Paul Suski, Klaus Wiesen

Einsatz von Sekundärmaterial vs. recyclinggerechtes Design

Diskussion verschiedener End-of-Life-
Allokationen unter Berücksichtigung der
europäischen Abfallhierarchie

Ursprünglich veröffentlicht in:

UmweltWirtschaftsForum,

24 (2016), 1, 7-13

DOI: 10.1007/s00550-016-0395-6

*Paul Suski a**
Klaus Wiesen a

Einsatz von Sekundärmaterial vs. recyclinggerechtes Design: Diskussion verschiedener End-of- Life-Allokationen unter Berücksichtigung der europäischen Abfallhierarchie

a Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH

* Korrespondierender Autor:
Paul Suski
Wuppertal Institut
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
Deutschland
E-Mail: paul.suski@wupperinst.org
Tel.: +49 202-2492270
Fax: +49 202-2492138

Dies ist die begutachtete, akzeptierte Manuskriptversion des Artikels. Aus dem Veröffentlichungsprozess können nachträgliche Änderungen resultieren, die sich z. B. auf die Formatierung und Zeichensetzung auswirken. Derartige Änderungen sind hier nicht berücksichtigt. Die endgültige Version wurde in der oben genannten Zeitschrift veröffentlicht.

Einsatz von Sekundärmaterial vs. recyclinggerechtes Design: Diskussion verschiedener End-of-Life-Allokationen unter Berücksichtigung der europäischen Abfallhierarchie

Paul Suski* und Klaus Wiesen

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH

Abstract (deutsch)

Die Kreislaufwirtschaft zielt unter anderem darauf ab, Abfall als Rohstoff für neue Produkte zu nutzen. Bei Ökobilanzen von Produkten stellt sich diesbezüglich die Frage, wie sich im offenen Kreislauf rezyklierter oder thermisch verwerteter Abfall bewerten lässt. Für die Bewertung von Produktsystemen sind zwei Allokationsmethoden üblich: Die Cut-Off Methode, welche den Einsatz von Recyclingmaterialien begünstigt und die Avoided Burden Methode, welche die Abgabe von recyclingfähigem Material begünstigt. Wir diskutieren diese beiden Methoden hinsichtlich ihrer Eignung zur Bewertung einer Kreislaufwirtschaft, gemessen an der europäischen Abfallhierarchie. Als Fallbeispiel dienen verschiedene End-of-Life-Szenarien für Glas und den Kunststoff Polypropylen, die wir mit Hilfe der Umweltindikatoren Material Footprint und Carbon Footprint bewertet haben. Als Ergebnis zeigt sich, dass die Anwendung von Avoided Burden im Fall einer thermischen Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage problematisch ist. Zum einen ergibt sich in diesem Fall ein negativer Material Footprint, falls dadurch ein Steinkohlekraftwerk substituiert wird, zum anderen wird die Abfallhierarchie teilweise übergangen, da die thermische Verwertung günstiger erscheint als Recycling. Des Weiteren wurde herausgestellt, dass die oberste Priorität in der Abfallhierarchie, die Vermeidung, durch den Cut-Off Ansatz höher begünstigt wird, als durch die Avoided Burden Methode.

Abstract (English)

An investigation on the end-of-life allocations “Cut-Off” and “Avoided Burden” in combination with the environmental indicators Material Footprint and Carbon Footprint has been conducted in order to estimate their eligibility for the European waste hierarchy.

Schlüsselwörter (deutsch und englisch)

Umweltbewertung, Allokation, End-of-Life, Material Footprint, Abfallhierarchie

Environmental Assessment, Allocation, End-of-Life, Material Footprint, waste hierarchy

1. Einleitung

Die Abfallverwertung gilt in der europäischen Umweltpolitik als ein zentraler Ansatz, um die Ressourceneffizienz zu steigern (Europäische Kommission 2015). Bei Ökobilanzen von Produkten stellt sich dabei die Frage, wie sich im offenen Kreislauf rezyklierte und thermisch verwertete

Produkte und Materialien bewerten lassen. Seit vielen Jahren gibt es in der Wissenschaft kontroverse Diskussionen darüber, welche Bewertungsmodelle Ressourceneffizienz am besten unterstützen (Allacker et al. 2014; Ekvall und Weidema 2004; Pelletier et al. 2014; Wötzel 2007). Konkret geht es darum, inwiefern der Einsatz von Recyclingmaterial in Produkten oder die potenzielle Recyclingfähigkeit im Zusammenhang mit offenen Kreisläufen honoriert werden soll. Über diese Frage entscheidet die gewählte Allokationsmethode. In der Diskussion um passende Allokationsmethoden stehen sich laut Frischknecht (2010) zwei zentrale Ansätze gegenüber:

- „Cut-Off“: Betrachtet den Einsatz von Recycling-Material in der Produktherstellung
- „Avoided Burden“: Betrachtet das Recycling des Produkts am Lebensende und hebt so die potenzielle Recyclingfähigkeit hervor

Weitere Allokations-Methoden sind zumeist Abwandlungen (zum Beispiel loss of quality method) oder Mischformen (zum Beispiel 50:50) (Nicholson et al. 2009). In diesem Artikel werden jedoch nur die Methoden Cut-Off und Avoided Burden behandelt, zumal sie Extrema unter den vorhandenen Methoden darstellen. Für Abfall, welcher nicht verwertet oder rezykliert wird, stellt sich die Frage nach der Allokation nicht, da dieser nicht die End-of-Waste Kriterien (Europäische Union 2008) erfüllt und somit regulär dem verursachendem Produkt zugeschrieben werden muss (End-of-Life Phase einer Ökobilanz).

Die Wahl der Allokationsmethode kann die Gesamtergebnisse einer Ökobilanz maßgeblich beeinflussen (Bergsma and Sevenster 2013). Dabei sind sowohl Cut-Off als auch Avoided Burden mit dem internationalen Standard für Ökobilanzen, der ISO 14040/44 vereinbar. Denn der ISO-Standard bleibt bezüglich der Allokationsmethode (in End-of-Life Situationen) unkonkret und gibt keine spezifische Methode vor: Einerseits wird für Allokationen eine Systemraumerweiterung empfohlen, was der Avoided Burden Methode entsprechen würde, andererseits gelten diese Regeln primär für Multi-Output-Prozesse. Für End-of-Life Situationen wird die Systemraumerweiterung nicht explizit erwähnt (ISO 2006a, 2006b).

Im Folgenden werden die Methoden Cut-Off und Avoided Burden zunächst erläutert und anschließend für das Beispiel Glas und den Kunststoff Polypropylen (PP) berechnet. Ausgehend von den Ergebnissen der Berechnung werden die Vor- und Nachteile beider Ansätze diskutiert und in Bezug zur Abfallhierarchie (Europäische Kommission 2015) gesetzt (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Europäische Abfallhierarchie (nach Europäische Kommission 2015)

2. Methode

Die beiden Allokationsmethoden werden auf zwei Beispiele angewendet: Weißglas für Behälter und ein Spritzgussteil aus dem Kunststoff Polypropylen (PP), was sich ebenfalls für Behälter nutzen lässt. Beide Materialien weisen keinen Recyclinganteil in der Herstellung auf. Die Berechnung stellt kein repräsentatives Szenario und keine Ökobilanz dar, sondern dient in erster Linie dazu, Unterschiede der Allokationsmethoden zu zeigen. Zum Beispiel bildet die Auswahl der Verwertungsszenarien nur einen Teil der Verwertungsvielfalt ab.

2.1. Systemgrenzen und Datengrundlage

Die Analyse von Glas und PP beginnt beim Abbau der Basisrohstoffe, Erdöl für PP und Quarzsand, Soda, Dolomit, Kalkstein, Feldspat und Natriumsulfat für Glas. Nach der Herstellung wird für beide Materialien eine Transportdistanz von 500 km angenommen. Die Weiterverarbeitung zum fertigen Produkt, etwa ein Behälter mit Deckel und die Nutzungsphase werden nicht betrachtet. Stattdessen wird der Fokus bei der Avoided Burden Methode auf das Recycling und die thermische Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) gelegt. Es kommen unterschiedliche Verwertungspfade in Betracht, welche auf deutschen Abfallstatistiken beruhen (Schüler 2015). Beispielhaft wurden für diese Studie folgende Szenarien berücksichtigt:

Glas

- Recycling: vollständiges Recycling ohne Deponierung durch Einschmelzen von Scherben

Kunststoff

- MVA (Steinkohle): vollständige thermische Verwertung in einer MVA zur Bereitstellung von Strom und Fernwärme, wobei Energie aus einem Steinkohlekraftwerk substituiert wird
- MVA (Erdgas): vollständige thermische Verwertung in einer MVA zur Bereitstellung von Strom und Fernwärme, wobei Energie aus einem Erdgaskraftwerk substituiert wird
- Recycling: vollständiges Recycling zu Sekundärgranulat. Qualitätsverluste sind hier unberücksichtigt
- Mix: Mittel aus 50 % Recycling, 25 % MVA (Steinkohle) und 25 % MVA (Erdgas)

Für die Cut-Off Berechnungen bleibt End-of-Life unberücksichtigt.

Deponierung als eigenes Szenario bleibt unberücksichtigt, da in Deutschland laut Abfallgesetz kein Müll unverarbeitet deponiert werden darf, also erst wenn dieser nach Verwertungsversuchen übrig bleibt. Alle Prozesse berücksichtigen die Müllsortierung und Aufbereitung (Wäsche, Abtrennung von Etiketten etc.). Die verwendeten Daten für die Glasherstellung stammen vom Bundesverband Glasindustrie e.V. und für die Kunststoffherstellung von PlasticsEurope. Für die Modellierung wurde auf Hintergrunddaten der Ecoinvent 2.2 Datenbank zurückgegriffen.

2.1.1. Allokationsmethode Cut-Off

Die Cut-Off-Methode trennt bei rezyklierten Materialien zwischen zwei unterschiedlichen Produktsystemen. Nach dem Standardmodell von Frischknecht (2010) und Wötzel (2007) werden alle Recyclingprozesse vollständig dem Produktsystem zugeschrieben, in dem das Recyclingmaterial auch eingesetzt wird (siehe Abbildung 2). Das heißt der Einsatz von Primärrohstoffen wird im vollen Herstellungsaufwand angerechnet und Sekundärrohstoffe werden in der Regel im Umfang der Abfallsammlung und Wiederaufbereitung berücksichtigt. Dies begünstigt den Einsatz von Recyclingmaterial, da dessen Anteil direkten Einfluss auf das Ergebnis hat. End-of-Life Betrachtungen finden nur im Rahmen von Deponierungen statt. Abweichungen zur Anrechnung des Recyclingaufwandes sind möglich (Frischknecht 2010; Wötzel 2007). Cut-Off Beschreibungen beziehen sich konkret auf Recycling und nicht thermische Verwertung, jedoch beschreibt das Product Category Rules (PCR) basic module CPC 36 für Gummi und Kunststoffe des Environmental Product Declaration (EPD) Systems für den Fall einer thermischen Verwertung ein ähnliches vorgehen, mit

dem einzigen Unterschied, dass der Transport zur Verwertungsanlage dem abgebenden Produktsystem zugerechnet wird (EPD 2015). Im Sinne der Konsistenz und da dieser Transport nur einen minimalen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat ($<1\%$), wird die thermische Verwertung auch nach der beschriebenen Cut-Off Methode berechnet.

Abbildung 2: Umwelteinflüsse nach der Cut-Off Methode über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und End-of-Life/Recycling (nach Frischknecht 2010)

2.1.2. Allokationsmethode Avoided Burden

Der Avoided Burden Ansatz (deutsch: vermiedene Belastung) belohnt die potenzielle Recyclingfähigkeit eines Materials oder Produkts und fördert damit u.a. recyclingfähiges Produktdesign (Bergsma und Sevenster 2013). Dies wird im Allgemeinen auf zwei ähnlichen Wegen durchgeführt, welche beide eine Systemraumerweiterung bedingen.

- **Gutschriften-Ansatz:** Bei der Gutschriften-Methode werden die vom aufnehmenden Produktsystem (2. Produktsystem) resultierenden Einsparungen durch die Substitution von Primärmaterial durch Recyclingmaterial an das abgebende Produktsystem (1. Produktsystem) vergeben (siehe Abbildung 3). Der Einsatz von Recyclingmaterial wird erst dann in Höhe von Primärrohstoffen in einem Produktsystem berücksichtigt, wenn das Material deponiert wird.
- **Verlagerungs-Ansatz:** Alternativ beschreibt dies (Frischknecht 2010) durch eine Verlagerung der Umweltbelastungen der Primärproduktion im Produktsystem 1 auf die Herstellungsphase in Produktsystem 2.

Beide Ansätze für Avoided Burden ergeben im Falle von stofflichem Recycling (zum Beispiel von Metall) dasselbe Ergebnis. Bei thermischer Verwertung, zum Beispiel von Kunststoff, funktioniert nur die Gutschriftenmethode, da recycelter Kunststoff keinen Primärkunststoff, sondern fossile Brennstoffe substituiert. So ergeben sich Gutschriften, die unabhängig vom Herstellungsaufwand des Kunststoffes sind. Die Methode von Frischknecht dagegen kann diesen Fall nicht abbilden, da der Herstellungsaufwand des Kunststoffes und nicht der Aufwand der Bereitstellung fossiler Brennstoffe verlagert würde. Aus diesem Grund wird in der weiteren Betrachtung die Logik des Gutschriften-Ansatzes für die Betrachtung der Avoided Burden Methode gewählt.

Für die thermische Verwertung von PP in einer MVA werden zwei Szenarien untersucht, die Substitution von Steinkohleenergie und von Erdgasenergie. Im Mix-Szenario werden beide Anteile zu gleichen Anteilen berücksichtigt, da Erdgas einen größeren Anteil an der Fernwärmebereitstellung hat (BMWi et al. 2015), Steinkohle dafür am Strommix (AGEB 2015). Da die Datenlage keine Allokation zwischen Fernwärme und Strom zugelassen hat wurde mit dem unteren Heizwert gerechnet und somit die Wirkungsgrade der Kraftwerke vernachlässigt. Besonders zwischen der MVA und einem Erdgaskraftwerk sind die Unterschiede jedoch als relevant anzunehmen. In einer Produktökobilanz sollte dies also berücksichtigt werden.

Abbildung 3: Umwelteinflüsse nach der Avoided Burden Methode über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und End-of-Life (Recycling) inkl. Gutschriftenvergabe

2.2. Umweltindikatoren

Für den Vergleich der Allokationsmodelle wurden mit den Umweltkennzahlen Material Footprint und Carbon Footprint bewusst zwei gegenläufige Indikatoren gewählt: Während der Material Footprint den Rohstoffeinsatz beziffert und somit ein Input-orientierter Ansatz ist, konzentriert sich der Carbon Footprint mit der Berücksichtigung der Treibhausgasemissionen auf die Outputs. Der Material Footprint kommt ohne Wirkungsmodell aus, es findet also keine Charakterisierung der Rohstoffe statt. Damit entspricht er einem Sachbilanz-Indikator ähnlich dem kumulierten Energieaufwand (Klöpffer, 1997).

2.2.1. Material Footprint

Der Material Footprint erfasst den lebenszyklusweiten Ressourceneinsatz eines Produktes oder einer Dienstleistung in Kilogramm. Die Berechnung der Prozessströme erfolgt auf dem MIPS-Konzept (Material-Input pro Serviceeinheit) von Friedrich Schmidt-Bleek (Schmidt-Bleek et al. 1995; Liedtke et al. 2014). Generell werden beim Material Footprint abiotische und biotische Rohstoffe, sowie Bodenerosion berücksichtigt. Für die aktuelle Studie blieb die Bodenerosion unberücksichtigt, da diese nur in der Landwirtschaft relevant ist. Der Material Footprint misst bei den abiotischen und biotischen Rohstoffen sowohl die wirtschaftlich genutzten Rohstoffe (Metalle, fossile Brennstoffe, Holz etc.), als auch die wirtschaftlich ungenutzten Rohstoffe (Bodenaushub, Abfallerz, Pflanzenreste). Je höher der Material Footprint verglichen mit dem Eigengewicht ausfällt, desto rohstoffintensiver ist das Produkt. So bedarf es keiner aufwändigen Interpretation und Einordnung der Ergebnisse.

2.2.2. Carbon Footprint

Der Carbon Footprint beziffert die Treibhausgasemissionen, welche anthropogenen Ursprungs sind. Damit ist er ein Maß für die Klimabelastung. CO_2 , welches aus der Verbrennung von Biomasse entsteht, bleibt entsprechend (IPCC 2007) unberücksichtigt. Der Carbon Footprint wird in kg CO_2 -Äquivalenten angegeben.

3. Ergebnisse der Bewertung von Glas und Kunststoff

Die untersuchten Allokations-Methoden unterscheiden sich deutlich in den Ergebnissen (s. Abbildung 4). Bei der Avoided Burden Methode sinkt der Material Footprint von Glas durch die Vergabe von Gutschriften um 62 %, der Carbon Footprint sinkt um 63 % im Vergleich zur Cut-Off Methode. Der Material Footprint wird maßgeblich durch die Einsparungen von Rohstoffen in der Glasherstellung (Quarzsand, Soda etc.) beeinflusst. Der Carbon Footprint profitiert insbesondere durch Energieeinsparungen, da durch den geringeren Schmelzpunkt von Glasscherben der Energieeinsatz je 10 % Scherben um 3 % sinkt (Scalet et al. 2013). Außerdem tritt keine Dekarbonatisierung beim Einschmelzen von Bruchglas auf, da keine Kohlenstoffanteile mehr im Glas vorhanden sind.

Bei PP hängt das Ergebnis für den Material Footprint maßgeblich von der Art der Verwertung ab (siehe Abbildung 5). Durch die Verwertung von PP in einer Müllverbrennungsanlage („Avoided Burden MVA“) sinkt der Material Footprint um 203 % (Substitution von Steinkohle) gegenüber Cut-Off, das Ergebnis fällt also negativ aus. Dies liegt an der sehr hohen Rohstoffintensität von Steinkohle, welche hier substituiert wird (Material-Faktor = 1.657,0 g/kWh gegenüber 211,9 g/kWh bei Erdgas). Das Szenario der Substitution von Erdgas hingegen zeigt nur einen Rückgang des Material Footprints von 25 %. Da sowohl Kohle und Erdgas als auch PP durch dieselbe grundlegende Reaktion, nämlich der Verbindung von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid, ihre Energie abgeben, können die Unterschiede des Carbon Footprints nicht so stark ausfallen wie beim Material Footprint. Der Carbon Footprint steigt sogar im Erdgas Szenario, was darauf schließt, dass eine effizientere Technik durch die thermische Verwertung von PP substituiert wurde.

Durch das stoffliche Recycling von PP gibt es nur geringe Gutschriften für den Material Footprint (Avoided Burden Recycling). Der Carbon Footprint ist hier dagegen 47 % geringer als nach Cut-Off. Im Mix-Szenario sinkt der MF um 64 % und der CF um 28 %.

Material Footprint und Carbon Footprint für 1 kg Glas

Abbildung 4: Material Footprint und Carbon Footprint für Glas nach Cut-Off und Avoided Burden

Abbildung 5: Material Footprint und Carbon Footprint für Polypropylen nach Cut-Off und Avoided Burden mit verschiedenen Verwertungsszenarien

4. Diskussion

Die Ergebnisse bestätigen, dass die Wahl der Allokationsmethode die Analyse entscheidend beeinflusst. Dabei muss die Eignung der Avoided Burden Methode unter Verwendung des Material Footprints, besonders bei thermischer Verwertung, angezweifelt werden. Ein negativer Material Footprint, wie bei PP mit Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage (Steinkohle Szenario), würde bedeuten, dass natürliche Rohstoffe nicht eingesetzt und verbraucht werden, sondern entstehen. Dieses Ergebnis zeigt deutlich, dass es sich bei Avoided Burden um ein abstrahiertes Modell handelt, welches kein Abbild der real anfallenden Umwelteinflüsse darstellt.

Ein weiterer Kritikpunkt an der Avoided Burden Methode ist der teilweise auftretende Widerspruch zur europäischen Abfallhierarchie. So legen die Material Footprints von PP eine thermische Verwertung statt eines stofflichen Recyclings nahe. Der Abfallhierarchie zufolge steht jedoch die Vermeidung an erster Stelle, gefolgt vom stofflichen Recycling. Deutlich wird dieser Widerspruch auch in der Herstellung und Nutzung von Produkten, welche jedoch nicht Gegenstand der Beispielrechnung waren: Durch das Belohnen der Recyclingfähigkeit eines Produkts sinkt die Motivation, Primärrohstoffe einzusparen und das Produkt lange zu nutzen. Bei der Cut-Off-Methode wird dagegen immer die größte Einsparung erreicht, wenn Recyclingmaterial eingesetzt wird oder noch besser – durch verbessertes Produktsystem die Materialmenge insgesamt reduziert wird.

Die Ergebnisse des Carbon Footprints scheinen auf den ersten Blick plausibler, als die des Material Footprints. Insgesamt sollte aber überprüft werden, inwiefern das Ziel von Avoided Burden, nämlich die Förderung von recyclingfähigen Produkten, sich in Ökobilanzen tatsächlich widerspiegelt. Wie im Fall unserer Analyse sind überwiegend allgemeine Abfallstatistiken die Grundlage der Berechnung, welche wiederum an geltende Abfallgesetze gekoppelt sind. Aspekte wie ein Produktdesign, das auf verklebte Bauteile verzichtet und eine schnelle Demontage ermöglicht konnte hier nicht abgebildet

werden. Somit geht der Aspekt des Produktdesigns gar nicht in die Verwertungsbetrachtung ein. Das Resultat sind durch Gutschriften verringerte Footprint-Werte unabhängig davon, ob beim Designprozess auf Recyclingfähigkeit geachtet wurde oder nicht. Der steigende Carbon Footprint im Erdgas Szenario würde sogar eine Deponierung bevorzugen, was wieder der Abfallhierarchie widerspricht.

Insgesamt muss bei den Szenarien der thermischen Verwertung auch ein methodischer Unterschied der Umweltindikatoren berücksichtigt werden. Der Material Footprint ist Input-orientiert, wodurch das Produkt selbst (1 kg PP) keine Lastschrift in der Verwertung hat. Die Gutschriften fallen somit relativ groß aus. Beim Carbon Footprint jedoch wird das PP insofern stark berücksichtigt, dass jeglicher Kohlenstoff im Material outputseitig als CO₂ austritt. Entsprechend geringer fällt der Unterschied zur substituierten Technik aus.

Erschwerend kommt bei der Avoided Burden Methode hinzu, dass die Berechnung der Verwertung für spezifische Produkte auf sehr vielen Annahmen und Ungenauigkeiten basieren. Denn Rückschlüsse der Abfallstatistik auf einzelne Produkte sind nicht unbedingt möglich. Die Entsorgung ist sehr dezentral und stark ortsabhängig. Schon innerhalb Deutschlands gehen Kommunen unterschiedlich mit Abfall um, aber sobald ein Produkt international, vielleicht sogar global, im Angebot steht, wird eine angemessene Gutschriften- und Lastschriftenvergabe sehr ungenau. Dies wird problematischer je länger das erwartete Produktleben ist, da die Verwertung abhängig vom technologischen Stand, sowie dem Bedarf an Energie bzw. Sekundärrohstoffen ist. Beim Beispiel von Behälterglas und PP ist dies zwar gut abschätzbar, bei längerlebigen Produkten, etwa beim Bau von Infrastruktur mit Lebenszeiten von bis zu 100 Jahren, jedoch weniger. Außerdem rückt der Fokus der Analyse vom eigentlichen Produkt auf nachstehende Produktsysteme. Dies gilt umso mehr je komplexer die Verwertungswege sind, Kunststoff ist also mehr davon betroffen als Glas oder Stahl.

Ein weiterer Aspekt ist die kaskadische Nutzung von Rohstoffen. So könnte der thermischen Verwertung eine bestimmte Anzahl von Recyclingvorgängen vorausstehen. Dies wäre im Sinne der europäischen Abfallhierarchie und würde die Umweltbelastungen senken. Die Zahlen von Avoided Burden selbst legen aber nahe den Kunststoff gleich zu verbrennen (bezogen auf Material Footprint). Durch die Betrachtung mehrerer Lebenszyklen würde sich das Ergebnis des 1. Produktsystems nicht ändern, da Gutschriften immer nur auf das vorangegangene System schreiben. Außerdem würde sich im Vergleich zu geschlossenen Stoffkreisläufen wie in (Neugebauer und Finkbeiner 2012) der Aufwand und die Ungenauigkeiten viel weiter erhöhen.

5. Fazit

Die Systemraumerweiterung mit Hilfe der Avoided Burden Methode weist einige Nachteile gegenüber der Cut-Off Methode auf. So lassen sich negative Ergebnisse beim Material Footprint durch eine thermische Verwertung von PP nicht sinnvoll deuten. Zudem lässt sich die Idee der Unterstützung eines recyclinggerechten Produktdesigns bei der Bewertung kaum abbilden, wenn die Systemraumerweiterung und die Gutschriften auf der Verwertbarkeit von Materialien der Abfallstatistiken beruhen.

Ein entscheidender Kritikpunkt ist auch, dass sich eine Bewertungsmethode für die Circular Economy nach der europäischen Abfallhierarchie richten sollte. Genau dies ist aber mit dem Avoided Burden-Ansatz teilweise nicht gegeben: Die niedrigen Footprint-Ergebnisse für die thermische Verwertung des Steinkohle Szenarios verglichen mit stofflichem Recycling stehen im Widerspruch zur Abfallhierarchie. Ebenso nicht mit der Abfallhierarchie vereinbar ist der gegenüber Cut-Off verringerte Anreiz zur Werkstoffeinsparung in der Herstellung. Insgesamt zeigt sich, dass die Ergebnisse von Avoided Burden je nach Annahmen, Szenariobildung und Umweltindikator unterschiedlichste Verwertungen (oder Deponierung) befürworten würden und darauf keine

konsistente Abfallpolitik gebaut werden kann. Es ist auch anzunehmen, dass es innerhalb der Kunststoffe zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen würde, durch variierende Energiedichten.

Die Cut-Off Methode mit der stärksten Berücksichtigung für Materialeinsparungen und starker Berücksichtigung von Recycling befindet sich hingegen im Einklang mit der EU Abfallhierarchie. Cut-Off profitiert dazu von geringeren Unsicherheiten und Annahmen. Insgesamt empfehlen die Autoren der Studie beim Vergleich der ökologischen Nachhaltigkeit unterschiedlicher Produkt-Systeme einheitlich den Cut-Off-Ansatz zu wählen, vor allem bei Produkten die thermisch verwertet werden. Für spezifische Fragestellungen, die sich mit der Optimierung des Produktdesigns beschäftigten, erscheint dagegen die Avoided Burden Methode sinnvoll. Dann sollte jedoch auch eine umfangreiche Analyse der Recyclingfähigkeit des Produkts durchgeführt werden, die nicht nur auf die Verwertungsmöglichkeiten einzelner Materialien basierend auf Abfallstatistiken abzielt, sondern auch die Zerlegbarkeit der Komponenten in den Fokus stellt.

Als nächster Schritt empfiehlt sich die Analyse von weiteren Umweltindikatoren bei thermischer Verwertung, besonders um weiter den Unterschied zu input- und outputseitigen Indikatoren zu untersuchen. Der KEA wäre hier für Kunststoffe, aufgrund der doppelten Nutzung als Werkstoff und als Brennstoff besonders interessant.

Danksagung:

Die Autoren möchten dem Bundesverband Glasindustrie e.V. für die Bereitstellung der Daten zur Glasherstellung danken, welche im Rahmen einer Umweltbewertung von Kosmetik-Tiegeln erfolgte. Ein weiterer Dank richtet sich an unsere Kollegin Katrin Bienge für die vielen wertvollen Kommentare und Hinweise.

Literaturverzeichnis

- AGEB (2015) Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990–2014 Stand August 2015.
- Allacker K, Mathieux F, Manfredi S, Pelletier N, De Camillis C, Ardente F, Pant R (2014) Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: Proposals for product policy initiatives. *Resour. Conserv. Recycl.* 88, 1–12. doi:10.1016/j.resconrec.2014.03.016
- Bergsma G, Sevenster M (2013) End-of-life best approach for allocating recycling benefits in LCAs of metal packaging. http://www.cedelft.eu/?go=home.downloadPub&id=1371&file=CE_Delft_8231_End_of_life_Metal_Packaging_FINAL.pdf. Zugegriffen: 30. Nov. 2015
- BMWi, Arbeitsgemeinschaft Fernwärme, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2015) Aufkommen und Verwendung von Fernwärme; Deutschland. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/Energiedaten/energietraeger13-aufkommen-verwendung-fernwaerme.property=blob,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.xls> Zugegriffen: 14. März 2016
- Ekvall T, Weidema B P (2004) System Boundaries and Input Data in Consequential Life Cycle Inventory Analysis. *Int. J. Life Cycle Assess.* 9, 161–171.
- EPD (2015) Rubber and Plastics Products; Product Category Classification: UN CPC 36 (PCR Basic Module). <http://environdec.com/en/PCR/Detail/?Pcr=5892> Zugegriffen: 14. März 2016
- Europäische Kommission (2015) Circular Economy Strategy - Environment - European Commission http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm. Zugegriffen: 30. Nov. 2015.
- Europäische Union (2008) Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.

- Friskhnecht R, (2010) LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *Int. J. Life Cycle Assess.* 15, 666–671. doi:10.1007/s11367-010-0201-6
- IPCC (2007) Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri R K and Reisinger A (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- ISO (2006a) DIN EN ISO 14040:2006 Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and framework. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- ISO (2006b) DIN EN ISO 14044:2006 Environmental Management: Life Cycle Assessment: Requirements and guidelines. Beuth Verlag, Berlin.
- Klöpffer W (1997) In defense of the cumulative energy demand. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2, 61–61. doi:10.1007/BF02978754
- Liedtke C, Biege K, Wiesen K, Teubler J, Greiff K, Lettenmeier M, Rohn H (2014) Resource Use in the Production and Consumption System—The MIPS Approach. *Resources* 3, 544–574. doi:10.3390/resources3030544
- Neugebauer S, Finkbeiner M (2012) Ökobilanz nach ISO 14040/44 für das Multirecycling von Stahl. http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/120621_Finkbeiner_Multi-Recycling_von_Stahl.pdf Zugegriffen: 14. März 2016
- Nicholson A L, Olivetti E A, Gregory J R, Field F R, Kirchain R E (2009) End-of-life LCA allocation methods: Open loop recycling impacts on robustness of material selection decisions. *IEEE*, pp. 1–6. doi:10.1109/ISSST.2009.5156769
- Pelletier N, Allacker K, Pant R, Manfredi S (2014) The European Commission Organisation Environmental Footprint method: comparison with other methods, and rationales for key requirements. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 387–404. doi:10.1007/s11367-013-0609-x
- Scalet B M, Sissa A Q, Garcia Muñoz M, Roudier S, Delgado Sancho L (2013) Best available techniques (BAT) reference document for the manufacture of glass; industrial emissions Directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control. Publications Office of the European Union, Luxembourg. DOI:10.2791/69502
- Schmidt-Bleek F, Klütting R, Weizsäcker E U von (1995) Wieviel Umwelt braucht der Mensch?: MIPS Das Maß für ökologisches Wirtschaften, 1994th ed. Birkhäuser.
- Schüler K (2015) Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2012. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_50_2015_verpackungsabfaelle_2012.pdf. Zugegriffen: 30. Nov. 2015
- Wötzel K (2007) Ökobilanzierung der Altfahrzeugverwertung am Fallbeispiel eines Mittelklassefahrzeuges und Entwicklung einer Allokationsmethodik. TU Braunschweig. http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00004466/ediss.pdf?hosts=local Zugegriffen: 14. März 2016