Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

09.25

57. Jahrgang
September 2025
Seite 497–560

www.MUELLundABFALL.de

Müll und Abfall

Fachzeitschrift für Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

35 Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar
15. und 16. Oktober 2025

AK GWS Arbeitskreis Grundwasserschutz e.V.
Überwachungsgemeinschaft Bauen für den Umweltschutz
Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH ICP Geologen und Ingenieure für Wasser und Boden PART OF SIERA

35. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar
Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten – Planung und Bau neuer Deponien
15. und 16. Oktober 2025

Vor Ort:
Gartenhalle (Kongresszentrum)
Festplatz 9, 76137 Karlsruhe

Seminar und Fachausstellung
Als Hybridveranstaltung
(Vor Ort und Online)

- Neue Entwicklungen im deutschen und europäischen Deponierecht – Aktuelles zum BVT - Merkblatt Deponien
- Deponie Vereinigte Ville - Neue Bohrlöcher für den Klimaschutz
- Beseitigung gefährlicher Abfälle in der Untertagedeponie Herfa-Neurode
- Intelligente Bau- und Arbeitsmaschinen für den Betrieb und die Sanierung von Deponien - sicheres Arbeiten in schwieriger Umgebung
- Untersuchungen zur Immobilisierung PFAS-kontaminierter Böden für die Deponierung
- Rückholbare Zwischenlagerung von Klärschlammaschen auf Deponien – Problemlösung oder Problem?
- Die Probenahme von Abfällen gemäß LAGA PN 98 vor Gericht
- Aktuelle Situation der Deponiekapazitäten – mögliche Einflussfaktoren auf die zukünftige Entwicklung
- Flexible Konzepte zur Sickerwasseraufbereitung – praktische Erfahrungen zur PFAS-Elimination
- Entsorgung, Sicherung und Langzeitlagerung von PFAS-haltigen Abfällen

Programm unter:
https://icp-ing.de/seminare/

EUTECH SIERA ACADEMY

ERICH SCHMIDT VERLAG

21001

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

Zuordnung der Klimawirkungen der Kreislaufwirtschaft

Empfehlungspapier der Akademie der Kreislaufwirtschaft

Allocation of the climate impacts of the circular economy

Recommendation paper by the Academy for Circular Economy

Prof. Dipl.-Ing. Frank Baur, Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek, Prof. Dr. rer. nat. Daniel Vollprecht, Univ. Prof. Dr. rer. nat. techn. Marion Huber-Humer, Prof. Dr. Peter Hense, Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler, Prof. Dr. Mario Mocker, Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. Helmut Rechberger, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger, Prof. Mag. rer. soc. oec. Dr. Christoph Scharff und Prof. Dr. Martin Wittmaier

Prof. Dipl.-Ing. Frank Baur
em. htwsaar
assoz. Professor izes gGmbh

Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft,
Institut IWAR
TU Darmstadt (a. D.)

Prof. Dr. rer. nat. Daniel Vollprecht
Inhaber des Lehrstuhls für Resource and Chemical Engineering
Universität Augsburg

Univ. Prof. Dr. rer. nat. techn. Marion Huber-Humer
Leiterin des Instituts für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
Universität für Bodenkultur Wien

Prof. Dr. Peter Hense
Umwelttechnik (Kreislaufwirtschaft und Ressourcenmanagement),
Hochschule Bochum

Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler
Mineralogie und Petrologie,
LMU München

Prof. Dr. Mario Mocker
Energetische und stoffliche Nutzung von Abfall- und Reststoffen,
OTH Amberg-Weiden

(Fortsetzung auf nächster Seite)

Zusammenfassung

Die Kreislaufwirtschaft trägt in mehreren Bereichen zum Klimaschutz bei, sowohl durch die Senkung der Emissionen bei der Abfallbehandlung als auch durch das Recycling von Abfällen, durch das der Wirtschaft Sekundärrohstoffe zur Verfügung gestellt werden. Vor dem Hintergrund der aktuellen Klimapolitik richtet sich heute das Interesse v. a. auf den Beitrag des Recyclings zur zirkulären Wirtschaft und die damit verbundenen Potenziale der Einsparung an Treibhausgasen (THG) und für ein zielgerichtetes „Carbon-Management". Um diese Potenziale weitestmöglich zu realisieren, können unterschiedliche Lenkungsinstrumente eingesetzt werden. Das vorliegende Empfehlungspapier der Akademie der Kreislaufwirtschaft befasst sich mit neuen Lenkungsinstrumenten im Kontext der Klimapolitik. Grundlage dieser Instrumente ist die Zuordnung von Klimawirkungen zu Akteuren der Wirtschaft, darunter auch die Entsorgungswirtschaft. In verschiedenen Bilanzierungssystemen wird die Zuordnung von THG-Emissionen unterschiedlich vorgenommen. Im Hintergrundteil dieses Empfehlungspapiers werden die Bilanzierungssysteme im EU-Zertifikatehandel und in Reporting-Anforderungen des Green Deals auf Basis des Lebenszyklusansatzes analysiert. Im voranstehenden Empfehlungsteil werden aus Sicht der Kreislaufwirtschaft verschiedene Herausforderungen identifiziert, die aus dieser Analyse resultieren, und Hinweise zur weiteren Ausgestaltung von Bilanzierungssystemen als Lenkungsinstrument in der Kreislaufwirtschaft formuliert.

Abstract

The circular economy contributes to climate protection in several areas, both by reducing emissions from waste treatment and by waste recycling, which provides the economy with secondary raw materials. Against the backdrop of current climate policy, interest today is focused primarily on the contribution of recycling to a circular economy and the associated potential for greenhouse gas (GHG) savings and targeted carbon management. Various policy instruments can be used to realise this potential to the greatest possible extent. This recommendation paper from the Academy of Circular Economy deals with new steering instruments in the context of climate policy. These instruments are based on the allocation of climate impacts to economic actors, including the waste management industry. Different accounting systems use different methods to allocate GHG emissions. The background section of this recommendation paper analyses the accounting systems used in EU certificate trading and in the Green Deal reporting requirements based on the life cycle approach. The preceding recommendation section identifies various challenges resulting from this analysis from the perspective of the circular economy and formulates recommendations for the further development of accounting systems as a steering instrument in the circular economy.

Teil 1 – Empfehlungen

Die kreislauforientierte Abfallbewirtschaftung bietet erhebliche Potenziale zur Einsparung von Treibhausgas (THG)-Emissionen und für ein nachhaltiges und zielgerichtetes „Carbon-Management", sowohl durch direkte Maßnahmen (z. B. Reduzierung von Methanemissionen aus Deponien und Abfallbehandlungsprozessen) als auch durch indirekte Effekte, nämlich durch Schließung von Materialkreisläufen, d. h. durch das Recycling von Abfällen und die Generierung hochwertiger Rezyklate/Sekundärrohstoffe[1], mit denen Primärrohstoffe ersetzt (substituiert) und die mit deren Bereitstellung einhergehenden THG-Emissionen und andere Umweltwirkungen vermieden werden können. Obwohl Materialkreisläufe seit vielen Jahren für Produkte wie Papier oder Stahl etabliert sind, werden die

1 In diesem Text werden die etablierten Begriffe Primär- und Sekundärrohstoff verwendet. Allerdings gebietet ein kreislauforientiertes Wirtschaften die vorrangige Verwendung von Sekundärrohstoffen, so dass sich zukünftig auch sprachlich ausdrücken sollte, dass Sekundärrohstoffe eben keine „zweite Wahl" darstellen.

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

Potentiale des Recyclings für viele Produkte wie Batterien oder Materialien wie Kunststoffe bislang immer noch unzureichend genutzt. Um sie bestmöglich zu fördern, sind technologische Innovationen für hochwertige Logistik- und Recyclingprozesse nötig; gleichzeitig müssen bereits im Vorfeld der Abfallentstehung Produkte kreislauffähig konzipiert und gestaltet werden. Zusätzlich sind zur Realisierung der Kreislaufführung von Materialien neue transformative Geschäftsmodelle wie auch attraktive Anreizsysteme von großer Bedeutung.

Für die Gestaltung positiver Rahmenbedingungen für das Schließen von hochwertigen Materialkreisläufen muss die enge Zusammenarbeit zwischen allen Akteuren von Materialkreisläufen gefördert werden. Dabei sind insbesondere die folgenden Gruppen von Akteuren zu berücksichtigen/anzusprechen:

1. Abfallerzeuger: für die recyclingorientierte Sammlung
2. Entsorgungswirtschaft: effiziente Logistik und Aufbereitung zu hochwertigen Rezyklaten
3. Produzierende Wirtschaft: Design for ReUse und Recycling sowie zielführender Einsatz von Rezyklaten

In der Kreislauf- und Abfallwirtschaft werden derzeit unterschiedliche Lenkungsinstrumente eingesetzt, die teils seit langem etabliert sind (z. B. Recyclingquoten), teils im Zuge der aktuellen Klimapolitik in den letzten Jahren oder aktuell erst eingeführt werden (z. B. Einbeziehung von Teilen der Kreislaufwirtschaft in den Zertifikatehandel und/oder in das Nachhaltigkeits-Reporting). Diese Instrumente werden jedoch kontrovers diskutiert, sowohl im Hinblick auf ihre Zielgenauigkeit hinsichtlich der Reduktion von THG-Emissionen und Rohstoffverbräuchen als auch bezüglich ihrer Praxistauglichkeit und ihres Aufwands.

Die Akademie der Kreislaufwirtschaft ist der Überzeugung, dass nicht eines dieser Lenkungsinstrumente „das beste“ für die Kreislaufwirtschaft ist, da jedes dieser Instrumente unterschiedliche Akteure anspricht und unterschiedliche Wirksamkeiten hat. Vielmehr muss es darum gehen, mit einer abgestimmten Kombination unterschiedlicher Lenkungsinstrumente effektive Lösungen für die Gestaltung der Kreislaufwirtschaft und insbesondere die Realisierung von Materialkreisläufen zu finden.

In einem ersten Empfehlungspapier hat sich die Akademie der Kreislaufwirtschaft mit dem Instrument der Quoten beschäftigt. Das hier vorliegende zweite Empfehlungspapier befasst sich mit den neu hinzugekommenen Lenkungsinstrumenten aus dem Kontext der Klimapolitik, die auf der Zuordnung von Klimawirkungen zu Akteuren in verschiedenen Bilanzierungssystemen für Treibhausgase beruhen. Im Hintergrundteil dieses Empfehlungspapiers wurden insbesondere der EU-Zertifikatehandel und Reporting-Anforderungen des Green Deals auf Basis des Lebenszyklusansatzes analysiert. Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft können hier verschiedene Herausforderungen/Defizite identifiziert werden:

- Vorhandene Instrumente und Bilanzierungssysteme werden zu wenig passgenau für unterschiedliche Abfallströme mit unterschiedlichem Charakter (z. B. Massenströme versus kritische Ressourcen) und unterschiedlichen Akteuren ausgestaltet.
- In vorhandenen Bilanzierungssystemen fehlen durchgehend spezifische Anreize für die abfallwirtschaftlichen (Vor-)Leistungen der Bereitstellung von Sekundärrohstoffen. Die derzeitigen THG-Bilanzierungssysteme setzen Anreize vorrangig für die Gruppe der produzierenden Wirtschaft, indem diese die potenziellen Einsparungen für den Einsatz von Sekundärrohstoffen zugerechnet bekommen. Dies bedingt z. T. ein Motivations-Ungleichgewicht entlang der Behandlungs-/Ent- und Versorgungskette. Prinzipiell sollten Anreize für alle an der Wertschöpfungskette beteiligten Akteure (Abfallerzeuger, Entsorgungsunternehmen, produzierende Wirtschaft) durchdacht und geschaffen werden, um z. B. auch mehr Spielraum für Investitionen in den Vorketten, längerfristige Planungen im Entsorgungssektor und dadurch bessere Qualitäten und höhere Sekundärrohstoffmengen zu schaffen.
- Die Reaktionen von Märkten für Sekundärrohstoffe auf den Einsatz der genannten Lenkungsinstrumente ist im Kontext ihrer jeweiligen Funktion zu wenig bekannt, wobei insbesondere die Abschätzung der Risiken von möglichem Marktversagen eine zentrale Herausforderung darstellt.

Zur weiteren Ausgestaltung von Bilanzierungssystemen als Lenkungsinstrument für die Förderung von Materialkreisläufen gibt die Akademie der Kreislaufwirtschaft die folgenden Empfehlungen:

Ausgestaltung des Zertifikatehandels

Adressaten des Zertifikatehandels (Emissionshandel gemäß EU-ETS I) sind die Betreiber von Anlagen, die als energieintensiv gelten und entsprechend aus ihren Produktionsprozessen große Mengen an THG emittieren. Im Bereich von Materialkreisläufen betrifft dies die Grundstoffindustrie, also Massenmaterialien wie Metalle, Zement oder bestimmte Grundprozesse der chemischen Industrie. Der Zertifikatehandel ist ein sehr wirksames Instrument des Klimaschutzes, wurde bislang aber nicht spezifisch hinsichtlich seiner Lenkungswirkung auf das Recycling und die daran beteiligten Akteure des Materialkreislaufs untersucht/ausgestaltet. Im Hinblick auf eine entsprechende Optimierung sind die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- Es gibt wesentliche **Unterschiede hinsichtlich des Geltungsbereiches des Zertifikatehandels** für Anlagen zur Herstellung verschiedener Materialien/Abfallströme:
  a) Solche, die schon im Zertifikatehandel enthalten sind und bei denen der Zertifikatehandel eine große Wirkung hat: Beispiel Massenmetalle wie Stahl, Aluminium sowie Grundchemikalien
  b) Solche, die nicht im Zertifikatehandel berücksichtigt sind: die nicht-energieintensiven Industrien wie zum Beispiel die Herstellung von Kunststoffwaren

  Empfehlungen dazu, wie man Recycling im Zertifikatehandel besser berücksichtigen könnte, beziehen sich daher nur auf Anlagen der Kategorie a).

Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. Helmut Rechberger
Leiter Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement,
TU Wien

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger
zuletzt Leiter des Instituts für Abfalltechnik und Ressourcensicherung,
Hochschule Trier

Prof. Mag. rer. soc. oec. Dr. Christoph Scharff
Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement,
TU Wien

Prof. Dr. Martin Wittmaier
Leiter des Instituts für Energie und Kreislaufwirtschaft,
Hochschule Bremen

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

- **Der Einsatz des Zertifikatehandels als marktbasierter Mechanismus** ist schon weitgehend etabliert, Liberalität ist gegeben und es schafft grundsätzlich Anreize für Anlagen der produzierenden Industrie, die dem Zertifikatehandel unterliegen, Sekundärrohstoffe einzusetzen. Sind die Recyclingprozesse bereits großtechnisch etabliert, wie im Fall von Stahlschrott, wirkt dies bereits jetzt schon im Zertifikatehandel als Anreiz. Diesbezüglich sind jedoch hinsichtlich der Bilanzierung von THG-Emissionen noch einige Defizite zu konstatieren, welche einer Intensivierung des Schrotteinsatzes ggf. im Wege stehen. So weisen z. B. Pothen et al. (2021) auf diverse Lücken im EU-ETS – wie z. B. der Berücksichtigung von Bergbau-bedingten Emissionen sowie der Emissionen aus Rohstoffen und Vorprodukten bei der Stahlherstellung – hin, welche geschlossen werden sollten[2]. Ergänzend/alternativ wäre auch eine Kopplung des Schrotteinsatzes mit der kostenlosen Zuteilung von Zertifikaten möglich.
- **Klare und zielgerichtete Zuordnung von Einsparungen im Zertifikatehandel**: Unbedingt zu beachten und im Vorfeld sorgfältig zu prüfen gilt (z. B. mittels umfassender Technikfolgenanalyse und Risikoabschätzung), ob es zu störenden Marktverschiebungen bzw. letztlich zu einem Marktversagen kommen könnte, wenn eine „Umverteilung" der Allokationsmöglichkeiten als Lenkungsinstrument angedacht wird. Marktversagen kann auftreten, wenn Gutschriften auf zu viele Akteure verteilt werden, denn dann könnten die Anreize für einzelne Akteure verwässert werden, bzw. die CO_2-Preise deutlich über den Materialpreisen liegen. Dies könnte die Effektivität des Instruments beeinträchtigen und die gewünschten Kreislaufziele gefährden. Daher ist auch der Fokus auf zentrale Akteure äußerst wichtig, um die Gutschriften gezielt an diejenigen Akteure zu vergeben, die den größten Einfluss auf die Recyclingkette und die größten (Markt)Unsicherheiten abzufangen haben. Weitere Risiken ergeben sich durch unsichere bzw. fehlende Einsatzoptionen für Sekundärrohstoffe, wenn Gutschriften in der produzierenden Industrie verringert werden, bzw. könnte es auch zu einem Abwandern des Rezyklat-Einsatzes außerhalb der EU kommen bei einem zu hohem Abfall-/Sekundärrohstoff-Angebot aufgrund zunehmender Allokation der Gutschriften im Entsorgungssektor.

Ausgestaltung des Reportings auf Basis des Lebenszyklusansatzes

Adressaten des Reportings, wie es im Rahmen der Politik des Green Deal aktuell v. a. in Form der Corporate Social Responsibility Directive (CSRD-Richtlinie)[3] und der Ökodesign-Verordnung eingeführt wurde, sind Unternehmen in ihrer Rolle als Organisation und als Hersteller von Produkten:

- Mit den organisations-/produktbezogenen Lenkungsinstrumenten sollten vorrangig die Produzenten komplexer Konsum- und Investitionsprodukte angesprochen werden. Diese Unternehmen sind – im Unterschied zu den Produzenten von Grundstoffen wie Stahl oder Zement – i.A. nicht im Zertifikatehandel erfasst, da die produktbezogenen THG vor allem in der Vorkette und nicht beim End-Hersteller selbst erfolgen. Um die erheblichen Gestaltungsmöglichkeiten dieser Gruppe von Unternehmen zu nutzen, bieten sich daher die „weichen" Instrumente des Reportings an.
- Produzenten komplexer Konsum- und Investitionsprodukte haben potenziell einen großen Einfluss hinsichtlich der folgenden Gestaltungsmöglichkeiten: (i) Einsatz von Sekundärrohstoffen; (ii) recyclinggerechtes Design von Produkten.
- Der Einsatz von Sekundärrohstoffen wird bereits jetzt in den vorhandenen Bilanzierungssystemen auf Basis des sogenannten Cut-off Ansatzes für die End-of-Life Allokation angerechnet und wirkt daher als Anreizsystem. Aus diesem Grund und wegen der Standardisierung eines Reportings erscheint die Beibehaltung dieses Ansatzes grundsätzlich sinnvoll. Inwieweit perspektivisch ein Ansatz nach dem Muster der Circular Footprint Formular genutzt werden sollte, hängt vor allem davon ab, ob die in der Formel enthaltenen Faktoren zur Charakterisierung von Märkten für Sekundärrohstoffe argumentativ tragfähig begründet werden können und eine entsprechende Lenkungswirkung dargestellt werden kann.
- Praktische Limitationen für das Recycling von Materialien aus komplexen Konsum- und Investitionsprodukten bestehen gegenwärtig insbesondere dahingehend, dass Produkte nicht auf ein Design for Recycling konzipiert sind. Hier ist ergänzend zu den vorhandenen Bilanzierungssystemen eine Berichterstattung über die Ausrichtung des Designs auf ein zukünftiges Recycling und dessen Wirkungen zur Reduktion von THG wünschenswert. Für solche Bilanzierungen benötigen Unternehmen sowohl methodische Anleitungen als auch Datensätze zu Recyclingverfahren, insbesondere für solche, die sich in der Entwicklung befinden. Generell ist dabei eine weitestgehende Reduzierung des Verwaltungsaufwandes entlang der gesamten Wertschöpfungskette anzustreben.
- Auch die Grundstoffindustrie ist in ihrer Rolle als Organisation und als Hersteller von Produkten von den genannten Reporting-Instrumenten betroffen. Da sie gleichzeitig im Rahmen des Zertifikatehandels erfasst wird, ist darauf zu achten, dass Vorgehensweisen und Datengrundlagen für beide Bereiche harmonisiert werden bzw. zur Reduzierung des Aufwands für Unternehmen synergetisch genutzt werden können.
- Auch Unternehmen der Entsorgungswirtschaft sind in ihrer Rolle als Organisationen in entsprechende Reporting-Instrumente wie CSRD einbezo-

2 Zu berücksichtigen ist hier der CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) welcher ab 2026 (Implementierungsphase) als Ergänzung zum EU-ETS die CO_2-Emissionen von Waren, die in die EU importiert werden, begrenzen soll.

3 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2022.322.01.0015.01.DEU&toc=OJ%3AL%3A2022%3A322%3ATOC

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

gen. Diese Berichterstattung könnte unmittelbar genutzt werden, um Informationen zu den Aufwänden von Recyclingverfahren beispielsweise über den Digitalen Produktpass oder über Datenbanken für die produzierende Industrie verfügbar zu machen. Darüber hinaus wäre im Rahmen eines solchen Reportings auch eine Zuordnung der Einsparungen durch die Substitutionswirkung von Sekundärrohstoffen prinzipiell durch die Nutzung eines Bilanzierungsansatzes nach dem Muster der Circular Footprint Formular denkbar, wenn die Entsorgungswirtschaft dort rechnerisch als dritte Gruppe eingeführt würde. Ob dafür argumentativ begründete Faktoren abzuleiten sind und ob und welche Steuerungswirkung dies ggf. hätte, wäre jedoch noch umfassend zu untersuchen.

Fazit

Für die untersuchten Bereiche der Bilanzierung von Klimawirkungen bieten sich eine Reihe von Ansätzen an, mit denen sie im Hinblick auf eine Stärkung des Recyclings ausgerichtet werden könnten. Wesentlich dabei ist es, die spezifische Eignung für unterschiedliche Gruppen von Akteuren zu berücksichtigen, im Falle des Zertifikatehandels v. a. die Grundstoffindustrie und die vorgeschalteten Unternehmen der Entsorgungswirtschaft, im Fall der Reporting-Anforderungen auf Basis des Lebenszyklusansatzes vor allem die Produzenten von komplexen Endprodukten. Speziell für die letzteren ist festzuhalten, dass die Ausgestaltung, z. B. über den digitalen Produktpass, und die damit verbundene Frage nach der Wirksamkeit derzeit noch offen ist, ebenso wie die Modalitäten einer möglichen Einbeziehung der Entsorgungswirtschaft.

Alternativ oder ergänzend zu den o. g. Ansätzen steht die stärkere Nutzung des abfallwirtschaftlichen Instrumentariums in Form von Quoten und rechtlichen Vorgaben der erweiterten Produktverantwortung. Kombinationen aus rechtlichen Rahmenvorgaben, z. B. verpflichtende Quoten, nachhaltigkeits- und lebenszyklus-orientierte Bilanzierungs- und Dokumentationsverpflichtungen (z. B. Carbon Footprint oder Digitaler Produktpass auf Basis LCA) und marktbasierte Mechanismen (Zertifikatehandel) sind denkbar, erfordern jedoch sorgfältige und umfassende Überlegungen und eine zielgerichtete Gestaltung. Hier sind sowohl Grundlagenuntersuchungen wünschenswert, vor allem hinsichtlich der Funktion und der rechtlichen Gestaltung von Sekundärrohstoffmärkten, als auch eine intensivierte wissenschaftliche Begleitforschung zur Umsetzung neuer Instrumente, mit der belastbare Informationen zu deren Wirksamkeit und weiterer Optimierung gewonnen werden könnten.

Teil 2 – Hintergrund

1. Einleitung: Beitrag der Kreislaufwirtschaft zum Klimaschutz

Der Beitrag der Kreislaufwirtschaft zum Klimaschutz lässt sich grundsätzlich in mehreren Bereichen verorten, die mit der Entwicklung von der „linearen" Abfallwirtschaft in der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg hin zu einer „zirkulären Wirtschaft" verbunden sind. Zum einen entstehen in der Abfallwirtschaft die im nationalen Projektionsbericht (UBA, 2024) gelisteten, direkten Emissionen von Treibhausgasen (THG) bei bestimmten Behandlungsverfahren von Abfällen: insbesondere ist hier die Methanbildung bei der Deponierung von biologisch abbaubaren Abfällen zu nennen, aber auch Restgasemissionen bzw. Methanschlupf bei der biologischen Behandlung von Bioabfall (Kompostierung, Vergärung). In diesem Bereich ist die emissionsseitige Reduzierung der THG ein direkter Beitrag zum Klimaschutz, der in Deutschland in den letzten Jahren mit einer Minderung um knapp 77 % gegenüber 1990 (Sektor Abfall und Abwasser; UBA, 2022) erhebliche Erfolge zeigte, für den aber weiterhin betriebliche Verbesserungen und technische Entwicklungen nötig sind. Zum anderen kann in der zirkulären Wirtschaft das Recycling von Abfällen zu einer indirekten Einsparung von THG führen: dies ist dann der Fall, wenn die durch das Recycling erzeugten Sekundärrohstoffe in der Wirtschaft primäre Rohstoffe ersetzen und die THG-Emissionen des Recyclings geringer sind als die der Bereitstellung der Primärrohstoffe. Dieser Effekt ist vor allem für Metalle erheblich. Beispielsweise könnten in Deutschland im Rahmen eines optimierten Aluminium-Recyclings im Vergleich zum Status Quo weitere 5,0 bis 7,2 Mio. t CO_2-Emissionen eingespart werden (Raatz et al., 2022). Auch aus der Energieerzeugung aus Abfällen lassen sich zusätzliche, THG-mindernde Effekte erzielen, wenn dadurch fossile Energieträger ersetzt werden. Für nicht-fossile Emissionen können aus diesen Prozessen über CCS (Carbon Capture and Storage-)Maßnahmen sogar Ansätze mit negativen Emissionen generiert werden, z. B. aus Emissionen von MVA und Biogasanlagen.

Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft stellt sich die Frage, wie bzw. wem Einsparungen von THG zugeordnet werden. Das Vorgehen dieser Zuordnung, das in der Bilanzierung von THG mit dem Fachwort Allokation bezeichnet wird, zeigt charakteristische Unterschiede zwischen den beiden Bereichen der Abfallwirtschaft und der zirkulären Wirtschaft (Schebek et al. 2022). Emissionsseitige Reduzierungen bei Entsorgungsverfahren werden direkt an den entsprechenden Stellen der Abfallwirtschaft wirksam (z. B. an der Deponie) und daher auch dort allokiert, d. h. dem abfallwirtschaftlichen Akteur zugeordnet (z. B. dem Betreiber der Deponie). Demgegenüber werden THG-Einsparungen beim Recycling nur dann realisiert, wenn viele Akteure zusammenwirken: die Abfallerzeuger, die ihren Abfall der getrennten Sammlung und damit dem Recycling zuführen, die Unternehmen der Entsorgungsbranche, die Transport, Logistik und Aufbereitung übernehmen, und letztendlich die produzierende Wirtschaft sowie die Landwirtschaft, die Sekundärrohstoffe (Rezyklate, Nährstoffe, etc.) einsetzen, im Fall der produzierenden Wirtschaft aber auch das Design ihrer Produkte auf deren spätere Recyclingfähigkeit ausrichtet. Die Allokation der Einsparungen durch die Substitution ist daher nicht eindeutig und aktuell ein kontroverses Thema der Klimapolitik, die die Bilanzierung von THG zunehmend als Anreiz zur Steuerung nutzt (Baehr et al. 2024).

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

Das vorliegende Papier konzentriert sich auf den Beitrag der „zirkulären Wirtschaft“ und deren Akteure zur Einsparung von THG. Beleuchtet werden einerseits Rahmenbedingungen und Bedeutung des Recyclings für unterschiedliche Materialströme und Wirtschaftsbereiche und andererseits das Vorgehen der Bilanzierung von Treibhausgasen hinsichtlich der Zuordnung (Allokation) möglicher Klimagaseinsparungen der zirkulären Wirtschaft. In der Zusammenschau werden Empfehlungen abgeleitet, wie die Potenziale der Kreislaufwirtschaft zur Einsparung von Klimagasen bestmöglich genutzt werden können.

2. Klimaauswirkungen der Produktion aus Primärrohstoffen

Wie oben ausgeführt, besteht der Beitrag der „zirkulären Wirtschaft“ zum Klimaschutz insbesondere in der Substitution von Primärrohstoffen und der mit ihrer Bereitstellung verbundenen Emissionen durch Sekundärrohstoffe. Will man diesen Beitrag bemessen, so ist das Referenzszenario zur Kreislaufwirtschaft die derzeitige Bereitstellung von Rohstoffen, die hauptsächlich aus primären Quellen erfolgt – dies sind im Falle nicht-erneuerbarer Rohstoffe natürliche Lagerstätten, im Fall erneuerbarer Rohstoffe die Landwirtschaft und Forstwirtschaft. Dabei ist anzumerken, dass aufgrund des steigenden Rohstoffbedarfs, der Degradation von Materialien während der Nutzungsphase sowie der unvermeidbaren Verluste entlang der Recyclingkette auch eine Maximierung des Recyclings die Gewinnung von Primärrohstoffen voraussichtlich nicht völlig vermeiden kann.

Bergbau und Aufbereitung sind für 4 bis 7 % der globalen THG-Emissionen verantwortlich (Wani et al. 2022). Mehr als 65 % der THG-Emissionen bei Bergbau und Aufbereitung entfallen auf die Verbrennung fossiler Energieträger. Im Bereich des Bergbaus sind dies z. B. die Dieselmotoren, die zum Antrieb von Bergbaumaschinen verwendet werden. Daneben können bei der Gewinnung fossiler Brennstoffe auch direkte Emissionen von Methan (CH_4) und bei der Abholzung von Flächen zur Vorbereitung der Rohstoffgewinnung im Tagebau durch den Maschineneinsatz sowie durch die Verringerung der Kohlenstoff-Speicherkapazität in Biomasse signifikante CO_2-Effekte entstehen (Liu et al., 2021).

In pyrometallurgischen Prozessen wird i.d.R. Kohlenstoff oder Kohlenstoffmonoxid (CO) als Reduktionsmittel eingesetzt, das die Metalle in ihren elementaren Zustand reduziert und dabei selbst zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) oxidiert wird. Der noch in den Anfängen befindliche Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel ist nur dann klimaneutral, wenn dieser nicht aus fossilen Rohstoffen erzeugt wird, was jedoch für 96 % des aktuell erzeugten Wasserstoffs der Fall ist (Le et al., 2023). Kohlenstoffträger wie z. B. Koks dienen jedoch nicht nur als Reduktionsmittel, sondern auch als Legierungselement, wofür zukünftig biogene Rohstoffe eingesetzt werden könnten, sowie als Energieträger, wobei sie in diesem Anwendungsfeld durch elektrische Energie substituiert werden können, wie es z. B. in Elektrostahlwerken der Fall ist. Pyrometallurgische Prozesse setzen CO_2 jedoch nicht nur aus dem Reduktionsmittel und dem Energieträger frei, sondern im Fall der Verhüttung karbonatischer Erze, wie z. B. Siderit ($FeCO_3$), auch bei deren Kalzinierung, die entweder direkt im metallurgischen Prozess oder in einem vorgeschalteten Sinterprozess erfolgen kann. Aufgrund der Summe dieser Prozesse ist die Eisen- und Stahlindustrie insgesamt für 7 % der globalen THG-Emissionen verantwortlich (Hasanbeigi 2022). Hydrometallurgische Prozesse nutzen anstelle der thermochemischen Reduktion elektrochemische Prozesse in wässriger Lösung, sodass die Quelle der Stromerzeugung einen entscheidenden Faktor bei der ökologischen Bewertung darstellen, wobei z. B. für die Zinkgewinnung der pyrometallurgische Prozess aktuell jedoch rund 28 % weniger THG-Emissionen erzeugt als der hydrometallurgische Prozess (Bobrowski & Nejranowski 2023).

Im Gesteinshüttenwesen, d. h. der Erzeugung von Glas, Keramik und Bindemitteln aus anorganisch-nichtmetallischen Rohstoffen, ist keine chemische Reduktionsarbeit zu verrichten, so dass die THG-Emissionen nur aus dem Einsatz fossiler Energieträger sowie aus der Kalzinierung karbonatischer Rohstoffe resultieren. Dennoch ist allein die Zementindustrie für 8 % der globalen THG-Emissionen verantwortlich (Andrew, 2019). Während erstere durch den Einsatz elektrisch beheizter Öfen zunehmend reduziert werden können, sind letztere Emissionen schwer vermeidbar („hard to abate“) und lassen sich nur durch Einsatz von CCUS-Technologien (carbon capture, utilization and storage) reduzieren.

Während die Verbrennung fossiler Rohstoffe als Quelle von THG rund 64 % der globalen Emissionen ausmacht (IPCC 2022), betragen die THG-Emissionen aus den produktionsbedingten Prozessen der petrochemischen Industrie nur etwa 3 % der globalen THG-Emissionen (Isella & Manca 2022). Die Produkte der petrochemischen Industrie stellen die Ausgangsstoffe der chemischen Industrie dar, die eine Vielzahl von Produkten herstellt, unter denen von den produzierten Mengen her vor allem Kunststoffe eine hohe Relevanz haben. Der Kohlenstoffgehalt dieser Produkte wird letztlich freigesetzt, wenn die Polymere in der Abfallverbrennung, oder bei energetischer Nutzung als Ersatzbrennstoff im Verbrennungsvorgang zu CO_2 umgesetzt werden, im Fall bioabbaubarer Kunststoffe aber auch bei deren biologischen Abbau. Entsprechend ist auch hier ergänzend zu Recyclingaktivitäten der Einsatz von CCUS-Technologien zur Minderung der THG-Emissionen erforderlich. Auf Grund der zentralen Rolle der Abfallverbrennung zur Entsorgung nicht stofflich (werkstofflich oder rohstofflich) genutzter Polymermaterialien wird dies aktuell als Teil eines zukünftigen Carbon Managements der Wirtschaft diskutiert. Die chemische Industrie geht gemäß einer Studie der DECHEMA (Krämer, D. 2024) langfristig (hier: 2035) und szenarienabhängig von einem jährlichen C-Bedarf in einer Bandbreite von 7,9–12,4 Mio. t/a aus. Dieser Bedarf muss langfristig (bis 2050) nicht-fossil gedeckt werden, wobei als C-Quellen Recyclingprozesse, Biomasse und Kohlenstoff aus CO_2 (CCU/BECCU) adressiert werden (Krämer, D. 2024).

Hinsichtlich der CO_2-Abscheidung sieht die Carbon Management Strategie (CMS) der Bundesregierung die

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

thermische Abfallbehandlung als ein prioritäres Anwendungsgebiet. CO_2-Emissionen aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen gelten gemäß Eckpunktepapier der CMS – auch bei Einhaltung hoher Standards bei der Abfalltrennung – als „nicht vermeidbar". Gleichwohl fehlen für die Anrechenbarkeit von abgeschiedenem C im Kontext der jeweiligen Verwendung (CCS/CCU) noch eindeutige Rechtsgrundlagen (Zertifikate, Kostenzuordnung, etc.). CCS-Effekte sind dabei einfacher zu bewerten als heterogene CCU-Maßnahmen (Dauer der C-Bindung in Produkten). Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit einer CO_2-Abschiedung ist bei Abscheidekosten von 50–100 €/t CO_2 (Weltenergierat für Deutschland; 2021)[4] kurz-/mittelfristig nicht davon auszugehen, dass der CO_2-Preis ausreicht, die erhöhten Kosten zu decken, zumal technologieabhängig zusätzliche Auswirkungen auf die Energiebilanz einer MVA zu erwarten sind. Mehrkosten müssten danach über Gebühren gedeckt werden.

Die land- und forstwirtschaftliche Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen stellt Kohlenstoffträger aus Biomasse, d. h. biogenem Kohlenstoff bereit; sie vermeidet damit die Entnahme der fossilen Rohstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle aus den Lagern der Lithosphäre. Trotzdem ist insbesondere die landwirtschaftliche Produktion mit erheblichen Problemen verbunden: Flächenkonkurrenz zwischen der Erzeugung von Rohstoffen für die Wirtschaft (z. B. Biokraftstoffen) und Nahrungsmitteln, der Verbrauch fossiler Energieträger in Landwirtschaft und Transport oder die Emission von Lachgas (N_2O) aus Stickstoffdüngern. Insofern ist auch für Produkte aus erneuerbaren Rohstoffen das Recycling eine wichtige Strategie der Kreislaufwirtschaft, beispielsweise im Falle von Altholz oder von Textilien.

Sowohl für biogene als auch fossile Kohlenstoffträger gibt es darüber hinaus eine spezifische Maßnahme, mit der ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden kann: den Entzug von Kohlenstoff aus Kreisläufen der Wirtschaft. Beim sogenannten Carbon Capture and Storage (CCS) wird der abgeschiedene Kohlenstoff außerhalb der Biosphäre eingelagert, z. B. in alten Gasvorkommen. Beim sogenannten Carbon Capture and Utilization (CCU) erfolgt eine Nutzung in der Biosphäre (Landwirtschaft) oder Wirtschaft (z. B. im Baubereich). Ob dies als Abscheidung zu sehen ist, hängt hier davon ab, inwieweit die Kohlenstoffträger dauerhaft in der Nutzung verbleiben, d. h. ein Lager aufgebaut werden kann, und über welche Zeit dieses Lager Bestand hat.

3. Rahmenbedingungen der Kreislaufwirtschaft und Fallbeispiele zur Einsparung von Treibhausgasemissionen

Die Kreislaufwirtschaft ist heute Teil des umfassenderen Konzepts einer Circular Economy (CE), die als ein neues Wirtschaftssystem der Produktion und des Verbrauchs von Produkten verstanden werden kann (Europäisches Parlament, 2023). Nach einer neuen Studie können durch Maßnahmen der CE bis 2045 26 % der durch Deutschland verursachten CO_2-Emissionen vermieden werden (WWF 2023). Ein erheblicher Anteil dieser Einsparungen geht allerdings auf Maßnahmen im Vorfeld der Abfallentstehung zurück, beispielsweise Änderungen in der Nachfrage nach Produkten, im Design oder bei der Nutzung von Produkten. Trotzdem bleibt das durch die Kreislauf- und Abfallwirtschaft geleistete Recycling ein wesentlicher Bestandteil der Circular Economy, da sowohl aus technischen als auch wirtschaftlichen oder gesellschaftlichen Gründen alle Produkte irgendwann das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen müssen und sich dann unvermeidlich die Notwendigkeit der Rückgewinnung der enthaltenen Materialien stellt.

Der Begriff „Produkte" umfasst dabei alle Güter der Gesellschaft, von kurzlebigen wie Verpackungen bis zu sehr langlebigen wie Fahrzeugen, Investitionsgütern oder Infrastrukturen und Gebäuden. Hält man sich diese Vielfalt vor Augen, so wird auch klar, dass der Weg bis zum als Sekundärrohstoff rückgewonnenen Material lang ist: Güter treten durch die Erfassung in den Geltungsbereich der Abfallwirtschaft ein, ähnliche Güter aus unterschiedlichen Erfassungsbereichen (z. B. Haushalt und Gewerbe) werden durch die Sammlung zusammengeführt. Wenn sie aus unterschiedlichen Komponenten und Materialien bestehen, müssen diese erst getrennt werden, was Prozesse der Demontage, Sortierung oder chemisch-physikalischen Materialtrennung umfasst. Erst dann liegen weitgehend homogene Materialströme vor, die in den eigentlichen Materialkreislauf – z. B. Papier, Glas, Metalle – eingespeist werden können, wenn sie durch weitere Behandlungsschritte gereinigt oder zu einer bestimmten Qualität aufbereitet worden sind. An dieser Kette sind unterschiedliche Akteure beteiligt: die Produkthersteller, die durch das Design ihres Produkts auf dessen spätere Rezyklierbarkeit Einfluss nehmen, die Nutzer, die durch die (getrennte) Entsorgung für möglichst einheitliche Abfallströme bei der Erfassung sorgen, die Recyclingunternehmen, die Materialtrennung und -aufbereitung übernehmen, und die Material-/Grundstoffindustrie, in deren Materialströme die homogenen Materialien einfließen, bis als Sekundärrohstoff ihre Abfalleigenschaft endet.

Der Punkt, an dem ein Material seine Abfalleigenschaft verliert, liegt dort, wo es eine von der produzierenden Industrie für einen Einsatzstoff benötigte Qualität erreicht hat. Genau hier findet also die Substitution statt, da das Sekundärmaterial gleichwertig zu einem Primärmaterial wird. Die positive Klimawirkung des Recyclings gegenüber der Primärproduktion tritt dann ein, wenn die Emissionen der Sekundärroute unter denen der Primärroute liegen. Ob dies der Fall ist, hängt von zwei Faktoren ab: zum einen davon, wie hoch der Aufwand der Aufbereitung eines Abfalls von der Erfassung bis zum Punkt der Substitution ist, zum anderen davon, wie emissionsintensiv die substituierten Prozesse der Primärproduktion sind. Letzteres hängt direkt mit der Frage zusammen, auf welcher Stufe der Prozesskette der Primärproduktion eine Substitution erfolgt. Wie in Kapitel 2 gezeigt, sind es die emissionsintensiven Sektoren der Wirtschaft, insbesondere die Rohstoffgewinnung und die Grundstoffindustrie, die einerseits einen hohen Bedarf an (fossi-

4 Karpf, R. (2021) geht bei einer Aminwäsche im Rahmen einer Fallbetrachtung von Abscheidekosten von 54 €/t CO_2 aus

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

len) Energieträgern haben, andererseits durch chemische Prozesse in der Produktion direkt zur Emission von CO_2 oder anderen Treibhausgasen führen.

Dementsprechend treten große Einsparungen vor allem dann ein, wenn Sekundärrohstoffe auf einer Stufe eingesetzt werden, in denen Prozesse der Grundstoffindustrie vermieden werden können, wie z. B. die thermochemische Reduktionsarbeit in pyrometallurgischen Prozessen. Dies ist dann der Fall, wenn die Abfälle, wie in diesem Fall die Schrotte, bereits in metallischer Form vorliegen. Wenn hingegen metallhaltige Abfälle, wie z. B. Schlacken, Krätzen und Stäube, die Metalle in oxidierter Form enthalten, wieder in pyrometallurgische Prozesse rückgeführt werden müssen, tritt dieser Effekt nicht in vergleichbarem Maße auf. Eine noch größere Ersparnis stellt sich ein, wenn Abfälle gar nicht erneut die thermochemische Prozessstufe durchlaufen müssen, um wieder in Produkten eingesetzt zu werden, die ansonsten auf diesem Wege hergestellt werden. Dies ist z. B. der Fall, wenn Ofenausbruch in gebrochener Form nach einer sensorbasierten Sortierung wieder direkt in feuerfeste Massen eingearbeitet wird (Horckmans et al. 2019).

Hier wird bereits die Bedeutung des Einsatzpunktes der Sekundärrohstoffe für die Berechnung der Klimawirkung des Recyclingprozesses deutlich. Je später im Produktionsprozess die Rückführung des Sekundärrohstoffs erfolgt, desto höher sind die Einsparungen. Dies kann anhand des Beispiels von Ersatzrohstoffen und Zumahlstoffen in der Zementindustrie dargestellt werden. Ein Einsatz eines Abfalls als Ersatzrohstoff, d. h. ein Einbringen gemeinsam mit dem Rohmehl in den Drehrohrofen, vermeidet zwar die Emissionen, die bei der Gewinnung und Aufbereitung der Primärrohstoffe entstehen (korrigiert um die Emissionen aus der Sammlung und Aufbereitung der Sekundärrohstoffe), aber nicht diejenigen Emissionen, die aus dem Energieeintrag in den Drehrohrofen resultieren. Jedoch ergibt sich im Klinkerbrandprozess ein Vorteil gegenüber dem Einsatz von Primärrohstoffen, wenn die Sekundärrohstoffe bereits „entsäuert" sind, d. h., wenn die Ca-Trägerphasen keine Carbonate, sondern Oxide oder Silikate sind und damit beim Klinkerbrand kein CO_2 freisetzen. Ein späterer Einsatz als Zumahlstoff, d. h. als Klinkersubstitut in der Zementmühle, bietet den zusätzlichen Vorteil, dass auch die aus dem Energieverbrauch resultierenden Emissionen beim Klinkerbrand anteilig zur Substitutionsquote eingespart werden. Ein Nachteil ist aber der, dass auch die Möglichkeit, durch die chemischen Reaktionen im Klinkerprozess die hydraulische Aktivität zu erhöhen, nicht besteht. Diese Faktoren adäquat in einer Ökobilanzierung zu berücksichtigen, ist eine wesentliche Herausforderung.

Ein zweites Beispiel zur Bedeutung des Einsatzzeitpunktes in der Produktionskette ist das Recycling von Schmelzkorund, der als Schleifmittel Verwendung findet. Ein direkter Wiedereinsatz in Schleifwerkzeugen ist im Hinblick auf vermiedene Emissionen vorteilhafter als ein erneutes Aufschmelzen mit Primärrohstoffen in der Schmelzkorunderzeugung. Andererseits können qualitative Mängel wie z. B. Risse oder abnehmende Partikelgröße nicht mehr korrigiert werden.

Diese Beispiele lenken auch den Blick auf die Bedeutung der Recyclingqualität. Der Einsatz von Bau- und Abbruchabfällen, die überwiegend aus Altbeton bestehen, als rezyklierte Gesteinskörnung ist ein solches Beispiel für „kaskadische Nutzung", da das Bindemittel wieder aus Primärmaterial hergestellt werden muss. Aus Klimaschutzsicht kann hier nur durch Substitution des Bindemittels, d. h. des Zements, eine relevante Einsparung von CO_2 erzielt werden, da die Emissionen der Zementproduktion die energiebedingten Emissionen der Gewinnung von Gesteinskörnungen bei weitem überwiegen. Ein weiteres Beispiel für kaskadische Nutzung ist der Einsatz von Feuerfestkeramik in der Schlackenkonditionierung im Gegensatz zum Closed-Loop-Recycling. Unter Closed-Loop-Recycling wird eine Form des Recyclings verstanden, bei dem ein Abfall wieder zu dem Produkt wird, aus dem er hervorgegangen ist, z. B. Glasflasche → Altglas → Glasflasche. Im Gegensatz dazu beschreibt Open-Loop-Recycling jene Verfahren, bei denen ein anderes Produkt erzeugt wird, z. B. Glasflasche → Altglas → Glaswolle. Darauf hinzuweisen ist allerdings, dass ein Closed-Loop-Recycling auf Produktebene nur dort stattfinden kann, wo das Produkt aus einem homogenen Material besteht, wie eben im Beispiel der Glasflasche. Andernfalls bezieht sich dieser Begriff auf die Stufe von Materialkreisläufen, die wie gezeigt im Wesentlichen im Sektor der Grundstoffindustrie verlaufen.

Eine Abhängigkeit der THG-Minderungseffekte von der Dauer der Kohlenstoffbindung bei Kreisläufen lässt sich insbesondere im Agrar- und Holzsektor darstellen. Diese Kreisläufe sind insbesondere deshalb von Interesse, da sie nicht nur einen Materialkreislauf betreffen – z. B. den der Holzindustrie – sondern weil sie einen Teil des Kohlenstoffkreislaufs durch Umwelt und Wirtschaft bilden. Die Landwirtschaft – mit einem Anteil an den nationalen THG-Emissionen von 8,2–9,6 % (UBA, 2024; haupts. CH_4 und N_2O) kann dabei insbesondere durch Einsatz von Komposten, durch Biokohlen sowie durch Nährstoffrezyklate von Kreislaufwirtschaftsaktivitäten profitieren. Hinsichtlich der real erzielbaren Klimaschutzeffekte sind jedoch – insbesondere aufgrund der schwer einschätzbaren Fristigkeiten bis zur Freisetzung des im Kompost/der Biokohle gebundenen Kohlenstoffs sowie der hohen Komplexität bodenspezifischer Abhängigkeiten – große Datenunsicherheiten festzustellen. Im Altholzsektor können multiple Kaskadenprozesse einer stofflichen Nutzung im Vergleich zu einer direkten energetischen Verwertung – je nach Ansatz und Referenzprodukt(e) – sowohl schlechtere als auch signifikant höhere THG-Minderungspotenziale ermöglichen[5].

Die angeführten z. T. sehr komplexen Beziehungen zwischen den einzelnen Wirtschaftssektoren der Rohstoff- und Grundstoffindustrie im Hinblick auf die intersektorale Verwertung von Abfällen werden in Abb. 1 vereinfacht dargestellt.

5 IZES et al., Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz – nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung, DOI: 10.13140/RG.2.2.28750.61764, 2014

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

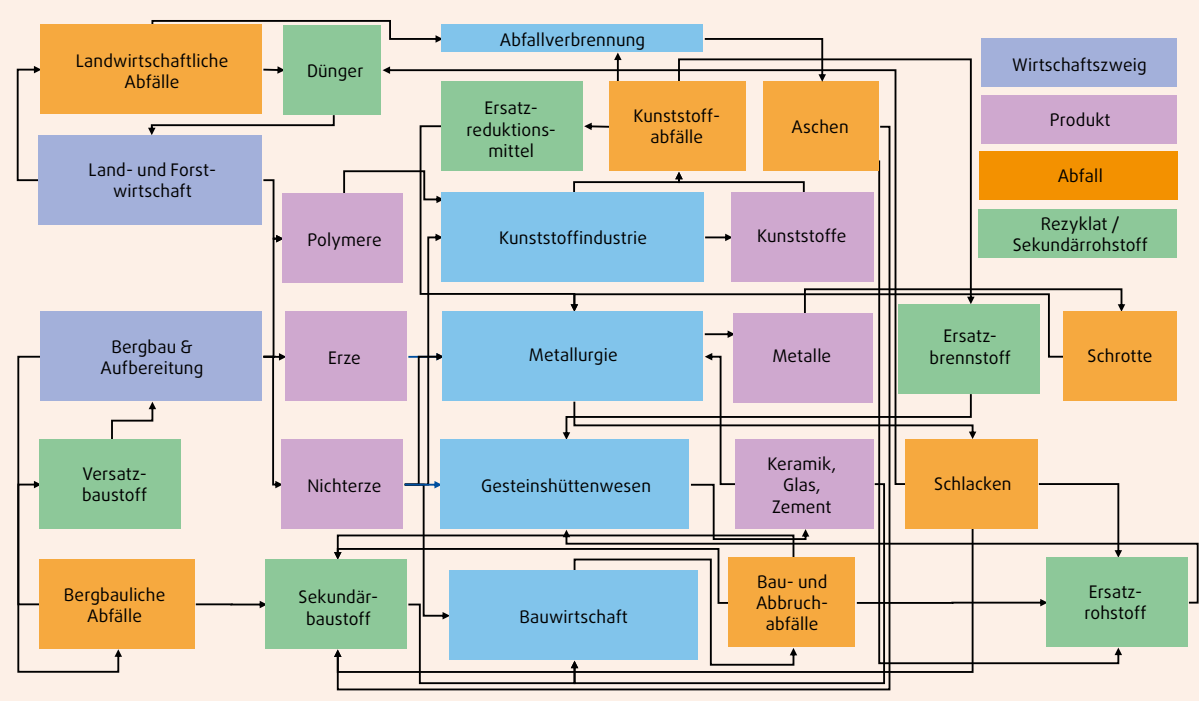

Abbildung 1
Ausgewählte Materialflüsse der intersektoralen Verwertung von Abfällen mit Fokus auf die Rohstoff- und Grundstoffindustrie

4. Bilanzierungsmethoden für THG und Allokation der Klimawirkung der „zirkulären Wirtschaft"/Kreislaufwirtschaft

Für die Berechnung der Gesamtemissionen von THG in einem gegebenen Systemrahmen (bzw. die Berechnung der Einsparung von THG durch bestimmte Maßnahmen) existieren verschiedene Bilanzierungsverfahren. Unbeschadet von unterschiedlichen Benennungen und Varianten lassen sich diese auf drei grundlegende methodische Ansätze zurückführen (Schebek et al. 2022):

Bilanzierung basierend auf dem Systemrahmen Nation als politische/wirtschaftliche Einheit nach dem Territorialprinzip[6]: Diese Methodik liegt nationalen Statistiken und internationalen Vereinbarungen zu Grunde, insbesondere: Umweltökonomische Gesamtrechnung (UGR)[7], International System of Environmental and Economic Accounting (SEEA)[8]; Nationale Inventarberichte der internationalen Klimaberichterstattung; Zertifikatehandel der EU.

Bilanzierung basierend auf dem Systemrahmen Organisation als rechtliche Einheit: Diese Methodik wurde durch das Green House Gas Protocol (GHG Protocol) entwickelt, das als weitere Strukturierung drei sogenannte Scopes für direkte, indirekte und upstream-/downstream-Emissionen vorgibt.

Bilanzierung auf dem Systemrahmen des Lebenswegs von Produkten als konzeptionelle Einheit: Diese Methodik ist standardisiert in den Normen des Life Cycle Assessment (ISO 14040/14044), das über die THG hinaus weitere Umweltwirkungen betrachtet, und in der auf dem LCA basierenden Norm des Carbon Footprint (ISO 14067), die sich auf THG beschränkt.

Die Allokation von THG bzw. THG-Einsparungen zu Akteuren wird im Rahmen dieser drei Ansätze durch deren jeweilige Berechnungsmethodik vorgenommen. Als wesentlicher prinzipieller Unterschied beschränkt sich die Bilanzierung nach dem Territorialprinzip auf die nationalen Emissionen, während GHG und LCA internationale Lieferketten von Produkten und auch Prozesse der Entsorgung erfassen. Entsprechend werden auch unterschiedliche Akteure angesprochen: im Territorialprinzip sind dies die direkt-Emittenten von Treibhausgasen aus Anlagen (z.B. Kraftwerke, große Industrieanlagen) oder aus definierten Sektoren (Verkehr, Landwirtschaft). Im GHG werden Organisationen angesprochen, insbesondere Unternehmen, aber auch nicht-kommerzielle Einrichtungen. Im LCA werden insbesondere Hersteller von Produkten oder Anbieter von Dienstleistungen angesprochen.

Die Berechnungsmethodik der nationalen Inventarberichte beruht auf der international vereinbarten Systematik zur Erhebung von Treibhausgasinventaren[9] bzw. zur THG-Berichterstattung an das UNFCCC[10]. Allgemein gesagt, werden Emissionen den Sektoren zugeordnet, in denen die handelnden Akteure angesiedelt sind. Für die Kreislaufwirtschaft bedeutet dies, dass Emissionen von Entsorgungsverfahren dem Sektor Abfallwirtschaft zugeordnet werden, während die Einsparungen durch Substitution dort angerechnet werden, wo der Einsatz von Sekundärmaterialien zur energetischen oder stofflichen Nutzung erfolgt, also

6 Eine Variante der Bilanzierung in nationalen Grenzen ist die Bilanzierung nach dem sogenannten Ansässigkeitsprinzip. Diese wird hier nicht gesondert betrachtet, da sie in der EU v. a. für die Luftemissionskonten (Air Emission Accounts) verwendet wird.
7 https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/ueberblick/Publikationen/Downloads/einfuehrung-ugr-pdf-5850021.pdf
8 https://seea.un.org/

9 2019-IPCC-Guidelines: ‚2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories'
10 UNFCCC (2013) FCCC/CP2013/10/Add.3 Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

im Energiebereich oder in der produzierenden Wirtschaft bzw. der Landwirtschaft. Entsprechend dem Territorialprinzip werden aber keine internationalen Vorketten erfasst, weshalb die Einsparungen sich vor allem auf den geringeren Energieeinsatz bei inländischer Verwendung von Sekundärmaterialien beschränken.

Im Fall des GHG Protocol fallen aus Sicht der produzierenden Wirtschaft sowohl Aufwendungen als auch Einsparungen unter die sogenannten Scope 3 Emissionen, für deren Berechnung bislang keine methodischen Vorgaben existieren. In der Berechnungsmethodik von LCA/Carbon Footprint wurden in der wissenschaftlichen Literatur verschiedene Ansätze der sogenannten End-of-Life (EoL)-Allokation entwickelt (Übersichten u. a. in VDI ESTEM; Allacker et al. (2014); Ekvall et al. (2020)). Bislang erfolgte jedoch weder in Normen noch in sonstigen Regelwerken eine Festlegung auf einen Ansatz. Darüber hinaus ist für alle Ansätze der EoL-Allokation im LCA festzuhalten, dass die Aufteilung von Aufwendungen und Einsparungen des Recyclings nur zwischen zwei Gruppen erfolgt: einerseits den Abfallbesitzern, die ihre Abfälle ins Recycling geben, und andererseits den Produzenten, die recycelte Materialien als Sekundärrohstoffe einsetzen. Die Entsorgungswirtschaft taucht nur als „Prozess" auf, jedoch nicht als Akteur.

Für alle Vorgehensweisen lässt sich das Grundproblem der zirkulären Wirtschaft sachlich wie folgt beschreiben (Schebek et al. 2024): Aufwand und Nutzen der Kreislaufführung von Abfällen sind ungleich auf die Akteure verteilt. Die Recyclingprozesse der Entsorgungswirtschaft erfordern notwendigerweise den Einsatz von Energie (deren Erzeugung zu THG-Emissionen führt) und ggf. Ressourcen (z. B. Hilfs- und Betriebsstoffe). An diesen Prozessketten von Transport, Vorbehandlung/Sortierung und Recycling sind u. U. zahlreiche Akteure beteiligt. Im Unterschied dazu tritt der gewünschte Nutzen der Einsparung von THG nur einmal auf, nämlich dann, wenn bei einem produzierenden Unternehmen tatsächlich eine Substitution von Primär- durch Sekundärrohstoffe erfolgt. Andererseits würden diese Sekundärrohstoffe ohne die von der Entsorgungswirtschaft durchgeführten Recyclingprozesse nicht auf dem Markt sein, und auch beim Abfallerzeuger können ggf. Aufwände auftreten, z. B. um Abfälle getrennt zu halten und so erst ein Recycling zu ermöglichen.

Die Frage der Zuordnung von Aufwänden und Einsparungen kann wissenschaftlich-analytisch untersucht und diskutiert werden. Praktisch relevant wird diese Frage dann, wenn eine Berechnungsmethodik auf Basis eines bestimmten Allokationsansatzes Bestandteil eines politischen Instruments wird und innerhalb dieses Instruments die Zuordnung eine politische Steuerungswirkung bzw. Einflussnahme auf Akteure entfaltet. Für die Kreislaufwirtschaft sind hier aktuell zwei Bereiche von Bedeutung, die in den folgenden Kapiteln behandelt werden: zum einen die Erfassung abfallwirtschaftlicher Anlagen und Prozesse im System des EU-Zertifikatehandels, zum anderen die Integration der Entsorgungswirtschaft in ein verpflichtendes Reporting zum Lebenszyklus von Produkten.

5. Allokation im Rahmen des Emissionshandels in D/EU auf Basis des Territorialprinzips (Substitutionsfaktoren)

Als Lenkungsinstrument zur Reduktion der THG-Emissionen wurde im Kontext der oben skizzierten Zuordnungsproblematik auf europäischer Ebene im Jahr 2005 der Europäische Emissionshandel (EU-ETS 1) eingeführt, welcher THG-mindernde Effekte zunächst in den Sektoren der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie auslösen sollte. Auf nationaler Ebene wurde die zugehörige europäische Richtlinie durch das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) umgesetzt. In den ersten Phasen erfasste der ETS ausschließlich Anlagen als direkt-Emittenten. 2019 wurde der ETS in Deutschland ergänzt durch das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG), welches insbesondere im Verkehrs- und Gebäudebereich Effekte auslösen soll, jedoch auch – erstmalig im Jahr 2024 – vollumfänglich in Abfallanlagen (MVA, Altholzkraftwerk) zur Anwendung kommt.

Nachdem die Bundesregierung ursprünglich im Rahmen einer Novellierung des TEHG im Kontext einer Opt-in-Regelung auch Abfallverbrennungsanlagen in den EU-ETS[11] überführen wollte, ist diese Regelung nun nicht mehr Bestandteil der am 31.01.2025 vom Bundestag beschlossenen Novelle des TEHG. Abfallverbrennungsanlagen unterliegen damit (zunächst) auch ab dem Jahr 2027 weiterhin der CO_2-Bepreisung nach dem BEHG.

Während über das BEHG Emissionszertifikate zu einem Festpreis von 55 € pro Tonne CO_2-Äq. (Bezug: 2025; ab 2026 Versteigerung) verkauft werden, ergibt sich der Preis beim EU-ETS aus dem Wechselspiel zwischen den festgelegten Emissionsobergrenzen (Cap) und dem jeweiligen Handelsvolumen. Aufgrund wenig ehrgeiziger Vorgaben hat sich dieser dabei bis 2017/2018 – bei einem Tiefstpreis von 3 € pro Tonne CO_2-Äq. – auf einem sehr geringen Niveau bewegt und sich erst durch entsprechende Reformen („Fit for 55"-Paket) – bei einem Maximalpreis von 100 € pro Tonne CO_2-Äq. im Jahr 2023 – auf ca. 73 € pro Tonne CO_2-Äq. (Statista, 2025; Stand: 02/2025) eingeregelt. Um die Gefahr eines „Carbon Leakage"[12] zu vermeiden, werden für definierte energie- und wettbewerbsintensive Wirtschaftszweige (z. B. Stahlindustrie) Kriterien-basiert kostenlose Zertifikate vergeben, bzw. zukünftig (vollständig ab 2026) über den ergänzenden Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) Maßnahmen ergriffen, um zu verhindern, dass EU-Produkte durch CO_2-intensive Importe ersetzt werden.

Das sachliche Bindeglied zwischen dem ETS und der Kreislaufwirtschaft sind immissionsschutzrechtliche Anlagen der Grundstoffindustrie, die, wie in Kapitel 2 beschrieben, die emissionsintensiven Prozesse der Primärproduktion in Materialkreisläufe durchführen. Insbesondere sind hier zu nennen die Metallindustrie sowie die Produktion von Zement. Ein der Kreislaufwirtschaft zuordenbarer Effekt ist dabei z. B. im Bereich der Stahlindustrie, einem der Hauptemittenten

11 bislang unterliegen thermische Abfallbehandlungsanlagen im EU-ETS nur der Berichtspflicht
12 Verlagerung von THG-intensiven Wirtschaftszweigen in das nicht-EU-Ausland

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

der energieintensiven Industrien, zu erkennen. Nach Pothen et al. (2019) können je nach Stahl-Produkt und Produktionsverfahren pro t Stahlschrotteinsatz 1,7–4,3 t CO_2 eingespart werden, was bei einem EU-ETS-Zertifikatspreis von ca. 73 € pro Tonne einer Einsparung von ca. 124–314 € pro t eingesetztem Stahlschrott gleichkommt.[13] Steigende Nachfragen haben entsprechend noch bis Mitte 2024 zu Knappheiten am Schrottmarkt und zu steigenden Preisen geführt, wohingegen aufgrund der schwachen Auftragslage bei den Stahlherstellern im letzten Drittel des Jahres 2024 wieder rückläufige Nachfragen und Preisentwicklungen zu konstatieren sind (EUWID, 4 und 39/2024). Diese Volatilität führt bei den Bereitstellern von Stahlschrott zu Planungsunsicherheiten und ökonomischen Risiken, während die Nutzer hinreichend gut auf Marktschwankungen reagieren können.

Die Risiken zum Aufbau und Betrieb einer Infrastruktur liegen somit hauptsächlich bei den Akteuren der Kreislaufwirtschaft. Zudem wurden die Kosten der Abfallwirtschaft über das BEHG erhöht. Nach ITAD (2020) werden die Mehrkosten bis 2026 auf bis zu 2 Mrd. € geschätzt. Die Kostenrelevanz ergibt sich dabei insbesondere aufgrund der kostenpflichtigen, fossilen Abfallbestandteile, deren Produzenten im Kontext der Abfallentsorgung nicht belangt werden und deren Herleitung über die EBeV 2030[14] sich vergleichsweise komplex darstellt[15].

6. Allokation im Rahmen von Reporting-Anforderungen des Green Deal auf Basis des Lebenszyklusansatzes

Die Politik des Green Deals hat im Zeitraum der letzten EU-Kommission zunehmend auf die Einführung eines verpflichtenden Reporting der THG von Unternehmen gesetzt. Diese neuen Instrumente der EU-Politik, insbesondere die Ökodesign-Verordnung mit der Implementierung des digitalen Produktpasses (DPP) und die CSRD-Richtlinie, basieren zentral auf dem Lebenszyklusansatz (Baehr et al. 2024). Im Unterschied zum Zertifikatehandel geht es hier nicht um eine direkte monetäre Steuerung, vielmehr sollen zur Steuerung Einflüsse unterschiedlicher Stakeholder von Unternehmen (Konsumenten, Investoren) indirekt genutzt werden. Perspektivisch ist es aber auch denkbar, bestimmte gesetzgeberische Regelungen direkt an die Ergebnisse einer solchen Bilanzierung zu koppeln. Die Relevanz dieser Steuerungsmechanismen wird sich in den nächsten Jahren erst zeigen, da gegenwärtig die Implementierung der zum Ende der letzten EU-Kommission eingeführten Instrumente erst am Anfang steht.

Die sachlichen Bindeglieder zwischen Reporting-Pflichten basierend auf dem Lebenszyklusansatz und der Kreislaufwirtschaft beziehen sich vor allem auf die folgenden Aspekte:

- Durch die Ökodesign-Verordnung werden alle Hersteller von Produkten angesprochen, unabhängig davon, ob beim Hersteller selbst direkte Emissionen von THG anfallen oder nicht. Da das „end-of-life“ Bestandteil des Lebenszyklus jedes Produkts darstellt, sind Hersteller in der Pflicht, auch über das vorgesehene Recycling oder über Maßnahmen des „Design for Recycling“ berichten zu müssen. Damit wird sowohl die Rolle der Produzenten als Akteure in Materialkreisläufen adressiert als auch dem in der Kreislaufwirtschaft verankerten Prinzip der Produktverantwortung entsprochen. Entsprechend den in den LCA verwendeten Ansätzen der Allokation wird die Entsorgungswirtschaft hier nicht explizit adressiert.
- Die CSRD erfasst alle Unternehmen der Wirtschaft, so auch Unternehmen der Entsorgungswirtschaft. Dies eröffnet die Möglichkeit, dass Entsorgungsunternehmen über ihre Recyclingprozesse berichten und damit einerseits mögliche eigene Beiträge zur Einsparung von Emissionen dokumentieren, andererseits Akteuren von Materialkreisläufen Informationen zur Verfügung stellen (beispielsweise über einen zukünftigen Digitalen Produktpass).

Gegenwärtig gibt es für die Berechnung des vollständigen bzw. teilweisen Lebenszyklus im Rahmen des jeweiligen Reporting keine methodischen Vorgaben über die allgemeinen Normen der LCA und des Carbon Footprint hinaus und damit auch keine Festlegung auf einen der in der LCA entwickelten Ansätze der Allokation. Offen ist beispielsweise, inwieweit insbesondere für den Digitalen Produktpass die Methodik des sogenannten Produkt Environmental Footprint (PEF) zur Anwendung kommen wird. Der PEF wurde auf Initiative der EU-Kommission 2013 im Rahmen der Leitinitiative „Ressourcenschonendes Europa“ innerhalb der Strategie „Europa 2020“ veröffentlicht, um für mehr Einheitlichkeit bei der ökologischen Bewertung von Produkten zu sorgen (Finkbeiner et al. 2018). Die in dieser Methodik beinhaltete EoL-Allokation spiegelt die Kritik am sogenannten Cut-Off-Ansatz wider: dieser ist die am häufigsten angewandte EoL-Allokation und ordnet Lasten und Nutzen des Recyclings vollständig der Seite des Einsatzes von Sekundärrohstoffen zu; die Netto-Vorteile des Recyclings kommen also ausschließlich der produzierenden Industrie zugute. Im Unterschied dazu wurde im Rahmen der ersten (PEF)-Methode der sogenannte 50:50-Ansatz für das EoL vorgeschlagen (European Commmission 2013). Hier werden sowohl Umweltwirkungen aus dem vor- oder nachgelagerten Recycling als auch Gutschriften im Verhältnis von 50:50 zwischen Bereitstellenden und Nutzenden des Sekundärmaterials aufgeteilt. Mit der sogenannten Circular Footprint Formula („CFF“), die Teil der Vorschläge zur erneuerten PEF-Methodik ist, wurde

13 Pothen et al. (2019) gehen hier unter Berücksichtigung weiterer Umweltkosten sowie bei Ansatz unterschiedlicher Produktionsverfahren (Kohlenstoffstahlschrott/Edelstahlschrott) und THG-Handelspreise von einer „Schrottbonus“-Bandbreite von 79–502 € pro Tonne Schrott aus. Des Weiteren wird konstatiert, dass der Einsatz von Schrott u. a. durch die Einbindung der Bergbau-bedingten Emissionen sowie derjenigen von Rohstoffen und Vorprodukten in die Bilanzierungssysteme (derzeit nicht der Fall) begünstigt würde.

14 Verordnung über die Emissionsberichterstattung nach dem Brennstoffemissionshandelsgesetz für die Jahre 2023 bis 2030 (Emissionsberichterstattungsverordnung 2030 – EBeV 2030)

15 Nach EBeV 2030 kann zwischen fünf verschiedenen Bewertungsverfahren gewählt werden: Standardwerte für verschiedene Brennstoffsorten, individuelle Festwerte je Entsorger und Abfalltyp, individuelle repräsentative Probenahme und Analyse, abgestimmte Literaturwerte und direkte kontinuierliche Messung unter Abzug des Biomasseanteils (nach VKU, 2023)

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

dieser Ansatz modifiziert (Zampori and Pant 2019): anstatt der fixen 50:50-Aufteilung wurden Faktoren eingeführt, die das Verhältnis von Angebot und Nachfrage auf einem Markt widerspiegeln sollen[16]. Der CFF-Ansatz bewirkt, dass sowohl die Bereitstellung als auch der Einsatz des Sekundärmaterials abhängig von der Marktsituation und der Qualität des Materials gefördert wird. Auch diese Vorschläge stehen aber in der Kritik, insbesondere da bislang eine valide und transparente Methodik für die sachliche Begründung der Faktoren fehlt. Darüber hinaus sind derzeit keine Datensätze verfügbar, die auf der CFF-Methodik beruhen (VDI ESTEM).

Die fehlenden methodischen Festlegungen für den Digitalen Produktpass und andere Reporting-Instrumente sorgen derzeit für Verunsicherung unter den betroffenen Akteuren. Andererseits besteht gerade jetzt großer Gestaltungsspielraum. Offensichtlich ist, dass für Vergleichbarkeit und Akzeptanz zukünftig eine weitergehende Standardisierung der Berechnung erfolgen muss, die die Rahmenbedingungen der Anwendung für unterschiedliche Reporting-Instrumente und deren intendierte Steuerungsfunktion berücksichtigt (Schebek et al. 2024). Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft sind dabei vor allem die folgenden Fragestellungen zu klären:

- Die Diskussion zur Aufteilung von Lasten und Gutschriften des Recyclings berücksichtigt bislang nur Abfallerzeuger und die produzierende Industrie, die Sekundärrohstoffe einsetzt. Soll die Entsorgungswirtschaft in eine solche Aufteilung einbezogen werden, oder soll im Gegenteil ihre Rolle als Teil der Daseinsvorsorge gestärkt werden, die zwangsläufig mit Aufwendungen verbunden ist?
- Welche Reporting- oder Steuerungsinstrumente eignen sich überhaupt für eine mögliche Einbeziehung der Entsorgungswirtschaft – digitaler Produktpass, CSRD etc. Welche Stakeholdergruppen der Entsorgungswirtschaft sollten ggf. einbezogen werden und nach welchen Prinzipien könnte eine Aufteilung von Lasten und Gutschriften grundsätzlich erfolgen?

Diese Fragestellungen umfassen grundsätzliche Sichten auf die Rolle der Entsorgungswirtschaft, aber auch sehr viele Detailfragen zur möglichen Ausgestaltung praktischer Regelungen. Die aktuell laufende Implementierung der neuen Reporting-Anforderungen wird zwangsläufig dazu führen, dass in den kommenden Jahren Antworten insbesondere zur grundsätzlichen Behandlung des Beitrags der Entsorgungswirtschaft gefunden werden müssen.

16 Hierbei besagt ein niedriger Wert, dass die Nachfrage höher als das Angebot des Sekundärmaterials ist. Ein hoher Wert zeigt wiederum, dass das Angebot höher als die Nachfrage ist. Für die Kategorien Metall, Papier, Plastik, Batterien, Baumaterialien, Glas und Chemikalien wurden bisher als Default-Werte 0.2, 0.5 und 0.8 ausgegeben.

Literatur

Allacker et al. 2014: Allacker, K.; Mathieux, F.; Manfredi, S.; Pelletier, N.; Camillis, C. de; Ardente, F. und R. Pant (2014): Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: Proposals for product policy initiatives. In: Resources, Conservation and Recycling, 88: 1–12
Andrew 2019: Andrew, R.M. (2019): Global CO_2 emissions from cement production. Earth System Science Data 11(4): 1675–1719; https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019
Baehr et al. 2024: Baehr, J.; Zenglein, F.; Sonnemann, G.; Lederer, M.; Schebek, L. Back in the Driver's Seat: How New EU Greenhouse-Gas Reporting Schemes Challenge Corporate Accounting. Sustainability 2024, 16, 3693. https://doi.org/10.3390/su16093693
Hasanbeigi 2022: Hasanbeigi, A. (2022): Steel Climate Impact. An International Benchmarking of Energy and CO_2 Intensities. https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/624ebc5e1f5e2f3078c53a07/1649327229553/Steel+climate+impact-benchmarking+report+7April2022.pdf
Horckmans et al 2019: Horckmans, L.; Nielsen, P.; Dierckx, P.; Ducastel, A. (2019): Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review. Resources, Conservation and REcycling 140: 297-304, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.025
Bobrowski & Nejranowski, 2023: Bobrowski, A. & Nejranowski, A. (2023): The Circular Economy in Terms of Zinc Recovery from Industrial Waste – Directions for the Development and Profitability of Recycling. Journal of Casting & Materials Engineering 7(4): 49–55, https://doi.org/10.7494/jcme.2023.7.4.49
Commission Recommendation 2013/179/EU, Annex V: Dealing with Multi-functionality in Recycling Situations https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013H0179
Ekvall et al. 2020: Ekvall. T.; Björklund, A.; Sandin, G.; Jelse, K.; Lagergren, J. und M. Rydberg (2020): Modeling recycling in life cycle assessment. Final project report. Gothenburg: IVL Swedish Environmental Research Institute; verfügbar unter: www.lifecyclecenter.se/wp-content/uploads/2020_05_Modeling-recyling-in-life-cycle-assessment-1.pdf
European Commission 2013: Commission Recommendation 2013/179/EU, Annex V: Dealing with Multi-functionality in Recycling Situations, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013H0179
Europäisches Parlament (2023): Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile. Artikel 20151201ST005603. Online verfügbar: https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2023/6/story/20151201STO05603/20151201STO05603_de.pdf (letzter Zugriff: 11.03.2025)
Finkbeiner et al. 2018: Matthias Finkbeiner, Vanessa Bach, Annekatrin Lehmann; Environmental Footprint: Der Umwelt-Fußabdruck von Produkten und Dienstleistungen; UBA TEXTE 76/2018; https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Forschungsdatenbank/fkz_3712_95_337_environmental_footprint_bf.pdf
IPCC 2022: International Panel on Climate Change (2022): Climate Change 2022: Mitigation of Cliamte Change. Working Group III Report. https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/
Isella & Manca 2022: Isella, A. & Manca, D. (2022): GHG Emissions by (Petro) Chemical Processes and Decarbonization Priorities – A Review. Energies 15(20): 7560, https://doi.org/10.3390/en15207560
ITAD 2020: Schrift: Das Brennstoff-Emissionshandelsgesetz (BEHG) – mögliche Kostenauswirkungen der Einbeziehung der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen (TAB) in den nationalen Emissionshandel auf Bürger, Gewerbe und Industrie und die Abfallwirtschaft, 19.05.2020
Karpf, R. 2021: CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen und dessen Nutzung (CCU); Präsentationsfolien ITAD Arbeitskreis Klimaschutz (Konferenz vom 16. April 2021)
Krämer, D. 2024; DECHEMA-Studie: Verfahren zur klimaneutralen Bereitstellung und Verarbeitung von Kohlenstoff; Vortragspräsentation im Rahmen der acatech-Veranstaltung „CO_2 als Rohstoff in einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft" am 17.12.2024
Le et al. 2023: The current status of hydrogen energy: an overview. RSC Advances 13: 28262-28287, https://doi.org/10.1039/D3RA05158G
Liu et al. 2021: Liu, L.-Y.; Ji, H.-G.; Lü, X.-F.; Wang, T.; Zhi, S.; Pei, F.; Quan, D.-L. (2021): Mititation of greenhouse gases released from mining activities: A review. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 28: 513–521. https://doi.org/10.1007/s12613-020-2155-4
Pothen, F. et al. (2019): Pothen, F.; Growitsch, C.; Engelhardt, J.; Reif, C.; Externe Kosten und fairer Wettbewerb in den globalen Wertschöpfungsketten der Stahlherstellung, Studie im Auftrag des BDSV, 2019
Pothen, F. et al. (2021): Pothen, F.; Brock, L.; Schrottbonus konkret – Instrumente für fairen Wettbewerb in den globalen Wertschöpfungsketten der Stahlherstellung und mikrostrukturierender Herstellungsverfahren, Studie im Auftrag des BDSV, 2021
Raatz et al. 2022: Raatz; Seidel; Tuma; Thorenz; Helbig; Reller; Faulstich; Joachimsthaler, Ch.; Steger, S.; Hagedorn, W.; Bickel; Liedke, OptiMet-Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie – Substitution von Primärrohstoffen durch Verminderung des Downcyclings, UBA-Texte 81/2022
Schebek et al. 2022: Schebek, L.; Baehr, J.; Hagedorn, T.; Lopes, A.; Zeller, V.; Die Entsorgungswirtschaft im Kontext der Klimapolitik: Rahmenbedingungen, Instrumente und Entwicklungen; Müll und Abfall 8/2022; https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2022.08.06

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

Schebek et al. 2024: Schebek, L.; Weyand, S.; Baehr, J.: Bilanzierung der Einsparung von Treibhausgasen durch Maßnahmen der Kreislauf- und Abfallwirtschaft; Müll und Abfall 9/2024; https://doi.org/10.3730 7/j.1863-9763.2024.09.03
Statista, 2025: EU-ETS price 2023–2025 Statista; entnommen am 25.02.2025
UBA 2024 (Hrsg): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024), Dessau-Roßlau, Juni 2024
UBA 2022: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2020 – gekürzte Version zur EU-Submission, Umweltbundesamt, 15.01.2022, S. 24
VDI ESTEM: Abschlussbericht zum Vorhaben ESTEM, download unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/2_Service/f_ESTEM/Abschlussbericht_ESTEM.pdf
VKU 2023: Web-Seite-Info: Neue Emissionsberichterstattungsverordnung 2030 zum BEHG in Kraft getreten: VKU (24.01.2023); entnommen am 07.07.2025
Wani et al. 2022: Wani, O. B.; Khan, S.; Shoaib, M.; Zeng, H.; Bobicki, E. R. (2022): Decarbonization of mineral processing operations: Realizing the potential of carbon capture and utilization in the processing of ultramafic nickel ores. Chemical Engineering Journal 433(1): 134203, https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134203
Weltenergierat für Deutschland 2021: Energie für Deutschland – Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext 2021, S. 61; WEC_Energie-für-Deutschland-2021.pdf; entnommen am 07.07.2025
WWF 2023: WWF Deutschland (2023): Modell Deutschland Circular Economy. Eine umfassende Circular Economy für Deutschland 2045 zum Schutz von Klima und Biodiversität. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Modell-Deutschland-Circular-Economy-Broschuere.pdf
Zampori and Pant (2019): Zampori, L. and Pant, R. (2019): Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-00654-1, doi:10.2760/424613, JRC115959. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEF_method.pdf

Anschrift der Autoren

Prof. Dipl.-Ing. Frank Baur
HTW des Saarlandes/IZES gGmbH
E-Mail: baur@izes.de

Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
TU Darmstadt (a. D.)
E-Mail: l.schebek@iwar.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. rer. nat. Daniel Vollprecht
Universität Augsburg
E-Mail: daniel.vollprecht@uni-a.de

Prof. Dr. rer. nat. techn. Marion Huber-Humer
BOKU Wien
E-Mail: Marion.huber-humer@boku.ac.at

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin