

# PRODUCT CARBON FOOTPRINT: ALLOKATION ENERGIE RECYCLING

## **Kurzpapiere im Auftrag des Umweltbundesamtes**

für die Ad-hoc-Gruppe (AhG) „Dekarbonisierung der automobilen Wertschöpfungsketten“  
des Expertenkreises „Transformation der Automobilwirtschaft“ (ETA)  
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz

Januar 2024

Autor:innen: Marina Kemper, Juliane Mundt, Jörn Sünkel (Hamburg Institut)

## INHALT

1. Product Carbon Footprint: Allokation.....	1
1.1 Ausgangssituation und Fragestellung .....	1
1.2 Konzept der Allokation in multifunktionalen Prozessen.....	1
1.3 Vergleich und Bewertung der Methoden .....	2
1.4 Zuordnung von Emissionen zur Vermarktung grüner Premiumprodukte .....	3
1.5 Diskussion und Impulse.....	4
Literaturverzeichnis.....	8
2. Product Carbon Footprint: Energie.....	9
2.1 Ausgangssituation und Fragestellung .....	9
2.2 Methodische Ansätze zur Bilanzierung eingekaufter Energie .....	9
2.3 Vergleich und Bewertung der Methoden .....	11
2.4 Doppelzählung in der Energiebilanzierung.....	12
2.5 Nutzen für die Energiewende .....	13
2.6 Diskussion und Empfehlung .....	14
Literaturverzeichnis.....	16
3. Product Carbon Footprint: Recycling.....	20
3.1 Ausgangssituation und Fragestellung .....	20
3.2 Methodische Konzepte .....	20
3.3 Vergleich der Methoden .....	22
3.4 Klassifizierung von Sekundärmaterial .....	23
3.5 Diskussion und Impulse.....	24
Literaturverzeichnis.....	27

# 1. PRODUCT CARBON FOOTPRINT: ALLOKATION

---

## 1.1 AUSGANGSSITUATION UND FRAGESTELLUNG

Allokation beschreibt die Zuordnung aller Eingangs- und Ausgangsmaterialien und -energien sowie deren Umweltwirkungen zu dem bilanzierten Produktsystem. Allokation ist in unterschiedlichen Bereichen der Product Carbon Footprint (PCF)-Bilanzierung relevant: bei der Bestimmung der Systemgrenzen, der Bilanzierung multifunktionaler Prozesse, Recycling und Energie sowie bei der Zuordnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen zur Vermarktung „grüner“ Endprodukte. Durch die Anwendung unterschiedlicher Allokationsmethoden kann es zu deutlichen Unterschieden in PCF-Ergebnissen kommen, was die Vergleichbarkeit von PCFs verringert. Regeln zur Allokation und deren einheitliche und transparente Verwendung sind relevant, um sicherzustellen, dass alle Umweltwirkungen berücksichtigt, nur einmal angerechnet und Emissionen auch an Sektorübergängen konsistent bilanziert werden.

In diesem Kurzpapier wird Allokation in multifunktionalen Prozessen sowie die Zuordnung von Emissionen zur Vermarktung von Premiumprodukten betrachtet und der spezifische Bedarf nach Harmonisierung beleuchtet.

Auch bei den Themen Energie und Recycling wirken sich unterschiedliche Allokationsmethoden stark auf das Ergebnis eines PCF aus, und ihre Anwendung wird intensiv diskutiert. Diese Themen werden in zwei weiteren Kurzpapieren im Anhang der Handlungsempfehlungen der AhG behandelt. Besondere Fälle, wie die Betrachtung von Energierückgewinnung, können hier nicht umfänglich diskutiert werden.

## 1.2 KONZEPT DER ALLOKATION IN MULTIFUNKTIONALEN PROZESSEN

In der PCF-Erstellung beschreibt Allokation nach ISO 14044 die Zuordnung der Material- und Energieflüsse sowie deren Umwelteigenschaften zu einem oder mehreren Produktsystem(en) (ISO 14044:2006, S. 12). Multifunktionale Prozesse zeichnen sich dadurch aus, dass innerhalb eines Prozesses mehrere Waren oder Dienstleistungen, sogenannte Neben-, Co- oder Koppelprodukte, mit jeweils eigenem Wert hergestellt werden. Nach ISO 14044 ist anzustreben, Prozesse so zu definieren, dass sie eindeutig einem Produkt zugeordnet werden können. In der Praxis ist dies vor allem in der Industrie oftmals nicht möglich, sodass eine Aufteilung von Material, Energie und Emissionen aus einem Prozess auf mehrere Produkte notwendig wird.

Die Allokationshierarchie der ISO 14044 beschreibt ein schrittweises Verfahren zur Bestimmung der anzuwendenden Allokationsmethode, bestehend aus

1. Anpassung der Systemgrenzen durch
  - a. Unterteilung des zu betrachtenden Produktsystems zur spezifischen Zuordnung von In- und Outputs („Subdivision“).
  - b. Erweiterung des zu betrachtenden Produktionssystems um das Nebenprodukt, wobei alle dem Nebenprodukt zuzuordnenden Prozesse in die Bilanz einbezogen werden („Systemraumerweiterung“).
2. Sind die vorgenannten Optionen nicht möglich, soll eine Allokation entsprechend der physikalischen Beziehungen, basierend auf Masse, Volumen oder Energie, vorgenommen werden. (ISO 14044:2006, S. 25)
3. Alternativ kann die Allokation entsprechend ökonomischer Beziehung zwischen den Nebenprodukten, z.B. dem relativen Marktwert, vorgenommen werden.

Hat ein Nebenprodukt keinen ökonomischen Wert, wird dieses allgemein als Abfall angesehen. Nach ISO 14044 und den nachfolgenden Standards ist definiert, dass im Rahmen einer PCF-Studie In- und Outputs nicht Abfällen zugeordnet werden. Der entstehende Aufwand zur Abfallbeseitigung wird dem Produktsystem allerdings angerechnet. Bei werthaltigen Nebenprodukten muss eine Allokation der Emissionen durchgeführt werden.

Zudem sollen innerhalb eines Produktsystems für ähnliche In- und Outputs einheitliche Allokationsverfahren angewandt werden: Die Zuordnung auf Nebenprodukte, die das System verlassen, soll dem Verfahren entsprechen, mit dem ähnliche Produkte bewertet werden, die dem System zugeführt werden. (ISO 14044:2006, S. 25) Innerhalb der Bilanz sollen Zuordnungsmethoden einheitlich verwendet und im Bericht zum PCF transparent gemacht werden. Die Regeln zur Allokation aus der ISO 14044 werden in nachfolgenden Standards genutzt und zum Teil differenzierter beschrieben.

Laut einer Studie der „Industrial Deep Decarbonisation Initiative“ kann die Verwendung unterschiedlicher Allokationsmethoden im PCF je nach Sektor zu Abweichungen um 10 bis sogar 55 % führen. (Industrial Deep Decarbonisation Initiative, 2023, S. 13) Große Abweichungen gibt es insbesondere bei Stoffen, bei denen die physikalische und ökonomische Bewertung stark auseinandergeht (z.B. Wasserstoff, ein Stoff mit sehr geringem Volumen, der aber einen hohen Marktwert hat). (Together for Sustainability [TfS], 2022, S. 69) Eine Sensitivitätsanalyse, wie sie auch von ISO 14044 gefordert ist, kann solche Abweichungen zwischen Allokationsverfahren deutlich machen.

Einzelne Standards wie die EU-PEF oder auch TfS haben für Anwendungsfälle, die als besonders kritisch eingestuft werden, spezifische Allokationsanforderungen festgelegt und entsprechende Entscheidungshierarchien aufgestellt. So soll die konsistente Anwendung von Allokationsmethoden ermöglicht werden. (TfS, 2022, S. 69) (Europäische Kommission, 2021, S. 73)

### 1.3 VERGLEICH UND BEWERTUNG DER METHODEN

ISO 14067 folgt der in ISO 14044 beschriebenen Allokationshierarchie, wobei die Zuordnung entsprechend den physikalischen Beziehungen bevorzugt wird, und fordert eine Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Allokationsverfahren. Hochfeld und Jenseit forderten bereits 1989, dass in den Fällen, in denen unterschiedliche Allokationsmethoden angewendet werden, eine Sensitivitätsanalyse

durchgeführt wird. Diese soll die Wirkung der Methodenwahl auf das Bilanzierungsergebnis verdeutlichen. (Hochfeld & Jenseit, 1989, S. 2) Für detaillierter beschriebene Verfahren verweist die ISO 14067 auf Produktkategorie-Regeln, die weitere Orientierung bieten können (ISO 14067:2018, S. 50). Allerdings erfordert auch dies wieder einheitliches methodisches Vorgehen zur Entwicklung einer Produktkategorie-Regel.

Die ISO 20915 für Stahlprodukte führt im Anhang C in einer kurzen Übersicht Beispiele für Nebenprodukte der Stahlproduktion an, die außerhalb des betrachteten Systems eine neue Verwendung finden. Allerdings gibt sie keine Orientierung darüber, wann welche Allokationsmethode angewendet werden soll. (ISO 20915:2018, S. 23)

Die neueren Branchenstandards verfolgen einen branchenübergreifenden engen Abstimmungsprozess über zu verwendende Ansätze und werden spezifischer in den Anforderungen an die Allokation, auch wenn die Basis allgemein die ISO 14044 und die dort definierte Allokationshierarchie ist. Die Ansätze werden bereits zwischen Catena-X, Together for Sustainability und dem Pathfinder Framework diskutiert und eine Harmonisierung wird angestrebt. Dabei wird berücksichtigt, dass eine sektorübergreifende Abstimmung und Vereinheitlichung zwischen sektorspezifischen Standards notwendig ist, um zu größerer Transparenz und besserer Vergleichbarkeit der PCFs beizutragen. (Catena-X Automotive Network e.V. 2023) (TfS, 2022, S. 9)

TfS erkennt an, dass unterschiedliche Allokationsmethoden sinnvoll sind, damit je Anwendungsfall und unter den Vorgaben unterschiedlicher Standards die passende Methode gewählt werden kann. Allerdings sollten Entscheidungskriterien festgelegt werden, die eine adäquate Wahl ermöglichen. Wenn vorhanden, sollten Produktkategorie-Regeln genutzt werden. Ist keine Produktkategorie-Regel vorhanden, wird festgelegt, dass auf Basis des Verhältnisses des ökonomischen Wertes zu entscheiden ist, ob physikalisch oder ökonomisch allokiert werden soll. (TfS, 2022, S. 66) Zudem definiert TfS Vorgehensweisen und anzuwendende Allokationsmethoden für einzelne Anwendungsfälle. (TfS, 2022, S. 69)

Der Vorschlag des europäischen Joint Research Center zur Bilanzierung von Batterien stellt in Kapitel 6.7 explizite Allokationsregeln für multifunktionale Prozesse auf (Joint Research Center [JRC], 2023, S. 17). Zur Bestimmung des Vorgehens wird auf die in EU-PEF beschriebene Entscheidungshierarchie verwiesen, die wiederum auf der ISO 14044 basiert (EC Recommendations 2021/2279 (Annex I – section 4.5)). Für besondere Nebenprodukte werden explizite Allokationsregeln definiert: So soll für die Verwendung von Edel- und Basismetallen eine ökonomische Zuordnung durchgeführt werden. Die Zuordnung von Energie soll physisch nach Anzahl der Zellen oder Energiekapazität (kWh) erfolgen (JRC, 2023, S. 10).

Alle Standards fordern Transparenz, indem der angewandte Ansatz zur Lösung der Multifunktionalität stets angegeben und begründet wird. (TfS, 2022, S. 63)

## **1.4 ZUORDNUNG VON EMISSIONEN ZUR VERMARKTUNG GRÜNER PREMIUMPRODUKTE**

Innerhalb einer Produktionskette können Ausgangsstoffe vollständig oder auch anteilig durch emissionsärmere oder anderweitig nachhaltigere Materialien oder Energieträger ersetzt werden.

Beispiele hierfür sind:

- geringe Emissionen aus der Vorproduktion (z.B. Verwendung von Ökostrom oder Biogas, Low-Carbon-Material, Recyclingmaterial)
- ein hoher biogener Anteil (z.B. Bio-Kunststoffe)
- besonders ressourcenschonende Produktion (z.B. Integration eines hohen Anteils von Recyclingmaterial in Produktionsprozessen)

Über die Allokation der bilanzierten Emissionen auf Endprodukte können grüne Premiumprodukte mit niedrigen Emissionen vermarktet werden. Für eine solche Zuordnung der „Low Carbon“-Eigenschaft kann ein Massenbilanz-Verfahren (engl. Mass Balance Approach) genutzt werden. Dabei wird ein Eingangsmaterial anteilig durch ein emissionsärmeres ersetzt. Die zugeordneten Vorteile (hier verminderte Emissionen) werden aber nur einem Teil der Produkte zugeordnet: den grünen Premiumprodukten. Die Eigenschaften und Funktionen von Inputmaterialien und Endprodukten bleiben dabei gleich, lediglich die zugeordneten Emissionsfaktoren ändern sich.

Diese Zuordnung von Eigenschaften ermöglicht es Unternehmen, ohne separate Produktionslinien besonders umweltfreundliche Produkte zu vertreiben und damit spezielle Kundenanfragen zu bedienen. Auch marktliche Restriktionen für Premiumprodukte, z.B. durch eine begrenzte Angebotsmenge des Low-Carbon-Materials, können so überwunden werden. Die Anwendung des Massenbilanz-Verfahrens kann die Transformation von Produktionsprozessen hin zu einer emissionsärmeren Produktion fördern. Dadurch können Produktionsprozesse effizient gestaltet werden, zusätzlicher Ressourcen- und Finanzmittelverbrauch durch den Aufbau paralleler Produktionslinien wird vermieden.

Entscheidend ist, dass es nicht zur Doppelvermarktung der grünen Eigenschaft kommt. Die kommunizierten Eigenschaften dürfen also nicht mehrfach gezählt und vermarktet werden. Dies kann über ein intern oder von Dritten geprüftes und verifiziertes Nachverfolgungssystem des Massenbilanz-Verfahrens erreicht werden. Zudem sollte das Verfahren transparent dargestellt und kommuniziert werden.

Die meisten Standards zur PCF-Erstellung behandeln die Verteilung der Emissionen auf einzelne Produkte nicht explizit. Begründung für Kritik der Zuordnung ist oftmals die ISO 14044, nach der Allokation insgesamt, wenn möglich, vermieden werden soll. Allerdings handelt es sich vielmehr um ein Thema, das in den Normen zur Rückverfolgung von Lieferketten (Chain-of-Custody) behandelt wird und hier breitere Anerkennung findet.

## 1.5 DISKUSSION UND IMPULSE

### Allokation in multifunktionalen Systemen

Für eine Verbesserung der Ökobilanzierung wird eine Diskussion zur Allokation gefordert, die sowohl wissenschaftliche als auch praxisnahe Expertise einbezieht. Aus der bisherigen Diskussion über Allokationsmethoden in multifunktionalen Systemen können nach Feifel et. al. drei Hauptpunkte hervorgehoben werden, auf die im Folgenden vertieft eingegangen wird:

- Für die Anwendung der Systemraumerweiterung fehlen prüfbare methodische Kriterien. Dies widerspricht dem Anspruch eines transparenten und allgemeingültigen Verfahrens.

- Die auf ISO basierende Allokationshierarchie, insbesondere die Bevorzugung der physikalischen vor der ökonomischen Allokation, wird nicht allgemein als sachgerecht akzeptiert.
- Die Darstellung und Kommunikation von Allokation sind für die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Bilanzierung klärungsbedürftig. (Feifel, Walk & Wursthorn, S. 49)

Am Beispiel der verzweigten Lieferkette der Automobilindustrie wird deutlich, dass Allokationsmethoden für PCFs sektorübergreifend diskutiert werden sollten. Es besteht in den einzelnen Branchen ein breites Spektrum von Anwendungsfällen mit spezifischen individuellen Anforderungen, für die die in der ISO 14044 aufgestellte Allokationshierarchie nicht ausreichend scheint. Oftmals ist eine weitere Unterteilung des betrachteten Systems (Subdivision) nicht möglich, da im Produktionsprozess unvermeidbare Nebenprodukte entstehen. Allerdings ist auch eine Systemraumerweiterung nicht immer sinnvoll, da der PCF so spezifisch wie möglich sein soll und die letztendlich bilanzierten Emissionen wieder den definierten Haupt- und Nebenprodukten zugeordnet werden müssen. Bei einer Systemraumerweiterung durch Substitution kann ein ersetztes Material oder Produkt in die Bilanz integriert werden. Diese Betrachtungsweise ist wirkungsorientiert und kann Technologieänderungen anreizen. (TfS, 2022, S. 63) Allerdings verändert sich der PCF damit von der Beschreibung des Status-quo (Inventarisierung oder engl. attributional approach) hin zu einer wirkungsorientierten Betrachtungsweise (engl. consequential approach). **Es sind also anerkannte und einheitlich verwendete Allokationsregeln notwendig, wobei die bisherige Allokationshierarchie diskutiert werden sollte.**

Zahlreiche Standards bevorzugen eine physikalische Allokation nach Gewicht, Masse oder Volumen. Die ökonomische Allokation, bei der Emissionen auf Basis von Marktpreis, Produktwert oder erwartetem Gewinn zugeordnet werden, wird als weniger aussagekräftig angesehen. Begründet wird dies damit, dass Emissionen über eine externe, variable Größe zugeordnet und damit dem Einfluss von Preisschwankungen oder sich ändernden Währungskursen unterstellt werden. Darüber hinaus ist die Festlegung des Marktwertes für einige Nebenprodukte komplex, da keine transparenten Marktpreise vorliegen oder diese regional sehr unterschiedlich sind. Sobald ein Nebenprodukt aufgrund seiner emissionsmindernden Wirkung an Wert gewinnt, kann diese Allokationsmethode zu einer deutlichen Verschiebung im PCF führen. Diesen volatilen Wirkungen kann durch die Verwendung von Durchschnitts- oder Referenzwerten begegnet werden. (Industrial Deep Decarbonisation Initiative, 2023, S. 13). Zudem gibt es Einschätzungen, dass sich der Preisunterschied zwischen dem Ursprungsmaterial und dem ersetzten Material deutlich weniger ändert, als es in absoluten Zahlen scheint. Preisschwankungen würden sich dadurch nicht so stark auswirken. Zudem könnten schwankende Preise als Zeichen sich ändernder Wertschätzung gesehen werden. So würden Produktpreise den Produktnutzen und Funktionalität widerspiegeln, weshalb eine Allokation nach Marktpreisen oder anteiligen Erträgen demnach zur Nutzenmaximierung beitragen würde. (Feifel et al., S. 48)

Bei der Kritik an der ökonomischen Allokation sollte zudem berücksichtigt werden, dass die Zuordnung auf Basis von Marktwerten bereits bei der Definition der Systemgrenzen angewendet wird: Wertlose Co-Produkte werden als Abfall definiert und ihnen werden keine Emissionen zugeordnet. Haben Co-Produkte jedoch einen Marktwert, werden ihnen Emissionen zugeordnet (Industrial Deep Decarbonisation Initiative, 2023, S. 13).

**Entsprechend der jeweiligen spezifischen Eigenschaften eines Produktes oder Materials und Anforderungen an diese sollten unterschiedliche Allokationsmethoden diskutiert und zugelassen werden.** So kann für einige Produkte eine physikalische Allokation, für andere eine

ökonomische sinnvoll sein. **Gleichzeitig sollten mehr Orientierung und Entscheidungshilfen bei der Wahl der Allokationsmethoden gegeben werden.** (Feifel et al., S. 48) Bei der Wahl der passenden Allokationsmethode spielen die Ziele der LCA ebenso eine Rolle wie der Entscheidungskontext oder die Anwendbarkeit der einzelnen Methoden. **Daher sollte ebenfalls diskutiert werden, ob ein inventarisierender PCF verfolgt wird, der den Status-quo widerspiegelt oder ob sozioökonomische Effekte der Allokation mit betrachtet werden, also eine transformative Wirkung angereizt werden soll** (dies ist ebenfalls für die Themenfelder Energie und Recycling relevant). Für eine wirkungsorientierte LCA kann sogar Substitution eine adäquate Methode sein (Schrijvers, 2017). Hierzu kann auf die Diskussion und Erfahrungen aus der Recycling-Allokation zurückgegriffen werden.

Auch im Regelwerk von Catena-X wird anerkannt, dass Allokationsverfahren außerhalb der Allokationshierarchie der ISO 14044 zu Technologieänderungen, Emissionsreduktionen oder Materialeffizienz beitragen können. Um diese transformativen Prozesse zu unterstützen, sollen Allokationsansätze für spezifische Materialien und Regionen formuliert werden. Bereits bestehende Spezifizierungen, z.B. in Produktkategorie-Regeln, werden dabei berücksichtigt. (Catena-X Automotive Network e.V. 2023)

**Harmonisierte Regeln sind insbesondere dann relevant, wenn Nebenprodukte über Systemgrenzen hinweg sektorübergreifend verwendet und bilanziert werden.** Werden in den einzelnen Industriezweigen unterschiedliche Allokationsmethoden für ein Produkt verwendet, kann dies zu starken Abweichungen in der Bewertung in den PCFs führen oder sogar dazu, dass Emissionen gar nicht bilanziert werden. Daher ist eine industrieübergreifende Diskussion notwendig, in der insbesondere an Sektorübergängen einheitliche Allokationsmethoden formuliert werden. Für die Auswahl der geeigneten Allokationsmethode können folgende Punkte betrachtet werden:

- Übereinstimmung mit den Bilanzierungsprinzipien der relevanten Standards
- Praktikabilität durch geringe Komplexität
- Transformative Wirkung der Methode für die Industrie
- Akzeptanz in den Industriezweigen

Eine Harmonisierung kann durch regulative Vorgaben vorangetrieben werden, die Wahlmöglichkeiten und damit die Verwendung unterschiedlicher Methoden ausschließen. Andererseits können Standards differenziertere Entscheidungshilfen bieten und durch vorgegebene Entscheidungsbäume (wie bspw. TfS) die Wahl der Allokationsmethode erleichtern. Produktkategorie-Regeln können unterstützen, wenn sie methodisch einheitlich umgesetzt und mit aktuellen Daten durchgeführt werden.

## **Zuordnung von Emissionen zur Vermarktung grüner Premiumprodukte**

Die Zuordnung von Emissionen zur Vermarktung grüner Produkte über Massenbilanz wird kontrovers diskutiert und ist in verschiedenen Branchen sehr unterschiedlich akzeptiert. Während die Massenbilanz in der Chemie- und Kunststoffindustrie breit akzeptiert ist, wird sie in der Aluminium- und Stahlindustrie zum Teil kritisch gesehen. Im Bausektor und von der Verwendung in EPDs wird Mass Balance oftmals ausgeschlossen (Donath, 2023, S. 1). Eine Harmonisierung sollte hier angestrebt werden.

In der Aluminium- und Stahlindustrie kann Massenbilanz insbesondere kleinen und mittelständischen Betrieben, die keine separaten Produktionsprozesse aufbauen können, die Möglichkeit zu einer

schrittweisen Transformation und zum Angebot grüner Produkte bieten. Dies kann insgesamt zu einer Erhöhung der Marktanteile klimafreundlicher Produkte führen.

**Wird das Massenbilanz-Verfahren akzeptiert, sollte es nach klaren Regeln und in einem überprüfbar System umgesetzt werden. Eine zusätzliche Zertifizierung durch Dritte kann sicherstellen, dass die grüne Eigenschaft nur einmal verwendet wurde. Zudem sollte durch eine klare Kommunikation über die Anwendung der Massenbilanz Transparenz geschaffen werden.**

Für eine branchenübergreifende Akzeptanz ist eine breite Diskussion des Massenbilanz-Ansatzes und das Aufstellen einheitlicher Umsetzungsregeln notwendig. Catena-X macht hier in Abstimmung mit dem Pathfinder Framework und TfS bereits praxisorientierte Vorschläge und hat das Massenbilanz-Verfahren mit Zusatzkriterien integriert. (Catena-X Automotive Network e.V. 2023).

Massenbilanzierung wird demnach unter folgenden Prinzipien im PCF anerkannt:

- Die erzielte Transformation soll einen effektiven Übergang zu einer stärker zirkulären, biobasierten Produktion mit geringeren Treibhausgasemissionen in komplexen Wertschöpfungsketten bewirken.
- Die Umsetzung muss transparent, klar und glaubwürdig sein. Dies kann z.B. durch anerkannte Zertifizierungssysteme Dritter erreicht werden.
- Label und Marketingaussagen müssen definierte Anforderungen erfüllen.
- Doppelzählung muss durch eine eindeutige Nachverfolgung der Inputmengen ausgeschlossen werden.

Darüber hinaus definiert Catena-X weitere Anforderungen an ein Massenbilanz-Konzept:

- Die Betriebsstätten stehen unter der Kontrolle desselben Unternehmens, wobei auch Unternehmensgruppen und Joint Ventures akzeptiert werden.
- Die Produktion des massenbilanzierten Produktes muss nach branchenüblicher Praxis technisch möglich sein. Dabei kann der Anteil an technisch verwendetem Material niedriger sein als der zugewiesene Anteil.
- Die für die Grenzen des Massenbilanzsystems angewandten Emissionsfaktoren müssen produkt- und prozessbezogen sein. (Catena-X Automotive Network e.V. 2023, S. 26)

Catena-X wird zudem die Verwendung von Zertifikaten prüfen. (Catena-X Automotive Network e.V. 2023, S. 25) Der Wissenschaftliche Beirat des BMWK geht im Fall von Grünstahl bereits über den Massenbilanz-Ansatz hinaus und spricht sich für ein Book & Claim-System aus, da grüner und grauer Stahl physisch identisch sind und der Unterschied lediglich im CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Produktion liegt. (BMWK, S. 16) Da der Handel von Zertifikaten die Bilanzierung deutlich weiter von den In- und Outputströmen entkoppelt, bedarf der Umgang noch einer eingehenderen fachlichen Diskussion.

# LITERATURVERZEICHNIS

- BMWK.. Transformation zu einer klimaneutralen Industrie: Grüne Leitmärkte und Klimaschutzverträge.  
Verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Ministerium/Veroeffentlichung-Wissenschaftlicher-Beirat/transformation-zu-einer-klimaneutralen-industrie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Ministerium/Veroeffentlichung-Wissenschaftlicher-Beirat/transformation-zu-einer-klimaneutralen-industrie.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- ECO Platform. (2023). *ECO Platform Statement on Mass Balance Approach (MBA) from Dec 12, 2023*. Zugriff am 03.01.2024. Verfügbar unter: [https://www.eco-platform.org/files/download/statements/ECO\\_2023.12.12\\_revised-Statement\\_MBA%2BG00s.pdf](https://www.eco-platform.org/files/download/statements/ECO_2023.12.12_revised-Statement_MBA%2BG00s.pdf)
- Europäische Kommission. Empfehlung zur Anwendung der Methoden für die Berechnung des Umweltfußabdrucks zur Messung und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen entlang ihres Lebenswegs. Empfehlung (EU) 2021/2279 der Kommission. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021H2279>
- Feifel, S., Walk, W. & Wursthorn, S. Die Ökobilanz im Spannungsfeld zwischen Exaktheit, Durchführbarkeit und Kommunizierbarkeit. In (Bd. 22, S. 46–55). <https://doi.org/10.1007/s12302-009-0107-8>
- Hochfeld, C. & Jenseit, W. (1989). *Allokation in Ökobilanzen und bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA). Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E-Vorhabens Nr. 104 01 123: Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand und der Umweltbelastung von energieintensiven Produkten und Dienstleistungen für Ökobilanzen und Öko-Audits* (UBA, Hrsg.).
- Industrial Deep Decarbonisation Initiative. (2023). *Driving consistency in the greenhouse gas accounting system. A pathway to harmonized standards for steel, cement, and concrete*.
- ISO 14067:2018. *Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 14044:2006 (2018). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 20915:2018 (November 2018). *Life cycle inventory calculation methodology for steel products*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Joint Research Center. (2023). *Harmonised rules for the calculation of the Carbon Footprint of Electric Vehicle Batteries (CFB-EV). Draft Version* (JRC Science for Policy Report). Europäische Kommission.
- Schrijvers, D. (2017). *Environmental evaluation of recycling options according to the Life Cycle Assessment methodology. Establishment of a consistent approach applied to case studies from the chemical industry*. Dissertation. Université de Bordeaux, Bordeaux.
- Together for Sustainability. (2022). *The Product Carbon Footprint Guideline for the Chemical Industry. Specification for product Carbon Footprint and Corporate Scope 3.1 Emission Accounting and Reporting* (Version 2.0).

## 2. PRODUCT CARBON FOOTPRINT: ENERGIE

---

### 2.1 AUSGANGSSITUATION UND FRAGESTELLUNG

Die Bilanzierung von Energie zählt zu den Aspekten der Treibhausgas (THG)-Bilanzierung, für die bisher keine einheitliche Vorgehensweise vorliegt. Insbesondere die Bilanzierung von eingekaufter Energie wird uneinheitlich vorgenommen. Es lassen sich ortsbasierte und marktbasierende Bilanzierungsansätze unterscheiden. Je nach Branche und Rahmenbedingungen findet einer der beiden Ansätze Anwendung, mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Hierdurch wird die Vergleichbarkeit von Product Carbon Footprints (PCF) erschwert und es besteht das Risiko der Doppelzählung.

Zu den weiteren Aspekten, die in verfügbaren PCF-Standards anders geregelt sind, zählen der Umgang mit Eigenerzeugungsanlagen und Energierückgewinnung sowie die Frage, wie grüne Energieeigenschaften innerhalb einer Organisation verschiedenen Produkten zugeordnet werden.

Im Folgenden wird insbesondere auf die Diskussion rund um die Bilanzierung von Elektrizität eingegangen. Das vorliegende Kurzpapier stellt die Diskussion der Methoden in der Wissenschaft sowie der (Bilanzierungs-)Praxis dar. Mit Bezug zu den Handlungsempfehlungen der AhG „Dekarbonisierung der Automobilen Wertschöpfungsketten“ werden Impulse zur weiteren Diskussion gegeben. Das Begleitforschungsprojekt des Umweltbundesamtes (UBA) unterstützt diesbezüglich die weitere Arbeit der AhG.

### 2.2 METHODISCHE ANSÄTZE ZUR BILANZIERUNG EINGEKAUFTER ENERGIE

Während im Kontext eines klassischen LCA (Life Cycle Assessment, dt. Ökobilanz) nach ISO 14044:2006 keine gesonderten Regelungen zur Verwendung von Emissionsfaktoren für Energie festgelegt sind, wird im Kontext der PCF-Erstellung nach ISO 14067:2018 eine Hierarchie zu verwendender Emissionsfaktoren zur Energiebilanzierung aufgestellt (ISO 14067:2018, S. 57–58). Hierbei werden in Bezug auf eingekaufte Energie Emissionsfaktoren, die aus vertraglichen Bindungen stammen, gegenüber netzbezogenen Durchschnittsemissionsfaktoren aus LCA-Datenbanken bevorzugt.

Im Kontext der Treibhausgasbilanzierung auf Unternehmensebene (Corporate Carbon Footprint, CCF) haben sich – insbesondere geprägt durch die Standards des Greenhouse Gas Protocol (GHGP) – die Begriffe „marktbasierend“ und „ortsbasierend“ zur Unterscheidung dieser beiden Ansätze etabliert (vgl. z.B. Sotos, 2015; World Resources Institute [WRI] & World Business Council for Sustainable Development [WBCSD], 2004). Diese Begrifflichkeiten werden zunehmend auch im Rahmen der Diskussionen zur PCF-Bilanzierung verwendet (z.B. in Together for Sustainability [TfS], 2022; WBCSD & WRI, 2011;

WBCSD, 2023). Auch in der wissenschaftlichen Literatur wird sich dieser beiden Begrifflichkeiten bedient, um die Ansätze zur Bilanzierung eingekaufter Energie zu unterscheiden (z.B. in Bjørn, Lloyd, Brander & Matthews, 2022; Brander, Gillenwater & Ascui, 2018; Brander & Bjørn, 2023). Zumeist werden markt- und ortsbasierte Bilanzierungsansätze in Bezug auf die Bilanzierung von eingekauftem Strom spezifiziert. Grundsätzlich sind diese aber auch auf andere Energieformen anwendbar, bspw. eingekaufte Wärme, z.B. in ISO 14067:2018.

Unter Verwendung des **ortsbasierten Ansatzes** wird die durchschnittliche Emissionsintensität des Netzes, in dem der entsprechende Verbraucher zu verorten ist, als Bewertungsgrundlage gesetzt. Die Größe des bilanzierten Netzes (lokal, regional oder national) ist nach GHGP (Sotos, 2015) so zu wählen, dass die Erzeugungskapazitäten innerhalb der Bilanzgrenze Netzstabilität gewährleisten können. In Deutschland wird als Referenzwert üblicherweise der Emissionsfaktor des bundesdeutschen Strommix herangezogen. Dadurch, dass die Ermittlung der Emissionsfaktoren auf statistischen Informationen zu Emissionen in bestimmten geographischen sowie zeitlichen Abgrenzungen basiert, ist der ortsbasierte Ansatz überall auf der Welt anwendbar; auch in nicht liberalisierten Märkten (Mundt, Werner & Maaß, 2019, S. 329; Sotos, 2015, S. 53).

Wird der **marktbasierte Ansatz** verwendet, so beeinflusst die Beschaffungsentscheidung eines Unternehmens, welcher Emissionsfaktor für die PCF-Berechnung in Bezug auf den Energiebezug zu verwenden ist; es wird nicht auf Durchschnittsfaktoren aus LCA-Datenbanken zurückgegriffen. Als Basis zur Bestimmung des Emissionsfaktors können vertragliche Bindungen zu Stromlieferanten, Verträge über differenzierte Stromprodukte, der Zukauf von Grünstromzertifikaten oder der Strombezug aus einer ausgewählten Erzeugungsanlage dienen.

Innerhalb des marktbasieren Ansatzes wird meist eine Hierarchie für die oben genannten vertraglichen Instrumente aufgestellt. Außerdem müssen diese bestimmte Kriterien erfüllen, um als Bemessungsgrundlage für den zur Strombilanzierung zu verwendenden Emissionsfaktor dienen zu dürfen. Vertragliche Instrumente sollten nach ISO 14067:2018 bspw. nicht nur Angaben zu den Eigenschaften einer Stromeinheit übermitteln, sondern auch das einzige vertragliche Mittel sein, in dessen Rahmen die Stromeigenschaft verwendet wird. Sie müssen demnach entsprechend entwertet werden, um Doppelzählung zu vermeiden. Außerdem sollten sie eine zeitliche Nähe zum Strombezug aufweisen und aus den Marktgrenzen stammen, in denen der Verbraucher verortet ist. Kriterien für vertraglich geregelte Mittel sind je nach Standard unterschiedlich ausführlich ausdifferenziert, zielen generell aber darauf ab, die Doppelanrechnung von erneuerbaren Eigenschaften zu vermeiden (vgl. z.B. Catena-X Automotive Network e.V., 2023, S. 22 f; Joint Research Center [JRC], 2023, S. 19 f; TfS 2022, S. 50; vgl. z. B. ISO 14067:2018, S. 57).

Die Europäischen Herkunftsnachweise (HKN) sind eine im Sinne der bestehenden Kriterien (bspw. nach GHP, ISO 14067/64, EU PEF) sicher anwendbare Grundlage für die marktbasierende Bilanzierung. Die Europäischen HKN-Register werden über die nationale Gesetzgebung reguliert und folgen einem gemeinsamen Europäischen Standard mit festgelegten Kontrollmechanismen (Association of Issuing Bodies [AIB], 2023a, 2023c). Internationale Nachweissysteme wären in Bezug auf die Erfüllung der Kriterien entsprechend zu prüfen.

Liegt kein vertragliches Instrument vor, so ist der Restenergiemix (Residualmix) zu verwenden, der die Emissionen des Gesamtenergiemix eines Landes abzüglich der mittels vertraglicher Instrumente nachverfolgten Energiemengen ausweist. Dieser wird von den entsprechenden Behörden berechnet und wird in Europa von der Association of Issuing Bodies (AIB), die Vereinigung der Europäischen Ausstellungsstellen für Herkunftsnachweise für erneuerbare Energien (EE), konsolidiert veröffentlicht (AIB, 2023b).

Die **Verwendung der beiden Ansätze wird von Bilanzierungsstandards unterschiedlich vorgegeben**. Es ist zu beobachten, dass Standards zur PCF-Berechnung zunehmend die Verwendung des marktbasiereten Ansatzes bevorzugen (vgl. Catena-X Automotive Network e.V., 2023, S. 22; Europäische Kommission [EC], 2021; European Aluminium, 2023; JRC, 2023, S. 19; TfS 2022, S. 48; ISO 14067:2018, S. 57–58). In einigen Kontexten wird jedoch der ortsbasierte Ansatz präferiert. Insbesondere Branchen-LCI beruhen weiterhin auf dem ortsbasierten Ansatz (vgl. z.B. European Aluminium [EA], 2018; Verein Deutscher Ingenieure [VDI], 2023; World Steel Association [WSA], 2017). Im Rahmen des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) wird ebenfalls auf ortsbasierte Standardwerte verwiesen, alternativ darf ein netzunabhängiges Power Purchase Agreement (PPA)<sup>1</sup> angesetzt werden ((EU) 2023/956, Annex IV).

## 2.3 VERGLEICH UND BEWERTUNG DER METHODEN

Beide vorgestellten Ansätze für die Energiebilanzierung weisen Stärken und Schwächen auf und unterscheiden sich maßgeblich in Bezug auf die Bemessungsgrundlage. Der ortsbasierte Ansatz bildet die physischen Gegebenheiten der Stromproduktion am Standort eines Unternehmens ab, der marktbasierete Ansatz spiegelt die Beschaffungsentscheidung eines Unternehmens wider.

Der ortsbasierte Ansatz lässt sich zwar global für alle Unternehmensstandorte anwenden, erschwert es Unternehmen jedoch, den PCF eines Produktes durch die Dekarbonisierung des Strombezuges zu verbessern. Der Strombezug ist immer nur so grün wie das Netz, aus dem dieser bezogen wird, auch wenn bspw. ein Ökostromvertrag abgeschlossen wurde. Die einzige Möglichkeit, die Bemühungen der Dekarbonisierung des Strombezuges nach ortsbasiertem Ansatz auch im PCF ausweisen zu können, wäre der Abschluss eines PPA mit Direktleitung zum Unternehmen ohne Netzzugang. So würde die Direktleitung ein kleines eigenes Netz darstellen und könnte mit dem entsprechenden Netzemissionsfaktor ortsbasiert bilanziert werden. Eine Verpflichtung zur stringenten Bilanzierung nach dem ortsbasierten Ansatz kann dazu führen, dass Standortentscheidungen für Unternehmen auch vom jeweiligen lokalen Netzmix abhängig werden. (Mundt et al., 2019)

Der marktbasierete Ansatz hingegen wird als ortsunabhängiger und effizienter, marktgetriebener Mechanismus zur Incentivierung unternehmerischer Beiträge zur Dekarbonisierung der Energieversorgung diskutiert (EnergyTag, 2023; Styles, Werner & Maaß, 2021). Der zusätzliche Nutzen für die Energiewende ist jedoch schwer nachweisbar und daher umstritten (vgl. Bjørn et al., 2022; Brander et al., 2018). Mit dem marktbasiereten Ansatz und vor allem der Verwendung von Grünstromzertifikaten aus verlässlichen Nachweissystemen kann besser auf Marktentwicklungen und -anforderungen reagiert werden. Es besteht bspw. die Möglichkeit einer zeitlich und örtlich granularen Auflösung des Strombezuges im PCF mittels Echtzeit-HKN. Dies ermöglicht bspw., den Strombezug den physischen Realitäten der Stromerzeugung wieder anzunähern und Produktionsprozesse an die Verfügbarkeit fluktuierender EE nachweislich anzupassen (vgl. Energy Track and Trace, 2023; EnergyTag, 2023). Auch die rechtssichere Übertragung erneuerbarer Eigenschaften innerhalb eines PPA oder der Nachweis von Zusätzlichkeitskriterien können mittels HKN abgebildet werden. In der praktischen Anwendung stellen besonders in Deutschland jedoch die späte Veröffentlichung der

---

<sup>1</sup> Langfristiger Stromliefervertrag zwischen zwei Parteien. Meist ein bilateraler Vertrag zwischen Stromproduzent und Stromverbraucher.

Stromkennzeichnung sowie die Tatsache, dass HKN nur über EVU entwertet werden können, eine Herausforderung in Bezug auf den zeitlichen Genauigkeitsgrad einer THG-Bilanz unter Verwendung des marktbasierenden Ansatzes dar (vgl. Styles et al., 2023).

Beide Ansätze führen bei konsistenter Verwendung dazu, dass PCFs unterschiedlicher Unternehmen untereinander vergleichbar gemacht werden. Sich mittels PCF über den Bezug erneuerbarer Energien und eine hieraus resultierende Reduktion in der Emissionsintensität eines Produktes vom Wettbewerb abzugrenzen, lässt sich jedoch fast nur über marktbasierende Energiebilanzierung abbilden.

## 2.4 DOPPELZÄHLUNG IN DER ENERGIEBILANZIERUNG

Da die meisten PCF-Standards keine ausschließende Vorgabe zur Verwendung eines der beiden Ansätze machen und die Konformität mit diesen nicht verpflichtend ist, finden sich in der praktischen Anwendung beide Ansätze wieder. Je nach Unternehmensstandort und Energiebeschaffungspraxis liefert einer der beiden Ansätze vorteilhaftere Ergebnisse im PCF. Dies führt nicht nur dazu, dass die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen PCFs erschwert wird, sondern auch zur Doppelzählung von Energiemengen. Im Kontext der Bilanzierung von eingekauftem Strom ist die Doppelzählung von EE-Mengen ein kritischer Aspekt, da diese mit einer Über- oder auch Unterschätzung der energiebezogenen Umweltauswirkungen einhergeht (Holzapfel, Bach & Finkbeiner, 2023).

**Um Doppelzählungen von Stromeigenschaften zu vermeiden, muss konsequent entweder nach ortsbasiertem oder marktbasierendem Ansatz bilanziert werden.** Andernfalls könnte beispielsweise eine Menge EE einerseits bei Unternehmen X über einen Ökostromvertrag im PCF X und andererseits bei Unternehmen Y über die Verwendung des Netzmix-Emissionsfaktors im PCF Y verrechnet werden (Holzapfel et al., 2023; Schneider, Kollmuss & Lazarus, 2015). Da Bilanzierungsstandards dahingehend nicht harmonisiert sind, kommt es in der aktuellen Bilanzierungspraxis zwangsläufig zu Doppelzählungen.

Selbst bei konsistenter Anwendung eines Ansatzes kann es zu Doppelzählungen kommen, etwa bei unterschiedlicher zeitlicher und geographischer Auflösung des verwendeten Strommix im Rahmen des ortsbasierten Ansatzes. Holzapfel et al. (2023) schlagen die Vorgabe von Emissionsfaktoren für festgelegte Netzgrenzen (bspw. Länderebene) und Zeitperioden (bspw. jährlich) vor. Eine granulare Auflösung von Emissionsfaktoren in Bezug auf Zeitperioden und Netzgrenzen, um akkuratere PCF-Ergebnisse zu erlangen (WBCSD, 2023), kann nur ohne Doppelzählungen ermöglicht werden, wenn ein Verrechnungssystem zwischen verschiedenen Strommixauflösungen besteht. Projekte wie der von TenneT und Gasunie entwickelte CO<sub>2</sub>-Monitor<sup>2</sup> für die Niederlande (NetAnders, 2023) können bei einheitlicher Anwendung eine Möglichkeit darstellen, mit granularer Auflösung Strom ortsbasiert zu bilanzieren. TenneT plant eine ähnliche Umsetzung in Deutschland zusammen mit der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) (TenneT, 2023).

Im Kontext des marktbasierenden Ansatzes wird die Doppelzählung durch die Verwendung des Restenergiemixes verhindert (Holzapfel et al., 2023; Mundt et al., 2019; Sotos, 2015). Eine Herausforderung stellt laut Holzapfel et al. (2023) hier jedoch die Verwendung von Sekundärdaten dar. Die Emissionsfaktoren in LCA-Datenbanken basieren meist auf ortsbasierten

---

<sup>2</sup> [CO2monitor.nl](https://co2monitor.nl)

Durchschnittswerten. Ein Lösungsansatz könnte die konsequente Verwendung des jeweiligen Restenergiemix sein. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass einige Länder keinen Restenergiemix veröffentlichen, da eine Vollkennzeichnungspflicht besteht oder geförderte Mengen in separaten Systemen erfasst werden. Auch hierzu werden in der Studie von Holzapfel et al. (2023) konkrete Lösungsvorschläge gemacht.

## 2.5 NUTZEN FÜR DIE ENERGIEWENDE

Im Kontext der konsistenten Verwendung eines Bilanzierungsansatzes für eingekaufte Energie wird insbesondere in Bezug auf den marktbasieren Ansatz auch die Abbildung eines Energiewendennutzens diskutiert. Hiermit einher geht die Fragestellung, ob neben der Emissionsintensität weitere Faktoren der Dekarbonisierung in der PCF-Erstellung berücksichtigt werden sollten.

Im Zusammenhang mit dem marktbasieren Ansatz wird immer wieder ein **positiver Nutzen für die Energiewende** vermutet, da der Handel von HKN einen zusätzlichen Gewinn für Energieerzeuger darstellen könnte. Diese Finanzierungswirkung ist bisher jedoch nicht mit quantitativen Studien belegt und bedürfte womöglich einer höheren Nachfrage nach Grünstrom, um tatsächliche Finanzierungseffekte zu erzielen (Brander et al., 2018; Dagoumas & Koltsaklis, 2017; Hamburger & Harangozó, 2018). Zuletzt stellte Galzi (2023) fest, dass in Frankreich kaum zusätzliche Investitionen in EE durch Ökostromkund:innen erzielt wurden. Dennoch bleiben HKN bspw. ein wichtiger Bestandteil bei der Umsetzung von PPAs, um die grünen Eigenschaften übertragen zu können. Das Instrument unterstützt so zumindest indirekt die Dekarbonisierung der Energieversorgung (vgl. Styles et al., 2021).

Der marktbasierende Ansatz steht zudem in der Kritik, keine tatsächlichen Emissionsreduktionen im PCF oder CCF abzubilden. Während eine Reduktion der Emissionen nach ortsbasiertem Ansatz bedeutet, dass sich der Netzmix durch den Zubau an EE verbessert hat, kann bei einer Reduktion der Emissionsintensität eines Produktes berichtet nach dem marktbasieren Ansatz nicht unbedingt davon ausgegangen werden, dass tatsächlich Emissionen durch den Zubau neuer EE-Anlagen reduziert wurden, sondern möglicherweise nur bereits bestehende EE-Mengen umverteilt wurden (Bjørn et al., 2022; Brander et al., 2018).

Um die **Zusätzlichkeit von Grünstrom und somit tatsächliche Emissionsreduktionen** sicherzustellen, müssten Grünstromqualitäten berücksichtigt werden. Solche Zusätzlichkeitskriterien für die Grünstrombeschaffung wurden bspw. vom UBA oder dem World Wide Fund For Nature (WWF) entwickelt (vgl. UBA 2017, S. 38 ff; WWF 2021). Auch die internationale Initiative RE100<sup>3</sup> legt Strombeschaffungskriterien fest (RE100, 2022).

In der aktuellen Ausgestaltung des marktbasieren Ansatzes finden Zusätzlichkeitskriterien keinen Eingang in die Methodik zur Emissionsberechnung. Im Rahmen der Aktualisierung der GHG Protocol Scope 2 Guidance wird dies jedoch überdacht. Entweder könnte künftig informativ oder in Form einer zusätzlichen Betrachtung über die tatsächlichen Umweltauswirkungen der Grünstromqualität berichtet

---

<sup>3</sup> Die RE100 ist eine internationale Initiative, in deren Rahmen sich Unternehmen weltweit dazu verpflichten, zu 100% Energie aus erneuerbaren Quellen zu beziehen.

werden oder die Kriterien für vertragliche Instrumente könnten um Zusätzlichkeitskriterien erweitert werden (WRI 2023). Inwiefern diese Änderungen auch auf die PCF-Berechnung nach GHGP Product Standard zutreffen werden, ist unklar.

Die beiden Alternativen zum Umgang mit Zusätzlichkeitskriterien würden unterschiedliche Ausrichtungen eines PCF bedeuten. Im Life Cycle Assessment (LCA) werden zwei Konzepte der Zieldefinition unterschieden. Eine Attributional LCA betrachtet die gegenwärtigen Umweltauswirkungen eines Produktes, während die Consequential LCA, künftige Umweltauswirkungen betrachtet, die durch die Produktion und Nutzung des Produktes beeinflusst werden (Ekvall, 2020). Das Einbeziehen von Zusätzlichkeitskriterien in einen marktbasierten Berechnungsansatz mutet eher wie eine Consequential LCA an, während die marktbasierte Berechnung, wie sie aktuell ausgestaltet ist, einer Attributional LCA zugeordnet werden könnte.

## 2.6 DISKUSSION UND EMPFEHLUNG

Vor dem Hintergrund des Doppelzählungsrisikos von Energiemengen, die zur Über- oder Unterschätzung der energiebezogenen Umweltwirkungen von Produkten führen, **sollte auf eine Einigung zur konsistenten Verwendung nur eines Bilanzierungsansatzes hingewirkt werden.**

**Die Priorisierung des marktbasierten Bilanzierungsansatzes könnte einen Treiber der Dekarbonisierung in der Automobilindustrie darstellen.** Zwar ist die zusätzliche Finanzierungswirkung für die Energiewende umstritten (vgl. Brander et al., 2018; Galzi, 2023), dennoch ermöglicht der marktbasierte Ansatz Unternehmen, grundsätzlich selbst zu entscheiden, ob diese Grünstrom beschaffen, und erlaubt die Anrechnung von ambitionierten Grünstromprojekten (bspw. PPA) auf den PCF und somit eine Differenzierung zum Wettbewerb. Des Weiteren kann aufgrund des steigenden Dekarbonisierungsdrucks eine ansteigende Grünstrom-Nachfrage erwartet werden, wodurch Finanzierungswirkungen laut Brandner et al. (2018) dennoch greifen könnten. **Eine konsistente Anwendung des marktbasierten Ansatzes muss mit entsprechenden Kriterien zu zugrundeliegenden vertraglichen Instrumenten einhergehen.** Das Europäische Herkunftsnachweissystem erfüllt, wie beschrieben, die Kriterien bestehender Standards. In Bezug auf andere Nachweissysteme wäre dies zu prüfen. Derzeit obliegen Analyse und Bewertung internationaler Nachweissysteme den einzelnen berichtenden Unternehmen. Eine übergreifende Einstufung von geeigneter Stelle würde diesen Prozess vereinheitlichen und effizienter machen. Eine Variante der Harmonisierung wäre, in Bezug auf Energie außerhalb Europas (zunächst) nur eine ortsbasierte Bilanzierung zuzulassen, wie es im Rahmen von CBAM bereits angelegt ist. Eine Doppelzählung kann durch die Unterscheidung zwischen inner- und außereuropäischem Energiebezug verhindert werden. Ob dies zur Benachteiligung von Drittländern führt, wäre ebenfalls zu diskutieren.

Neben der Festlegung nur eines Bilanzierungsansatzes sollte zudem geregelt werden, dass zusätzlich zu den direkten Emissionen der Energieproduktion **auch vorgelagerte Emissionen der Energiegewinnung zwingend im PCF berücksichtigt** werden. Dies ist im Rahmen des ortsbasierten Ansatzes meist durch die Verwendung von Netzemissionsfaktoren aus LCA-Datenbanken sichergestellt. Emissionsfaktoren, die über vertragliche Instrumente übermittelt werden, müssen hinsichtlich einer vollständigen Lebenswegbetrachtung der Stromproduktion überprüft werden.

Die **Diskussion um die Zuträglichkeit des marktbasierten Ansatzes für die Energiewende** sollte auch im Kontext der PCF-Erstellung nicht außer Acht gelassen werden. Inwiefern Zusätzlichkeitskriterien Eingang in die Berechnungsmethodik finden sollten, ist auch abhängig von der Zielsetzung einer PCF-Berechnung. **Im Sinne der Diskussionen in der AhG wäre daher zu empfehlen, dem Attributional-LCA-Ansatz folgend, Zusätzlichkeitskriterien nicht innerhalb der Bilanzierungsmethoden anzusetzen, sondern gegebenenfalls eine separate Ausweisung einzuführen.**

Eine Empfehlung, die über die Bilanzierungsmethodik für PCFs hinausgeht, könnte sein, grundsätzlich strengere Grünstrombeschaffungskriterien Einzug in Förderprogramme wie bspw. EEW<sup>4</sup>, Dekarbonisierung der Industrie<sup>5</sup> oder Klimaschutzverträge (CfD)<sup>6</sup> finden zu lassen, deren Bewertungskriterien meist von den zu erreichenden Treibhausgasemissions-Reduktionen abhängig sind. Im Falle von Grünem Wasserstoff werden Zusätzlichkeitskriterien über den Delegierten Rechtsakt zu RFNBO (EU) 2023/1184 sogar bereits regulatorisch festgehalten. Selbiges könnte auch Eingang in Regularik und Initiativen finden, im Rahmen derer Unternehmen die durch den Energiebezug erreichten Emissionsreduktionen geltend machen können. Ein Beispiel ist die RE100-Initiative, die Grünstrombeschaffungskriterien setzt, um Emissionsreduktionen aus dem Energiebezug nachzuweisen.

**Über den Umgang mit eingekaufter Elektrizität hinaus stellen sich weitere Fragen, die in Bezug auf die Bilanzierung von Energie eingehender betrachtet werden sollten.** Es ist zu beachten, dass die Methoden perspektivisch **weitere Energieträger (Wärme/Kälte, Gase, Wasserstoff)** und die mit diesen einhergehenden Nachweissysteme einbeziehen sollten.

Zudem sollte der **Umgang mit Eigenerzeugungsanlagen** ausführlich geregelt und mit entsprechenden Verifizierungsanforderungen versehen werden, damit eine Doppelzählung erneuerbarer Energie vermieden werden kann. Dies ist bspw. für die Stahlindustrie ein häufiger Anwendungsfall (ISO 20915:2018; Wright, Liu, Wu & Chalasani, 2023, S. 19).

Das Thema der Energiebilanzierung findet sich auch in den Diskussionen im Rahmen von Allokationsfragen wieder, wenn es darum geht, wie **Energierückgewinnung** bilanziert werden soll oder wie die **Allokation grüner Energieeigenschaften** innerhalb einer Organisation vorgenommen werden sollte (vgl. TfS 2022, S. 50, 56ff).

**Abschließend ist festzustellen, dass eine Harmonisierung der Methoden zur Energie-Bilanzierung nicht funktionieren kann, ohne dass die jeweilige Verwendung durch entsprechende Regularik verpflichtend gemacht wird.** Nur so kann im Kontext eingekaufter Energie eine konsistente Anwendung lediglich eines Bilanzierungsansatzes vorgeschrieben und die Doppelzählung von Energiemengen vermieden sowie die Glaubwürdigkeit von Nachweissystemen gestärkt werden.

---

<sup>4</sup> Richtlinie zur Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz [BMWK], 2023).

<sup>5</sup> Richtlinie zur Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Investitionsprojekten mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität im Industriesektor. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit [BMU], 2020).

<sup>6</sup> Richtlinie zur Förderung von klimaneutralen Produktionsverfahren in der Industrie durch Klimaschutzverträge. (BMWK, 2020).

# LITERATURVERZEICHNIS

- Association of Issuing Bodies. (2023a). *EECS - European Energy Certificate System*. Verfügbar unter: <https://www.aib-net.org/eecs>
- Association of Issuing Bodies. (2023b). *European Residual Mixes 2022*. Brüssel. Verfügbar unter: [https://www.aib-net.org/sites/default/files/assets/facts/residual-mix/2022/AIB\\_2022\\_Residual\\_Mix\\_Results\\_inclAnnex.pdf](https://www.aib-net.org/sites/default/files/assets/facts/residual-mix/2022/AIB_2022_Residual_Mix_Results_inclAnnex.pdf)
- Association of Issuing Bodies. (2023c). *European Energy Certificate System (EECS) Rules. Release 8 v1.6*. Brüssel.
- Bjørn, A., Lloyd, S. M., Brander, M. & Matthews, H. D. (2022). Renewable energy certificates threaten the integrity of corporate science-based targets. *Nature Climate Change*, 12(6), 539–546. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01379-5>
- Brander, M. & Bjørn, A. (2023). Principles for accurate GHG inventories and options for market-based accounting. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(10), 1248–1260. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02203-8>
- Brander, M., Gillenwater, M. & Ascui, F. (2018). Creative accounting: A critical perspective on the market-based method for reporting purchased electricity (scope 2) emissions. *Energy Policy*, 112, 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.051>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2020). *Richtlinie zur Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Investitionsprojekten mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität im Industriesektor. (Förderrichtlinie zur Dekarbonisierung in der Industrie)* (Bundesanzeiger, Hrsg.) (BAnz AT 15.01.2021 B5). Verfügbar unter: [https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Foerderprogramm/Foerderrichtlinie\\_Dekarbonisierung\\_in\\_der\\_Industrie.pdf](https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Foerderprogramm/Foerderrichtlinie_Dekarbonisierung_in_der_Industrie.pdf)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2020). *Richtlinie zur Förderung von klimaneutralen Produktionsverfahren in der Industrie durch Klimaschutzverträge. (Förderrichtlinie Klimaschutzverträge - FRL KSV)*. ENTWURF v. 6.6.2023. Verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/klimaschutzvertraege-foerderrichtlinie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/klimaschutzvertraege-foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2023). *Bekanntmachung\* der Richtlinie zur Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Förderwettbewerb* (BAnz AT 25.05.2023 B1). Verfügbar unter: <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/EcD1UbbCMpayBkED8Ui/content/EcD1UbbCMpayBkED8Ui/BAnz%20AT%2025.05.2023%20B1.pdf?inline>
- Catena-X Automotive Network e.V. (2023). *Catena-X Product Carbon Footprint Rulebook CX-PCF Rules. Version 2.0*.
- Dagoumas, A. S. & Koltsaklis, N. E. (2017). Price Signal of Tradable Guarantees of Origin for Hedging Risk of Renewable Energy Sources Investments. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(4), 59–67. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/320417729\\_Price\\_Signal\\_of\\_Tradable\\_Guarantees\\_of\\_Origin\\_for\\_Hedging\\_Risk\\_of\\_Renewable\\_Energy\\_Sources\\_Investments](https://www.researchgate.net/publication/320417729_Price_Signal_of_Tradable_Guarantees_of_Origin_for_Hedging_Risk_of_Renewable_Energy_Sources_Investments)

- Ekvall, T. (2020). Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. In M. José Bastante-Ceca, J. Luis Fuentes-Bargues, L. Hufnagel, F.-C. Mihai & C. Iatu (Hrsg.), *Sustainability Assessment at the 21st century*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89202>
- Energy Track and Trace. (2023). *ABOUT ENERGY TRACK AND TRACE: Digital proof that sustainable energy choices make a real difference*. Verfügbar unter: <https://energytrackandtrace.com/>
- EnergyTag. (2023). *EnergyTag and granular energy certificates: Accelerating the transition to 24/7 clean power*. London. Verfügbar unter: <https://www.energytag.org/wp-content/uploads/2021/05/EnergyTag-and-granular-energy-certificates.pdf>
- Europäische Kommission. (2021, 15. Dezember). *Product Environmental Footprint Method*. Annex 1 zur Empfehlung (EU) 2021/2279 der EU-Kommission.
- European Aluminium. (2018). *Environmental Profile Report. Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe*.
- European Aluminium. (2023). *Methodological guidance for the environmental assessment of aluminum intermediate and semi-finished products*. Brussels.
- Galzi, P.-Y. (2023). Do green electricity consumers contribute to the increase in electricity generation capacity from renewable energy sources? Evidence from France. *Energy Policy*, 179, 113627. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113627>
- Hamburger, Á. & Harangozó, G. (2018). Factors Affecting the Evolution of Renewable Electricity Generating Capacities: A Panel Data Analysis of European Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(5), 161–172. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/327688474\\_Factors\\_Affecting\\_the\\_Evolution\\_of\\_Renewable\\_Electricity\\_Generating\\_Capacities\\_A\\_Panel\\_Data\\_Analysis\\_of\\_European\\_Countries](https://www.researchgate.net/publication/327688474_Factors_Affecting_the_Evolution_of_Renewable_Electricity_Generating_Capacities_A_Panel_Data_Analysis_of_European_Countries)
- Holzappel, P., Bach, V. & Finkbeiner, M. (2023). Electricity accounting in life cycle assessment: the challenge of double counting. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(7), 771–787. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02158-w>
- ISO 14067:2018. *Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 14044:2006 (2018). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 20915:2018 (November 2018). *Life cycle inventory calculation methodology for steel products*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Joint Research Center. (2023). *Harmonised rules for the calculation of the Carbon Footprint of Electric Vehicle Batteries (CFB-EV). Draft Version* (JRC Science for Policy Report). Europäische Kommission.
- Mundt, J., Werner, R. & Maaß, C. (2019). AP 4: Ausweisung der Umweltwirkung durch Strom-bezug von Unternehmen und öffentlicher Hand. In Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.), *Marktanalyse Ökostrom II. Marktanalyse Ökostrom und HKN, Weiterentwicklung des Herkunftsnachweissystems und der Stromkennzeichnung Abschlussbericht* (Climate Change, 30/2019, S. 317–383).
- NetAnders (TenneT & Gasunie Energy, Hrsg.). (2023). *CO2 Monitor - Principles*. Verfügbar unter: <https://co2monitor.nl/en/principles>

- RE100. (2022). *RE100 Technical Criteria. Version 4.1* (Carbon Disclosure Project (CDP), Hrsg.). London, New York, New Dehli. Verfügbar unter: <https://www.there100.org/sites/re100/files/2022-12/Dec%2012%20-%20RE100%20technical%20criteria%20%2B%20appendices.pdf>
- Schneider, L., Kollmuss, A. & Lazarus, M. (2015). Addressing the risk of double counting emission reductions under the UNFCCC. *Climatic Change*, 131(4), 473–486. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1398-y>
- Sotos, M. (2015). *GHG Protocol Scope 2 Guidance. An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard* (World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), Hrsg.). Verfügbar unter: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Scope%20%20Guidance.pdf>
- Styles, A., Kemper, M., Jeuk, M., Herrmann, N., Fusar Bassini, C. & Krämer, K. (2023). *Analyse eines Unternehmensentwertungs-rechts für Strom-Herkunftsnachweise in Deutschland. Vorschläge und Auswirkungen* (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.) (Climate Change 24/2023). Dessau-Roßlau. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/24\\_2023\\_cc\\_analyse\\_eines\\_unternehmensentwertungsrechts\\_fuer\\_strom-herkunftsnachweise\\_in\\_deutschland.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/24_2023_cc_analyse_eines_unternehmensentwertungsrechts_fuer_strom-herkunftsnachweise_in_deutschland.pdf)
- Styles, A., Werner, R. & Maaß, C. (2021). *Zweck und instrumentelle Leistungsfähigkeit von Herkunftsnachweisen Status quo und Weiterentwicklungsperspektiven. GO4Industry Grundlagen – Bericht G2*. Gefördert durch BMU (FKZ: UM20DC003). Hamburg: Hamburg Institut. Verfügbar unter: [https://go4industry.com/wp-content/uploads/2021/11/HIC\\_2021\\_Einsatzzwecke-von-Herkunftsnachweisen\\_final.pdf](https://go4industry.com/wp-content/uploads/2021/11/HIC_2021_Einsatzzwecke-von-Herkunftsnachweisen_final.pdf)
- TenneT, FfE (Mitarbeiter). (2023). *TenneT Digital Data Days: Successful CO2 Monitor Workshop with FfE*. Verfügbar unter: <https://www.tennet-digitaldataday.eu/updates/co2-monitor-workshop>
- Together for Sustainability. (2022). *The Product Carbon Footprint Guideline for the Chemical Industry. Specification for product Carbon Footprint and Corporate Scope 3.1 Emission Accounting and Reporting* (Version 2.0).
- Umweltbundesamt. (2017). *Beschaffung von Ökostrom - Arbeitshilfe für eine europaweite Ausschreibung der Lieferung von Ökostrom im offenen Verfahren*. Dessau-Roßlau. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-17\\_broschuere\\_leitfaden-oekostrom-ausschreibung\\_korr.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-17_broschuere_leitfaden-oekostrom-ausschreibung_korr.pdf)
- Verein Deutscher Ingenieure. (2023). *VDI-Analyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Pkw mit verschiedenen Antriebssystemen. Wann wird Autofahren grün?*
- World Business Council for Sustainable Development. (2023, Januar). *Pathfinder Framework. Guidance for the Accounting and Exchange of Product Life Cycle Emissions*. Verfügbar unter: <https://www.wbcd.org/contentwbc/download/15625/226889/1>
- World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute. (2011). *Greenhouse Gas Protocol - Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*.
- World Resources Institute. (2023). *Greenhouse Gas Protocol Detailed Summary of Responses from Scope 2 Guidance Stakeholder Survey*. Verfügbar unter: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-11/Scope%20%20Survey%20Summary\\_Final\\_0.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-11/Scope%20%20Survey%20Summary_Final_0.pdf)
- World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol - A Corporate Accounting and Reporting Standard*.
- World Steel Association. (2017). *Life cycle inventory methodology report for steel products* (World Steel Association, Hrsg.).

World Wide Fund for Nature. (2021). *WWF-Kriterien zu Ökostrom. Nach welchen Kriterien sollte Ökostrom beschafft werden, um in besonderem Maße die Energiewende zu fördern?* Berlin. Verfügbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/WWF-oekostrom-kriterien.pdf>

Wright, L., Liu, X., Wu, I. & Chalasani, S. (2023, Juni). *Steel Emissions Reporting Guidance* (Rocky Mountain Institute, Hrsg.). Verfügbar unter: [https://rmi.org/wp-content/uploads/2022/09/steel\\_emissions\\_reporting\\_guidance.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2022/09/steel_emissions_reporting_guidance.pdf)

# 3. PRODUCT CARBON FOOTPRINT: RECYCLING

---

## 3.1 AUSGANGSSITUATION UND FRAGESTELLUNG

Dem Konzept der Ökobilanzierung (engl. Life Cycle Assessment, LCA) liegt der Anspruch zugrunde, die Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen von der Ressourcengewinnung bis zur Abfallbehandlung, von der „Wiege“ bis zum „Grab“ (engl. cradle-to-grave), zu erfassen. In dieser Struktur lassen sich lineare Produktlebenszyklen intuitiver abbilden als verzweigte zirkuläre Wertschöpfungsketten. Die Bilanzierung von Recyclingprozessen gehört auch deshalb zu den intensiv diskutierten Aspekten des LCA.

Die Diskussion dreht sich insbesondere um die Frage, welchem Produktsystem im Materialkreislauf die Einsparung von Treibhausgasemissionen (THG) zugeschrieben werden soll: dem Produktsystem, das am Lebensende (engl. end-of-life, EoL) recycelbar ist, dem Produktsystem, in welchem das recycelte Material eingesetzt wird, oder beiden. In der regulatorischen und wettbewerblichen Anwendung des Product Carbon Footprint (PCF) erhält diese Diskussion eine stark wirtschaftliche Bedeutung für die beteiligten Unternehmen. Darüber hinaus besteht eine Herausforderung in der Klassifizierung und Nachverfolgung von Sekundärmaterialströmen.

Das vorliegende Kurzpapier stellt die Grundzüge der Diskussion in Wissenschaft und (Automobil-) Wirtschaft dar. Mit Bezug zu den Handlungsempfehlungen der AhG werden Impulse zur weiteren Diskussion gegeben.

## 3.2 METHODISCHE KONZEPTE

Die Norm zur Ökobilanzierung ISO 14044:2006 beinhaltet Leitprinzipien zur Modellierung von Recyclingprozessen. Die Emissionen von Primärmaterialherstellung, Recycling und Entsorgung müssen innerhalb einer Produktkaskade den jeweiligen Produkten zugeordnet werden.

In der Modellierung solcher Systeme werden nach ISO 14044:2006 drei Fälle unterschieden, vgl. *Abbildung 1*. Über die „richtige“ Auswahl und Interpretation dieser Fälle in der Praxis wird der eingangs beschriebene Diskurs geführt. Im geschlossenen Kreislauf (engl. closed loop) wird das Material im selben Produktsystem wiederverwendet, in dem es entstanden ist (Fall 1). Eine Allokation zwischen verschiedenen Produktsystemen ist somit nicht notwendig.

Wenn das Material das ursprüngliche Produktsystem verlässt, die inhärenten Eigenschaften jedoch behält, kann der Prozess dennoch als closed loop modelliert werden (Fall 2). Das Eingangsmaterial des bilanzierten Produkts wird dann zunächst einheitlich mit dem Emissionsfaktor vom Primärmaterial bewertet. Das Produkt erhält jedoch eine Gutschrift für dessen Wiederverwendbarkeit bzw.

-verwertbarkeit (engl. recyclability). Über eine angenommene Recyclingrate wird berechnet, in welcher Höhe Emissionen vermieden werden, weil im nächsten Produkt auf die entsprechende Produktion von Primärmaterial verzichtet werden kann. Sie wird daher u.a. **Avoided-Burden-Approach (ABA)** genannt. Diese Methodenbezeichnung ist jedoch nicht eindeutig. Synonym verwendet werden bspw. die Begriffe Closed-Loop-Approximation-, 0/100-, End-of-Life- und (Recyclability-)Substitution-Approach.

Je besser im ABA über die Recyclingrate die *Recyclability* von Produkten bewertet wird, desto geringer ist der Product Carbon Footprint (PCF) des jeweiligen Produkts.

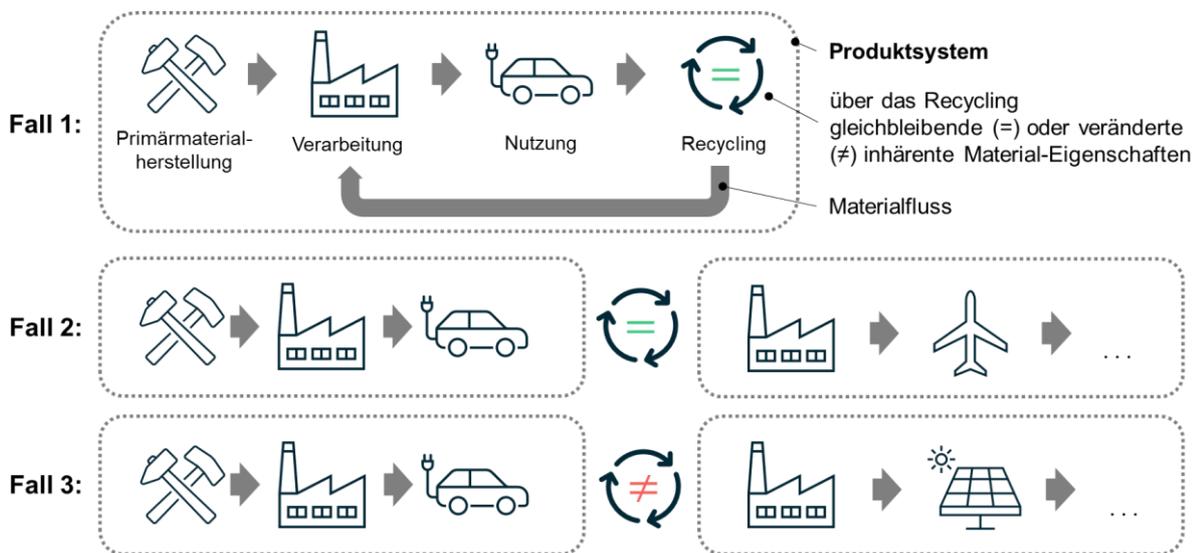


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der drei Fälle zur Allokation von Emissionen zu Produktsystemen für Recyclingprozesse nach ISO 14044:2006. Eigene Darstellung.

Durchläuft das Material mehrere Produktsysteme und verändert seine inhärenten Eigenschaften (Fall 3), sieht ISO 14044:2006 die Allokation von Emissionen anhand von physikalischen Eigenschaften, ökonomischen Werten oder der Anzahl späterer Nutzungen (in dieser Priorisierung) vor.

Der **Cut-Off-Approach<sup>7</sup> (COA)** stellt eine häufig verwendete Variante dieser Allokation dar. Die Emissionen der Primärmaterialherstellung werden demnach vollständig dem vorherigen Produkt im Materialkreislauf zugeordnet. Das Sekundärmaterial geht (üblicherweise) nur mit den Emissionen der Wiederaufbereitung in das Produktsystem ein.

Je höher der *Anteil von Sekundärmaterial* (engl. recycled content) im Produkt ausfällt, desto geringer ist in der Regel der PCF nach COA. Eine Ausnahme hierzu stellt das chemische Recycling von Kunststoff dar (Together for Sustainability [TfS], 2022).

Es existieren zahlreiche Varianten und Adaptionen der oben genannten Ansätze, vgl. Ekvall et al. (2020). Von besonderer Relevanz ist die **Circular Footprint Formula (CFF)** der Methodik zum Product Environmental Footprint (PEF). Diese berücksichtigt sowohl Recycled Content als auch Recyclability des Produkts, stellt also einen Kompromiss aus ABA und COA dar. Über einen Allokationsfaktor und einen Quotienten für die Materialqualität von Sekundär- zu Primärmaterial

<sup>7</sup> Analog zu ABA, siehe oben. Synonym: 100/0-, Recycled-Content-Methode.

werden die Emissionen zwischen den Produkten aufgeteilt, welche das Material liefern bzw. verwenden. Für die Parameter sieht die PEF-Methodik Standardwerte, z.B. einheitlich für alle Metalle, vor. Die Bilanzierung von Zwischenprodukten<sup>8</sup> bzw. Cradle-to-gate<sup>9</sup>-Studien sollen in erster Linie nach COA und zusätzlich informativ nach CFF durchgeführt werden. (Europäische Kommission [EC], 2021)

### 3.3 VERGLEICH DER METHODEN

Die wissenschaftliche Diskussion um Vor- und Nachteile der Methoden wird bereits seit Anfang der neunziger Jahre geführt. Die Autor:innen kommen zu unterschiedlichen Empfehlungen, je nachdem welche **Kriterien** angelegt wurden. Einige Facetten der Diskussion werden nachfolgend kurz aufgegriffen.

Ekvall et al. (2020) bewerten zwölf Varianten der oben vorgestellten Konzepte anhand von zehn Kriterien. Das Ergebnis soll schwedischen Wirtschaftsakteuren als Diskussionsgrundlage dienen, daher wird keine abschließende Empfehlung ausgesprochen. Die Autor:innen stellen lediglich fest, dass die Anforderungen an die Methode stark abhängig von der jeweiligen **Anwendung** (Policy, externe Kommunikation, interne Auswertung) sind.

Frischknecht (2010) diskutiert die Ansätze im kulturellen Kontext. Der COA entspreche dem Konzept der starken **Nachhaltigkeit**, demnach natürliches nicht durch menschengemachtes Kapital ersetzt werden kann, und impliziere eine geringe **Risikoaffinität**. Im Kontrast dazu sei der ABA einem schwachen Nachhaltigkeitsverständnis und einer hohen Risikobereitschaft zuzuordnen, da über die Gutschrift von künftigen Generationen ein Kredit für Umweltbelastungen aufgenommen wird, die den zunächst hypothetischen Recyclingprozess umsetzen müssen, um tatsächlich THG-Emissionen einzusparen.

Die Wahl der Methode ist ebenso abhängig von der **Zielsetzung** des LCA. Zwei grundsätzliche Zielsetzungen werden hier unterschieden: Das Attributional LCA ordnet die gegenwärtigen globalen Umweltauswirkungen dem jeweiligen Produkt zu, das Consequential LCA bewertet die künftige Änderung der Umweltauswirkungen durch Herstellung und Nutzung des Produkts (Ekvall, 2020). Der COA ist der Attributional LCA zuzuordnen, während die ABA i.d.R. der Consequential LCA entspricht (Schrijvers, 2017).

Das GHG Protocol listet folgende Entscheidungskriterien auf: Wenn die **Nutzungsdauer** des Produkts kurz und bekannt ist, kann der ABA angewendet werden. Gleiches gilt, wenn die **Nachfrage** nach Sekundärmaterial das Angebot übersteigt oder am Markt eine Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärmaterial nicht möglich ist. Für das jeweilige Gegenteil wird der COA empfohlen, ebenso, sofern das Unternehmen uneingeschränkte **Kontrolle** über den Recycled Content im Produkt hat. (World Business Council for Sustainable Development [WBCSD] & World Resources Institute [WRI], 2011, S. 74)

Für die Entwicklung der CFF wurden folgende Anforderungen formuliert: Die Methode soll die **Vergleichbarkeit** von Produkten unterstützen, sowohl Recycled Content als auch Recyclability

---

<sup>8</sup> Zwischenprodukte sind in der Nomenklatur des PEF solche Produkte, die weiterer Verarbeitung bedürfen, bevor sie an den Endverbraucher verkauft werden können (Europäische Kommission [EC] (2021).

<sup>9</sup> Die „Cradle-to-gate“-Systemgrenze umfasst alle Lebenszyklusphasen von der Rohstoffgewinnung bis zum Werkstor (i.d.R. des Unternehmens, welches das LCA erstellt).

berücksichtigen, hohe **Akzeptanz** ermöglichen, **universell auf Produkte anwendbar** und **physisch korrekt** sein (Allacker, Mathieux, Pennington & Pant, 2017). Finkbeiner, Bach und Lehrmann (2019) kritisieren, dass die CFF für vergleichende Aussagen nicht geeignet ist, insbesondere aufgrund der unzureichend abgebildeten Qualitätsverluste zwischen Primär- und Sekundärmaterial (engl. downcycling).

Durch die sukzessive Implementierung des PCF als regulatorisches Instrument<sup>10</sup> erhöht sich der Entscheidungsdruck. Die Diskussion verlagert sich dadurch von der Wissenschaft auf die Politik und Wirtschaft. In den für die Automobilwirtschaft relevanten Branchen werden die nachfolgend dargestellten Ansätze diskutiert.

Im vorliegenden Entwurf der Methodik für den **Batteriepass** der Europäischen Union (EU) ist die CFF, ohne die o.g. Ausnahme auf COA für Zwischenprodukte<sup>8</sup>, enthalten (Joint Research Center [JRC], 2023). Das Konsortium des Battery Pass und eine Koalition von Akteuren der Automobilwirtschaft kritisieren diese Entscheidung und sprechen sich stattdessen für den COA aus (Braunfels & Teuber, 2023; European Association of Automotive Suppliers [CLEPA], 2023).

**Verbände der Metallindustrie** argumentierten in der Vergangenheit dafür, metallische Produkte nach ABA zu bilanzieren (Atherton, 2007, S. 60). Die Methoden für Stahlprodukte kombinieren ABA und COA (ISO 20915:2018; World Steel Association [WSA], 2017). Eingesetztes Sekundärmaterial wird nach COA bewertet, die Gutschrift am Lebensende berücksichtigt die Differenz des im Produktsystem ein- und ausgehenden Sekundärmaterials. Die Normen für Environmental Product Declarations (EPD) von Bauprodukten folgen einem vergleichbaren Ansatz. Aufgrund der Langlebigkeit von Gebäuden darf die EoL-Gutschrift jedoch nur informativ angegeben werden (ISO 21930:2017; DIN EN 15804:2020-03).

Das WBCSD **Pathfinder Framework** zielt branchenübergreifend auf die konsistente, primärdatenbasierte Berechnung von PCF in Lieferketten. Da die Systemgrenze der zugehörigen Methodenrichtlinie nicht das EoL einschließt (cradle-to-gate), soll der COA Anwendung finden. Zudem sei der COA universell anwendbar und vermeide auf einfache Weise Doppelzählung. (WBCSD, 2023) Für **Together for Sustainability** (TfS) stellt der COA eine unzureichende Abbildung von relevanten Beiträgen zur Kreislaufwirtschaft dar (Together for Sustainability, 2023, S. 11). In der TfS-Guideline wird vorrangig auf Produktkategorie-Regeln, z.B. PlasticsEurope, verwiesen. Erst in letzter Instanz soll der COA angewendet und um eine informative EoL-Betrachtung ergänzt werden. Zudem wird die sog. Upstream-System-Expansion-Methode vorgeschlagen: Ein Produkt aus recyceltem Kunststoff erhält darüber beispielsweise eine Gutschrift in der Rohstoffgewinnung, da im vorherigen Produktsystem kein Material verbrannt wurde. Im Unterschied zum ABA basiert die Gutschrift somit nicht auf zukünftigen, sondern vorherigen Recyclingprozessen. (TfS, 2022, S. 61)

### 3.4 KLASSIFIZIERUNG VON SEKUNDÄRMATERIAL

An die obige Diskussion zur Allokation innerhalb einer Produktkaskade schließt sich die Frage an, wie in der Kaskade die Systemgrenzen gezogen werden und an welchen Punkten des Lebenszyklus

---

<sup>10</sup> Siehe Bericht der Begleitforschung von Prognos und Fraunhofer IAO als gesonderter Anhang zu den Handlungsempfehlungen der AhG.

Primär- zu Sekundärmaterial wird. Insbesondere unter Anwendung von COA und CFF hat dies maßgeblichen Einfluss auf den PCF.

Die LCA nach ISO 14044:2006 unterscheidet drei Output-Kategorien. Produkte sowie Koppelprodukte sind wertvolle Waren oder Dienstleistungen, Abfall ist zur Entsorgung vorgesehen. Sekundärmaterial wird aus Abfall zurückgewonnen und entsprechend den oben dargestellten Methoden bewertet.

Häufig wird zur Begriffsdefinition zusätzlich die Norm für Umweltkennzeichnungen und -deklarationen ISO 14021:2016 herangezogen. Diese unterscheidet Recycled Content in Pre- und Post-Consumer-Material (nachfolgend Pre-Con und Post-Con), je nachdem, ob dieses vor oder nach der Nutzungsphase anfällt.

Diese Unterscheidung wird von ISO 14067:2018 und GHG Protocol (WBCSD & WRI, 2011) nicht aufgegriffen. In der Praxis ist die jeweilige Zuordnung daher nicht konsistent: Während Post-Con eindeutig als Sekundärmaterial eingestuft werden kann, fällt die Bewertung von Pre-Con unterschiedlich aus. Vielfach wird dieses als Sekundärmaterial eingestuft. Es kann jedoch ebenso argumentiert werden, dass bspw. Verschnitt oder Ausschuss in der Metallbearbeitung zu keinem Zeitpunkt zur Entsorgung vorgesehen oder wertlos ist.

Insbesondere die Aluminium-Branche befasst sich daher intensiv mit der Frage, wie Pre-Con bewertet werden soll (International Aluminium Institute, 2023). Laut TfS-Guideline soll „wertvolles“ Pre-Con als Koppelprodukt klassifiziert und entsprechend in der Bilanzierung behandelt werden. (TfS, 2022) Die PEF-Methode erlaubt beide Optionen (EC, 2021).

Darüber hinaus lässt die Definition von Recycled Content und Pre-Con in ISO 14021:2016 Interpretationsspielraum. Von diesen Kategorien ausgeschlossen sind Materialien, die „im selben Prozess“ wiederverwendet werden können, in dem sie angefallen sind. Der Begriff „Prozess“ ist hier nicht näher definiert. In einigen branchenspezifischen Methoden finden sich daher Konkretisierungen bezogen auf die jeweilige Wertschöpfungskette (WSA, 2017).

Relevant wird die Abgrenzung insbesondere mit Blick auf die Fertigungstiefe von Unternehmen. Einige Unternehmen decken große Teile einer Wertschöpfungskette ab. Im Sinne von ISO 14021:2016 könnte die Wiederverwendung von Material „im selben Prozess“ somit nicht als Recycled Content angerechnet werden. In anderen Fällen ist dieselbe Prozesskette zwischen mehreren Akteuren geteilt und es kann eine Anrechnung von Pre-Con geltend gemacht werden. Wright, Liu, Wu und Chalasani (2023) schlagen für dieses Problem am Beispiel von Stahl die einheitliche Bewertung anhand einer Referenz-Systemgrenze vor.

### 3.5 DISKUSSION UND IMPULSE

Wie dargestellt, wurden die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Allokationsmethoden für Recyclingprozesse in der Fachliteratur umfassend diskutiert. Immer wieder kommen LCA-Expert:innen zu dem Schluss, dass es keine naturwissenschaftlich „richtige“ Methode gebe. Die Wahl sei abhängig von den jeweiligen (politischen) Randbedingungen des LCA (Allacker et al., 2017; Frischknecht, 2010).

Die AhG zielt mit den vorliegenden Handlungsempfehlungen auf eine verstärkt primärdaten-basierte Erfassung von THG-Emissionen in der automobilen Wertschöpfungskette ab. Unternehmen sollen ausschließlich ihre Gate-to-gate-Emissionen (Scope 1 & 2) in die PCF-Berechnung einbringen. Diese Zielsetzung entspricht einer Attributional LCA. Die Lebensdauer eines Automobils umfasst in der

Regel mehr als zehn Jahre, konkrete Annahmen zu Recyclability und Downcycling wären daher mit starken Unsicherheiten behaftet. Mit Blick auf die im Abschnitt „**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**“ aufgeführten Kriterien ist die **Empfehlung des Cut-Off-Approach** durch die AhG eine logische Konsequenz. Das Pathfinder Framework kommt unter vergleichbaren Prämissen zum selben Schluss (WBCSD, 2023).

Wie in den Handlungsempfehlungen angedeutet wird, hat diese Entscheidung **Nebeneffekte**. Ein zentraler kritischer Punkt ist, dass der COA ausschließlich den Einsatz von Sekundärmaterial incentiviert. Weitere Faktoren einer Kreislaufwirtschaft, die etwa auf die Recyclingfähigkeit von Produkten einzahlen, finden keine Berücksichtigung im PCF.

Es ist zu diskutieren, inwiefern diese fehlenden Impulse für die automobilen Wertschöpfungsketten stattdessen anderweitig gesetzt werden. Als Teil des **EU Circular Economy Action Plan** liegt derzeit im Entwurf eine Verordnung zur Stärkung der automobilen Kreislaufwirtschaft vor, mit der die gültige Altfahrzeugrichtlinie (2000/53/EG)<sup>11</sup> sowie die 3R-Typgenehmigungsrichtlinie (2005/64/EG)<sup>12</sup> abgelöst werden sollen<sup>13</sup>. Für Kunststoffe soll demnach bis 2031 in Neufahrzeugen ein Recycled Content von 25 % umgesetzt werden, ein Viertel davon wiederum aus Altfahrzeugen stammend. Für andere Rohstoffe, vorerst Stahl, sollen entsprechende Vorgaben erarbeitet werden. Bereits in 2000/53/EG wird für die Wiederverwendbarkeit oder Recyclingfähigkeit ein Zielwert von 85 % der Masse gesetzt. Für die Berechnung dieser Werte wird auf ISO 22628:2002-02 verwiesen. Die neue Verordnung sieht zur Unterstützung der Berechnung und Überprüfung der gleichbleibenden Vorgaben die Entwicklung einer neuen, einheitlichen **Berechnungsmethode** vor.

Komplementär dazu enthält auch die EU-Batterieverordnung neben dem PCF gesonderte Schwellenwerte für den Recycled Content und die Recyclingrate. Auch Taxonomie und Corporate Sustainability Directive (CSRD) der EU adressieren Aspekte der Kreislaufwirtschaft.

**Das Zusammenspiel der PCF-Berechnung nach COA in den automobilen Lieferketten und der genannten Regulatorik im Sinne der Förderung von Kreislaufwirtschaft sollte tiefergehend diskutiert werden.**

Der starke Anreiz des COA in Bezug auf den Recycled Content erfordert eine einheitliche Regelung in Bezug auf die **Differenzierung von Sekundärmaterial**. Die Entstehung von Pre-Consumer-Material stellt prinzipiell eine Ineffizienz im Produktionsprozess dar. Das jeweilige Material durchläuft Prozessschritte mehrfach, bevor es zu einem Produkt wird. So entstehen pro Produkteinheit (theoretisch) unnötige Emissionen. Die Wiederverwertung des Materials ist aus ökologischen und in der Regel auch ökonomischen Gründen sinnvoll. Die Wiederverwertung von Post-Consumer-Material erfordert in den meisten Fällen einen höheren technischen und finanziellen Aufwand als der Einsatz von Pre-Consumer-Material. Eine unterschiedliche Bewertung von Pre-Consumer-Material, abhängig davon, ob es von einem oder mehreren Akteuren zum Endprodukt verarbeitet wird, erscheint zufällig und nicht zielführend.

**Für die wichtigsten Grundstoffe der automobilen Lieferketten sollte jeweils eine Definition und**

---

<sup>11</sup> Europäisches Parlament und Europäischer Rat. Richtlinie über Altfahrzeuge. 2000/53/EG.

<sup>12</sup> Europäisches Parlament und Europäischer Rat. Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates. 2005/64/EG.

<sup>13</sup> Europäische Kommission. (2023). Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG. 2023/0284 (COD).

**Differenzierung von Sekundärmaterial und Koppelprodukten entwickelt werden. Zur Umsetzung dieser ist eine glaubwürdige Erfassung und Nachverfolgung von Materialströmen erforderlich. Insbesondere kleine Unternehmen benötigen Unterstützung im Aufbau geeigneter Strukturen und Prozesse.**

Für viele Grundstoffe, z.B. Stahl und Aluminium, wird prognostiziert, dass der weltweite Bedarf an diesen in den kommenden Jahrzehnten überwiegend *nicht* durch Sekundärmaterial gedeckt werden kann (Mission Possible Partnership [MPP], 2022, 2023). Die schnelle **Dekarbonisierung der Primärmaterialherstellung** ist somit essenziell für einen erfolgreichen Klimaschutz, unabhängig vom Erstarren der Kreislaufwirtschaft.

Unter Anwendung des COA ist ein niedriger PCF derzeit in vielen Branchen deutlich kostengünstiger und schneller durch Einsatz von Sekundärmaterial (insbesondere Pre-Consumer-Material) umzusetzen als über investitionsintensive Technologiewechsel in der Primärmaterialherstellung. Vielfach sind diese technologischen Maßnahmen noch gar nicht im kommerziellen Maßstab verfügbar. Im Kontext der Definition von Grünstahl verfolgen die International Energy Agency [IEA] (2022) und ResponsibleSteel (2022) einen sog. **Sliding-Scale-Approach**, um eine unverhältnismäßige methodische Bevorzugung von Sekundärmaterial zu umgehen: Der PCF wird u.a. in Abhängigkeit von Primär- und Sekundärmaterialanteil in Bezug zu einem sektorspezifischen Dekarbonisierungs-Zielpfad gesetzt. Die Interpretation des PCF erfolgt somit nicht mehr rein anhand des Absolutwerts, sondern in (abstrahiertem) Bezug zu technologischen Rahmenbedingungen.

**Es ist zu diskutieren, ob eine Methode vergleichbar zum Sliding-Scale-Approach in der Automobilbranche für die Interpretation von PCF in der Lieferkette adaptiert und gegebenenfalls auf weitere Grundstoffe, insbesondere Metalle, ausgeweitet werden sollte und kann.**

Wie im Papier dargestellt, knüpft die Diskussion der genannten Punkte an bestehenden Arbeiten und Initiativen an. Die aktuelle Herausforderung besteht in der branchenübergreifenden Harmonisierung der Methoden für die Anwendungspraxis. Aufgrund ihrer weit verzweigten Wertschöpfungsketten eignet sich besonders die Automobilwirtschaft als Treiber dieser Harmonisierungsprozesse.

# LITERATURVERZEICHNIS

- Allacker, K., Mathieux, F., Pennington, D. & Pant, R. (2017). The search for an appropriate end-of-life formula for the purpose of the European Commission Environmental Footprint initiative. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(9), 1441–1458. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1244-0>
- Atherton, J. (2007). Declaration by the Metals Industry on Recycling Principles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(1), 59–60. <https://doi.org/10.1065/lca2006.11.283>
- Braunfels, A. S. & Teuber, A. (2023, April). *Comparison of end-of-life allocation approaches. An analysis complementing the Battery Pass Rules for calculating the Carbon Footprint of the 'End-of-life and recycling' life cycle stage* (Systemiq, Hrsg.). Verfügbar unter: [https://thebatteryass.eu/assets/images/content-guidance/pdf/2023\\_Battery\\_Passport\\_EOL\\_Analysis.pdf](https://thebatteryass.eu/assets/images/content-guidance/pdf/2023_Battery_Passport_EOL_Analysis.pdf)
- DIN EN 15804:2020-03 (2020). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Ekvall, T. (2020). Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. In M. José Bastante-Ceca, J. Luis Fuentes-Bargues, L. Hufnagel, F.-C. Mihai & C. Iatu (Hrsg.), *Sustainability Assessment at the 21st century*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89202>
- Ekvall, T., Björklund, A., Sandin, G., Jelse, K., Lagergren, J. & Rydberg, M. (2020, Mai). *Modeling recycling in life cycle assessment* (Swedish Life Cycle Center, Hrsg.) (2020:05). Göteborg, Schweden. Verfügbar unter: [https://www.lifecyclecenter.se/wp-content/uploads/2020\\_05\\_Modeling-recycling-in-life-cycle-assessment-1.pdf](https://www.lifecyclecenter.se/wp-content/uploads/2020_05_Modeling-recycling-in-life-cycle-assessment-1.pdf)
- Europäische Kommission. (2021, 15. Dezember). *Product Environmental Footprint Method*. Annex 1 zur Empfehlung (EU) 2021/2279 der EU-Kommission.
- European Association of Automotive Suppliers. (2023). *Joint Letter of Concern: Final JRC draft of the "Rules for the calculation of the Carbon Footprint of Electric Vehicle Batteries (CFB-EV)" and the suggested approach to account for recycled materials*. Verfügbar unter: [https://clepa.eu/wp-content/uploads/2023/07/Joint-Letter-of-Concern\\_Carbon-Footprint-Rules-EV-Batteries.pdf](https://clepa.eu/wp-content/uploads/2023/07/Joint-Letter-of-Concern_Carbon-Footprint-Rules-EV-Batteries.pdf)
- Finkbeiner, M., Bach, V. & Lehrmann, A. (2019, Januar). *Environmental Footprint: Der Umwelt-Fußabdruck von Produkten und Dienstleistungen. Abschlussbericht* (Umweltbundesamt, Hrsg.) (TEXTE 76/2018). Dessau-Roßlau: Technische Universität Berlin.
- Frischknecht, R. (2010). LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(7), 666–671. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0201-6>
- International Aluminium Institute. (2023, Januar). *Reference document on how to treat scrap flows in carbon footprint calculations for aluminium products*. Draft for public review. International Aluminium Institute.
- International Energy Agency. (2022, Mai). *Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members*. Paris. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-sectors-in-g7-members>
- ISO 14067:2018. *Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 22628:2002-02 (Februar 2002). *Straßenfahrzeuge - Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit - Berechnungsverfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 14021:2016 (März 2016). *Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 21930:2017 (30.11.2017). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Grundregeln für die Umweltdeklaration von in Bauwerken verwendeten Bauprodukten und technischen Anlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 14044:2006 (2018). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- ISO 20915:2018 (November 2018). *Life cycle inventory calculation methodology for steel products*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Joint Research Center. (2023). *Harmonised rules for the calculation of the Carbon Footprint of Electric Vehicle Batteries (CFB-EV). Draft Version* (JRC Science for Policy Report). Europäische Kommission.
- Mission Possible Partnership. (2022). *Making net zero steel possible*. Verfügbar unter: <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf>
- Mission Possible Partnership. (2023). *Making net-zero aluminium possible. An industry-backed, 1.5°C-aligned transition strategy*. Verfügbar unter: <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2023/04/Making-1.5-Aligned-Aluminium-possible.pdf>
- ResponsibleSteel. (2022, September). *ResponsibleSteel International Standard version 2.0*.
- Schrijvers, D. (2017). *Environmental evaluation of recycling options according to the Life Cycle Assessment methodology. Establishment of a consistent approach applied to case studies from the chemical industry*. Dissertation. Université de Bordeaux, Bordeaux.
- Together for Sustainability. (2022). *The Product Carbon Footprint Guideline for the Chemical Industry. Specification for product Carbon Footprint and Corporate Scope 3.1 Emission Accounting and Reporting* (Version 2.0).
- Together for Sustainability. (2023, Oktober). *Improving and Harmonizing Scope 3 Reporting. Biogenic Carbon, Mass/Energy Balance, Recycled Content*. Verfügbar unter: [https://www.tfs-initiative.com/app/uploads/2023/10/TfS-2097-White-Paper-EN\\_hi\\_single\\_page\\_no\\_crop\\_.pdf](https://www.tfs-initiative.com/app/uploads/2023/10/TfS-2097-White-Paper-EN_hi_single_page_no_crop_.pdf)
- World Business Council for Sustainable Development. (2023, Januar). *Pathfinder Framework. Guidance for the Accounting and Exchange of Product Life Cycle Emissions*. Verfügbar unter: <https://www.wbcd.org/contentwbc/download/15625/226889/1>
- World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute. (2011). *Greenhouse Gas Protocol. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*.
- World Steel Association. (2017). *Life cycle inventory methodology report for steel products* (World Steel Association, Hrsg.).
- Wright, L., Liu, X., Wu, I. & Chalasani, S. (2023, Juni). *Steel Emissions Reporting Guidance* (Rocky Mountain Institute, Hrsg.). Verfügbar unter: [https://rmi.org/wp-content/uploads/2022/09/steel\\_emissions\\_reporting\\_guidance.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2022/09/steel_emissions_reporting_guidance.pdf)