungskette im gleichen Land stattfinden. Die Wahl der Option hat also ausschließlich Auswirkungen auf die sektorale Aufteilung des Inventars.

Tabelle 23: Bilanzierungsoptionen der Verbrennung eines fossilen Energieträgers mit Abscheidung (vereinfacht: ohne Energiebedarfe und nicht-CO₂)

GREENHOUSE GAS SOURCE AND SINK CATEGORIES	Heute	Option N1	Option N2	Option N3
	Net CO ₂ emissions/removals			
	(tCO ₂)			
Total national emissions and removals (with LULUCF)	235	235	235	235
1. Energy	230	230	530	535
1.A. Fuel combustion				
1.A.1.a. Public electricity and heat production	230	230	530	530
1.B. Fugitive emissions from fuels				
1.C. CO ₂ Transport and storage	5	5	0	5
2. Industrial processes and product use				
3. Agriculture				
4. Land use, land-use change and forestry				
5. Waste				
6. Other (please specify)				
X. New categories				
X.1 CO ₂ captured				-300
X.2 CO ₂ injected at storage sites			-295	
X.3 Direct Air Capture				
X.4 Carbon bound in products and fuels				

Quelle: Eigene Darstellung.

6.3.3 Beispiel 2b: Synthetischer Energieträger

Das zweite Fallbeispiel untersucht einen synthetischen Energieträger aus atmosphärischem CO₂. Die folgenden fünf Bilanzierungsoptionen stehen dabei zur Verfügung:

- ▶ In **Option U1-N1 und U1-N2** werden alle Schritte der Ursprungs- und Nutzungsphase neutral bilanziert und daher im Inventar nicht erfasst. Nur die finale Speicherung wird negativ bilanziert und im Inventar erfasst. Hier fallen die Optionen U1-N1 und U1-N2 zusammen.³⁹
- ▶ In **Option U1-N4** wird die Einbindung des Kohlenstoffs im Energieträger negativ bilanziert. Daraus resultiert das C-1-Attribut in der Verbrennungsphase. Entsprechend wird die Verbrennung positiv bilanziert. Damit liegt der Kohlenstoff dann wieder mit C-0-Attribut vor, d. h. ausgestoßenes CO₂ wird neutral bilanziert, geologisch gespeichertes CO₂ wird negativ bilanziert.⁴⁰
- ▶ Die **Option U2-N1** bilanziert bereits die Abscheidung des Kohlenstoffs aus der Luft negativ, woraus sich das C-1-Attribut für den bereitgestellten Energieträger ergibt. Einbindung, Verbrennung und Abscheidung werden neutral bilanziert. Entsprechend muss ausgestoßenes CO₂ positiv bilanziert werden, geologisch gespeichertes CO₂ wird ebenfalls neutral bilanziert.⁴¹
- ▶ Im Gegensatz dazu ist die **Option U2-N3** komplexer, da mehr Flüsse positiv und negativ bilanziert werden und sich daher die Attribute mehrmals wechseln. Das führt zu mehreren Einträgen in das Inventar, die sich aber in der Summe wieder kompensieren. Zu bemerken ist, dass die Summe der negativen Emissionen mit -840 tCO₂ höher ist als der eigentliche Kohlenstofffluss von ursprünglich 540 tCO₂. Das liegt daran, dass derselbe Kohlenstoff mehrmals erfasst wird (positiv und negativ bilanziert).⁴²

³⁹ Diese Option ist kompatibel mit dem geltenden Biomasseprivileg für Kohlenstoff aus mehrjähriger Biomasse (Holz) (Kapitel 4).

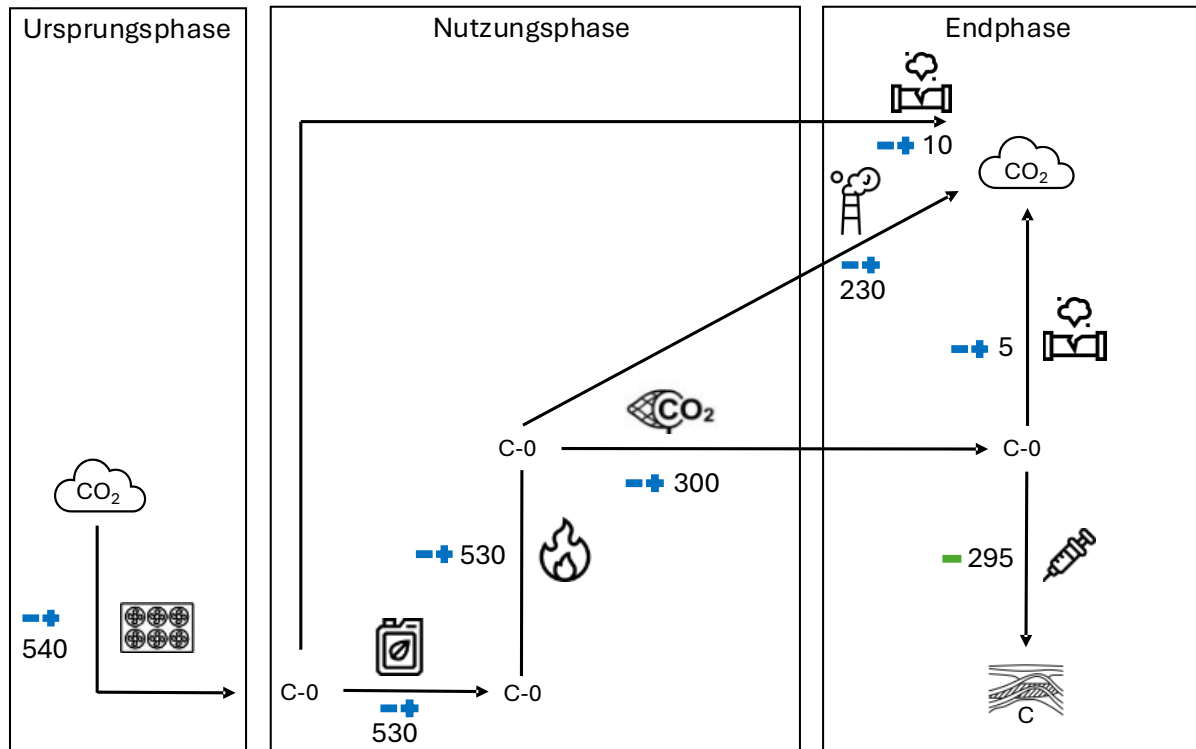
⁴⁰ Diese Option ist kompatibel mit dem geltenden Biomasseprivileg für Kohlenstoff aus mehrjähriger Biomasse (Holz) (Kapitel 4).

⁴¹ Diese Option ist inkompatibel mit dem geltenden Biomasseprivileg als C-0-Bilanzierung für Kohlenstoff aus mehrjähriger Biomasse (Holz). Ein C-1 Attribut ist jedoch prinzipiell denkbar (siehe Option 1, Kapitel 4). Herausforderungen, die sich aus einer Bilanzierung gemäß der Option U2 bei Aufrechterhaltung der heutigen Biomassebilanzierung als C-0 ergeben, werden im weiteren Bericht nicht vertieft.

⁴² Diese Option ist inkompatibel mit dem geltenden Biomasseprivileg als C-0-Bilanzierung für Kohlenstoff aus mehrjähriger Biomasse (Holz). Ein C-1 Attribut ist jedoch prinzipiell denkbar (siehe Option 1, Kapitel 4). Herausforderungen, die sich aus einer Bilanzierung gemäß der Option U2 bei Aufrechterhaltung der heutigen Biomassebilanzierung als C-0 ergeben, werden im weiteren Bericht nicht vertieft.

Abbildung 17: Bilanzierungsoptionen der Verbrennung eines synthetischen Energieträgers mit Abscheidung

Option U1-N1/U1-N2



Option U1-N4

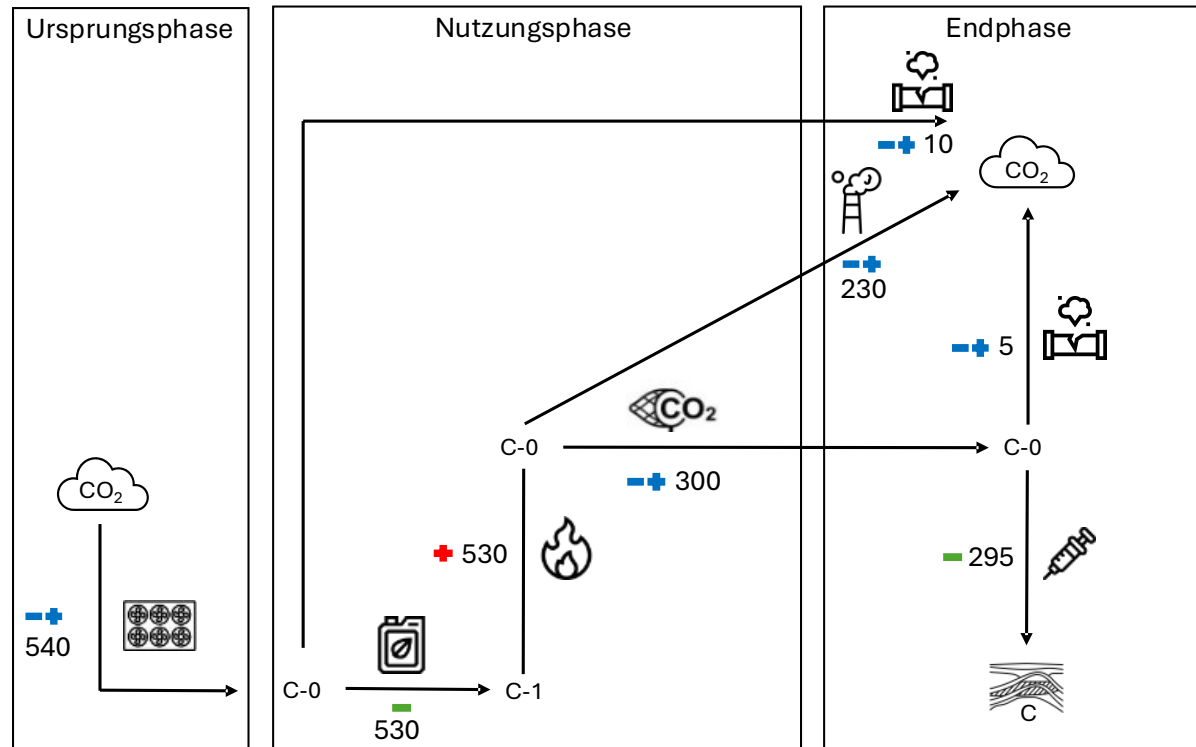


Tabelle 24: Bilanzierungsoptionen für synthetische Energieträger

GREENHOUSE GAS SOURCE AND SINK CATEGORIES	Synthetisch mit Abscheidung			
	U1-N1/U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
	Net CO ₂ emissions/removals (kt)			
Total national emissions and removals (with LULUCF)	-295	-295		-295
1. Energy	0	530	245	545
1.A. Fuel combustion				
1.A.1.a. Public electricity and heat production	0	530	230	530
1.A.1.b Petroleum refining				
1.A.1.c Manufacture of solid fuels and other energy industries				
1.C. CO ₂ Transport and storage	0	0	15	15
2. Industrial processes and product use				
3. Agriculture				
4. Land use, land-use change and forestry				
5. Waste				
6. Other (please specify)				
X. New categories				
X.1 CO ₂ captured				-300
X.2 CO ₂ injected at storage sites	-295	-295		
X.3 Direct Air Capture			-540	-540
X.4 Carbon bound in products and fuels		-530		

Quelle: Eigene Darstellung.

7 Anwendungsbeispiel 3: Verbrennung, Abscheidung und Rezyklierung (CCU)

7.1 Beschreibung

Dieses Kapitel stellt nun die Nutzung eines Energieträgers aus rezykliertem CO₂ dar. Dazu erweitern wir das Anwendungsbeispiel aus Kapitel 6. Allerdings verzichten wir aus Platzgründen auf die Darstellungen in Tabellenform und zeigen nur die Abbildungen. Die Einträge in die Inventartabellen lassen sich daraus analog zu den vorherigen Kapiteln leicht ableiten. Um das Beispiel nicht zu komplex werden zu lassen, nehmen wir an, dass Leckagen nur im letzten Schritt auftreten.

Wir betrachten zwei Beispiele, in denen rezyklierter Kohlenstoff eine Rolle spielt. Im ersten Beispiel wird Kohlenstoff mit Ursprung Atmosphäre mehrmals verwendet. Im zweiten Beispiel wird sowohl Kohlenstoff mit Ursprung Atmosphäre als auch Kohlenstoff fossilen Ursprungs mehrmals verwendet.

7.2 Bilanzierungsoptionen

Die Optionen betreffen in diesem Beispiel wiederum die Ursprungsphase als auch die Nutzungsphase. Hier sind alle fünf Optionen relevant.

7.3 Inventarisierung

7.3.1 Szenario für Fallbeispiele

Im Folgenden werden anhand von zwei Fallbeispielen die unterschiedlichen Bilanzierungsoptionen und deren Einträge in das Inventar aufgezeigt. Die zwei Fallbeispiele betrachten den Fall einer ausschließlichen Nutzung von synthetischen Energieträgern und den Fall einer gemeinsamen Nutzung von synthetischem und fossilem Energieträger. Die Zahlen der Beispiele sind in Tabelle 25 dargestellt. Sie sind weitgehend identisch und generisch, um den Fokus auf die Bilanzierungsmöglichkeiten im Inventar zu legen. Betrachtet wird jeweils ein Fall ohne Abscheidung und ein Fall mit Abscheidung (carbon capture) in der zweiten Nutzungsphase. Die Beispiele haben folgende Eigenschaften.

- ▶ Die bisher betrachteten Schritt 1) Förderung bis 4) Transport II (Umwandlung zu Nutzung) sind hier zur Vereinfachung nicht berücksichtigt. Die Bilanzierung orientiert sich an den vorherigen Beispielen im Kapitel 6.3.
- ▶ Die erste Nutzungsphase (Schritt 5) Verbrennung und Abscheidung I) beinhaltet immer die Abscheidung von CO₂. Das abgeschiedene CO₂ wird erneut in einem synthetischen Energieträger gebunden und in einer zweiten Nutzungsphase (Schritt 9) Verbrennung und Abscheidung II) erneut verbrannt.
- ▶ Von den in Schritt 5) Verbrennung & Abscheidung I abgeschiedenen 300 tCO₂ werden 290 tCO₂ erneut synthetisch in einem Energieträger gebunden. Die übrigen 10 tCO₂ gelangen über Leckagen bei Transport und Umwandlung in die Atmosphäre.
- ▶ Ist das Kraftwerk in Schritt 9) Verbrennung und Abscheidung II mit einer Abscheideanlage (carbon capture) ausgestattet, werden 200 tCO₂ abgeschieden

- Nach der Abscheidung resultieren CO₂-Leckagen in Höhe von insgesamt 5 tCO₂ (= 3 + 2 tCO₂) aus Transport und Speicherung. Von den abgeschiedenen 200 tCO₂ können daher nur 195 tCO₂ eingespeichert werden.

Zudem kann biogener Kohlenstoff je nach Bilanzierungsoption als C-1, wie fossiler, oder als C-0, wie atmosphärischer Kohlenstoff, behandelt werden. Die übrigen Annahmen gelten wie bisher. Insbesondere: um auf Bilanzierung der Kohlenstoffflüsse fokussieren zu können, sind alle Emissionen, die aufgrund von Energiebedarfen anfallen, zur Vereinfachung im Weiteren nicht aufgeführt. Auch Leckagen werden zur Vereinfachung vernachlässigt, wenn sie nicht in Form von CO₂ anfallen.⁴³

Tabelle 25: Fallbeispiel Energieträger: Betrachtete Kohlenstoffmengen in tCO₂

Schritte	ohne Abscheidung	mit Abscheidung
1) Förderung		
Kohlenstoffmenge		
2) Transport I (Förderung zu Umwandlung)		
Kohlenstoffmenge		
Leckagen		
3) Umwandlung I (z. B. Raffinerie)		
Kohlenstoffmenge		
4) Transport II (Umwandlung zu Nutzung)		
Kohlenstoffmenge		
5) Verbrennung & Abscheidung I		
Verbrennung	530	
Abscheidung	300	
Emission in die Atmosphäre	230	
6) Transport III (Abscheidung zu Speicherung)		
Kohlenstoffmenge	300	
Leckagen	3	
7) Umwandlung II (z. B. Raffinerie)		
Kohlenstoffmenge	297	
Leckagen	7	

⁴³ Das heißt, Leckagen/ flüchtige Emissionen aus Energieträgern (1.B) weisen wir nicht aus. Hier handelt es sich häufig nicht um CO₂, sondern um andere THG (v. a. Methan), entsprechend kommen hier andere Anrechnungsregeln zum Tragen.

Schritte	ohne Abscheidung	mit Abscheidung
8) Transport IV (Umwandlung II zu Nutzung II)		
Kohlenstoffmenge	290	
9) Verbrennung & Abscheidung II		
Verbrennung	290	
Abscheidung		200
Emission in die Atmosphäre	290	90
10) Transport V (Abscheidung zu Speicherung)		
Kohlenstoffmenge		200
Leckagen		3
11) Speicherung		
Kohlenstoffmenge		197
Leckagen		2
Einspeicherung		195

Schritte 1) - 4) sind nicht berücksichtigt

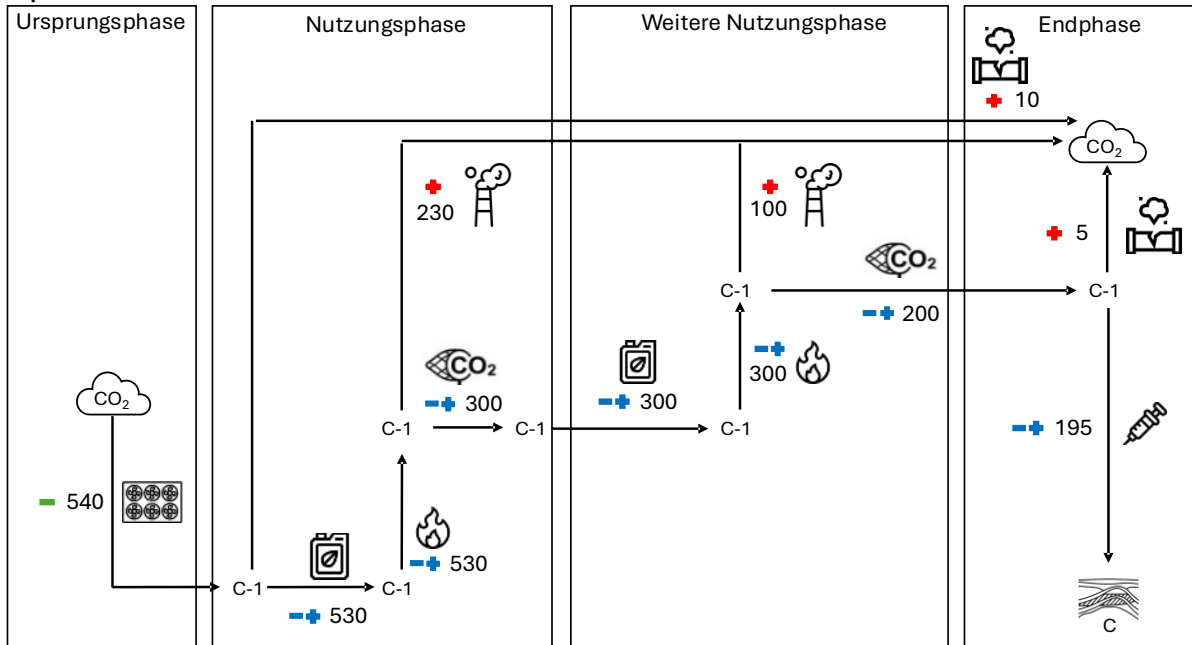
Quelle: Eigene Darstellung.

7.3.2 Beispiel 3a: Synthetischer Energieträger aus atmosphärischem Kohlenstoff im Kreislauf

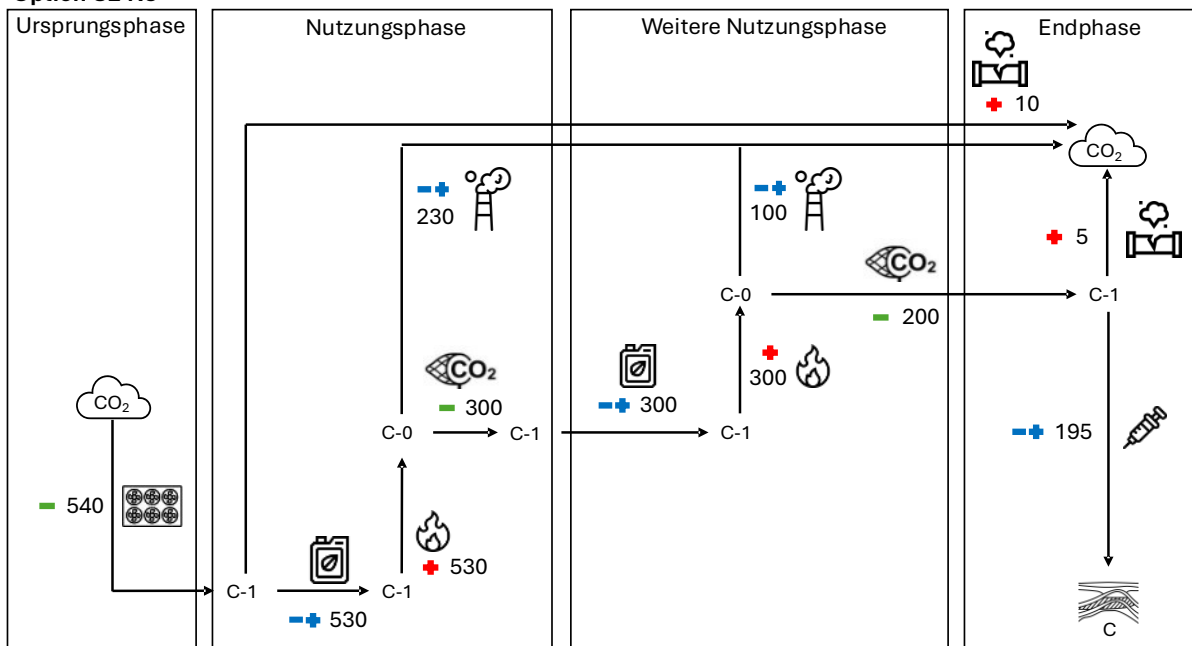
Wir starten mit dem einfacheren Fall, in dem ausschließlich ein synthetischer Energieträger aus atmosphärischem Kohlenstoff verbrannt und rezykliert wird. Im Fall ohne Abscheidung resultieren **totale Emissionen von 0 tCO₂** (in der Abbildung unten nicht aufgeführt). Je nach Bilanzierungsoption resultieren jedoch durchaus positive und negative Einträge im Inventar, die sich allerdings insgesamt ausgleichen.

Der Fall mit Abscheidung führt dazu, dass Gesamtemissionen von **-195 tCO₂** ausgewiesen werden. Dieses Total ist unabhängig von der Bilanzierungsmethode immer identisch, auch hier ändern sich aber die einzelnen Einträge (siehe Abbildung 18).

Option U2-N1



Option U2-N3



Quelle: Eigene Darstellung.

- Optionen U1-N1/U1-N2 weisen ausschließlich die Einspeicherung der abgeschiedenen Emissionen in Höhe von **-195 tCO₂** in der Kategorie **X.2 CO₂ injected** aus. In allen vorherigen Schritten wird auf eine Bilanzierung des nicht-fossilen Energieträgers verzichtet.
- Option U1-N4 verbucht die Einspeicherung von **830 tCO₂** (= 530 + 300 tCO₂) in der Kategorie **X.5 Production of synthetic fuels and feedstocks** negativ. Im Gegenzug wird die Verbrennung des C-1 attribuierten Kohlenstoffs positiv bilanziert (**830 = 530 + 300 tCO₂**), im Beispiel in der Kategorie **1.A.1.a Public electricity and heat production**. Wiederum negativ bilanziert werden die **195 tCO₂**, die geologisch gespeichert werden.

- Option U2-N1 weist im Sektor **1.A.1.a Public electricity and heat production** die aus Verbrennung anfallenden und nicht abgeschiedenen Emissionen in Höhe von **330 tCO₂** (=230+100 tCO₂) aus. Hinzu kommen Leckagen in Höhe von **15 tCO₂** (=10+5 tCO₂) im **Sektor 1.C**. Dem gegenüber steht eine negative Bilanzierung des aus der Atmosphäre entnommenen CO₂ in Höhe von **-540 tCO₂** im Sektor **X.3 Direct Air Capture**.
- Option U2-N3 weist im Sektor **1.A.1.a Public electricity and heat production** sogar **830 tCO₂** (=530+300 tCO₂) aus. Die abgeschiedene Menge wird mit einer negativen Bilanzierung von **-1040 tCO₂** (= -540+(-300) + (-200) tCO₂) berücksichtigt. Sie ergibt sich aus der aus der Luft abgeschiedenen Menge in Höhe von 540 tCO₂ in Sektor **X.3 Direct Air Capture** und der in Verbrennungsprozessen abgeschiedenen Menge in Höhe von 500 tCO₂ in Sektor **X.1 CO₂ captured** (alternativ könnte dies auch im Sektor 1.A.1.a separat erfasst werden). Der **Sektor 1.C** beinhaltet wieder die Leckagen beim Transport und Einspeicherung des CO₂ in Höhe von **15 tCO₂**.

In allen betrachteten Optionen ergibt sich somit das gleiche Total in Höhe von -195 tCO₂ für diese Aktivität, solange alle Schritte der Wertschöpfungskette im gleichen Land stattfinden. Die Wahl der Option hat also ausschließlich Auswirkungen auf die sektorale Aufteilung des Inventars.

7.3.3 Beispiel 3b: Synthetischer Energieträger aus fossilem und atmosphärischem Kohlenstoff im Kreislauf

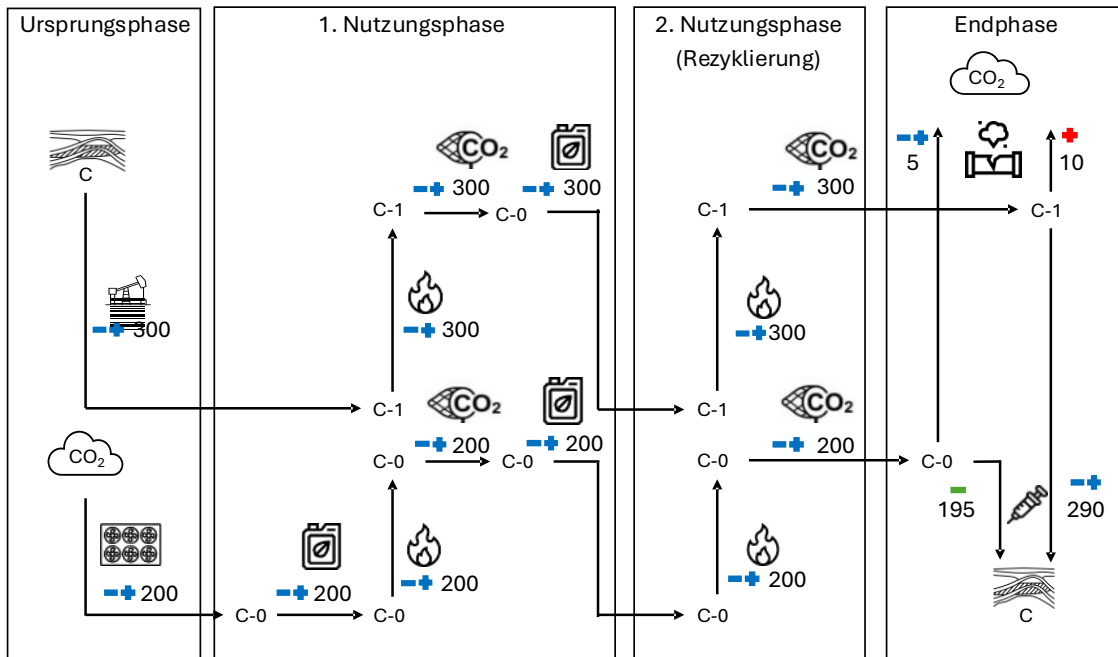
Der folgende Anwendungsfall verdeutlicht die Situation, in der parallel sowohl fossiler als auch atmosphärischer Kohlenstoff im Kreislauf ist und bilanziert werden muss. Das erlaubt eine weitere Einschätzung, welche der Bilanzierungsoptionen in der Praxis gangbarer sind.

Die Fälle aus Beispiel 3a wiederholen sich, in den Abbildungen sind jedoch die Flüsse und Bilanzierungen für einen fossilen Energieträger ergänzt.

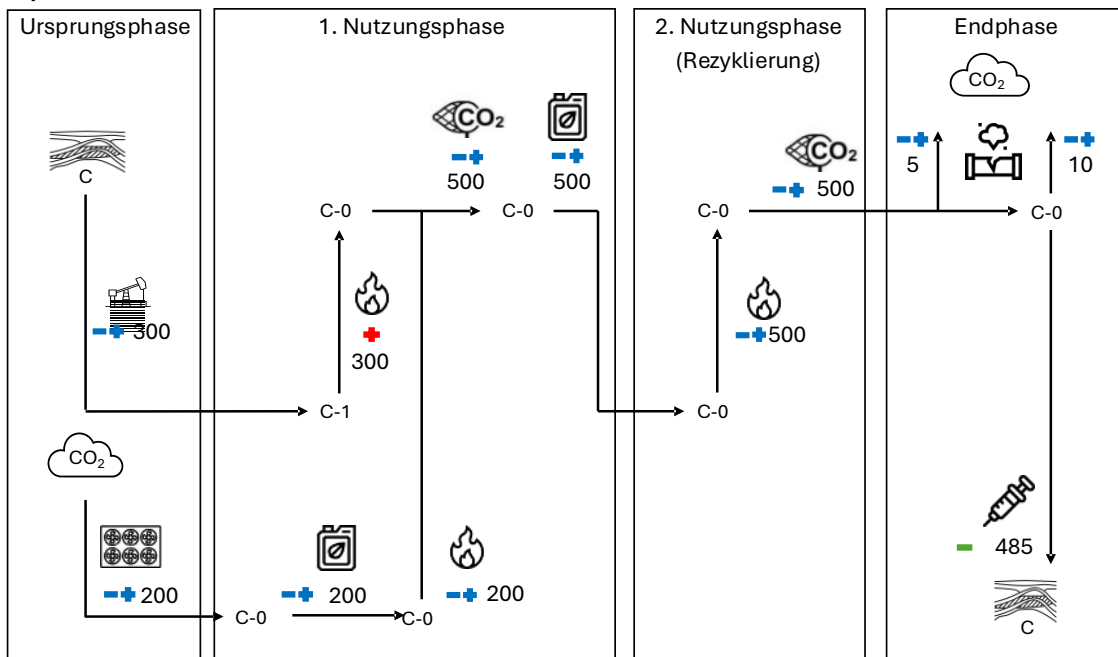
Wir verzichten auf eine detaillierte Diskussion der Auswirkungen der verschiedenen Bilanzierungsansätze auf einzelne Kategorien, da diese analog zu Beispiel 3a erfolgt. Stattdessen konzentriert sich im Folgenden die Analyse auf Implikationen für die Bilanzierung, die sich aus den einzelnen Ansätzen ergeben.

Abbildung 19: Bilanzierungsoptionen synthetischer und fossiler Energieträger CCU

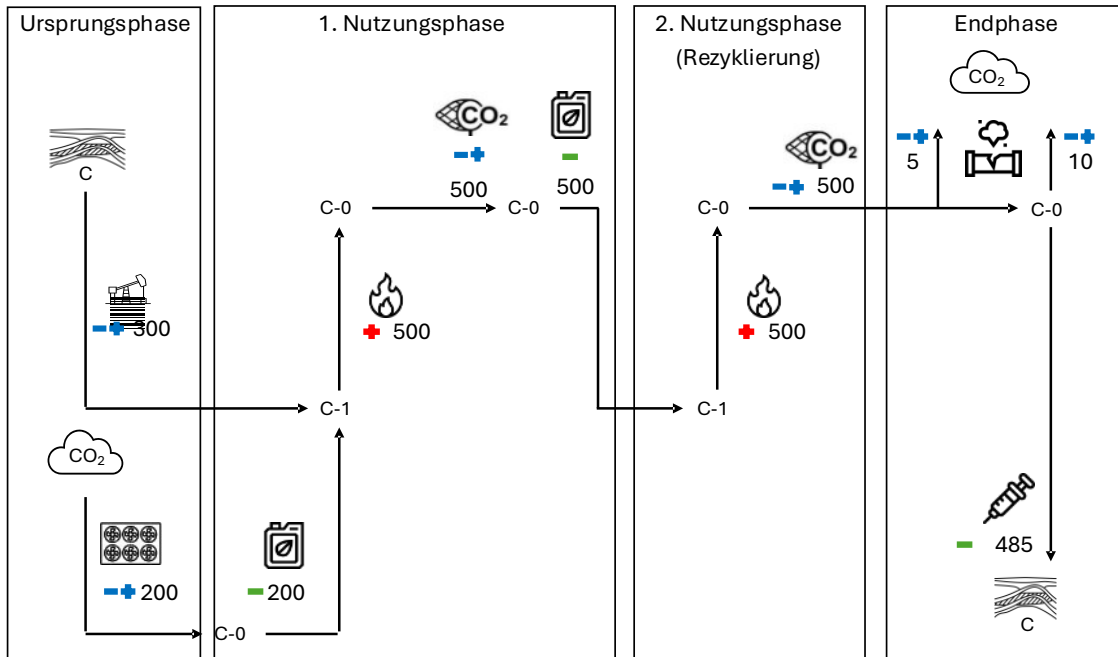
Option U1-N1



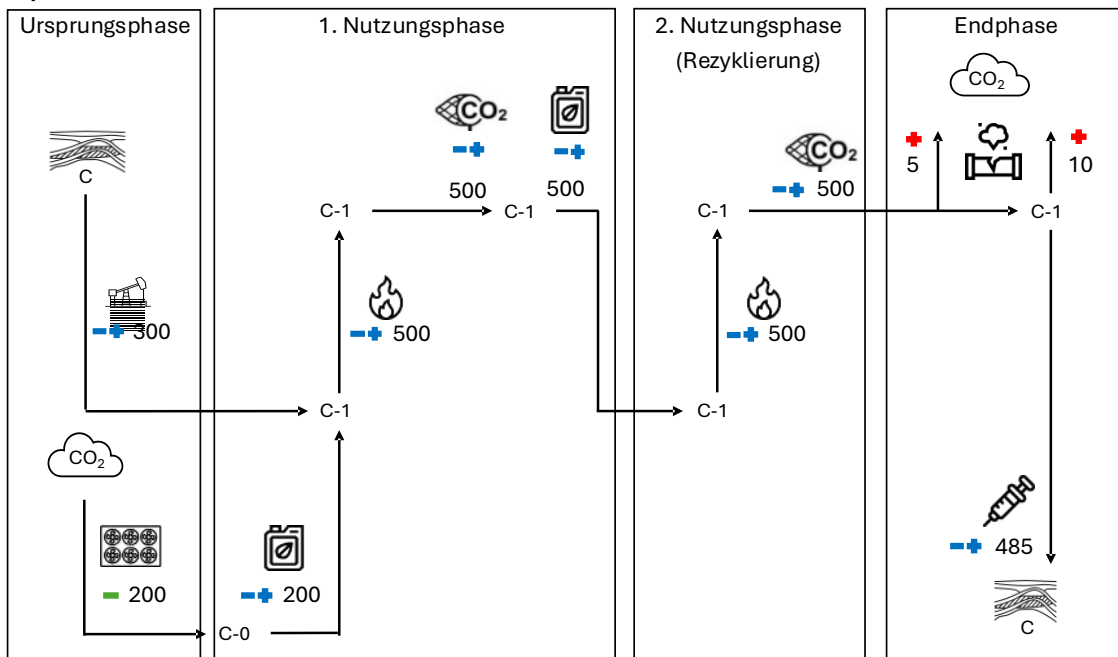
Option U1-N2



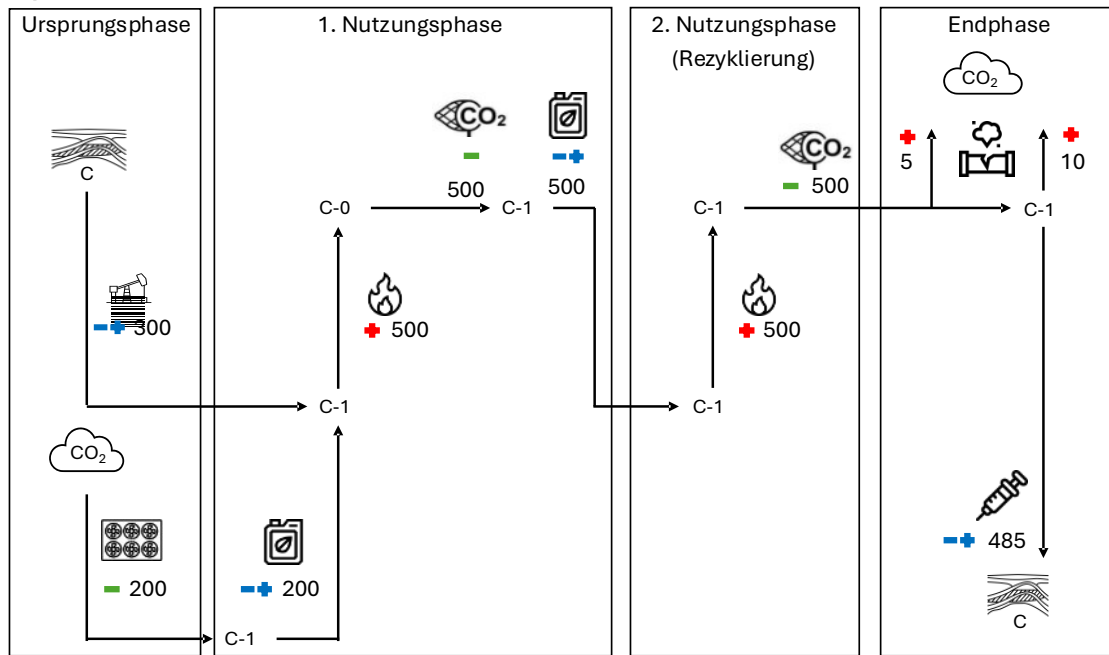
Option U1-N4



Option U2-N1



Option U2-N3



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abbildungen verdeutlichen Folgendes:

- Unter Option U1-N1 müssen der Kohlenstoff fossilen Ursprungs und der atmosphärische Kohlenstoff über die gesamte Lebensdauer separat erfasst werden. Dies gilt sowohl für den daraus erzeugten Energieträger (d. h. ein synthetischer Energieträger mit fossilem Kohlenstoff wird anders behandelt als ein synthetischer Energieträger mit atmosphärischem Kohlenstoff) als auch für die Leckagen während des CO₂-Transports und der Umwandlung in einen Energieträger. Insbesondere die unterschiedliche Erfassung von Leckagen kann einen deutlichen Mehraufwand bedeuten.
- In allen übrigen Optionen wird spätestens ab der zweiten Nutzungsphase Kohlenstoff unabhängig von seiner Herkunft gleichbehandelt, was den Datenerfassungsaufwand deutlich eingrenzt. In den Optionen U2 müsste dafür das Biomasseprivileg aufgehoben werden und mehrjährige Biomasse (Holz) ebenfalls mit einem C-1 Attribut in der Ursprungsphase bilanziert werden.

8 Anwendungsbeispiel 4: Langlebige (chemische) Produkte

8.1 Beschreibung

Konzeptionell sind langlebige Produkte solche, deren Lebensdauer mehr als ein Jahr beträgt. Diese binden Kohlenstoff über einen längeren Zeitraum und werden in diesem Abschnitt gesondert diskutiert. Für langlebige Produkte ist es potenziell nicht möglich, das Attribut am Ende des Lebenszyklus des Produkts eindeutig zu identifizieren. Typische Beispiele für solch langlebigen Produkte sind:

- ▶ Synthetische Chemieprodukte auf Basis von Grundstoffchemikalien, etwa Polymere,
- ▶ Carbonate, wie zum Beispiel PCC-Kalk,
- ▶ Stahl bzw. Gusseisen, bei welchen die Festigkeit durch den im Material gebundenen Kohlenstoff erhöht wurde,
- ▶ Beton, z. B. durch die Einbringung von CO₂ als Gas bei der Herstellung von Frischbeton oder durch die Beimischung von Pflanzenkohle oder Kohlenstoff-Pellets aus pyrolysiertem Abfall,
- ▶ Graphen oder Verbundwerkstoffe wie Carbon, welche Kohlenstoff enthalten.

Die meisten dieser Beispiele binden Kohlenstoff bereits heute, da der Einsatz von Kohlenstoff integraler Bestandteil des Produktionsprozesses ist.⁴⁴ Die Neuerung in der Zukunft wäre allerdings, dass der eingesetzte Kohlenstoff neu atmosphärischen Ursprungs ist.

In diesem Anwendungsbeispiel wird daher diskutiert, wie die Emissionen am Ende der Lebensdauer von langlebigen Produkten unter diesen neuen Gegebenheiten in den THG-Inventaren abgebildet werden können.

In diesem Abschnitt werden keine Energieträger und kein Papier betrachtet, da diese nicht langlebig sind. Auch Harvested Wood Products (HWP) werden nicht diskutiert, da es für diese bereits eine etablierte Methode zur Abbildung im THG-Inventar gibt (siehe Box).

8.2 Bilanzierungsoptionen

Das Anwendungsbeispiel unterscheidet sich grundlegend von den vorherigen. Wir diskutieren hier nicht die Anwendung jeder der in Kapitel 3 vorgestellten Optionen einzeln, sondern es reicht, diese in zwei Gruppen zu unterteilen. In Gruppe 1 sind in der Nutzungsphase sowohl das C-0 als auch das C-1-Attribut vorhanden. In diesem Fall ist ein spezieller Modellierungsansatz nötig (Produkte-Pool; siehe Kapitel 8.3.1). In Gruppe 2 ist es nur das C-1-Attribut in der Nutzungsphase vorhanden und eine Differenzierung somit nicht nötig (siehe Kapitel 8.3.2).

⁴⁴ Die Ausnahme ist die Speicherung in Beton. Die erwähnten Verfahren werden speziell zur Kohlenstoffspeicherung eingesetzt.

Box: Bestehende Inventarisierungsansätze langlebiger Produkte

Im Folgenden beschreiben wir die Inventarisierung von langlebigen Produkten, die bereits im Inventar ansatzweise oder komplett durchgeführt wird.

Harvested Wood Products (HWP)

Für verbautes Holz (Harvested Wood Products) werden in THG-Inventaren für die Senkenleistung Statistiken der Produktion verschiedener Holzprodukte und deren Kohlenstoffanteil verwendet. Die Emissionen am Ende der Lebenszeit des verbauten Holzes werden ausschliesslich modelliert. Für diesen Zweck werden pauschale Halbwertszeiten verschiedener Holzprodukte (z. B. Papier 2 Jahre, Holzplatten 25 Jahre, gesägtes Holz 35 Jahre) verwendet und als exponentieller Zerfallsprozess anhand eines First-Order-Decay-Ansatz modelliert. Die modellierten Emissionen sind somit abhängig von der Inputmenge an verbautem Holz und der angenommenen produktspezifischen Lebensdauer. Eine Zunahme an verbautem Holz würde erst zu einer erhöhten Senkenleistung führen, aber im Anschluss mit einer Verzögerung auch die Emissionen erhöhen.

Ammoniak & Harnstoff

Harnstoff wird durch die Reaktion von Ammoniak (NH_3) mit CO_2 hergestellt. Das hierfür verwendete CO_2 stammt in der Regel aus der vorgelagerten Ammoniakproduktion. Die Inventarisierung dieses Prozesses erfolgt im Sektor Industrial Processes and Product Use (IPPU) unter den Kategorien 2.B.1 Ammonia Production und 2.B.5 Urea Production.

Gemäß den IPCC-Guidelines wird das in der Harnstoffproduktion eingesetzte CO_2 nicht als Emission während der Ammoniakproduktion erfasst, sondern erst bei der Nutzung oder Zersetzung des im Anschluss erzeugten Harnstoffs. Damit gilt das CO_2 als temporär gespeichert.

Da Harnstoff überwiegend als Düngemittel eingesetzt wird, erfolgt seine Zersetzung in der Regel innerhalb kurzer Zeiträume. Eine Lebensdauer wird daher in der Inventarisierung nicht explizit berücksichtigt, und das enthaltene CO_2 wird im Jahr der Nutzung wieder als Emission ausgewiesen.

8.3 Ansätze zur korrekten Bilanzierung langlebiger Produkte

8.3.1 Ansatz 1: Modellierung Verhältnis C-0 zu C-1-Attribut (Produkte-Pool)

In Option U1-N1 ist sowohl C-0 als auch C-1 in der Nutzungsphase vorhanden. Da es schwierig sein dürfte, diese Attribute bei (mehrmaliger) Kreislauflösung durch Datenerhebungen nachzuverfolgen, bietet sich ein mathematisches Accounting-Modell an, das es erlaubt, das Verhältnis der Attribute in der Gesamtwirtschaft im Zeitverlauf statistisch korrekt abzubilden. Wir nennen dies eine Produkte-Pool-Lösung. Die Funktion des Pools ist, die Bindedauer in der Bilanz abzubilden, d. h. der Tatsache Rechnung zu tragen, dass der Kohlenstoff nach der Einbindung in das Produkt nicht sofort als Emission in die Atmosphäre gelangt, sondern über die Lebensdauer der Produkte gespeichert wird. Der Kohlenstoff wird erst am Lebensende emittiert oder auch in einen neuen Pool bzw. eine Senke oder einen Speicher überführt. Analog zu der HWP-Modellierung können im Produkte-Pool-Modell diverse Produkte abgebildet werden mit unterschiedlichen Halbwertszeiten. Auch könnte der Zerfall mit einem First-Order-Decay-Ansatz modelliert werden.

Im Gegensatz zu den HWP ist für den Produkte-Pool allerdings nicht die Emissionsmenge von primärer Bedeutung. Der Grund ist, dass die Produktmenge (zumindest im Total über alle

Produkte) z. B. bei der Verbrennung gemessen werden kann und daher nicht notwendigerweise durch das Modell bestimmt werden muss.⁴⁵ Vielmehr ist das zentrale Ergebnis die statistische Aufteilung von C-0 und C-1, welche den Produkte-Pool (bzw. die diversen Pools) zu einem gegebenen Zeitpunkt verlassen. Diese Aufteilung kann kaum gemessen bzw. nur unter Schwierigkeiten nachverfolgt werden und es bietet sich daher an, diese zu modellieren. Die Aufteilung von C-0 und C-1 bestimmt schlussendlich den bilanztechnischen Emissionsfaktor (siehe Box „Emissionsfaktoren und der Bezug zu den Attributen“).

Es muss definiert werden, welche Produkte in dem Modell differenziert werden sollen. Dabei sind verschiedene Ausgestaltungen denkbar:

- ▶ Differenzierung auf Produktebene: Beispielsweise sollen neben Plastikflaschen ebenfalls Plastikteile der Automobilindustrie erfasst werden. Aufgrund der hohen Produktvielfalt besonders in der chemischen Industrie und vor dem Hinblick zukünftig neuer Produkte, erscheint diese Definition allerdings weniger praktikabel. Eine mögliche Definition kann angelehnt an die Aktivitäten aus der EU-Taxonomie erfolgen, wie beispielsweise die Herstellung von Plastik, Gummi und anderen organischen Chemikalien.
- ▶ Differenzierung nach Grundstoffchemikalie: Es wird nicht die Plastikflasche, sondern deren Ausgangsmaterial Polyethylen oder sogar dessen Ausgangsprodukt Ethylen erfasst. Denkbar ist hier eine Orientierung an der Definition von High Value Chemicals aus dem EU-Emissionshandel, die im Moment Methanol, Ethylen und Propylen als kohlenstoffhaltige Chemikalien abdeckt.
- ▶ Differenzierung nach Branchenebene: Pools können beispielsweise alle Produkte umfassen, die in den Branchen mit NACE-Code 20 „Herstellung von chemischen Erzeugnissen“ vorkommen.

Diese Alternativen haben Vor- und Nachteile. Generell ist eine Alternative mit mehr Differenzierung aufwändiger, aber auch genauer. Es ist für Grundstoffchemikalien schwierig, eine repräsentative Halbwertszeit der daraus entstehenden Produktpalette abzuschätzen. Zudem könnte bei einer Differenzierung nach High Value Chemicals Produkte aus Recyclingmaterialien nicht erfasst werden (sondern Recycling müsste in den Halbwertszeiten der High Value Chemicals abgebildet werden, was nicht ideal wäre). Generell gilt, dass mehrmaliges Rezyklieren des Kohlenstoffs die Komplexität der Modellierung langlebiger Produkte erhöht. Eine Erfassung von allen Produkten auf Branchenebene würde eine sehr große Produktpalette zur Folge haben (jedoch kann der Zugang zu den Unternehmen und deren Daten über das Handelsregister einfach sein).

Bei einer konkreten Ausgestaltung müssten die Vor- und Nachteile in Detail identifiziert und analysiert werden.

Beispiel der Anwendung Produkte-Pool (illustratives Beispiel mit erfundenen Zahlen)

In einer Abfallverbrennungsanlage werden im Jahr t 1'000 Tonnen Plastikprodukte pro Jahr verbrannt. Davon sind 300 Tonnen Flaschen, 500 Tonnen Rohre und 200 Tonnen Fensterrahmen.

Das Produkte-Pool Modell verwendet als Input die C-0/C-1-Attribut Verteilung zum Zeitpunkt der Einbindung von Kohlenstoff in die Produktkategorien des Modells für die Jahre $t-1$, $t-2$, etc. Zudem

⁴⁵ Im Unterschied dazu gibt es für HWP keine umfassenden Daten zu deren Zerfallsmenge.

sind je Produktkategorie unterschiedliche Halbwertszeiten hinterlegt (z. B. 2 Jahre für Flaschen, 35 Jahre für Rohre und 20 Jahre für Fensterrahmen). Halbwertszeiten heißt in diesem Zusammenhang die Zeit bis die Hälfte der Produkte wieder in den Kreislauf gelangt.

Ist die Differenzierung der Plastikprodukte im Modell gleich oder detaillierter als die Differenzierung der Abfallverbrennungsanlage, kann der Modelloutput je Kategorie verwendet werden, um die Verteilung der Attribute im Jahr t je Produkte abzuschätzen (z. B. C-0-Anteil im Jahr t für Flaschen 20 %, für Rohre 5 % und für Fensterrahmen 10 %; die Unterschiede ergeben sich entweder aufgrund der unterschiedlichen technischen Möglichkeiten C-0-Kohlenstoff in der Produktion zu verwenden⁴⁶ oder aufgrund des mit der Zeit ansteigenden Anteils an C-0 in der Produktion in Verbindung mit den unterschiedlichen Halbwertszeiten).

Ist die Differenzierung der Plastikprodukte im Modell weniger detailliert als die Differenzierung der Abfallverbrennungsanlage, kann aus dem Modell für das Jahr t lediglich eine durchschnittliche Verteilung der Attributen C-0 und C-1 des eingesetzten Plastiks abgeschätzt werden (z. B. C-0-Anteil für 1.000 Tonnen Plastikprodukte im Jahr t ist 15 %). Diese Methode wäre für einen Anlage weniger genau, aber vermutlich über alle Anlagen, d. h. im Total immer noch ausreichend und weniger datenintensiv.

In beiden Fällen müsste das Modell allenfalls periodisch nachjustiert werden, um sicherzustellen, dass der kumulierte Input von Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs bzw. fossilen Ursprungs mit dem kumulierten Output balanzierter Emissionen bzw. permanenter Speicherung übereinstimmt.

8.3.2 **Ansatz 2: Einheitliches C-Attribut für langlebige Produkte in der Nutzungsphase**

Ein anderer Ansatz für die Erfassung von langlebigen Produkten ist es, in der Ursprungsphase so zu bilanzieren, dass in der Nutzungsphase ein einheitliches C-1-Attribut für langlebige Produkte resultiert. Dies ist z. B. in Abbildung 19 in allen Optionen der Fall, in denen die U2-Bilanzierung verwendet wird. Dann entfällt die Notwendigkeit, unterschiedliche Attribute in der Nutzungsphase nachverfolgen zu müssen. Jedes Produkt besteht immer vollständig aus Kohlenstoff mit dem C-1-Attribut. Dies ist ein klarer Vorteil im Kontext langlebiger Produkte im Gegensatz zu der Modellierung mittels eines Produkte Pools. Allerdings müsste dafür das Biomasseprivileg aufgehoben werden und mehrjährige Biomasse (Holz) ebenfalls mit einem C-1 Attribut in der Ursprungsphase bilanziert werden.

Für die Option U1-N2 wäre die Umsetzung allerdings aufwändiger als bei U2-N1, U2-N3 und U2-N4, weil sichergestellt werden muss, dass der Kohlenstoff fossilen Ursprungs bei der erstmaligen Nutzung separat vom atmosphärischen Kohlenstoff positiv bilanziert wird. Dieser zusätzliche Aufwand ergibt sich jedoch weniger aus konzeptionellen Unterschieden als aus den Anforderungen an die Datenerfassung. Analog zu Verbrennungsprozessen, bei denen die Bilanzierung ebenfalls ausschließlich auf dokumentierten Inputströmen basiert, wäre eine solche Differenzierung grundsätzlich auch hier möglich, sofern die Herkunft der eingesetzten Kohlenstoffströme eindeutig erfasst und dokumentiert wird. Der Unterschied liegt somit primär in der institutionellen und statistischen Umsetzung, nicht in der grundsätzlichen Bilanzierbarkeit des Ansatzes.

⁴⁶ Z. B. kann recyceltes Plastik zwar problemlos in Rohren, aber aus hygienischen Gründen schwieriger in Plastikflaschen für Nahrungsmittel verwendet werden.

9 Eigenschaften der Bilanzierungsoptionen

Für die Diskussion der Eigenschaften der Bilanzierungsoptionen stützen wir uns auf die Grundsätze und Annahmen, welche wir für die Entwicklung der Bilanzierungsoptionen gesetzt haben (siehe Kapitel 3.1). An zentraler Stelle steht dabei insbesondere die Beseitigung der identifizierten Fehlstellen (Grundsatz 2). Gewisse Fehlstellen sind darauf zurückzuführen, dass die CRT-Tabellen der heutigen Treibhausgasinventare **keine Erfassungsmöglichkeit für die entsprechenden Kohlenstoffflüsse** vorsehen (z. B. bei der technischen CO₂-Entnahme bei DAC, siehe Tabelle 21 in Kapitel 5.3). Andere Fehlstellen hängen damit zusammen, dass der **Ursprung des CO₂ (fossil/geogen, biogen oder atmosphärisch) nicht bekannt** ist. Vor diesem Hintergrund lassen sich zwei „Analyseelemente“ ableiten:

- **Kompakte versus detaillierte Inventarisierung:** Die Bilanzierungsoptionen unterscheiden sich darin, wie detailliert die Kohlenstoffpfade in den nationalen THG-Inventaren erfasst werden. Eine kompakte Inventarisierung kommt mit einer Reduktion auf relevante Flüsse und entsprechend wenig Einträgen aus. Dies entspricht in der Regel einer einmaligen Erfassung der Entstehung oder Freisetzung von CO₂. Eine detaillierte Inventarisierung erfasst ggf. jede einzelne Umwandlung von Kohlenstoff in CO₂ (in Verbrennungsprozessen mit und ohne CCS), und daher auch jede Einbindung in Produkten oder jede permanente Speicherung. Es wird daher deutlich, an welchen Stellen in der Wirtschaft weiterhin Kohlenstoff eingesetzt wird.
- **Einheitliche vs. differenzierte C-Attribute:** Je nach Bilanzierungsoption unterscheidet eine Option möglichst lange entlang des abgebildeten Kohlenstoffflusses nach unterschiedlichen Ursprüngen oder sie vereinheitlicht möglichst zügig die vergebenen Attribute. Wenn ab einem Zeitpunkt weit vorne im Kohlenstoffpfad nur noch ein C-0 oder C-1-Attribut vorliegt, sprechen wir von einheitlichen C-Attributen. Im anderen Fall muss entlang der abgebildeten Kohlenstoffflüsse zwischen den Attributen C-0 und C-1 differenziert werden und deren Aufteilung muss in der Kohlenstoffwirtschaft bekannt sein (siehe Kapitel 8).

Anhand dieser zwei Analyseelemente können die Bilanzierungsoptionen unterschieden und deren Vor- und Nachteile bestimmt werden. Die Grundsätze 1 und 4 (siehe Kapitel 3.1) sind in allen Fällen umgesetzt.

Zudem haben wir in Kapitel 3.1 auch die Nähe zur bestehenden Inventarisierung als einen relevanten Aspekt identifiziert (Grundsatz 3). Dieser Aspekt wird im nachfolgenden Kapitel 10.1 unter dem Stichpunkt Territorialprinzip genauer untersucht.

Das Anwendungsbeispiel 3b (CCU mit atmosphärischem und fossilem Kohlenstoff im Kreislauf; siehe Kapitel 7.3.3) ist das komplexeste Anwendungsbeispiel und daher am besten geeignet, um die Bilanzierungsoptionen zu diskutieren. Deshalb fokussieren die folgenden Abschnitte auf dieses Beispiel. Die Erkenntnisse der Diskussion lassen sich auf die anderen Anwendungsbeispiele übertragen.

9.1 Kompakte versus detaillierte Inventarisierung

Die Bilanzierungsoptionen unterscheiden sich vor allem in der Nutzungsphase zum Teil stark darin, wie oft positiv bzw. negativ oder neutral bilanziert wird. Zur Erinnerung: Neutral bilanziert bedeutet, dass ein Umwandlungsschritt in der Kohlenstoffwirtschaft nur nachrichtlich oder gar nicht inventarisiert wird. Bei Bilanzierungsoptionen mit mehr neutralen

Bilanzierungsschritten werden daher für die Berechnung des nationalen Emissionstotals weniger Zahlen benötigt (**kompakte Inventarisierung**). Viele positive und negative Bilanzierungsschritte erhöhen hingegen die Information der Umwandlungsprozesse (**detaillierte Inventarisierung**).

Eine **kompakte Inventarisierung** des nationalen Totals bedeutet, dass möglichst viele Schritte in der Nutzungsphase neutral bilanziert werden, um den Erfassungsaufwand zu reduzieren. Die Datenerhebung für ein THG-Inventar ist anspruchsvoll. Je nach Bilanzierungsoption ist die Menge der Daten, die für das nationale Total des THG-Inventars erhoben werden müssen, unterschiedlich. Für kompakte Bilanzierungsoptionen, bei welchen ein großer Teil der Schritte insbesondere in der Nutzungsphase neutral bilanziert wird und diese deshalb gar nicht oder nur nachrichtlich erfasst werden müssen, vereinfacht sich die Datenerhebung. Zugleich kann zwischen den Bilanzierungsoptionen abgewogen werden, welcher Kohlenstofffluss mit möglichst geringem Aufwand zu erfassen ist.

Eine **detaillierte Inventarisierung** des nationalen Totals bedeutet, dass möglichst alle Schritte (= alle Kohlenstoffflüsse) in der Nutzungsphase positiv / negativ bilanziert werden, um die Transparenz zu erhöhen. Je mehr Schritte im THG-Inventar erfasst und abgebildet werden, desto differenzierter können Aussagen zu Einsatz und Umwandlung von Kohlenstoff in einem Land gemacht werden. Einzelne Elemente (z. B. Verbrennung, Abscheidung oder Einbindung) können individuell betrachtet werden. Die Berichterstattung über Vorgänge innerhalb der Sektoren ist daher aussagekräftiger. Es können besser Aussagen dazu getroffen werden, in welchen Sektoren Kohlenstoff benötigt bzw. zu Verbrennungszwecken eingesetzt wird, wo CO₂ abgeschieden wird und wo ggf. auch Kohlenstoff in Produkten eingebunden oder geologisch langfristig gespeichert wird. Die Vergleichbarkeit der Kohlenstoffflüsse innerhalb und zwischen Sektoren verschiedener Länder wird erhöht. Gleichzeitig ist der Erfassungsaufwand deutlich höher. Zudem ergeben sich teilweise auch Einträge in das Inventar, die für Nutzende, die das heutige System gewohnt sind, nicht-intuitiv erscheinen (z. B. positive Bilanzierung von Umwandlungsschritten, die keine Emissionen sind).

Die beiden oben genannten Punkte schließen sich gegenseitig aus. So bedeutet eine kompakte Inventarisierung, dass nur ausgewählte Kohlenstoffflüsse innerhalb eines Kohlenstoffpfads in den THG-Inventaren individuell betrachtet und zwischen Inventaren verglichen werden können (weniger Transparenz). Eine detaillierte Inventarisierung hat den Nachteil, dass der Aufwand für die Datenerhebung, die Berechnung der Kohlenstoffflüsse und die Qualitätssicherung deutlich höher ausfallen dürfte. Zudem ist eine detaillierte Inventarisierung nur dann möglich, wenn alle Einzelschritte tatsächlich gemessen oder berechnet werden können.

Welche der Bilanzierungsoptionen am geeignetsten ist hängt davon ab, ob die kompakte oder detaillierte Bilanzierung priorisiert wird. Die folgende Tabelle zeigt, welche Bilanzierungsoptionen sich für eine kompakte oder eine detaillierte Bilanzierung eignen:

Tabelle 26: Eignung der Bilanzierungsoptionen für eine kompakte vs. detaillierte Inventarisierung

Option	Kompakte Inventarisierung	Detaillierte Inventarisierung
U1-N1	ja	nein
U1-N2	teilweise	nein
U1-N4	nein	ja
U2-N1	ja	nein
U2-N3	nein	ja

Legende: Die Bilanzierungsoptionen (U1-N1, etc.) sind im Kapitel 2.5 erläutert.

Quelle: Eigene Darstellung.

Aus obiger Tabelle lässt sich Folgendes ableiten:

- Es gibt zwei Bilanzierungsoptionen, die sich für eine kompakte Inventarisierung eignen (U1-N1 und U2-N1). In beiden wird die Nutzungsphase neutral bilanziert. Der Unterschied ist, dass bei U1-N1 die permanente Speicherung von CO₂ in der Endphase negativ bilanziert wird, während bei U2-N1 bereits die Abscheidung aus der Atmosphäre negativ bilanziert wird.
- Für eine möglichst detaillierte Bilanzierung eignen sich die zwei Bilanzierungsoptionen U1-N4 und U2-N3. Der Unterschied zwischen diesen beiden Optionen ist lediglich, dass innerhalb der Nutzungsphase die Abscheidung von CO₂ bzw. die Umwandlung in ein Produkt negativ bilanziert wird.
- U1-N2 eignet sich nur teilweise für eine kompakte Inventarisierung. Dort muss Kohlenstoff fossilen Ursprungs einmalig zu Beginn der Nutzungsphase positiv bilanziert werden. Im Anschluss ist die Bilanzierung in der Nutzungsphase neutral.

Ergänzend zu der Aufnahme der Flüsse müssten die IPCC-Richtlinien klare und verbindliche Vorgaben machen, damit die Vergleichbarkeit zwischen den Inventaren verschiedener Länder sichergestellt ist. Auch methodische Vorgaben zur Messung, Berechnung und Berichterstattung dieser Kohlenstoffflüsse müssen in den IPCC-Richtlinien ergänzt werden.

9.2 Einheitliche versus differenzierte C-Attribution in der Nutzungsphase

Die Einführung der Attribute C-0 und C-1 ermöglicht es, dass der Ursprung des Kohlenstoffs (atmosphärisch oder fossil) in der Nutzungs- und Endphase nicht mitgeführt werden muss.

Bei gewissen Bilanzierungsoptionen erfolgt die Bilanzierung der Ursprungsphase so, dass ab dem Beginn der Nutzungsphase in jedem Kohlenstofffluss nur noch das C-1-Attribut vorkommt

(**einheitliche C-Attribute**).⁴⁷ Dies verringert den Aufwand für die Bilanzierung gegenüber anderen Bilanzierungsoptionen mit **differenzierten C-Attributen**, in welchen das Verhältnis von C-0 und C-1 in der Nutzungsphase nachverfolgt werden muss (z. B. mittels Modellierung eines Produkte-Pools).

Welche der Bilanzierungsoptionen am geeignetsten ist, hängt davon ab, ob die einheitliche oder differenzierte C-Attribuierung priorisiert wird. Tabelle 27 zeigt, welche Bilanzierungsoptionen sich für vereinfachte oder differenzierte C-Attribute eignen:

Tabelle 27: Eignung der Bilanzierungsoptionen für einheitliche vs. differenzierte Attribution in der Nutzungsphase

Option	Einheitliche C-Attribute	Differenzierte C-Attribute
U1-N1	nein	ja
U1-N2	teilweise	teilweise
U1-N4	ja	nein
U2-N1	ja	nein
U2-N3	ja	nein

Legende: Die Bilanzierungsoptionen (U1-N1, etc.) sind im Kapitel 2.5 erläutert.

Aus obiger Tabelle lässt sich folgendes ableiten:

- U2-N1 ist die einzige Bilanzierungsoption, die in der Nutzungsphase nur mit dem Attribut C-1 auskommt. Es ist somit nicht nötig, für einen Kohlenstoffpfad zwischen C-0 und C-1 zu differenzieren, weil per Design kein C-0-Kohlenstoff in der Nutzungs- und Endphase vorhanden ist.
- In der Optionen U1-N4 und U2-N3 werden die Umwandlungsschritte so bilanziert, dass der Kohlenstoff vor der Verbrennung das Attribut C-1 hat. Danach wird gemäß den Bilanzierungsregeln abwechselnd positiv und negativ bilanziert, bis der Kohlenstoff beim Übertritt in die Endphase wieder das Attribut C-1 erhält. Auch hier ist es an keiner Stelle nötig, das Verhältnis zwischen C-0 und C-1 zu erfassen, weil das Attribut zu Beginn und zum Ende der Nutzungsphase jeweils gleich ist und die dazwischenliegende Bilanzierung so stattfindet, dass der Kohlestoff jedes Energieträgers bzw. Produkts entweder vollständig mit dem Attribut C-0 oder dem Attribut C-1 behaftet ist. Das heißt, ein Energieträger bzw. ein Produkt kann in diesen Optionen nicht aus Kohlenstoff mit den Attributen C-0 und C-1 zusammengesetzt sein. Da eine solche „Mischattribution“ nicht vorkommen kann, entfällt auch der entsprechende Erhebungsaufwand.

⁴⁷ Prinzipiell könnte auch so bilanziert werden, dass nur das C-0 Attribut vorkommt. Dies bedingt jedoch, dass die Förderung von fossilem Kohlenstoff positiv bilanziert wird. Dies ist eine Option, die wir als nicht umsetzbar verworfen haben.

- ▶ In Option U1-N2 tritt Kohlenstoff fossilen Ursprungs mit dem C-1-Attribut in die Nutzungsphase ein. Die Verbrennung wird dann positiv bilanziert, sodass im Anschluss nur noch Kohlenstoff mit dem C-0-Attribut in der Kohlenstoffwirtschaft vorhanden ist. Im Gegensatz zur obigen Option U2-N1 bedeutet dies, dass in der ersten Nutzung das Verhältnis von C-0 und C-1 bekannt sein muss. In folgenden Nutzungsphasen muss das Verhältnis allerdings nicht mehr bekannt sein.
- ▶ In Option U1-N1 werden Kohlenstoffpfade mit C-1 und mit C-0 in der gesamten Nutzungsphase entkoppelt und eine Mischattribution von Energieträgern bzw. Produkten findet statt. Es muss demnach der Anteil C-1 und C-0 in der Kohlenstoffwirtschaft bekannt sein. In dieser Option kann in der Endphase die Speicherung von Kohlenstoff mit C-0-Attribut direkt als technische Senke ausgewiesen werden.

9.3 Einfluss der Bilanzierungsoptionen auf die in Kapitel 3.1 definierten Grundsätze

Die verschiedenen Bilanzierungsoptionen haben jeweils Vor- und Nachteile. Wie diese gewichtet werden, um schlussendlich eine Auswahl zu treffen, hängt davon ab, welchen Ansprüchen die THG-Inventare genügen müssen. Die hier zusammengetragenen Informationen leisten einen Beitrag zu einer solchen Entscheidungsfindung.

Mit Option U1-N2 ist weder eine detaillierte noch eine kompakte Inventarisierung möglich. Die C-Attribution in der Nutzungsphase ist nicht komplett einheitlich oder differenziert. In der Option U1-N2 wird fossiler Kohlenstoff – im Gegensatz zum atmosphärischen Kohlenstoff – vor der ersten Nutzung als C-1 geführt. Nach der erstmaligen Nutzung und entsprechend positiven Bilanzierung des fossilen Kohlenstoffs liegt in allen weiteren Nutzungsphasen und der Endphase nur noch das Attribut C-0 vor (unabhängig vom Ursprung). Gegenüber der komplett einheitlichen C-Attribution lässt sich mit Option U1-N2 die Menge von neu gefördertem fossilem Kohlenstoff direkt aus dem Inventar ablesen. Gleichzeitig muss diese Menge auch separat ausgewiesen werden, was den Erfassungsaufwand erhöht. Zudem unterscheidet sich die Option deutlich von der heutigen Praxis der THG-Inventare. Diese Option ist daher gemessen an den Grundsätzen 2 und 3 gegenüber anderen Optionen weniger vorteilhaft. Es gibt daher keinen Grund, diese Bilanzierungsoption weiterzuverfolgen.

Daher stehen aus unserer Sicht letztlich vier Bilanzierungsoptionen im Vordergrund, die in Abbildung 20 beschrieben sind:

Abbildung 20: Matrix zur Einordnung der vier relevanten Bilanzierungsoptionen

Attribute	differenziert	U1-N1 Nutzungsphase: C hat Mischattribution und wird im Inventar immer neutral bilanziert Endphase: C kann beide Attribute haben	
	einheitlich	U2-N1 Nutzungsphase: C liegt nur als C-1 vor und wird im Inventar immer neutral bilanziert Endphase: C liegt nur als C-1 vor	U1-N4 und U2-N3 Nutzungsphase: C kann beide Attribute (aber keine Mischattribution) haben und wird im Inventar v.a. positiv und negativ bilanziert Endphase: C liegt nur als C-1 vor
		kompakt	detailliert
		Inventarisierung	

Quelle: Eigene Darstellung.

Aus der Matrix lässt sich erkennen, wie verschiedene Umwandlungsschritte von Kohlenstoff mit den verschiedenen Bilanzierungsoptionen in den THG-Inventaren abgebildet werden.

U2-N1 ist die am stärksten vereinfachte Bilanzierungsoption. In der Nutzungsphase liegt Kohlenstoff nur als C-1 vor. Alle Umsetzungsschritte des Kohlenstoffs werden neutral bilanziert: Die Verbrennung⁴⁸ als auch die anschließende Abscheidung von Kohlenstoff oder auch die Einbindung von Kohlenstoff in Produkte oder Energieträger. In der Endphase liegt Kohlenstoff ausschließlich als C-1 vor. Die Speicherung von Kohlenstoff wird demnach immer neutral bilanziert, eine Emission immer positiv (gemäß Bilanzierungsregeln).

Mit der Option U2-N1 kann ein nationales Emissionstotal mit einer kleinen Datenmenge bzw. wenigen Einträgen und einer einfachen Attribution bestimmt werden. Die C-Attribute müssen ab der Nutzungsphase nicht mehr mitverfolgt werden. Durch das System der Attribute muss auch der Ursprung des Kohlenstoffs (fossil, atmosphärisch) nicht berichtet werden.

Durch diese vereinfachte Betrachtung kann ein THG-Inventar auf Basis von Option U2-N1 nur wenig detaillierte Ergebnisse ausweisen. So können die erzeugten Emissionen (vor CCS) und die Menge des abgeschiedenen CO₂ nicht anhand der inventarisierten Werte berechnet werden (siehe auch folgendes Kapitel 9.4). Zudem ist keine Unterscheidung des Ursprungs des abgeschiedenen oder eingebundenen Kohlenstoffs möglich, weshalb technische Senken (z. B. BECCS oder DACCS) via Inventar nicht explizit ausgewiesen werden können. Negativemissionen, d. h. permanent gespeicherter Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs, können somit nur als Teil der Gesamtbilanz ausgewiesen werden aber nicht gesondert.

⁴⁸ Mit der Verbrennung ist noch nicht die Emission gemeint, welche erst in der Endphase stattfindet.

Die drei anderen Bilanzierungsoptionen können gegenüber der am stärksten vereinfachten Option U2-N1 weitere Informationen direkt via THG-Inventar ausweisen:

Option U1-N1 erfasst beide Attribute (C-1 und C-0) über die Nutzungs- und Endphase getrennt. Für die Nutzungsphase bedeutet das im Vergleich zur vereinfachten Option U2-N1, dass beide Attribute vorkommen. Die Bilanzierung ist aber weiterhin neutral, d. h. das nationale Emissionstotal wird mit einer kleinen Datenmenge bestimmt. Der entscheidende Unterschied betrifft die Endphase. Weil die Attribute nie gemischt werden, hat Kohlenstoff mit dem C-1-Attribut fossilen Ursprung und Kohlenstoff mit dem C-0-Attribut atmosphärischen Ursprung. Der Ursprung des Kohlenstoffs wird also mitgeführt. Wird Kohlenstoff mit C-0 in der Endphase gespeichert, entspricht die gespeicherte Menge den technischen Senken, die bei der Bilanzierungsoption U1-N1 zusätzlich zum nationalen Emissionstotal direkt via THG-Inventar ausgewiesen werden können.

Optionen U1-N4 und U2-N3 bilanzieren die Umwandlungsschritte in der Nutzungsphase detailliert, d. h. möglichst oft positiv oder negativ. Die beiden Attribute C-0 und C-1 wechseln sich in der Nutzungsphase ab, liegen jedoch in jedem Nutzungsschritt einheitlich vor. Das bedeutet, dass der Kohlenstoff wie in der vereinfachten Option U2-N1 in der Endphase nur als C-1 vorliegt und die technischen Senken nicht via THG-Inventar ausgewiesen werden können. In der Nutzungsphase ergeben sich aber durch die detaillierte Bilanzierung zusätzliche Informationen. Die Menge an erzeugten Emissionen (vor CCS) ausgewiesen werden. Ergänzend kann auch die Menge an abgeschiedenem Kohlenstoff (CCS; im Beispiel **U2-N3**) oder die Menge an in Produkten eingebundenem Kohlenstoff (im Beispiel **U1-N4**) direkt via Inventar ausgewiesen werden, je nachdem, welcher Prozess positiv bilanziert wird. Darüber hinaus unterscheiden sich die beiden Optionen lediglich in der Ursprungs- und Endphase, d. h. die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre negativ oder neutral bilanziert wird (was entsprechend den Bilanzierungsregeln auch Einfluss auf die Endphase hat).

Es zeigt sich, dass es mit unserem Regelwerk nicht möglich ist, Kohlenstoffpfade sowohl detailliert zu inventarisieren als auch die C-Attribute in der Nutzungsphase vollständig zu differenzieren. Der Grund ist, dass eine detaillierte Darstellung eine negative Bilanzierung von Abscheidung oder Einbindung erfordert und dieser Kohlenstoff sodann das C-1-Attribut hat. Daher ist es im Folgenden nicht mehr möglich, diesen von C-1 Kohlenstoff fossilen Ursprungs zu differenzieren. Ist eine detaillierte Inventarisierung mit differenzierten C-Attributen das Ziel, dann müsste der Ursprung des Kohlenstoffs über die ganze Kette nachverfolgt werden - unabhängig von der Bilanzierung.

9.4 Bedeutung der Bilanzierungsoptionen für Zielarchitekturen

Im Folgenden erweitern wir die bisherigen Überlegungen um eine weitere Ebene: die der Zielarchitekturen. Dabei nehmen wir Bezug auf ein vom Umweltbundesamt herausgegebenes Papier (vgl. Voß-Stemping et al. (2024)), welches einen Vorschlag für eine Zielarchitektur für Deutschland macht. Dieser Vorschlag umfasst drei Zielelemente:

- ▶ Ziele für sektorenbezogene THG-Minderungen
- ▶ Ziele für die Einbindung von Kohlenstoff in natürlichen Ökosystemen (natürliche Senken)
- ▶ Ziele für die technische Kohlenstoffbindung (technische Senken) zum Ausgleich der unvermeidbaren, residualen Emissionen.

Die Elemente zwei und drei sind inzwischen in Form von §3a und 3b zu natürlichen und technischen Senkenzielen im deutschen Bundes-Klimaschutzgesetz umgesetzt⁴⁹.

Eine aktuelle Veröffentlichung des UBA (Purr et al. (2025)) differenziert vier Kategorien:

- ▶ **Erzeugte THG (exklusive CCS):** Dies sind die Treibhausgase, die vor einer eventuellen Anwendung von CCS entstehen. Sie sind noch nicht emittiert und daher noch nicht als Emissionen zu verstehen.
- ▶ **Ausgestoßene THG-Emissionen (inklusive CCS):** Dies sind die Emissionen, die nach einer eventuellen Anwendung von CCS resultieren. Ohne CCS sind erzeugte THG und ausgestoßene THG-Emissionen identisch.
- ▶ **Natürliche Senken**
- ▶ **Technische Senken**

Im Folgenden untersuchen wir, inwieweit diese vier Kategorien unter den vorgeschlagenen Bilanzierungsoptionen aus den Inventardaten zu erfassen wären.

Erzeugte THG (exklusive CCS)

Nach aktuellem Verständnis muss in den Inventardaten erkennbar sein, welche Menge an fossilen Energieträgern verbrannt wurde und welche THG-Emissionen dadurch erzeugt wurden. Wichtig sind zwei Dinge: Erzeugte THG-Emissionen berücksichtigen ausschließlich THG-Emissionen fossilen oder geogenen Ursprungs. Zudem ist irrelevant, ob diese Emissionen tatsächlich in die Atmosphäre freigesetzt werden oder ob sie mit Hilfe von CCS-Technologien abgeschieden und permanent gespeichert werden.

Unter den heute geltenden Berichtsregeln können im Fall von CCS-Nutzung erzeugte THG-Emissionen nicht im Inventar abgebildet werden, da bereits innerhalb eines Sektors eine Verrechnung mit dem abgeschiedenen CO₂ erfolgt.

Von den vorgestellten fünf Bilanzierungsoptionen bietet nur Option U1-N2 die Möglichkeit, die erzeugten THG-Emissionen zu erfassen. Unter den Optionen U1-N4 und U2-N3 wird zwar die Verbrennung von fossilen Energieträgern positiv bilanziert. Allerdings findet keine Differenzierung statt zwischen synthetischen und fossilen Energieträgern, sodass diese nicht voneinander zu trennen sind.

Ausgestoßene THG-Emissionen (inklusive CCS)

Die ausgestoßenen THG-Emissionen lassen sich entweder direkt als Zahl aus dem Inventar ablesen oder – bei Kenntnis der fossilen Mengen, die mit Hilfe von CCS abgeschieden und gespeichert werden – aus den erzeugten THG-Emissionen berechnen. Wie bereits diskutiert liegen die erzeugten THG-Emissionen ausschließlich unter Option U1-N2 vor. Hier wird jedoch bei der Einspeicherung nicht differenziert nach Ursprung, weshalb die ausgestoßenen THG-Emissionen nicht ermittelt werden können. Unter Option U1-N1 werden jedoch direkt die ausgestoßenen THG-Emissionen, differenziert nach fossil und anderem Ursprung ausgewiesen.

⁴⁹ Die in § 3b des Bundes-Klimaschutzgesetzes vorgesehenen Ziele für technische Senken sind derzeit noch nicht quantitativ festgelegt.

Natürliche Senken

Zu natürlichen Senken kann hier keine Aussage getroffen werden, da diese nicht Inhalt des Berichts sind.

Technische Senken

Die Abbildung technischer Senken im Inventar stellt eine grundsätzlich andere Herausforderung an das Inventar als die erzeugten oder ausgestoßenen THG-Emissionen: die Herkunft des Kohlenstoffs muss bis zur finalen Einspeicherung des Kohlenstoffs rückverfolgbar sein. Dies ist, wie wir bereits in anderen Kontexten gesehen haben, ausschließlich unter Option U1-N1 gegeben. In allen übrigen Bilanzierungsoptionen werden spätestens im zweiten Nutzungsschritt Attribute verwendet, die sich teilweise von der Attribuierung im ersten Schritt unterscheiden.

Damit wird deutlich, dass technische Senken im Inventar nicht lediglich eine zusätzliche Kategorie bestehender Emissionslogiken darstellen, sondern eine eigenständige konzeptionelle Entscheidung erfordern: Entweder wird die Senkenwirkung strikt an die physische Herkunft einzelner Kohlenstoffflüsse geknüpft, was hohe Anforderungen an die Attributverfolgung über den gesamten Nutzungspfad hinweg mit sich bringt, oder sie wird auf einer stärker aggregierten Ebene abgebildet, bei der die individuelle Herkunft zugunsten einer konsistenteren, aber weniger differenzierten Inventarlogik in den Hintergrund tritt. Dieser Zielkonflikt prägt die Abbildungsfähigkeit technischer Senken in allen betrachteten Bilanzierungsoptionen. Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass es mit keiner Bilanzierungsoption möglich ist, direkt via Inventar gleichzeitig Informationen zu erzeugten Emissionen und CCS als auch zu technischen Senken auszuweisen. Option U1-N1 bietet zumindest die Möglichkeit, die ausgestoßenen THG-Emissionen und technische Senken zu identifizieren. Option U1-N2 liefert als einzige Option die erzeugten THG-Emissionen.

10 Bedeutung der Bilanzierungsoptionen für Territorialprinzip, nationale Inventare und Sektoren

Im Folgenden betrachten wir die Auswirkungen der in diesem Bericht vorgestellten Bilanzierungsoptionen auf unterschiedlichen Ebenen. Dazu nutzen wir erneut Beispiele. Das Augenmerk liegt in diesem Fall jedoch nicht wie bisher auf der Erfassung eines detaillierten Kohlenstoffpfads. Stattdessen betrachten wir verschiedene Länder mit besonderen Charakteristika (Kapitel 10.2) bzw. einzelne Sektoren (Kapitel 10.3). Wir zeigen auf, welche Auswirkungen die verschiedenen Bilanzierungsoptionen für die Inventare der Länder bzw. die Einträge einzelner Sektoren haben. Zu Beginn des Kapitels gehen wir kurz auf die Rolle des Territorialprinzips als Grundlage für zukünftige THG-Inventare ein (Kapitel 10.1).

Als Basis für die nachfolgenden Analysen (insbesondere Kapitel 10.2 und Kapitel 10.3) dient Tabelle 28. Sie fasst die Bilanzierungsoptionen zusammen, unter Berücksichtigung der verschiedenen Phasen (Ursprungsphase, Nutzungsphase, Endphase). Die Nutzungsphase ist untergliedert in eine mögliche Einbindung, die Verbrennung und eine mögliche Abscheidung. Die Endphase unterteilt sich in eine dauerhafte Speicherung oder die Freisetzung in die Atmosphäre. Nach einer Abscheidung erfolgt entweder die erneute Einbindung oder die dauerhafte Speicherung. Eine Verbrennung ohne Abscheidung führt zu einer Freisetzung in die Atmosphäre in der Endphase. Im Falle von Kohlenstoff fossilen Ursprungs entfällt in der ersten Nutzungsphase der Schritt der Einbindung.

Die Tabelle ist beispielsweise für die Option U1-N1 folgendermaßen zu lesen: die Zeilen 1 und 2 fassen die Bilanzierungsregeln für Kohlenstoffemissionen zusammen, abhängig von der Herkunft des Kohlenstoffs. Sowohl bei atmosphärischem /biogenem Kohlenstoff als auch bei fossilem Kohlenstoff erfolgt in der Ursprungsphase eine neutrale Bilanzierung. d. h. atmosphärischer oder biogener Kohlenstoff geht mit dem C-0-Attribut in die Nutzungsphase, fossiler Kohlenstoff mit einem C-1-Attribut. In der Nutzungsphase erfolgt ebenfalls in allen möglichen Schritten (Einbindung, Verbrennung, Abscheidung) eine neutrale Bilanzierung. d. h. das Attribut des Kohlenstoffs ändert sich dort nicht. Daraus ergibt sich für die Endphase: atmosphärisch/biogener Kohlenstoff (mit C-0-Attribut) muss bei einer Speicherung negativ bilanziert werden. Bei der Freisetzung in die Atmosphäre dagegen erfolgt eine neutrale Bilanzierung. Im Fall von fossilem Kohlenstoff (C-1-Attribut) erfolgt eine neutrale Bilanzierung bei Abscheidung und Speicherung. Bei einer Freisetzung muss diese positiv bilanziert werden.

Zur Vereinfachung ist in Rot (C-1-Attribut) bzw. Grün (C-0-Attribut) hinterlegt, welches Attribut der Kohlenstoff beim Verlassen des Schrittes aufweist. d. h. bei Option U1-N1 ist gut zu erkennen, dass Kohlenstoff atmosphärischen oder biogenen Ursprungs durchweg ein C-0-Attribut hat. Im Falle von Kohlenstoff fossilen Ursprungs weist bei dieser Option der Kohlenstoff immer ein C-1-Attribut auf.

Die anderen Optionen sind nach derselben Systematik erfasst. Zu erkennen ist, dass es dort aufgrund der angewendeten Bilanzierungsregeln zu Wechseln der Attribute kommt.

Tabelle 28: Bilanzierungsregeln und Kohlenstoffattribute in den verschiedenen Schritten der Wertschöpfungskette

		Ursprungs- phase	Nutzungsphase			Endphase	
			Einbindung	Verbren- nung	Abschei- dung	Speicherung (nach Abschei- dung)	Freisetzung (nach Verbren- nung ohne Abschei- dung)
U1- N1	Atmos- phärisch	+/-	+/-	+/-	+/-	-	+/-
	Fossil	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+
U1- N2	Atmos- phärisch	+/-	+/-	+/-	+/-	-	+/-
	Fossil	+/-	+/-	(⁵⁰ +) +/-	+/-	-	+/-
U1- N4	Atmos- phärisch	+/-	-	+	+/-	-	+/-
	Fossil	+/-	-	+	+/-	-	+/-
U2- N1	Atmos- phärisch	-	+/-	+/-	+/-	+/-	+
	Fossil	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+
U2- N3	Atmos- phärisch	-	+/-	+	-	+/-	+/-
	Fossil	+/-	+/-	+	-	+/-	+/-
+/-: neutrale Bilanzierung							
+: positive Bilanzierung							
-: negative Bilanzierung							
C-1-Attribut am Ende des Schritts							
C-0-Attribut am Ende des Schritts							

Quelle: Eigene Darstellung.

10.1 Rolle des Territorialprinzips

Bisher dient das Territorialprinzip als Leitprinzip zur Verortung von Emissionen in Länderinventaren. Nach dem Territorialprinzip ist ausschließlich entscheidend, in welchem Land die Emissionen ausgestoßen werden, d. h. CO₂ (und andere Emissionen) in die Atmosphäre gelangt (eine Abscheidung wird derzeit innerhalb der nationalen Inventare verrechnet). Ebenso müssen nach der Logik des Territorialprinzips Entnahmen aus der Atmosphäre physikalisch

⁵⁰ Bei erstmaliger Verbrennung erfolgt hier bei fossilem Kohlenstoff eine positive Bilanzierung, in den weiteren Verbrennungsschritten erfolgt dann eine neutrale Bilanzierung

zugeordnet werden, d. h. sie erfordern dort eine negative Bilanzierung, wo CO₂ aus der Atmosphäre entnommen wird. Tabelle 29 stellt die Bilanzierungsregeln im Sinne einer klaren Einhaltung des Territorialprinzips in den einzelnen Schritten dar.

Tabelle 29: Bilanzierungsregeln zur Umsetzung des Territorialprinzips

Option	Ursprung	Ursprungsphase	Nutzungsphase			Endphase	
			Einbindung	Verbrennung	Abscheidung	Speicherung	Freisetzung
Territorialprinzip	Atmosphärisch	-	+/-	+/-	+/-	+/-	+
Territorialprinzip	Fossil	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+

Quelle: Eigene Darstellung.

Vergleicht man Tabelle 29 mit den Einträgen in Tabelle 28, so zeigt sich, dass die vorgestellten Bilanzierungsoptionen in unterschiedlichem Maße geeignet sind, das dargestellte Territorialprinzip umzusetzen. Nur Option U2-N1 setzt alle Bilanzierungsschritte entsprechend dem Territorialprinzip um. Bei den übrigen Bilanzierungsoptionen kommt es zu Abweichungen:

- ▶ Bei allen U1-Optionen weicht die Erfassung in der Ursprungsphase für atmosphärischen Kohlenstoff vom Territorialprinzip ab.
- ▶ Bei U2-N3 erfolgt sowohl die Erfassung der Verbrennung als auch die Abscheidung, sodass sich in Summe über die Nutzungsphase bzw. Nutzungs- und Endphase auch hier das gleiche Bild analog zum Territorialprinzip ergibt. Unterschiede kann es auf der Sektorebene geben, je nach Zuordnung der Kategorie für Abscheidung.

Tabelle 30 fasst die Erkenntnisse zum Territorialprinzip zusammen.

Tabelle 30: Umsetzung des Territorialprinzips in den einzelnen Bilanzierungsoptionen nach Phasen

		Ursprungsphase	Nutzungsphase	Endphase
U1-N1	Atmosphärisch	Nein	Ja	Nein
	Fossil	Ja	Ja	Ja
U1-N2	Atmosphärisch	Nein	Ja	Nein
	Fossil	Ja	Nein	Nein
U1-N4	Atmosphärisch	Ja	Nein	Nein
	Fossil	Ja	Nein	Nein
U2-N1	Atmosphärisch	Ja	Ja	Ja
	Fossil	Ja	Ja	Ja
U2-N3	Atmosphärisch	Ja	Nein	Nein
	Fossil	Ja	Nein	Nein

Quelle: Eigene Darstellung.

Auch wenn nur eine Option geeignet ist, das Territorial-Prinzip vollumfänglich umzusetzen, nutzen wir dies nicht als Ausschluss-Kriterium für die übrigen Optionen.

10.2 Bilanzen für länderübergreifende Prozesse

In diesem Abschnitt diskutieren wir die Möglichkeit, dass einzelne Schritte der gesamten Wertschöpfungskette in unterschiedlichen Ländern stattfinden. Wir betrachten dazu drei Länder. Um die Auswirkungen für die involvierten Länder und ihre Inventare zu verstehen, haben wir exemplarisch festgelegt, welche Schritte der einzelnen Phasen in welchem Land erfolgen. Die drei Länder sind wie folgt charakterisiert:

- ▶ **Energieexporteur:** Unter einem Energieexporteur verstehen wir ein Land, das Energieträger erzeugt und diese in andere Länder exportiert. Bei einem Exporteur fossiler Energieträger erfolgt nur die Betrachtung der Inventar-Schritte, die sich von der bisherigen Bilanzierung unterscheiden. Im Kontext dieses Berichts zukünftig besonders relevant ist zudem der Fall, dass es sich um synthetisch erzeugte Energieträger handelt. Wir betrachten im Folgenden den Fall, dass das Land selbst über Abscheideanlagen verfügt und daher auch die Ursprungsphase abdeckt.⁵¹
- ▶ **Energieimporteur ohne Speicherkapazitäten:** Das zweite betrachtete Land kann weder fossile Energieträger fördern noch synthetische Energieträger zur Deckung der Nachfrage im Inland wirtschaftlich konkurrenzfähig erzeugen. Somit ist es (auch) zukünftig auf Importe von Energieträgern angewiesen. Zudem verfügt es nicht über eigene Speicherstätten, um abgeschiedenes CO₂ permanent zu speichern.
- ▶ **Speicherland:** Unter einem Speicherland verstehen wir ein Land, das über ein hohes Potential zur permanenten Speicherung von CO₂ verfügt. Neben ggf. eigenem CO₂ wird CO₂ aus anderen Ländern importiert, um es permanent zu speichern.

Die Auswirkungen lassen sich aus Tabelle 28 ablesen, indem ausschließlich die im Land anfallenden Schritte für die Bilanz berücksichtigt werden. Dies ist im Folgenden für die drei Länder textlich dargestellt. Wir betrachten zunächst den Fall der Nutzung eines fossilen Energieträgers bevor wir uns der Bilanzierung von synthetisch erzeugten Energieträgern zuwenden.

Fossiler Energieträger

Aufgrund der getroffenen Annahmen ändert sich die Bilanzierung der Ursprungsphase bei einem fossilen Energieträger nicht gegenüber der bisherigen Praxis. Entsprechend ergeben sich für einen fossilen Energieexporteur keine Veränderungen gegenüber heute. Für den Energieimporteur ohne Speicherkapazitäten sind die Spalten Verbrennung und Abscheidung der interessante Fall. Erfolgt keine Abscheidung nach der Verbrennung werden die Emissionen in allen Fällen analog zu heute erfasst. Im Falle einer Verbrennung mit anschließender Abscheidung resultiert in drei Fällen (U1-N1, U2-N1 und U2-N3) eine neutrale Bilanzierung für das abscheidende Land, also den betrachteten Energieimporteur ohne Speicherkapazitäten. In diesen drei Fällen ergibt sich für das Speicherland ebenfalls eine neutrale Bilanzierung wie sich aus Spalte Speicherung ablesen lässt. In den anderen beiden Fällen U1-N2 und U1-N4 ergibt sich dagegen für den Energieimporteur ohne Speicherkapazität eine positive Bilanzierung der

⁵¹ Ein zweiter Fall wäre ein Land, das ggf. CO₂ importiert, um die Energieträger herzustellen. Dieser einfachere Fall kann analog analysiert werden, indem die Spalte «Einbindung» betrachtet wird.

Nutzung des fossilen Energieträgers trotz Abscheidung des entstehenden CO₂. (wiederum durch Betrachtung der Spalten Verbrennung und Abscheidung) Dafür würde das Speicherland in diesem Fall für das Speichern des importierten CO₂ einen bilanziell negativen Eintrag im Inventar erhalten (vgl. Spalte Speicherung).

Synthetische Energieträger

Der Fall der synthetischen Energieträger ist deutlich komplexer. Daher betrachten wir die drei Länder separat. Tabelle 31 fasst die Erkenntnisse zusammen.

Energieexporteur

Der Energieexporteur deckt die beiden Schritte Ursprungsphase und Einbindung ab. Die beiden Spalten «Ursprungsphase» und «Einbindung» in Tabelle 28 müssen daher gemeinsam betrachtet werden. In diesem Beispiel ausschließlich relevant ist jeweils die Zeile «atmosphärisch». In den Fällen U1-N1 und U2-N2 ist die Gesamtbilanz aus den beiden Spalten neutral. Der Energieexporteur erhält also trotz der Entnahme des CO₂ aus der Atmosphäre und anschließenden Einbindung in einen Energieträger⁵² lediglich einen neutralen Inventareintrag.

In den Fällen U1-N4, U2-N1 und U2-N3 erfolgt jeweils eine negative Bilanzierung in einem der beiden Schritte. D. h. das Beispielland kann in diesen drei Fällen sein Inventar durch die Einbindung des Kohlenstoffs in einen zu exportierenden Energieträger aufbessern, auch dann, wenn es den Energieträger anschließend exportiert.

Energieimporteur ohne Speicherkapazitäten

Zur Betrachtung der Auswirkungen der verschiedenen Bilanzierungsoptionen müssen wir hier die Spalten «Verbrennung» und «Abscheidung» bzw. «Freisetzung» in Tabelle 28 betrachten. Die Summe aus Verbrennung und Freisetzung in die Atmosphäre von synthetischen Energieträgern wird in drei Optionen (U1-N4, U2-N1 und U2-N3) positiv bilanziert, d. h. die Nutzung dieser Energieträger wird im Inventar erfasst. In den übrigen Optionen (U1-N1 und U1-N2) dagegen werden diese Schritte neutral bilanziert und daher nicht im Inventar erfasst.

Die Verbrennung und nachfolgende Abscheidung (ohne heimische geologische Speicherung) wird dagegen nur in einer Option (U1-N4) positiv bilanziert. In den übrigen Fällen weist das Inventar des Beispiellandes hier in Summe keine positiven oder negativen Emissionen aus.

Für dieses Land ist also die Option U1-N4 besonders nachteilig, weil unabhängig von einer Abscheidung die Verbrennung der Energieträger bereits mit einer positiven Bilanzierung belegt ist. Unter den Optionen U2-N1 und U2-N3 kann die Verwendung der Energieträger durch eine Abscheidung bilanziell immerhin ausgeglichen werden. Unter den Optionen U1-N1 und U1-N2 dagegen werden unter keinen Umständen Emissionen aus der Verbrennung von synthetischen Energieträgern erfasst, solange der Kohlenstoff atmosphärischen Ursprungs ist. Unter Option U1-N1 würde aber die Verbrennung von synthetischen Energieträgern aus recyceltem fossilem Kohlenstoff bei anschließender Freisetzung positiv bilanziert werden. Unter dieser Option führt also die Einfuhr und Nutzung eines synthetisch hergestellten Energieträgers mit fossilem eingebundenem CO₂ ohne Abscheidung zu einem positiven Eintrag im Inventar des Landes.

⁵²Dies umfasst ggf. nicht nur Energieträger, sondern auch später zur Erzeugung von chemischen Produkten erzeugtes grünes Naphtha. An dieser Stelle erfolgt keine Vorfestlegung dazu, in welcher zeitlichen Nähe zur Einbindung ggf. eine Wiederfreisetzung erfolgt oder ob diese ggf. ganz verhindert werden kann, z. B. durch die Einlagerung von Kunststoffprodukten am Ende der Lebenszeit anstelle einer Verbrennung.

Speicherland

Um die Auswirkungen des Imports von CO₂ zu Speicherzwecken zu verstehen, ist es hinreichend die Spalte «Speicherung» in Tabelle 28 zu betrachten. In den drei Optionen U1-N1, U1-N2 und U1-N4 kommt es zu einer negativen Bilanzierung für das importierte CO₂. Im Falle von U1-N1 und U1-N4 ausschließlich für atmosphärisches importiertes und gespeichertes CO₂, im Falle von U1-N1 sogar für jegliches importiertes CO₂. Daraus ergibt sich für das Speicherland in diesen drei Optionen die Möglichkeit, eigene verbleibende THG-Emissionen durch die Speicherung von importiertem CO₂ durch einen negativen Eintrag im Inventar auszugleichen. Ggf. Kann dadurch sogar ein negatives Inventarergebnis erreicht werden, obwohl im Land selbst (vermeidbare) Emissionen verbleiben und der Beitrag zur Erzeugung dieser Negativemissionen entlang der Wertschöpfungskette eher gering ist (ausschließlich der letzte Schritt erfolgt inländisch).

Die Optionen U2-N1 und U2-N3 sehen hingegen eine neutrale Bilanzierung für die permanente Speicherung von CO₂ vor. Unter diesen beiden Optionen besteht somit nicht die Möglichkeit, das eigene Inventarergebnis durch den Import von CO₂ zu verändern. Allerdings besteht — zumindest aufgrund der Bilanzierungsregeln — auch kein Anreiz, CO₂ aus dem Ausland zu importieren und zu speichern.

Zusammenfassung

Wie die Darstellung in Tabelle 31 zeigt, entstehen in allen untersuchten Fällen ein negativer Eintrag oder mehrere positive oder negative Einträge im Inventar der betrachteten Länder. Unter Option U1-N4 können sowohl für das Speicherland als auch für den Energieexporteur negative Inventareinträge entstehen durch Speicherung bzw. die Produktion und den Export von synthetischen Energieträgern. Dafür ist der Energieimporteur ohne Speicherkapazitäten Inventar-seitig besonders belastet, weil unabhängig von einer Abscheidung des CO₂ die Nutzung eines synthetischen Energieträgers zu einem positiven Inventareintrag führt. Aus Inventar-Sicht für den Energieimporteur ohne Speicherkapazitäten zu präferieren sind dagegen die Optionen U1-N1 und U1-N2, bei denen die Nutzung der synthetischen Energieträger im Inventar nicht berücksichtigt werden. Der Import und die Speicherung des CO₂ durch das Speicherland wird negativ bilanziert. Der Energieexporteur dagegen sieht keine Effekte durch das Herstellen und Exportieren der Energieträger in seinem Inventar.

Tabelle 31: THG-Bilanzierung der Länderbeispiele unter der Annahme, dass entstehende CO₂-Emissionen abgeschieden werden

	U1-N1	U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
Energieexporteur	+/-	+/-	-	-	-
Energieimporteur ohne Speicherkapazitäten	+/-*	+/-	++	+/-	+/-
Speicherland	-	-	-	+/-	+/-

* gilt explizit nur für aus atmosphärischem Kohlenstoff hergestellte synthetische Energieträger, nicht für solche, die rezyklierten fossilen Kohlenstoff enthalten

Quelle: Eigene Darstellung.

10.3 Ergebnisse für ausgewählte Sektoren

Die folgende Analyse greift das Vorgehen von Kapitel 10.2 zu Ländern auf, betrachtet nun jedoch die Auswirkungen auf einzelne im Inventar erfasste Sektoren. Neben der Zugehörigkeit von einzelnen Schritten in der Ursprungs-, Nutzungs- und Endphase zu den Sektoren spielt hier außerdem auch die Zuordnung neuer Kategorien (vergleiche die CRT-Tabellen in den Anwendungsbeispielen) zu Sektoren eine Rolle. Insgesamt wurden in den Fallbeispielen vier neue Kategorien als echter Bestandteil des Inventars (also kein Memo-Item) vorgeschlagen:

- ▶ X.1 CO₂ captured
- ▶ X.2 CO₂ injected at storage site
- ▶ X.3 Direct Air Capture
- ▶ X.4 Carbon bound in products and fuels

Diese Kategorien wurden bisher bewusst keiner der existierenden Kategorien zugeordnet. Ihre Zuordnung wollen wir hier daher diskutieren.

Energiesektor (1.A.1.a Public electricity and heat production)

Der Sektor 1.A.1.a Public electricity and heat production ist gekennzeichnet durch den Einsatz von (fossilen und nicht-fossilen) Energieträgern sowie durch große Punktquellen, welche die Abscheidung von CO₂ erlauben. Für den Sektor relevant sind insbesondere die Spalten „Verbrennung“ und „Abscheidung“ bzw. „Freisetzung“ in Tabelle 28.

Im Falle eines fossilen Energieträgers gilt in allen Fällen, dass die Verbrennung mit anschließender Freisetzung des CO₂ einen positiven Inventareintrag zur Folge hat. Im Falle einer Abscheidung des entstehenden CO₂ ergeben sich positive Inventareinträge für den Sektor unter den Optionen U1-N2 und U1-N4. Bei Option U2-N3 ist der positive bzw. neutrale Sektoreintrag davon abhängig, ob die neu angelegte Kategorie X.1 Carbon captured dem Sektor zugeordnet wird (in dem Fall heben sich der positive und der negative Eintrag für den Sektor insgesamt auf) oder nicht (in dem Fall bleibt es bei einem positiven Inventareintrag für den Sektor). Die Optionen U1-N1 und U2-N1 führen immer zu einem neutralen Eintrag trotz der Nutzung eines fossilen Energieträgers.

Im Falle der Nutzung eines synthetischen atmosphärischen Energieträgers dagegen ist die Verbrennung und anschließende Freisetzung des CO₂ in drei der betrachteten Fälle mit einem positiven Inventareintrag verbunden: U1-N4, U2-N1 und U2-N3. In den anderen zwei Fällen ergibt sich ein neutraler Eintrag. Die Nutzung mit anschließender Abscheidung dagegen führt in den Optionen U1-N1, U1-N2 und U2-N1 zu einem neutralen Inventareintrag. Bei Option U2-N3 ist wiederum ausschlaggebend, ob die neu vorgeschlagene Kategorie X.1 Carbon captured dem Sektor zugeordnet wird (--> positiver und negativer Eintrag gleichen sich im Sektor-Total aus) oder ob die Kategorie anderweitig zugeordnet wird (--> positive Bilanzierung der Verbrennung). Unter Option U1-N4 kommt es unabhängig von der Zuordnung von X.1 Carbon captured zu einem positiven Inventareintrag.

Transport (1.A.3 Transport)

Der Sektor 1.A.3 unterscheidet sich vom Energiesektor darin, dass zwar ggf. weiterhin kohlenstoffhaltige Energieträger eingesetzt werden, dass sich aber auf Grund der vielen verteilten Emissionsquellen aktuell kein Konzept für eine CO₂-Abscheidung abzeichnet.

Entscheidend für die Gesamtbilanz des Sektors ist daher ausschließlich die Kombination der Spalten «Verbrennung» und «Freisetzung» in Tabelle 28.

Die Nutzung eines fossilen Energieträgers führt demnach immer zu einer positiven Bilanzierung. Die Nutzung eines synthetischen atmosphärischen Energieträgers führt in den Optionen U1-N1 und U1-N2 zu einem neutralen Sektoreintrag. In den drei übrigen Optionen würde sich trotz der Tatsache, dass atmosphärisches CO₂ freigesetzt wird ein positiver Sektoreintrag ergeben.

Industrie (1.A.2 Manufacturing Industries and Construction bzw. 2 Industrial processes and product use)

Der Sektor Industrie gleicht in weiten Teilen wiederum dem Beispiel des Energiesektors. Dies gilt insbesondere auch für die Abscheidung von Prozessemissionen, die Kategorie 2 zugeordnet sind. Hinzu kommt jedoch die Möglichkeit der Einbindung von CO₂ in Anlagen der chemischen Industrie. Insofern kommt in der Betrachtung zu den Spalten „Verbrennung“, „Abscheidung“ und „Freisetzung“ noch die Spalte „Einbindung“ hinzu.⁵³

Die Verbrennung mit anschließender Freisetzung von fossilen Energieträgern führt auch hier immer zu einem positiven Inventareintrag. Verbrennung und Abscheidung von fossilen Energieträgern mit anschließendem Verlassen des Sektors führt zu positiven Einträgen unter den Optionen U1-N2 und U1-N4. Die drei übrigen Optionen führen hier zu neutralen Einträgen. Interessant (und neu) sind die Fälle, in denen es zu einer Einbindung von CO₂ kommt. Unter Option U1-N4 führt diese Einbindung zu einer negativen Bilanzierung und kann daher das Sektorergebnis beeinflussen sofern die betreffende Kategorie X.4 Carbon bound in products and fuels dem Sektor zugeordnet wird. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass nicht unbedingt die gleiche Menge CO₂, im Sektor verbrannt wird, auch wieder eingebunden wird. Es wird in der Tendenz also nicht zu sich ausgleichenden Mengen an bei der Verbrennung entstehendem CO₂ und eingebundenem CO₂ kommen.

Im Falle eines synthetischen atmosphärischen Energieträgers ist die Situation etwas anders. Optionen U1-N1, U1-N2 und U2-N1 liefern im Falle einer Abscheidung ausschließlich neutrale Bilanzierungsschritte. Im Falle einer Freisetzung des CO₂ liefert die Option U2-N1 eine positive Bilanzierung, die beiden anderen Optionen behalten ihre durchgängig neutrale Bilanzierung.

Interessanter sind die Optionen U1-N4 und U2-N3. Bei U1-N4 erfolgt die negative Bilanzierung bei der Einbindung; bei U2-N3 erfolgt die negative Bilanzierung bereits bei der Abscheidung. Interessant ist dies aus zwei Gesichtspunkten: Erstens wäre aus Sicht des Sektors eine Zuordnung der relevanten Anteile der neu zu schaffenden Kategorien (X.1 und X.2 bei U2-N3 oder X.6 bei U1-N4) zu Sektor 1.A.2 interessant, um die negativen Einträge verrechnen zu können. Zweitens sind auch hier wieder die Mengen auf der Abscheideseite und auf der Einbindeseite nicht deckungsgleich. So lange in der chemischen Industrie große Teile an fossilen Energieträgern eingesetzt werden, ist davon auszugehen, dass die Menge an CO₂, die abgeschieden werden kann, größer ist als die Menge an CO₂, die im Anschluss auch eingebunden wird (aus Kostengründen). In diesem Fall wäre für die Bilanz des Sektors Option U2-N3 vorteilhafter. Eine Umstellung hin zu nicht-kohlenstoff-haltigen Energieträgern (Strom, Wasserstoff) kann langfristig allerdings dazu führen, dass die Menge an eingebundenem CO₂ größer wird als die Menge an abgeschiedenem CO₂. Dann wäre Option U1-N4 für die Bilanz des Sektors vorteilhafter.

⁵³ Wir vernachlässigen hier, dass es in anderen Teilen des Industriesektor zu verbleibenden Restemissionen kommen kann. Diese sind – bilanziell – weitgehend in Kategorie 2 der THG-Inventare erfasst.

Eine weitere Besonderheit des Industriesektors besteht in der Aufteilung der Emissionen auf zwei Sektoren innerhalb des Inventars: 1.A.2 Manufacturing Industries and Construction enthält die energie-bedingten Emissionen. 2. Industrial processes and product use beinhaltet die Prozessemissionen sowie Emissionen aus der Produktnutzung (z. B. Emissionen aus Lacken und Farben, aus Kerzen und Schmiermitteln oder aus dem medizinischen oder Lebensmittelbereich). Hier ist generell relevant zu klären, ob die Einspeicherung von CO₂ in Produkten ggf. eher unter Sektor 2 berichtet würde. Dies wird bereits im Fall der Harnstoffherstellung so gehandhabt. Dort wird – in integrierten Prozessen – Ammoniak mit vorher in der Prozesskette freigesetztem CO₂ zu Harnstoff verarbeitet. Die innerhalb dieser chemischen Prozesskette entstehenden und wieder eingebundenen CO₂-Emissionen werden in Sektor 2 verrechnet. Die Abscheidung von energiebedingten Emissionen wäre dagegen klar dem Sektor 1.A.2 zuzuordnen.

Im Falle von U2-N3 ergeben sich die gegenläufigen Effekte darüber hinaus nur im Falle der erneuten Abscheidung, nicht aber bei einer Freisetzung. Bei U1-N4 ist das Entstehen der oben genannten Effekte dagegen unabhängig von Abscheidung oder Freisetzung.

Umwandlung (1.A.1.b Petroleum refining + 1.A.1.c Manufacture of solid fuels and other energy industries)

Der Umwandlungssektor umfasst heute die Umwandlung von fossilen Energieträgern. Perspektivisch ist zu überlegen, ob Umwandlungsprozesse zur Erzeugung von synthetischen Energieträgern ggf. ebenfalls dort bilanziert werden sollen oder ob dafür alternative Kategorien geschaffen werden. Die Einbindung von solchen neuartigen Umwandlungsprozessen würde es dem Sektor ermöglichen ggf. trotz weiter stattfindender fossiler Umwandlungsprozesse bilanziell THG-neutral zu werden, wenn die Einbindung von nicht-fossilem Kohlenstoff dort miterfasst würde. Dies würde unter Option U1-N4 ermöglicht werden.

Tabelle 32 fasst die Ergebnisse für die verschiedenen Sektoren zusammen. Die Tabelle weist die möglichen Inventar-Einträge aus, die sich aus der Nutzung von synthetischen Energieträgern sowie deren Abscheidung bzw. Einbindung ergeben können (die Nutzung fossiler Energieträger steht hier nicht im Fokus, ebenso der Fall ohne Abscheidung – beide sind hier daher nicht betrachtet). Unter drei Optionen (U1-N1, U1-N2 und U2-N1) erhalten alle betrachteten Sektoren einen neutralen Eintrag aus der Nutzung von synthetischen Energieträgern. Die Option U1-N4 verhindert in zwei Fällen (Energie und Transport), dass Sektoren bilanziell neutral werden können. Hier verbleiben auf Grund der Anrechnungsregelungen bei verbleibender Verwendung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern (auch wenn diese synthetisch aus atmosphärischem Kohlenstoff hergestellt wurden) positive Einträge. Gleichzeitig können zwei andere Sektoren (Industrie und Umwandlung) bilanziell negative THG-Einträge erzeugen. Das heißt, hier kann die negative Bilanzierung von eingespeichertem CO₂ in Summe zu einem negativen THG-Eintrag führen. Im Falle von U2-N3 können je ein Sektor nicht neutral werden (Transport) bzw. einen negativen THG-Eintrag erreichen (Industrie). Während für Umwandlung ebenfalls keine Einschränkungen hinsichtlich dieser Option bestehen, kann der Energiesektor nur unter besonderen Zuordnungsregeln für neu zu schaffende Kategorien Neutralität erzielen.

Tabelle 32: Sektorbeispiele und ihre Inventar-Einträge bei Einbindung, Verbrennung und Abscheidung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern

	U1-N1	U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
Energie (1.A.1.a)	Neutral	Neutral	Positiv	Neutral	Möglicherweise neutral*
Transport (1.A.3)	Neutral	Neutral	Positiv	Neutral	PositivPos
Industrie (1.A.2)	Neutral	Neutral	Möglicherweise negativ**/**	Neutral	Möglicherweise negativ**/**
Umwandlung (1.A.1b + 1.A.1.c)			Möglicherweise negativ****	Neutral	NeutralNeu

* bei entsprechender Zuordnung von X.1 (CO₂ captured) und X.2 CO₂ (injected at storage site)

** Berücksichtigung von Einbindung bzw. Abscheidung erlaubt negative THG-Bilanz im Sektor Chemie

*** bei entsprechender Zuordnung von X.4 (Carbon bound in products and fuels)

**** Berücksichtigung von Einbindung erlaubt negative THG-Bilanz im Umwandlungssektor

neutrale Bilanzierung

positive Bilanzierung

neutrale Bilanzierung unter Voraussetzungen möglich

bilanziell negatives THG-Ergebnis möglich

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Zuordnung der neu zu schaffenden CRT-Einträge kann wie oben gezeigt Auswirkungen auf die THG-Bilanz eines Sektors haben. Tabelle 33 zeigt die neu zu schaffenden CRT-Einträge und in welchen Bilanzierungsoptionen sie benötigt werden.

Von den vier neu vorgeschlagenen Einträgen sind zwei relativ unabhängig zu bestehenden CRT-Kategorien: X.2 CO₂ injected at storage site und X.3 Direct Air Capture⁵⁴. In beiden Prozessschritten fallen ggf. energie-bedingte Emissionen an, die unter Kategorie 1 zuzuordnen wären. Allerdings können – analog zum Vorgehen im Landwirtschaftsbereich – die nicht-energie-bedingten Emissionen in einer anderen Kategorie berichtet werden, da kein direkter Zusammenhang zwischen den anfallenden energie-bedingten Emissionen und der Abscheidung bzw. Einspeicherung besteht. Gleichzeitig wäre ein Gegenrechnen im Energiesektor nur bedingt zu rechtfertigen wegen des fehlenden Bezugs zu eben diesem Sektor, insbesondere im Falle der direkten Luftabscheidung, aber auch im Falle der Speicherung, die sowohl Emissionen aus CRT-Kategorie 1 als auch aus CRT-Kategorie 2 enthalten kann. In diesem Fall wäre eine Aufnahme entweder als neu zu schaffende siebte CRT-Kategorie oder als Teil der bereits bestehenden CRT-Kategorie 6 anzudenken.

⁵⁴ Die Benennung der Kategorie orientiert sich hier an den in diesem Bericht berücksichtigten Möglichkeiten zur Gewinnung von atmosphärischem Kohlenstoff, die weitgehend auf Direct Air Capture beschränkt wurde. Grundsätzlich stehen auch andere Möglichkeiten der Abscheidung zur Verfügung wie Direct Ocean Capture, die aber in der Entwicklung noch nicht so weit vorangeschritten sind. Bei der endgültigen Benennung der Kategorie sollte aber ggf. darauf geachtet werden, dass sie so breit erfolgt, dass alle relevant erscheinenden Verfahren damit abgedeckt sind.

Tabelle 33: Notwendigkeit neuer CRT-Einträge nach Bilanzierungsoptionen

	U1-N1	U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
X.1 CO₂ captured					Alles
X.2 CO₂ injected at storage site	Atmosphärisch	Alles	Alles		
X.3 Direct Air Capture				Atmosphärisch	Atmosphärisch
X.4 Carbon bound in Products and fuels			Alles		

Die Einträge in der Tabelle bezeichnen den Ursprung des in den Kategorien zu erfassenden CO₂

Quelle: Eigene Darstellung.

Anders sieht es bei den beiden Kategorien X.1 CO₂ captured und X.4 Carbon bound in products and fuels aus. Hier ergibt sich durchaus ein enger inhaltlicher Bezug zu den Emissionen aus den CRT-Kategorien 1 und 2. Insbesondere bei X.1 CO₂ captured sollte die Abscheidung direkt der CRT-Kategorie zugeordnet werden, in der die Abscheidung erfolgt, d. h. unter den energiebedingten oder den Prozessemissionen erfasst werden. Die Zuordnung könnte analog zu den bestehenden Regeln für die Zuordnung von Emissionen zu CRT-Kategorie 1 und 2 erfolgen, d. h. anteilig außer es ist aufgrund der technologischen Beschaffenheiten von etwas anderem auszugehen. Entsprechend würden Einträge – die derzeit als Spalte bereits in den Erfassungstabellen enthalten sind – als eigenständige Einträge in gesonderten Zeilen ausgewiesen werden. Die Aufnahme der Werte in Zeilen erhöht dabei deutlich die Transparenz gegenüber dem Status Quo.

Schwieriger ist die Zuordnung von Eintrag X.4 Carbon bound in products and fuels. Einerseits erfolgt die Einbindung im Rahmen eines chemischen Prozesses – vergleichbar mit der Einbindung von CO₂ in Harnstoff. Andererseits erlaubt die Einbindung wiederum das Entstehen neuer weitgehend energiebedingter Emissionen bei der Verbrennung der Produkte am Ende der Lebensdauer. Dies lässt sich jedoch nicht eindeutig nur den energiebedingten Emissionen zuordnen denkt man z. B. an die Herstellung von Schmiermitteln. Außerdem erfolgt die Freisetzung nicht unbedingt im Industriesektor (Kategorie 1.A.2), sondern ggf. unter Kategorie 1.A.1 oder auch unter Kategorie 1.A.3 Transport. Und nicht zuletzt ist auch die Herkunft des eingebundenen CO₂ nicht klar einer Kategorie zuzuordnen, sondern kann mindestens aus den Kategorien 1.A.1, 1.A.2 und 2 stammen. Vor diesem Hintergrund sollte am ehesten über die Schaffung einer neuen Kategorie nachgedacht werden bzw. eine Zuordnung unter 6. Others verfolgt werden.

Angesichts der Tatsache, dass drei der vier neu vorgeschlagenen Einträge (X.2, X.3 und X.4) in eine neu zu schaffende Kategorie im Kontext von zirkulären Kohlenstoffflüssen eingebunden werden könnten, scheint vieles für die Schaffung einer solchen Kategorie zu sprechen.

Gleichzeitig sollte aber berücksichtigt werden, dass max. 2 dieser drei Einträge gleichzeitig innerhalb einer Bilanzierungsoptionen benötigt werden. Dies würde eher für eine Einordnung unter 6. Others sprechen, um den Aufwand zu begrenzen. Klar ist in allen drei Fällen, dass eine Zuordnung zu einer anderen bestehenden CRT-Kategorie als CRT-Kategorie 6 eher verwirrend wäre.

11 Diskussion der Bilanzierungsoptionen

Welche Schlussfolgerungen lassen sich nun aus diesen Untersuchungen ableiten? Tabelle 34 fasst die verschiedenen in den Kapiteln 9 und 10 betrachteten Aspekte zusammen.

Anzumerken ist hierzu, dass mit den Varianten der U1 Bilanzierung das heutige Biomasseprivileg aufrechterhalten werden und zudem die Gleichbehandlung mit atmosphärischem Kohlenstoff sichergestellt werden kann. Für alle Varianten der U2 Bilanzierung wäre das Biomasseprivileg aufzuheben, da andernfalls eine Ungleichbehandlung von atmosphärischem Kohlenstoff und biogenem Kohlenstoff aus mehrjähriger Biomasse (Holz) vorgenommen würde. Ein C-1 Attribut wäre anzuwenden wie in Kapitel 4 vorgeschlagen. Die Fragen, welche Auswirkungen eine Ungleichbehandlung oder eine Abschaffung des Biomasseprivileg nach sich ziehen würde, wird hier nicht weiterverfolgt, sollten jedoch an anderer Stelle systematisch diskutiert werden.

Tabelle 34: Überblick über die Charakteristika der betrachteten Bilanzierungsoptionen

	U1-N1	U1-N2	U1-N4	U2-N1	U2-N3
Kompakt vs. Detailliert	kompakt	teilweise kompakt	detailliert	kompakt	detailliert
Einheitlich vs. Differenziert	differenziert	Mischform	einheitlich	einheitlich	einheitlich
Erzeugte Emissionen darstellbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar
Ausgestoßene Emissionen darstellbar	Erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar
Technische Senken direkt darstellbar	Erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar
Territorialprinzip	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Nicht erfüllt/erkennbar	Erfüllt/erkennbar
Erfüllt/erkennbar					
Teilweise erfüllt/erkennbar					
Nicht erfüllt/erkennbar					

Quelle: Eigene Darstellung.

Basierend auf dieser Tabelle 34 und aufbauend auf den Analysen fassen die folgenden Punkte die relevanten Erkenntnisse aus den vorliegenden Arbeiten zusammen:

- Zunächst soll mit Blick auf die Zielsetzung des Projektes auf Folgendes hingewiesen sein: alle hier vorgestellten und untersuchten Bilanzierungsoptionen sind geeignet, um die in Duscha et al. 2025 identifizierten Fehlstellen zu schließen. Die vorgestellten Optionen unterscheiden

sich dabei aber z. T. deutlich in der Herangehensweise. Im Folgenden werden dafür die untersuchten Ansätze durchgegangen und es wird auf Basis der Untersuchungen dargestellt, welche der vorgeschlagenen Optionen besonders vielversprechend scheinen.

- U1-N1 scheint in mehrerlei Hinsicht eine präferierte Option zu sein, da sie (i) eine kompakte Inventarisierung erlaubt, die die Freisetzung von fossilem Kohlenstoff erfasst und (ii) entsprechend in der Lage ist, technische Senken zu identifizieren. Die Erstellung eines solchen Inventars erfordert allerdings genaue Kenntnisse über die Kohlenstoffflüsse entlang der gesamten Nutzungskette. Der Ursprung des Kohlenstoffs – hier untersucht für fossil und atmosphärisch – muss jederzeit nachverfolgbar bleiben. Messverfahren zur Identifikation. Messverfahren zur Identifikation der Kohlenstoffherkunft existieren zwar für biogenen Kohlenstoff, jedoch nicht für atmosphärischen Kohlenstoff. Eine Umsetzung für biogenen Kohlenstoff wiederum ist teuer und aufwändig. Der Aufwand ergibt sich hierbei aus den hohen Anforderungen an Erhebung, Nachverfolgung und Verifikation der Kohlenstoffherkunft über den gesamten Nutzungspfad hinweg, welcher zusätzlich mit hohen Kosten verbunden ist. Entsprechend müsste bei der Datenbeschaffung für die Inventare in jedem Fall auf statistische Verfahren zurückgegriffen werden, um die Menge und Herkunft von im Kreis geführten Kohlenstoff abzubilden. Die vorgestellte Produkte-Pool-Lösung (Kapitel 8.3.1) könnte als Näherung herangezogen werden. Auch sie erfordert aber einen nicht unerheblichen Aufwand, um die zugrundeliegenden Daten regelmäßig (d. h. mind. jährlich) zu erfassen. In welchem Detailgrad dies vor dem Hintergrund von globalen Wertschöpfungsketten in einem industrialisierten Land wie Deutschland überhaupt zu realisieren wäre, bleibt zu diskutieren. Sicher ist aber: je höher der gewählte Detailgrad für die Abbildung des Produkte-Pools, umso höher werden Unsicherheiten in Bezug auf Verfügbarkeit und Qualität der verwendeten Datenset. Neben der Frage der Umsetzbarkeit im internationalen Kontext steht dabei auch die Frage im Zentrum, inwieweit eine Option mit zwar geringerer Detailtiefe, die gleichzeitig aber auch geringeren Unsicherheiten unterliegt, nicht insgesamt gesehen zu besseren Ergebnissen führt. Hier gilt es, gewissermaßen das globale Optimum der Datenerfassung zwischen Detailtiefe und Unsicherheit der Daten unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu finden. Schließt man Option U1-N1 aufgrund der Datenanforderungen als nicht praktikabel aus, so stehen nur noch Bilanzierungsoptionen zur Verfügung, bei denen in gewissem Umfang die Kohlenstoffherkunft vereinfacht mitgeführt wird. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal der verbliebenen Optionen ist der Detailgrad der Erfassung von Kohlenstoffpfaden. Dabei muss grundsätzlich entschieden werden, ob eine **möglichst kompakte Abbildung der Kohlenstoffpfade oder eine sehr detaillierte Erfassung möglichst vieler einzelner Kohlenstoffflüsse** in den CRT-Tabellen erfolgen soll. Die kompakte Inventarisierung legt den Fokus auf Freisetzung in die Luft bzw. Einspeicherung. Die detaillierte Inventarisierung dagegen zeigt auf in welchen Schritten jeweils noch Kohlenstoff zum Einsatz kommt und schafft ggf. Gegenpositionen, um die Nicht-Freisetzung durch Abscheidung kenntlich zu machen.
- Sollte der **Fokus stärker auf der Nutzung von Kohlenstoff** liegen, also eine detaillierte Inventarisierung präferiert werden, bleiben die Optionen U1-N4 und U2-N3 zur Wahl.

Aus der Kombination von detaillierter Inventarisierung und einheitlicher C-Attribution sind die Anforderungen an die Datenerhebung geringer. Zwar müssen alle eingesetzten Energieträger für alle Kohlenstoffflüsse berichtet werden. Allerdings erlaubt die einheitliche

C-Attribution einen Verzicht auf die Unterscheidung zwischen Kohlenstoff atmosphärischen und fossilen Ursprungs.

U2-N3 zeichnet sich zusätzlich dadurch aus, dass eine gewisse Nähe zur bisherigen Praxis besteht und das Territorialprinzip darin umgesetzt ist. Gleichwohl müsste dafür das Biomasseprivileg aufgehoben werden oder eine separate Bilanzierung von mehrjähriger Biomasse durchgeführt werden. Die Auswirkungen dessen wurden in diesem Bericht nicht diskutiert. Ein Effekt des Territorialprinzips ist dabei, dass Inverkehrbringer von kohlenstoffhaltigen, synthetischen Energieträgern, die atmosphärischen Kohlenstoff abscheiden und einbinden, negative Inventareinträge erzielen. Gleichzeitig kann Inventar-seitig der Transportsektor (insbesondere der internationale Verkehr) keine ausgeglichene THG-Bilanz erzielen, solange kohlenstoffhaltige Energieträger eingesetzt werden und die resultierenden Emissionen nicht über Abscheidung aufgefangen werden können. Der Industriesektor wiederum könnte bei entsprechender Zuordnung neuer Kategorien in den CRT-Tabellen eine negative THG-Bilanz ausweisen (auch wenn wie in Kapitel 10.3 diskutiert, diese Zuordnung nicht unbedingt zu empfehlen ist). Die Option benötigt zwei neuen Kategorien: X.1 CO₂ captured enthält Werte, die heute bereits in einer Spalte der CRT-Tabellen berichtet werden müssen, wenn sie aus dem Inventar herausgerechnet werden sollen. Insbesondere zu Transparenzzwecken empfehlen wir hier die Aufnahme als separate Kategorie. Zusätzlich müsste eine weitere neue Kategorie für die Erfassung von aus der Luft direkt abgeschiedenem CO₂ geschaffen werden (hier X.3 Direct Air Capture).

Auch U1-N4 garantiert eine detaillierte und einheitliche Bilanzierung, ist aber die weniger zu favorisierende Option: Neben der fehlenden Nähe zum heutigen Vorgehen und einem starken Abweichen vom Territorialprinzip ergibt sich auch aus Länder- und Sektorensicht eine deutliche Ungleichheit.

Grundsätzlich ist die Wahl einer detaillierten Erfassung mit deutlich mehr Reporting von Daten verbunden. Dies steigert die Möglichkeit, dass passende Daten für die nationale oder Europäische Zielarchitektur in den Inventaren enthalten sind und zur Berechnung von Zielgrößen verwendet werden können.

- Eine kompakte Inventarisierung fokussiert dagegen auf die **Erfassung der Freisetzung**. Insbesondere Option U2-N1 ist hier geeignet, aber auch Option U1-N2 erlaubt zumindest einen in Teilen kompakte Inventarisierung. U1-N2 kombiniert die kompakte Inventarisierung mit einer zumindest in Teilen differenzierten C-Attribution, während U2-N1 eine einheitliche C-Attribution nutzt. Die teilweise differenzierte C-Attribution bedeutet dabei einen höheren Aufwand für U1-N2 bei der Datenerfassung. Bereits in Kapitel 9.4 wurde geschlussfolgert, dass Option U1-N2 gegenüber anderen Optionen keine Vorteile bzgl. der für die Analyse definierten Grundsätze bietet. Allerdings erlaubt U1-N2 im Gegensatz zu U2-N1 eine Aussage darüber, in welchen Ländern fossiler Kohlenstoff in den Kreislauf eingespeist wird. Sie liefert als einzige Option eine Ausweisung der erzeugten THG-Emissionen (vgl. auch Kapitel 10.2).

Auf Sektorebene ermöglichen beide Optionen ausgeglichene Einträge auch bei Nutzung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern. Auch aus Länderperspektive sind beide Optionen vergleichbar. Der Unterschied liegt ausschließlich darin, ob die negative Bilanzierung bei Abscheidung aus der Luft (U2-N1) oder bei der dauerhaften Speicherung (U1-N2) erfolgt.

Dadurch wird der negative Bilanzeintrag zwischen Energieexporteur und Speicherland verschoben.

Auch auf Ebene der CRT-Tabellen gibt es wenig Unterschiede: in beiden Fällen müsste eine neue Kategorie eingefügt werden, entweder zur -nicht ausschließlich als Memo-Item – Erfassung der dauerhaften Speicherung oder zur Erfassung der Abscheidung aus der Atmosphäre.

Nicht bzw. nur am Rande in die Diskussion eingegangen sind die Ergebnisse aus den Kapiteln 10.2 und 10.3 zu länderübergreifenden Prozessen und Ergebnissen für ausgewählte Sektoren. Dies hat zwei Gründe: Einerseits beruhen beide Kapitel stark auf ausgewählten Beispielen. Andererseits ist eine klare Präferenz sehr stark von der jeweiligen Länder- bzw. Sektor-Perspektive abhängig. Tabelle 31 und Tabelle 32, welche die Ergebnisse aus Kapitel 10.2 und 10.3 zusammenfassen, sind aber für eine abschließende Bewertung – und insbesondere eine Einordnung auf politischer Ebene – ebenfalls herangezogen werden. Dies ist jedoch nicht Aufgabe dieses Berichts.

Ein separates Thema, das wir in Kapitel 4 des Berichts behandelt haben, ist die Frage, wie die Nutzung von Biomasse im THG-Inventar gehandhabt werden sollte. Derzeit wird deren Nutzung (vor allem Verbrennung) neutral bilanziert (Biomasse-Privileg). Die implizite Annahme für dieses Vorgehen ist, dass im LULUCF-Sektor eine Biomasseabnahme durch Nutzung berücksichtigt wird, falls Biomasse durch die Entnahme zur Nutzung abnimmt. Gleichzeitig sollte sichergestellt werden, dass die Nutzung von Biomasse nur in dem Maße erfolgt, wie ihre nachhaltige Verfügbarkeit gewährleistet ist. Vor diesem Hintergrund kann eine neutrale Bilanzierung der Nutzung von Biomasse im THG-Inventar nur als vereinfachende Annahme verstanden werden, deren Gültigkeit nicht für alle Anwendungsfälle und insbesondere nicht unter global sinkenden Biomassebeständen als generell gegeben vorausgesetzt werden kann. In Kapitel 4 haben wir auch mögliche Optionen vorgestellt, das Biomasse-Privileg abzuschaffen und die Nutzung von Biomasse im Energiesektor der Nutzung fossiler Energieträger gleichzusetzen.

Dabei zeigt sich, dass lediglich Option 1 grundsätzlich umsetzbar erscheint, in welcher für Biomasse zusätzliche Bilanzierungen eingeführt werden, deren Effekte sich für das nationale Total gegenseitig aufheben. Die weitergehenden Optionen 2 und 3 sind entweder mit erheblichen methodischen Komplexitäten verbunden oder führen zu systematischen Verzerrungen der ausgewiesenen Emissionen und sind daher nicht empfehlenswert. Ist hingegen, eine nachhaltige Nutzung von Biomasse sicherzustellen. Dies hat allerdings keinen direkten Bezug zum Regelwerk der THG-Inventare, sondern muss im Regelwerk der Nutzung verankert werden (zum Beispiel in der EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (RED III) im Bereich Bioenergie).

Bei einer Beibehaltung des Biomasse-Privilegs ergibt sich allerdings eine weiterführende Frage: Sowohl im Fall von Biomasse als auch im Fall von direkt abgeschiedenem CO₂ aus der Atmosphäre handelt es sich um atmosphärischen Kohlenstoff. Daher kann man gut argumentieren, dass beide Ursprünge im Inventar gleichbehandelt werden sollten. Eine solche Gleichbehandlung hätte jedoch zur Folge, dass die derzeitige Sonderstellung von Biomasse im Inventar nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern in Relation zu anderen Formen der Entnahme von atmosphärischem Kohlenstoff gesetzt werden muss. Daraus würden sich dann wiederum Anforderungen an die zu wählenden Bilanzierungsoptionen ergeben, insbesondere hinsichtlich der Frage, in welchem Schritt eine negative Bilanzierung erfolgt und wie früh im Kohlenstoffpfad eine Vereinheitlichung der Attribute vorgenommen wird.

12 Ausblick

Die vorliegenden Arbeiten verstehen sich als ein erster systematischer Beitrag zu Möglichkeiten für eine zukünftige konsistente Erfassung von zirkulären Kohlenstoffflüssen in nationalen THG-Inventaren. Sie zeigen anhand von konkreten Beispielen, dass verschiedene Bilanzierungsoptionen grundsätzlich geeignet sind, die identifizierten Fehlstellen zu adressieren. Gleichzeitig sind sie jedoch mit spezifischen konzeptionellen und praktischen Zielkonflikten verbunden. Vor diesem Hintergrund ergeben sich nach wie vor mehrere offene Fragestellungen, die in zukünftigen Arbeiten weiter vertieft werden können.

Ein zentraler weiterer Forschungsbedarf betrifft die konsistente Behandlung von ursprünglich atmosphärischem Kohlenstoff im Inventar. Die Analysen zu CCU/ CCS sowie zu Biomasse haben gezeigt, dass das heutige Biomasse-Privileg bei der Suche nach einer einheitlichen und gleichbehandelnden Inventarlogik zunehmend zu Spannungen führt. Insbesondere ist offen, unter welchen Bedingungen Biomasse, direkt aus der Atmosphäre abgeschiedenes CO₂ und andere Formen der CO₂-Entnahme im Inventar gleichbehandelt werden sollen und welche Konsequenzen dies für die Wahl geeigneter Bilanzierungsoptionen hätte.

Zusätzlich besteht weiterer Klärungsbedarf hinsichtlich des angemessenen Detaillierungsgrades nationaler Inventare. Im internationalen Kontext erscheint eine kompakte Inventarisierung, wie sie unter Option U2-N1 („kompakt, einheitlich“) mit einer einheitlichen C-1-Attributierung über die gesamte Nutzungsphase und einer einmaligen Erfassung der CO₂-Freisetzung erfolgt, aufgrund geringer Datenanforderungen und einer hohen Anschlussfähigkeit an bestehende Inventarpraktiken vielversprechend. Zugleich bleibt offen, in welchem Umfang zusätzliche Differenzierungen möglich sind, um technische Senken, Kohlenstoffkreisläufe und langfristige Speicherwirkungen hinreichend transparent abzubilden. Zukünftige Arbeiten sollten daher systematisch untersuchen, welche Mindestanforderungen an die Datenerfassung erforderlich sind, um sowohl internationale Vergleichbarkeit als auch klimapolitische Steuerungsfähigkeit zu gewährleisten.

Im internationalen Kontext ist außerdem zu untersuchen, wie nationale Inventare unter dem Übereinkommen von Paris zusammenspielen können, wenn flexible Kooperationsmechanismen eingebaut werden. Elemente wie „corresponding adjustments“ oder „internationally transferred mitigation outcomes“ eröffnen grundsätzlich die Möglichkeit, Klimazielerreichung über Ländergrenzen hinweg zu organisieren, setzen jedoch voraus, dass strenge Anforderungen an Zusätzlichkeit, Transparenz und Vermeidung von Doppelzählungen eingehalten werden. Die Gestaltung dieser Mechanismen und ihre Wechselwirkungen mit unterschiedlichen Inventarlogiken, vor allem im Zusammenhang mit technischen Senken und CO₂-Entnahmen, sind ein weiterer zentraler Forschungs- und Diskussionspunkt.

Insgesamt zeigen die Arbeiten, dass die Weiterentwicklung nationaler THG-Inventare im Rahmen einer zunehmend zirkulären Kohlenstoffwirtschaft nicht allein als technische Frage der Bilanzierung verstanden werden kann. Vielmehr erfordert sie ein integriertes Verständnis von Inventarlogik, Datenverfügbarkeit, internationalen Kooperationsmechanismen und flankierenden Regelwerken zur Nutzung von Kohlenstoff und Biomasse. Die hier vorgestellten Ansätze können hierfür eine Grundlage bieten, benötigen jedoch weitere methodische, empirische und politische Klärung.

13 Quellenverzeichnis

- Bailis, R. und Pemberton-Pigott, C. (2020): Fraction of non-renewable biomass in emission crediting in clean and efficient cooking projects; A review of concepts, rules, and challenges; World Bank Group (Hrsg.); Washington DC. https://www.ci-dev.org/sites/default/files/2020-11/CI-DEV_FRACTION%20OF%20NONRENEWABLE%20BIOMASS_R2.pdf [01.01.2026]
- Duscha, V.; Ehler, A.; Oberpriller, Q.; Weber, F.; Friedrichsen, N. und Decker, A. (2025): Zirkuläre Kohlenstoffpfade und THG-Berichterstattung; Teilbericht: Zukünftige Kohlenstoffflüsse und ihre Erfassung; Umweltbundesamt (Hrsg.); Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-8224>
- Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Paar, A.; Hennenberg, K.; Pfeiffer, M.; und Billharz, M. (2024): Ansatz zur Neubewertung von CO₂-Emissionen aus der Holzverbrennung; Ergebnisse des Forschungsprojekts BioSINK als Grundlage für die Erweiterung der Bilanzierung von Holz im CO₂-Rechner; Umweltbundesamt (Hrsg.); Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/479/publikationen/factsheet_ansatz_zur_neubewertung_von_co2-emissionen_aus_der_holzverbrennung_0.pdf [01.01.2026]
- Ghilardi, A. und Bailis, R. (2024): Updated fNRB Values for Woodfuel Interventions. https://cdm.unfccc.int/Sunset_CMS_ControlledSlots/public_inputs/sunsetcms/storage/contents/stored-file-20240624161613578/Report_on_Updated_fNRB_Values_20%20June%202024.pdf [abgerufen am 24.04.2026]
- IPCC– Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change; Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report (AR5); Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (Hrsg.); Cambridge University Press; Cambridge and New York. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> [01.01.2026]
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis; Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report (AR6); Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.); Cambridge University Press; Cambridge and New York. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> [01.01.2026]
- Juhrich, K. (2022): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe; Aktualisierung 2022; Umweltbundesamt (Hrsg.); Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/28_2022_cc.pdf [01.01.2026]
- Pulles, T.; van der Gon, H.; Appelman, W.; und Verheul, M. (2022): CO₂ emissions from biomass combustion. Accounting of CO₂ emissions from biomass under the UNFCCC; *Climate Policy*. <https://doi.org/10.1080/17583004.2022.2067456>
- Voß-Stemping, J.; Schultz, K.; und Purr, K. (2024): Technische Negativemissionen: Ist die klimapolitische Zielarchitektur der Bundesregierung fit for purpose? Umweltbundesamt (Hrsg.); Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/uba_fact_sheet_technische_negativemissionen_zielarchitektur_bundesregierung_v2.pdf [01.01.2026]