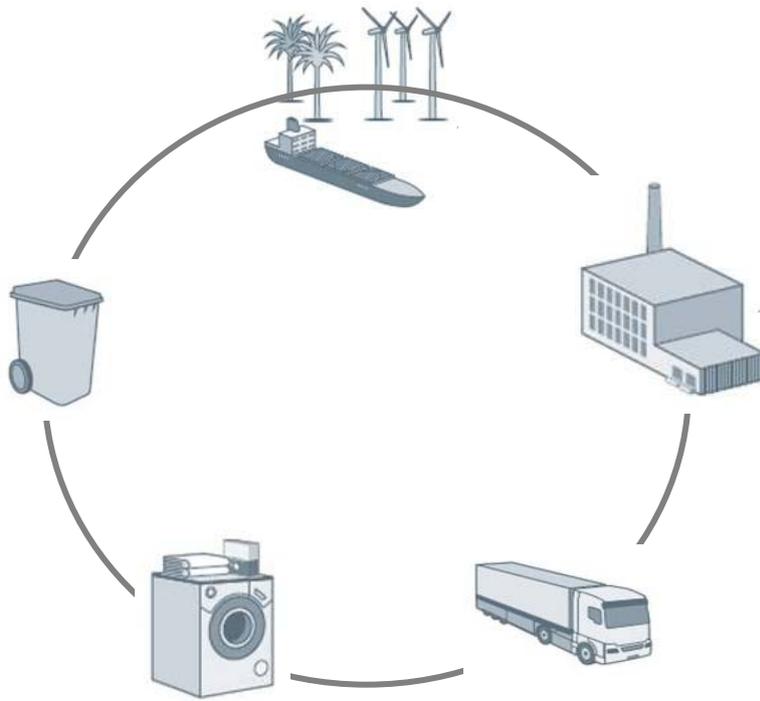


Einführung in die Lebenszyklusanalyse



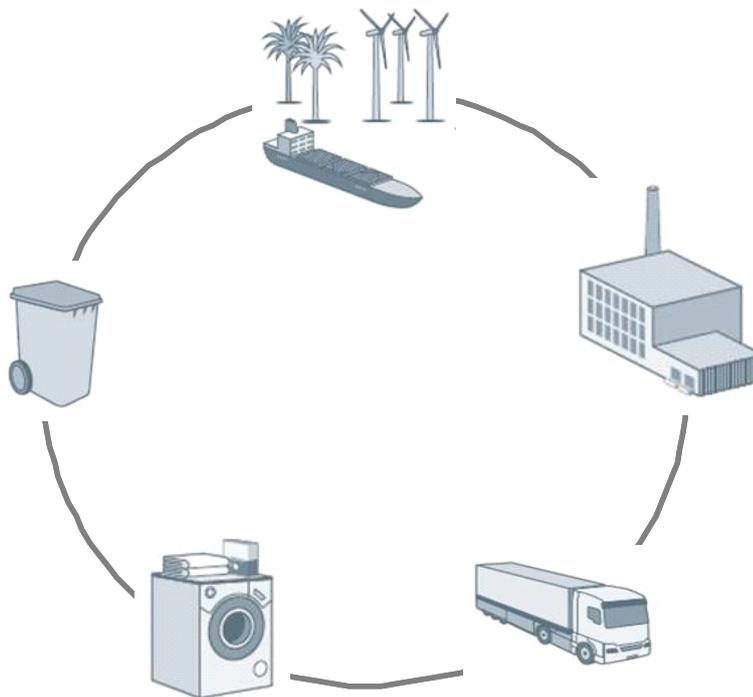
Inhaltsverzeichnis

1. Der Lebenszyklusgedanke	3
1.1. Grundgedanke	3
1.2. Beispiele für Methoden und Leifäden	3
2. Vorbereitung der Analyse	5
2.1. Festlegung der Systemgrenzen	5
2.2. Bezugsgröße „Funktionelle Einheit“	5
3. Problem: Datenbeschaffung	6
4. Bilanzierung.....	6
4.1. Grundlage: Stoffstromanalyse	6
4.2. Die Sachbilanz	7
5. Umweltauswirkungen	8
5.1. Welche Umweltauswirkungen (Impact Kategorien) gibt es.....	8
5.2. Wie werden die Umweltauswirkungen erfasst	9
6. Was fängt man mit den Ergebnissen an.....	10
6.1. Praxisbeispiel: Erhöhung des Rezyklatanteils in PET Flaschen	10
7. Umwelt.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.1. Lebensweg PET.....	12
8. Referenzen / Links.....	22
8.1. Publikationen	22
8.2. Internet.....	22

1. Der Lebenszyklusgedanke

1.1. Grundgedanke

Mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse lässt sich eine Vielzahl von Umweltauswirkungen erfassen, die direkt oder indirekt mit einem Produkt oder einer Dienstleistung verbunden sind. Dabei sind zunächst alle Lebensphasen des zu untersuchenden Produkts relevant. Neben der Herstellung des Produkts selbst sind beispielsweise auch die Produktion und Anlieferung der benötigten Rohstoffe („Upstream Prozesse“) sowie seine Distribution, Nutzung und Entsorgung („Downstream Prozesse“) zu berücksichtigen.



1.2. Beispiele für Methoden und Leitfäden

Es gibt eine Vielzahl von Leitfäden und Standards, in denen erklärt wird, wie Lebenszyklusanalysen durchgeführt werden sollen. Das grundsätzliche Prinzip ist dabei immer gleich. Es gibt jedoch noch keine international harmonisierte Methode, die eine verlässliche Basis für den Vergleich von Produkten unterschiedlicher Hersteller sein könnte.

Nachfolgend einige Beispiele



PAS 2050:2008

Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services

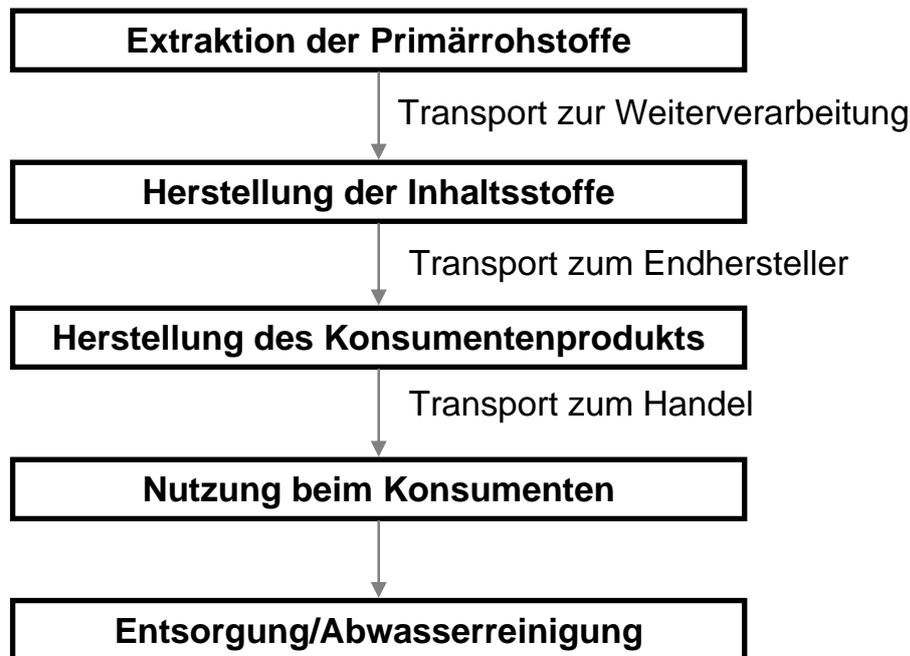


2. Vorbereitung einer Analyse

2.1. Festlegung der Systemgrenzen

Mit den Systemgrenzen wird vor Beginn der Analyse festgelegt, welche Lebensphasen berücksichtigt werden. Für Endkonsumentenprodukte werden typischerweise alle Lebensphasen erfasst, einschließlich der Distribution, Nutzung und Entsorgung der betreffenden Produkte. Dieser Ansatz wird auch „Cradle-to-Grave“ genannt. Die Hersteller von Industrieprodukten wissen oft nicht im Detail, welche weiteren Prozesse und Verarbeitungsschritte ihr Produkt bei ihren Kunden durchläuft. Deshalb werden für Industrieprodukte häufig nur die Lebensphasen bis zum Werkstor in die Analyse eingebunden. Diesen Ansatz nennt man „Cradle-to-Gate“. Die Ergebnisse einer solchen Analyse können beispielsweise vom industriellen Kunden benutzt werden, um eine vollständige Lebenszyklusanalyse für sein Produkt durchzuführen.

Beispiel für Festlegung von Systemgrenzen für ein Konsumentenprodukt



2.2. Bezugsgröße „Funktionelle Einheit“

Die Funktionelle Einheit ist die wichtigste Bezugsgröße in einer Lebenszyklusanalyse. Alle späteren Quantifizierungen beziehen sich auf die zu Beginn festgelegte Funktionelle Einheit. Beispiele für Funktionelle Einheiten sind etwa „Reinigung von fünf Kilogramm Wäsche“ oder „Transport von zwei Personen über fünf Kilometer“. Wenn man die Umweltauswirkungen von zwei Produkten vergleichen will, müssen beide die gleiche Funktionelle Einheit haben. Die „Herstellung von 1 L Orangensaft“ ist als Funktionelle Einheit beispielsweise zu ungenau, da der Orangensaft frisch gepresst

oder aus Konzentrat hergestellt sein kann. Diese beiden Varianten lassen sich daher nicht miteinander vergleichen.

3. Problem: Datenbeschaffung

Zur Durchführung einer Lebenszyklusanalyse werden sehr viele Daten und Informationen aus allen Lebensphasen benötigt. Diese Daten sollen möglichst exakt alle involvierten Prozesse widerspiegeln. Die beste Datenqualität erreicht man durch direkte Messungen zum Beispiel an den jeweils betrachteten Anlagen. Diese Art von Daten nennt man Primärdaten.

Für Prozesse, die nicht unter der eigenen Kontrolle sind sondern beispielsweise bei einem Zulieferer erfolgen, sind in der Regel keine Primärdaten bekannt. Derzeit ist die Kommunikation innerhalb der Lieferketten noch nicht zufrieden stellend. Oft steht der vertrauliche Umgang mit Betriebsgeheimnissen einer Weitergabe von Daten für Lebenszyklusanalysen entgegen. In diesen Fällen arbeitet man mit Literaturinformationen oder Durchschnittswerten aus Datenbanken. Solche Daten werden Sekundärdaten genannt. Eine der am weitesten verbreiteten Datenbanken ist „Ecoinvent“. Innerhalb der EU wurde eine eigene Datenbank mit einem eigenen Datenformat entwickelt (International Reference Life Cycle Data System - ILCD), die bisher allerdings nur sehr wenig Daten enthält.

Stehen weder Primär- noch Sekundärdaten zur Verfügung, kann man eigene Abschätzungen durchführen. Obwohl sich daraus in der Regel die größten Fehlerquellen ergeben, lassen sich viele Analysen nicht ohne derartige Schätzungen durchführen.

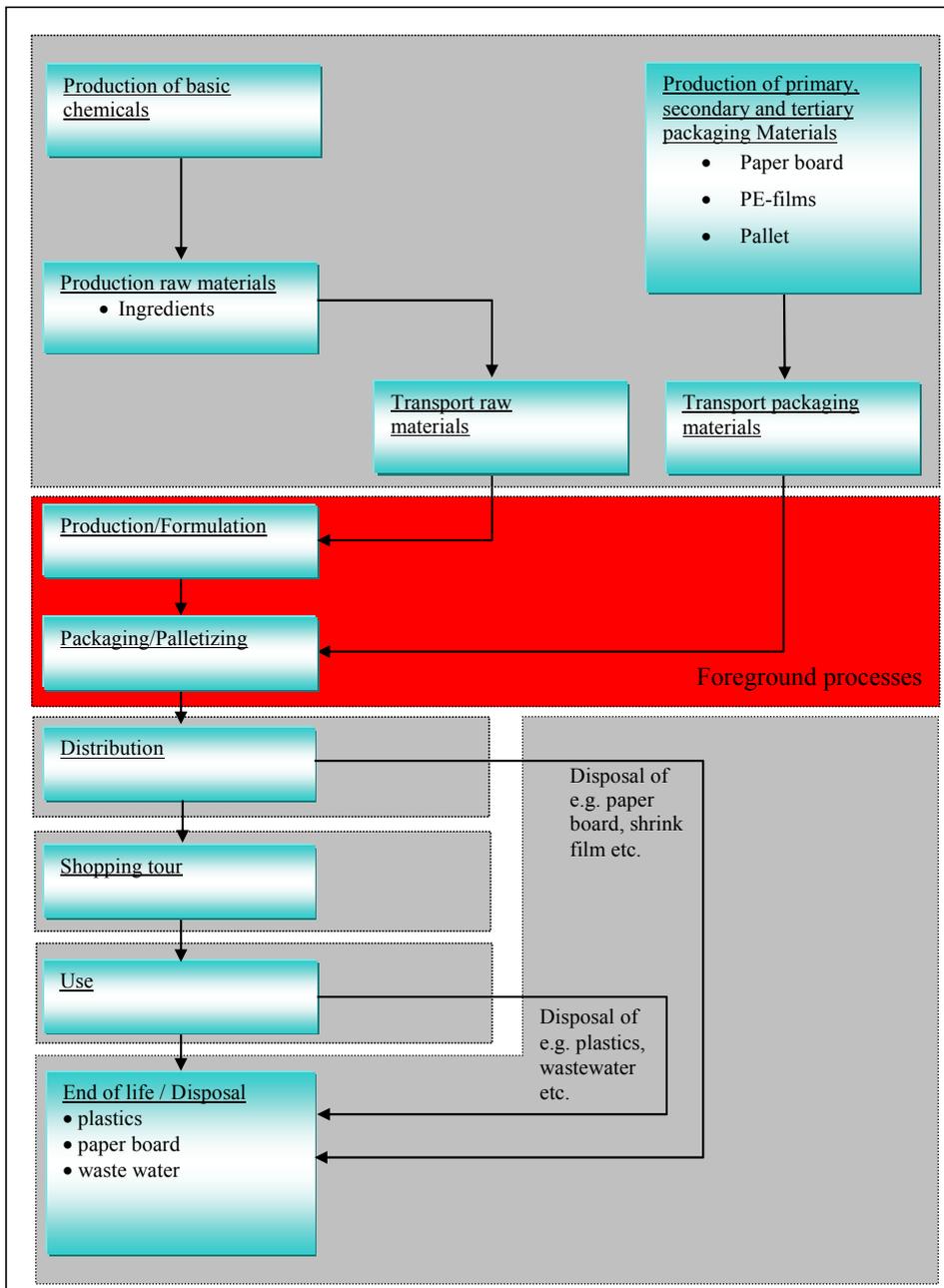
Die Beschaffung aller notwendigen Daten ist oft der aufwendigste Schritt einer Lebenszyklusanalyse. Gleichzeitig wird dabei die Qualität des Gesamtergebnisses oder die darin enthaltene Unsicherheit bestimmt.

4. Bilanzierung

4.1. Grundlage: Stoffstromanalyse

Grundlage jeder Lebenszyklusanalyse ist die Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen innerhalb der festgelegten Systemgrenzen. Dazu werden Eingangs- und Ausgangsparameter für jeden Prozess innerhalb dieser Grenzen ermittelt und erfasst. Weiterhin wird berücksichtigt, welche Ströme zwischen den einzelnen Prozessen stattfinden. Für die Lebenszyklusanalyse eines Waschmittels beginnt man beispielsweise damit, die Menge an Energie und Grundchemikalien zu erfassen, die zur Herstellung einer bestimmten Menge jedes einzelnen Inhaltsstoffs notwendig sind sowie die mit dieser Herstellung verbundenen Emissionen und Abfälle.

Die Zahl der für jeden Prozess zu berücksichtigenden Eingangs- und Ausgangsstoffe kann im Detail sehr groß werden. Um das gesamte Netzwerk von Prozessen auswerten zu können, benötigt man daher eine spezialisierte Software. Diese Software ermittelt die Stoffströme bezogen auf einen Referenzfluss, der die zuvor festgelegte funktionelle Einheit abbildet.



Vereinfachtes Beispiel für Stoffströme innerhalb von festgelegten Systemgrenzen für ein Konsumentenprodukt.

4.2. Die Sachbilanz

Das primäre Ergebnis der Stoffstromanalyse ist die Sachbilanz, auch „Lebenszyklusinventar“ genannt, bezogen auf die Funktionelle Einheit. Darin werden

alle Materialien erfasst, die in das festgelegte System eingehen, zum Beispiel Rohstoffe, Energieträger, Elektrizität. Auf der anderen Seite sind alle Stoffe aufgeführt, die das System verlassen, beispielsweise Emissionen in die Luft oder in den Boden sowie in Abwasserströme oder Materialien, die später in Recyclingprozesse einmünden.

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
EcoSpold Materials			EcoSpold Materials		
Elementary			Elementary		
Ressource			Boden		
biogen			allgemein		
Energie, Brennwert, in Biomasse [Ressource:biogen]	167,344075700	MJ	Abwärme [Boden/allgemein]	219,805659254	MJ
Holz, allgemein [Ressource:biogen]	0,000000500	m3	Blei [Boden/allgemein]	0,00000257	kg
Holz, Hart- [Ressource:biogen]	0,004609610	m3	Bor [Boden/allgemein]	0,000286179	kg
Holz, Weich- [Ressource:biogen]	0,009550253	m3	Cadmium [Boden/allgemein]	0,000000051	kg
Torf, in Boden [Ressource:biogen]	0,001831647	kg	Chloride [Boden/allgemein]	0,007406947	kg
Fläche			Chrom [Boden/allgemein]	0,000000462	kg
Nutzung, Ackerbau, unbewässert [Ressource:Fläche]	1,473474686	m2a	Chrom-VI [Boden/allgemein]	0,001505542	kg
Nutzung, Baustelle [Ressource:Fläche]	5,402384262	m2a	Eisen [Boden/allgemein]	0,007057356	kg
Nutzung, Dauerkultur, Obst, intensiv [Ressource:Fläche]	0,106349652	m2a	Fluoride [Boden/allgemein]	0,001017684	kg
Nutzung, Deponie [Ressource:Fläche]	1,465673816	m2a	Kupfer [Boden/allgemein]	0,000940056	kg
Nutzung, Deponie, Benthos [Ressource:Fläche]	0,017682414	m2a	Natrium [Boden/allgemein]	0,000010930	kg
Nutzung, Gewässerläufe, künstlich [Ressource:Fläche]	0,373003900	m2a	Nickel [Boden/allgemein]	0,000000410	kg
Nutzung, Industrieareal [Ressource:Fläche]	0,594179716	m2a	Öle, allgemein [Boden/allgemein]	0,000324276	kg
Nutzung, Industrieareal, bebaut [Ressource:Fläche]	0,354044164	m2a	Öle, biogen [Boden/allgemein]	0,000039774	kg
Nutzung, Industrieareal, Benthos [Ressource:Fläche]	0,000138584	m2a	Zink [Boden/allgemein]	0,000041359	kg
Nutzung, Industrieareal, bepflanzl [Ressource:Fläche]	0,065105844	m2a	Forstwirtschaft		
Nutzung, Krautvegetation, Hartlaubbewuchs [Ressource:Fläche]	0,008289406	m2a	Öle, allgemein [Boden/Forstwirtschaft]	0,069917562	kg
Nutzung, Ressourcenabbau [Ressource:Fläche]	1,382149638	m2a	Öle, biogen [Boden/Forstwirtschaft]	0,000143459	kg
Nutzung, Siedlung, unterbrochen [Ressource:Fläche]	0,001987276	m2a	Industrie		
Nutzung, Verkehrsweg, Bahngelände [Ressource:Fläche]	0,054934614	m2a	Abwärme [Boden/Industrie]	0,147358984	MJ
Nutzung, Verkehrsweg, Schiene [Ressource:Fläche]	0,060746217	m2a	Aluminium [Boden/Industrie]	0,000681710	kg
Nutzung, Verkehrsweg, Strasse [Ressource:Fläche]	0,160665687	m2a	Arsen [Boden/Industrie]	0,000000273	kg
Nutzung, Verkehrsweg, Strassenbaute [Ressource:Fläche]	0,178896561	m2a	Barium [Boden/Industrie]	0,000340861	kg
Nutzung, Wald, intensiv [Ressource:Fläche]	0,232978638	m2a	Bor [Boden/Industrie]	0,000006817	kg
Nutzung, Wald, intensiv, normal forstlich bewirtschaftet [Ressource:Fläche]	17,061705023	m2a	Calcium [Boden/Industrie]	0,002272652	kg
Nutzung, Wasserfläche, künstlich [Ressource:Fläche]	0,846378036	m2a	Chloride [Boden/Industrie]	0,002388040	kg
Umwandlung, von Ackerbau [Ressource:Fläche]	0,000736810	m2	Chrom [Boden/Industrie]	0,000003409	kg
Umwandlung, von Ackerbau, unbewässert [Ressource:Fläche]	2,374193948	m2	Eisen [Boden/Industrie]	0,001363422	kg
Umwandlung, von Ackerbau, unbewässert, Brache [Ressource:Fläche]	0,000013442	m2	Fluoride [Boden/Industrie]	0,000034086	kg
Umwandlung, von Deponie, Inertstoffdeponie [Ressource:Fläche]	0,000611120	m2	Glyphosat [Boden/Industrie]	0,000003698	kg
Umwandlung, von Deponie, Reaktordeponie [Ressource:Fläche]	0,000045870	m2	Kalium [Boden/Industrie]	0,000238604	kg
Umwandlung, von Deponie, Reststoffdeponie [Ressource:Fläche]	0,000995868	m2	Kohlenstoff [Boden/Industrie]	0,002337885	kg
Umwandlung, von Deponie, Schlackekompartiment [Ressource:Fläche]	0,000005411	m2	Kupfer [Boden/Industrie]	0,000009178	kg
Umwandlung, von Industrieareal [Ressource:Fläche]	0,001127116	m2	Magnesium [Boden/Industrie]	0,000545375	kg
Umwandlung, von Industrieareal, bebaut [Ressource:Fläche]	0,001799822	m2	Mangan [Boden/Industrie]	0,000027268	kg
Umwandlung, von Industrieareal, Benthos [Ressource:Fläche]	0,000001537	m2	Natrium [Boden/Industrie]	0,001363422	kg

5. Umweltauswirkungen

Nach Erstellung der Sachbilanz, ist die Ermittlung der Umweltauswirkungen der nächste Schritt einer Lebenszyklusanalyse. Dies geschieht, indem man die in der Sachbilanz erfassten Stoffe mit bestimmten Auswirkungen in Verbindung bringt. Es gibt verschiedene Ansätze und zahlreiche wissenschaftliche Modelle zur Ermittlung von Umweltauswirkungen basierend auf Lebenszyklusanalysen. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden werden immer noch wissenschaftlich diskutiert.

5.1. Welche Umweltauswirkungen (Impact Kategorien) gibt es

Es existieren zahlreiche wissenschaftliche Modelle zur Beschreibung von verschiedenen Umweltauswirkungen. Die Auswahl der in einer Lebenszyklusanalyse anzuwendenden Modelle ist in der Regel abhängig vom Ziel der Studie. Nachfolgend sind beispielhaft einige Umweltauswirkungen aufgeführt, für die Berechnungsmodelle existieren:

- Klimawandel
- Ozonabbau
- Humantoxizität
- Feinstaub
- Ionisierende Strahlung
- Versauerung

- Eutrophierung
- Landnutzung
- Ressourcenverzehr

5.2. Wie werden die Umweltauswirkungen erfasst

Zunächst muss man die Menge einer bestimmten Substanz wissen, die zum Beispiel in die Luft emittiert wird. Diese Menge, bezogen auf die Funktionelle Einheit, ist in der Sachbilanz hinterlegt. Zusätzlich muss man noch wissen, welche Auswirkung die Substanz in der Umwelt hat. Beispielsweise weiß man, dass Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) zum Klimawandel beitragen – allerdings in unterschiedlichem Ausmaß. Das Klimawandelpotenzial von Methan (CH₄) ist ca. 24mal stärker ausgeprägt als das von Kohlendioxid. Diese Unterschiede werden in Form von Substanz-spezifischen Schadensfaktoren berücksichtigt. Nachfolgend ist das Prinzip an einem einfachen Beispiel gezeigt:

Lebenszyklusinventar

CO₂, fossil → 1,00 kg

CH₄, fossil → 1,00 kg

Schadensfaktoren in Bezug auf Klimawandel

CO₂, fossil → 1,0

CH₄, fossil → 24,0

Ermittlung des Klimawandelpotenzials bezogen auf CO₂

1,00 kg CO₂, fossil x Schadensfaktor 1,0 = 1,0 kg CO₂ Equivalente

1,00 kg CH₄, fossil x Schadensfaktor 24,0 = 24,0 kg CO₂ Equivalente

$$\Sigma = 25,00 \text{ kg CO}_2 \text{ Equivalente}$$

Umfangreichere Auswertungen werden üblicherweise mit entsprechender Software durchgeführt, in der beispielsweise die Schadenfaktoren für verschiedene Impact Kategorien hinterlegt sind.

6. Was fängt man mit den Ergebnissen an – Beispiel Polyethylenterephthalate (PET)

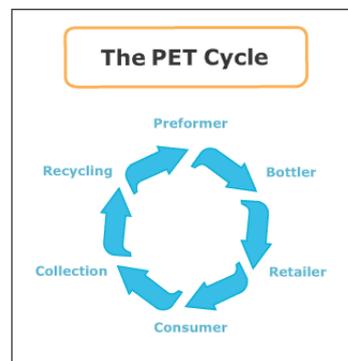
6.1. Hintergrundinformationen zu PET-Kunststoffverpackungen

PET-Flaschen schonen allein schon durch ihre Leichtigkeit die Umwelt. Auf dem Transportweg vom Abfüller zum Verbraucher kann gegenüber schwereren Verpackungen Benzin und damit auch CO₂ eingespart werden.

Außerdem lässt sich PET problemlos recyceln. Auch nach einem langen Produktleben ist das Material bis zu 100 Prozent recyclingfähig und gelangt als hochwertiger Wertstoff zurück in den Wirtschaftskreislauf. Gebrauchte PET-Flaschen sind ein gesuchter Rohstoff.

Das Ziel: Bottle-to-Bottle-Recycling

Bisher war es möglich, gebrauchte PET-Produkte einer stofflichen Wiederverwertung zuzuführen. Das PET-Recyclat wurde zur Herstellung von Textilfasern, Umreifungsbändern, Folien und Formteilen eingesetzt. Mit dem sogenannten URRC-Verfahren (s.u.) gelingt es inzwischen, aus gebrauchten PET-Getränkeflaschen in einem mehrstufigen Prozess ein lebensmitteltaugliches Recyclat zu gewinnen.



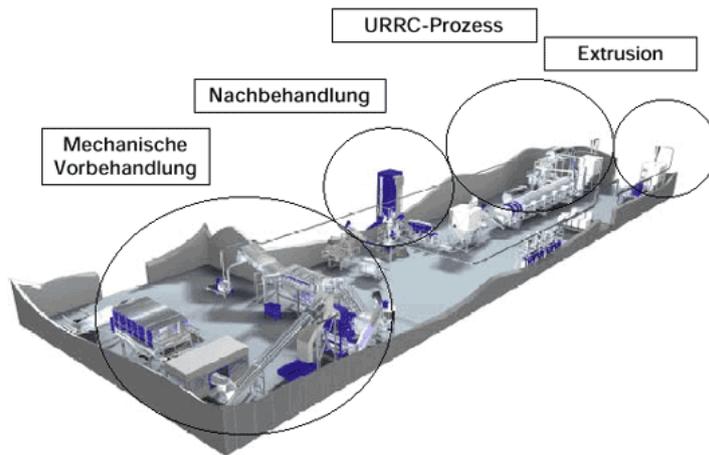
Der PET Kreislauf

Ein geschlossener PET-Kreislauf:

- erschließt mit dem Recyclat eine neue Rohstoffquelle
- schont unersetzliche Ressourcen wie Rohöl und Energie
- und verringert Transporte für die Getränkeflaschenverwertung und Neumaterialbeschaffung.
- Die eingesammelten PET-Getränkeflaschen werden nach Farben sortiert und dem Recycling zugeführt.
- Anschließend werden sie nach dem URRC-Verfahren aufbereitet.

Nach einer Qualitätskontrolle wird das aufbereitete Material an die sogenannten Preformer geliefert, die daraus neue Preforms herstellen. Die Preforms in der Größe von Reagenzgläsern haben bereits Gewinde und Hälse in der endgültigen Größe. Der Abfüller bringt die Preforms dann in die jeweilige Getränkeflaschenform - sie werden erwärmt und wie ein Ballon aufgeblasen. Nach der Prüfung auf Sauberkeit, Form und Dichtigkeit sind die PET-Getränkeflaschen dann bereit für ihren nächsten Einsatz und werden befüllt. Die Flasche kommt wieder in den Handel und wird konsumiert. Der Kreislauf ist geschlossen.

Darüber hinaus erfüllt das URRC-Recyclat folgende Ansprüche:



Das Verfahren auf einen Blick

Mechanische Vorbehandlung

Das Inputmaterial gelangt aus Sortieranlagen in Form von gepressten Ballen und Briketts in den Betrieb. Über ein Förderband werden die Ballen in eine Auflösetrommel transportiert, die zunächst Ballen und Briketts in die einzelnen Bestandteile zerlegt. Grobe Fremdbestandteile werden manuell entfernt. Eine Schneidmühle zerkleinert die Getränkeflaschen dann zu rieselfähigen Schnipseln (Flakes). Mit Klebstoff behaftete Etiketten lösen sich bei einer anschließenden Intensivwäsche vom Material. Im nachfolgenden Schwimm-Sink-Prozess erfolgt die Abtrennung der polyolefinen Verschlussdeckel. Danach werden mit Hilfe von Windsichtung die Etiketten aus Kunststoff aussortiert.

Video zum URRC-Verfahren

<http://www.pet.veolia-umweltservice.de/de/urrc/auf-einen-blick.php>

Hauptprozess (URRC)

Das Mahlgut wird dann in einem Mischreaktor mit Natronlauge benetzt. Im 26m langen Drehrohrofen mit einem Durchmesser von 3m führt anschließend eine Reaktion von Natronlauge und PET zur Ablösung der Oberflächenschicht der Flakes mitsamt letzten Verunreinigungen. Als Nebenprodukt entsteht bei dieser Reaktion ein Salz. Im hinteren Bereich des Drehrohrofens werden durch optimale Luft- und Temperaturführung auch die letzten in das PET diffundierten Fremdstoffe entfernt. Diese Behandlung gewährleistet die für die Lebensmitteltauglichkeit des Recyclats erforderliche Qualität.

Nachbehandlung

Die Salze werden in einer Nachbehandlung vom PET-Mahlgut entfernt. Nach einem Durchlauf im Mahlgutsortierer mit Farbzeilenkamera gelangt das Recyclat zur

Qualitätskontrolle und verlässt dann den Betrieb. Wichtig für die Verwendung in der Lebensmittelbranche ist unter anderem der niedrige Acetaldehyd-Gehalt und der gute Farbwert.



Recyceltes PET wird vor allem zur Herstellung von Kleidung und Textilien genutzt. Im Jahr 2006 wurden in Europa mehr als 50 Prozent des zurück gewonnenen Materials zu Polyester-Fasern verarbeitet.

Neben flauschigen Fleece-Pullovern entstehen daraus auch viele andere Produkte - wie beispielsweise Rucksäcke. Zur Herstellung eines speziellen Rucksackes werden etwa 22 PET-Flaschen verwendet. Diese werden zu Flakes zerkleinert und dann zu Fäden verarbeitet, die die Grundlage des neuen Stoffes sind. Das Anwendungsspektrum ist groß. Das PET-Recyclat ist aber auch in vielen anderen Bereichen einsetzbar. Beispielsweise als Folie, als Verpackung für Reinigungsmittel oder Kosmetika. Darüber hinaus wird recyceltes PET auch zur Herstellung neuer Lebensmittel-Verpackungen und Getränkeflaschen im sogenannten bottle-to-bottle-Verfahren eingesetzt. So werden mittlerweile fast 20 % des recycelten PET zur Herstellung von Flaschen verwendet.

Seit Einführung des Pfandpfandes im Jahr 2003 werden in Deutschland Einwegflaschen für Getränke sortenrein beim Handel gesammelt.

Sowohl Pfandsysteme als auch Rücknahmesysteme wie zum Beispiel das Duale System (Der Grüne Punkt) oder andere wie Landbell oder Interseroh sorgen dafür, dass PET-Flaschen recycelt werden. Mehrwegflaschen und Kreislaufflaschen des PETCYCLE-systems werden sortenrein zurückgenommen und einer Wiederverwertung zugeführt – zur Schonung der Ressourcen.

Lebensweg PET

In vielen Ländern wird PET über verschiedene Systeme gesammelt und der Verwertung zugeführt. Neben den europäischen Ländern, die gebrauchte Verpackungen über die Sammelsysteme des grünen Punktes zurücknehmen, haben sich in Italien, Großbritannien, Frankreich und der Schweiz Rücknahmesysteme über spezielle PET-Sammelcontainer etabliert. Pfandsysteme gibt es unter anderem in den skandinavischen Ländern. Ob über Pfandsysteme oder andere Erfassungssysteme, sortenreines PET wird europaweit als Kreislaufwerkstoff geschätzt.

Material

PET gehört zur Gruppe der Polyesterwerkstoffe. Das Grundmaterial wurde bereits 1941 in den USA entwickelt und wird seitdem als hochwertige Kunstfaser – beispielsweise unter dem Markennamen "Trevira" - in der Textilindustrie verwendet.

Das heutige PET ist ein veredelter Polyester mit nochmals verbesserten Materialeigenschaften. Als äußerst belastbarer Kunststoff eignet sich PET für Verpackungen, Behälter, Folien, Fasern und vieles mehr. Die Automobilindustrie nutzt hochfeste Polyesterfasern zur Herstellung von Airbags.

PET ist ein Makromolekül, das aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff besteht. Der Aufbau der Molekülketten kann gezielt beeinflusst werden und bestimmt so die Eigenschaften der späteren Produkte. Als thermoplastischer Kunststoff ist PET unter Hitze formbar und kann in nahezu jede beliebige Form gebracht werden.

Die Ausgangsprodukte von PET - Ethylenglykol und Terephthalat-Verbindungen - werden aus Erdöl oder Erdgas gewonnen. Zur Herstellung von PET werden diese Stoffe zu langen Kettenmolekülen verbunden. Dabei werden die Ausgangsmoleküle, die ausschließlich aus Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff bestehen, durch so genannte Esterbindungen aneinandergelagert. Daher stammt auch der Name: "Poly" (viele) und "ester" (für die Art der Bindung). Am Ende der Polykondensation erhält man eine zähflüssige Schmelze, die in dünne Stangen gepresst (extrudiert), abgekühlt und zu Granulat geschnitten wird.

Bei der Herstellung von PET wird in der Regel Antimontrioxid als Katalysator eingesetzt. Hierbei können geringste Mengen im Material verbleiben. Ohne Katalysator würde die Synthese von PET langsam und unvollständig ablaufen. Ein Gesundheitsrisiko besteht nicht.

Bei der Herstellung von PET für Verpackungen, wird das Granulat einem zusätzlichen Veredelungsschritt unterzogen, um die Festigkeitseigenschaften gezielt zu verbessern. Dazu wird das feste Granulat kristallisiert und in der so genannten Feststoffkondensation erhitzt. Hierbei wird die Länge der Molekülketten durch weitere Esterbindungen nochmals vergrößert. Abschließend erhält man ein farbloses PET-Granulat, das in der Industrie als fertiges Vorprodukt direkt weiterverarbeitet werden kann.

Als thermoplastischer Kunststoff ist PET bei Temperaturen von 250°C wie Wachs formbar. Die Molekülketten werden dann so beweglich, dass der Kunststoff schmilzt und in nahezu jede beliebige Form gebracht werden kann. Beim Erkalten frieren die Molekülketten wieder ein und der Kunststoff erstarrt in der gewünschten Form.

Dieses Verfahren wird beispielsweise auch bei der Herstellung von PET-Flaschen angewandt. In einem ersten Schritt werden "Vorformlinge" so genannte Preforms hergestellt. Als Vorläufer der PET-Flaschen verfügen diese Vorformlinge bereits über fertige Schraubgewinde. Damit man "richtige" Flaschen erhält, werden sie bei 100° Celsius nochmals erweicht, mit Druckluft gestreckt und zu einer Flasche geblasen (Streckblasprozess). Ähnlich einfach sind auch die Herstellungsprozesse anderer PET-Produkte. Um beispielsweise Folien oder Bänder zu erhalten, wird die heiße Schmelze durch Schlitzdüsen gepresst und anschließend mit Hilfe von Walzen in die endgültige Form gebracht.

All diese Vorgänge laufen in vollautomatischen Prozessen und mit größter Präzision ab. Zur Kontrolle passieren die fertigen PET-Erzeugnisse Inspektionsmaschinen, die sie auf

Form und Dichtigkeit prüfen. Zum Schluss der Produktion erhalten die Flaschen eine maschinenlesbare Codierung, die beispielsweise über den Hersteller und das Produktionsdatum informiert.

PET und PET-Recycling

Der Kunststoff PET (Polyethylenterephthalat) ist ein Polyester.

Gewonnen wird PET, dessen Moleküle ausschließlich aus Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff bestehen, aus Erdöl oder Erdgas. Zur Herstellung eines Kilogramms PET benötigt man etwa 1,9 Kilogramm Erdöl und einen Energieeinsatz von 23 kWh.

Als thermoplastischer Kunststoff kann PET bei einer Temperatur von ca. 250°C geschmolzen und beliebig verformt werden. Beim Abkühlen erstarrt der Kunststoff in der gewünschten Form. Dieses Verfahren ist mehrfach wiederholbar und wird beispielsweise bei der Herstellung von PET-Getränkeflaschen genutzt. In einem ersten Schritt werden sogenannte "Preforms" hergestellt, die vom Aussehen her Reagenzgläsern gleichen, aber bereits ein Schraubgewinde für den Verschluss aufweisen.

Diese Preforms werden dann noch einmal erhitzt und auf die entsprechende Behältergröße aufgeblasen. So können enorme Transportkosten eingespart werden.

6.2. Praxisbeispiel: Erhöhung des Rezyklatanteils in PET Flaschen



Aufgrund geänderter Rahmenbedingungen und neuer Produktionsstandorte sowie neuer Recyclingeinsatzquoten (von 25% auf 100%) soll die Carbon Footprint Berechnung und Auswertung für drei Flaschenverpackungen aktualisiert werden.

Material Produktverpackung	Produkt	Größe
PET	Badreiniger	500 ml
PET	Glasreiniger	500 ml
PET	Handgeschirrspülmittel	700 ml

Produktverpackung	Bestandteile der Produktverpackung
TERRA BAD EGC 500 »PET« TERRA Bad-Reiniger	Trigger, Flasche, Label
TERRA GLAS EGC 500 »PET« TERRA Glasreiniger	Trigger, Flasche, Label
TERRA HDW 700 »PET« TERRA Spülmittel	Verschlusskappe, Flasche, Label
XTRA Total Circle 1890 »PP« Waschmittel France	Verschlusskappe, Flasche, Label
XTRA Total Eco 1980 »PET« Waschmittel France	Verschlusskappe, Flasche, Label



Gemäß des aktuellen Stands der wissenschaftlichen Diskussion ist der Carbon Footprint eines Produktes oder einer Dienstleistung das Treibhausgaspotenzial entlang des gesamten Lebensweges (»cradle-to-grave«). Dieses Treibhausgaspotential wird in Anlehnung an die Normenreihe DIN EN ISO 14040 ff sowie ISO 14064, 14065 bestimmt und erfasst die Emissionen an Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid, teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe, perfluorierte Kohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid, Stickoxide, Kohlenmonoxid und weitere flüchtige organische Verbindungen als CO₂-Äquivalente.

Derzeit existiert jedoch noch keine allgemein anerkannte Methode zur Bestimmung des Produkt Carbon Footprints und der Darstellung der Ergebnisse – weder international noch national. Zur Bestimmung des Carbon Footprints sind, analog der Ökobilanz, vier Phasen vorgesehen:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
2. Sachbilanz,
3. Wirkungsabschätzung und
4. Auswertung.

Wesentlicher Unterschied zu einer Ökobilanz ist dabei, dass beim Carbon Footprint während der Wirkungsabschätzung lediglich eine Wirkungskategorie, nämlich das Global Warming Potential (GWP), betrachtet und anschließend ausgewertet wird.

Zur Wirkungsabschätzung wird die CML-Methode herangezogen, die derzeit internationaler Standard ist. Sie ist auswirkungsorientiert, definiert zu berücksichtigende Wirkungskategorien und bestimmt für jede dieser Wirkungskategorien den Beitrag der entsprechenden Umwelteinwirkungen (z. B. Schadstoffemissionen). Die potenzielle Wirkung eines Kilogramms eines Treibhausgases im Vergleich zu einem Kilogramm Kohlendioxid wird für den Zeithorizont 100 Jahre bestimmt und in äquivalente Emissionsmengen CO₂e umgerechnet.

Der Untersuchungsraum bezieht sich dabei auf Produktverpackungen, die in Deutschland und Europa hergestellt und vertrieben werden. Die Systemgrenzen schließen entsprechend des Lebenswegmodells die Herstellung der Produktverpackung, Packhilfsmittel und Ladeeinheitensicherungsmittel, den Transport zum Ort der Befüllung der Produktverpackung, die Palettierung und Distribution der Packstücke sowie die Entsorgung der Produktverpackung, Packhilfsmittel und Ladeeinheitensicherungsmittel ein und bilden somit den gesamten Lebenszyklus der Produktverpackung ab.

Nicht berücksichtigt werden Lagerungs-, Förder- und Umschlagvorgänge, die Herstellung und die Entsorgung der Investitionsgüter entlang der Lebenswege (z. B. Energieverbräuche und Emissionen bei der Herstellung von Verpackungsmaschinen) sowie das Verhalten der Endverbraucher – auch während der Nutzungsphase – (z. B. Emissionen und Energieverbräuche aufgrund von Einkaufsfahrten).

Funktion, funktionelle Einheit und Referenzfluss

Die Funktion der betrachteten Verpackungen besteht darin, die Bereitstellung des Füllgutes für den Verbraucher unter Einbehaltung der notwendigen Hygiene und Unversehrtheit der Produkte sowie der üblichen verpackungstechnischen Funktionalitäten (z. B. Distributionsfähigkeit) zu gewährleisten.

Die funktionelle Einheit bezeichnet jeweils die Menge eines bereitgestellten Produktes beim Endverbraucher. Die funktionelle Einheit ist in diesem Fall der Maßstab für den Nutzen einer Verpackung, auf die alle Wechselwirkungen mit der Umwelt bezogen werden. Beim Erwerb von Reinigungs- und Pflegeprodukten ist in der Regel davon auszugehen, dass der Verbraucher jeweils eine bestimmte Füllgutmenge erwerben will. Unter dieser Voraussetzung wird als funktionelle Einheit die Verpackungsgröße festgelegt, die im Einzelhandel erhältlich ist.

Der Referenzfluss bezeichnet die Stoffmengen, die notwendig sind, die funktionelle Einheit zu realisieren. Für die Berechnung wird das Produkt in seine Werkstoffe zerlegt, wobei dann jeder Stoff des Endproduktes einen Referenzfluss bildet. In diesem Beispiel umfasst der Referenzfluss die Menge der erforderlichen Produktverpackung, Packhilfsmittel und Ladeeinheitensicherungsmittel (die Stretchfolie, das Dust Cover, die Zwischenlagen aus Karton sowie die Shipping Units aus Wellkarton).

Die Bereitstellung der Bestandteile der Produktverpackungen erfordert Packhilfsmittel und Ladeeinheitensicherungsmittel. Diese werden ebenfalls über die Herstellung des Materials und – sofern erforderlich – über einen Formgebungsprozess (z. B. PP-Band, Versandfaltschachtel) oder eine Bedruckung (z. B. Versandfaltschachtel) abgebildet. Die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Mehrwegsystemen (Palette, Holzplatte und Gitterbox) wird ausgeschlossen. Die Anlieferung der Packhilfsmittel und Ladeeinheitensicherungsmittel beim Lieferanten für die Bestandteile der Produktverpackungen sind nicht Gegenstand der Untersuchung. Ebenso werden sämtliche Lagerungs- und Umschlagvorgänge beim Lieferanten ausgeschlossen, da diese im Rahmen der Studie nicht erhoben werden konnten.

Die Bereitstellung der Bestandteile der Produktverpackungen erfolgt über die Prozesse Palettieren, Transport der Paletten und Depalettieren.

Herstellung und Anlieferung der Verpackung

Verschlusskappe (Inbound)

Die Verschlusskappe wiegt inkl. des Masterbatchanteils 5 g, besteht aus PP und wird in Italien hergestellt. Zur Herstellung der Verschlusskappen dient das Spritzgießen.

Die Verschlusskappen werden in Versandfaltschachteln auf einer Palette mittels PE-LLD-Folie zum Transport verpackt. Der Transport der Verschlusskappen erfolgt von Italien bis zum Abfüllort in Frankreich (781 km) mit einem Sattelzug >32 t.

Flasche (Inbound)

Die Flasche wiegt inkl. des Masterbatchanteils 35 g, besteht aus PET und hat ein Fassungsvermögen von 750 ml, wird aber nur mit rund 700 ml Spülmittel befüllt.

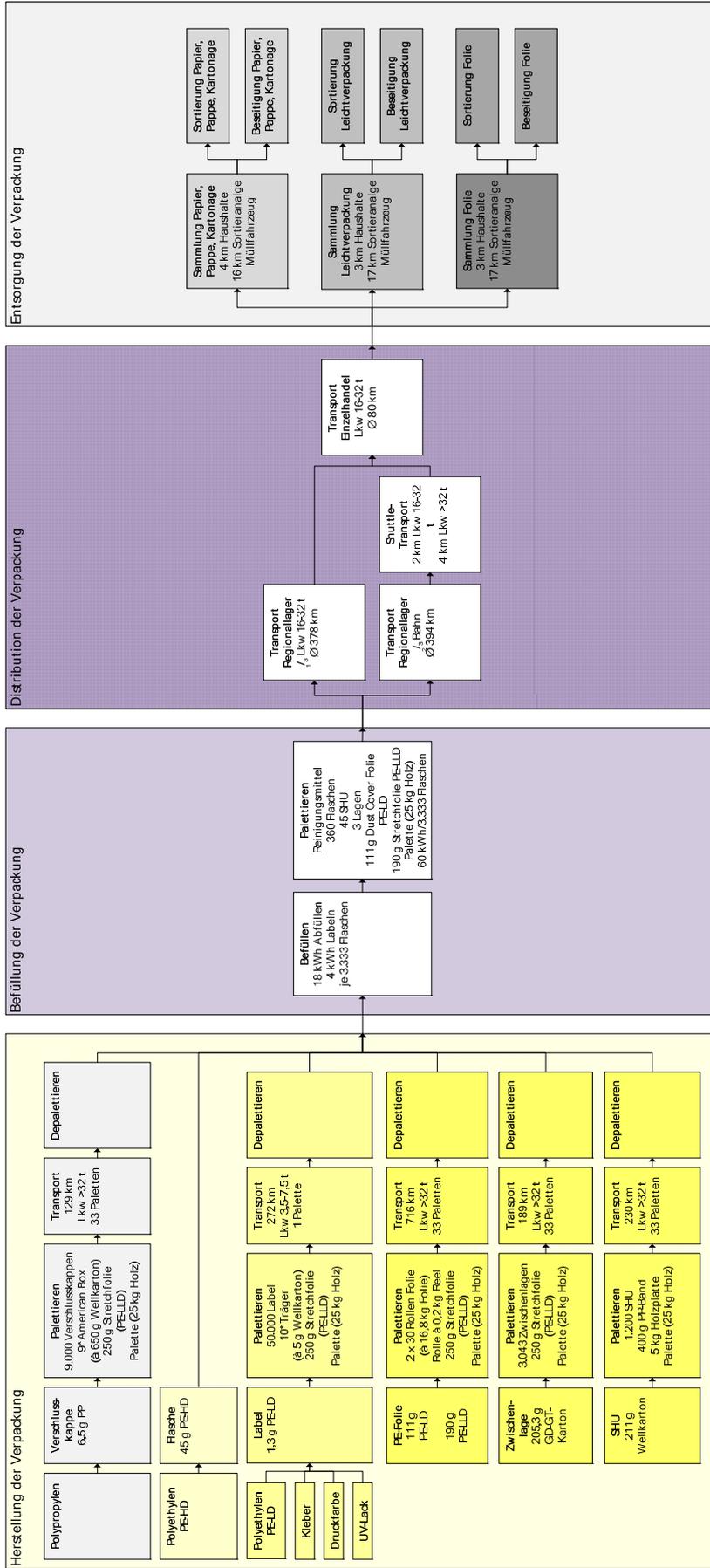
Die Preforms werden in Österreich hergestellt. Dabei werden verschiedene Preform-Typen unterschieden: ein Preform-Typ ohne und einer mit 25%, 50% und 100% Anteil recyceltem PET.

Für den Transport werden die Preforms in mit einem Inliner-Faltsack ausgekleideten Gitterboxen (Mehrwegsystem) verpackt. Der Transport der Preforms erfolgt über 1000 km von Österreich bis zum Abfüllort in Frankreich per Solo-Lkw >20 t. Die Herstellung der Flaschen aus den Preforms erfolgt am Abfüllort in Frankreich. Die für die Herstellung von 3.333 Flaschen notwendige elektrische Energie besteht aus einem Anteil für den Kompressor, einen für die Kühlung und die Blasanlage.

Label (Inbound)

Das zweiteilige Label für die Vorder- und die Rückseite der Flasche wiegt 1,3 g und besteht aus holzfreiem Papier. Die Label werden in Rollenform (Träger aus Wellkarton) auf einer Palette mittels PE-LLD-Folie zum Transport verpackt. Der Transport der Label erfolgt bis zum Abfüllort in Frankreich. Hierbei wird eine Palette pro Lkw transportiert.

Vorketten
z. B. Strom zur Konfektionierung, Diesel zur Verteilung per Lkw

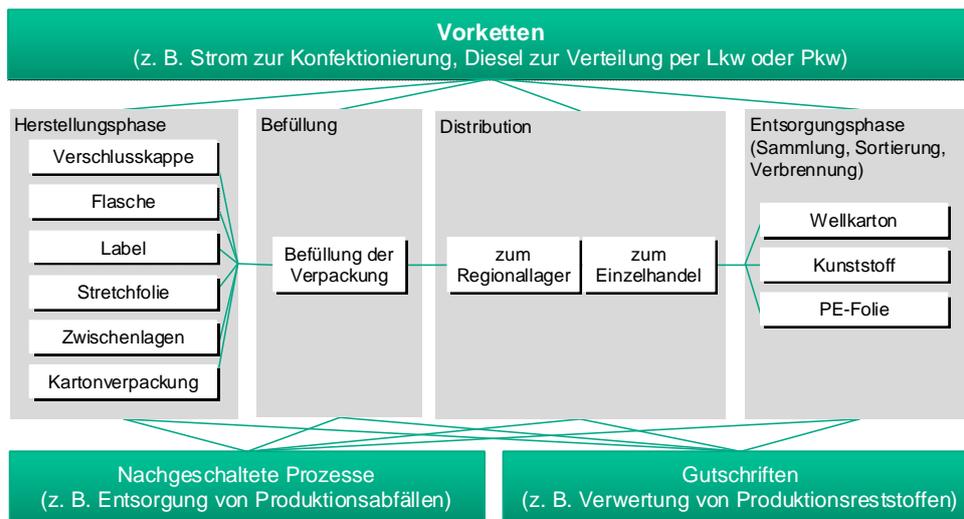


Nachgeschaltete Prozesse
z. B. Entsorgung von Produktionsabfällen

Gutschriften
z. B. Verwertung von Produktionsressourcen

Die Daten zu den Produktverpackungen, ihren Bestandteilen sowie den jeweiligen Inbound- und Distributionsstrukturen müssen bereitgestellt werden. Die Daten für die Distanzen im Straßenverkehr werden der Software Microsoft MapPoint®2010, die der Schiene dem Trassenpreissystem der DB Netz AG 2007 entnommen. Die informationstechnische Unterstützung bei der Bestimmung des Carbon Footprints erfolgt über die Software Umberto® und die Datenbank »ecoinvent v2.2«. Letztere beinhaltet eine Modulbibliothek, in der verschiedene Prozesse – von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung – hinterlegt sind.

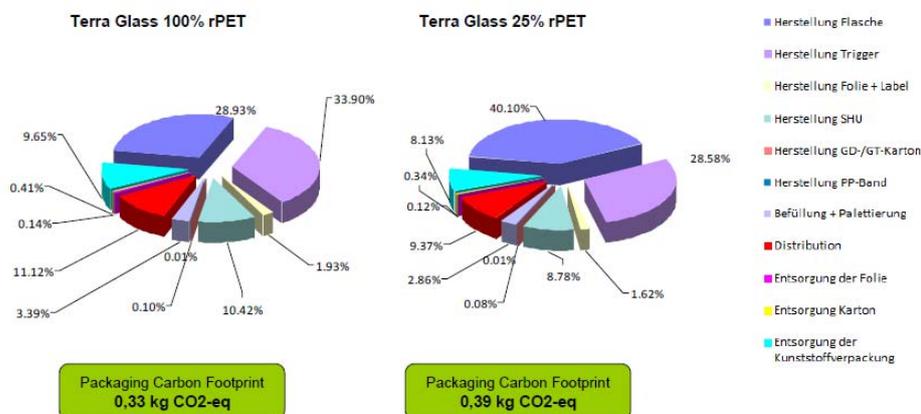
LCA Inventory



Ergebnisse

Nachfolgend ist die prozentuale Verteilung der drei Verpackungsformen mit jeweils 25%rPET (vorher) und 100%rPET (nachher) der unterschiedlichen Phasen dargestellt.

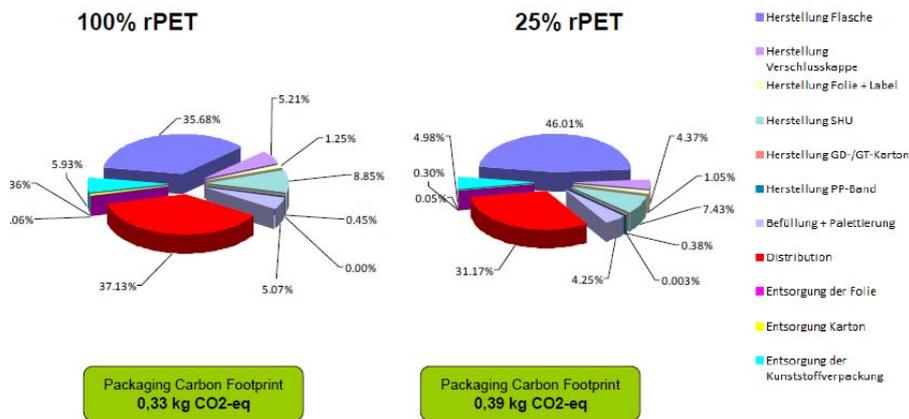
Beispiel Terra Bad- und Glasreiniger



Die Tortendiagramme zeigen, dass die Phase „Herstellung der Flasche“, die den Haupttreiber darstellt, prozentual abnimmt durch die Erhöhung des PET-

Rezyklatanteilas auf 100%. Damit nimmt der Carbon Footprint der Gesamtverpackung um 15% ab.

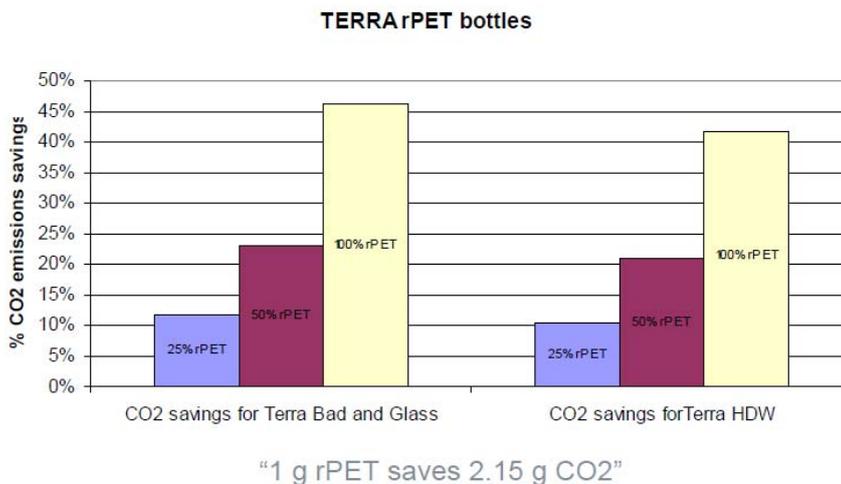
Beispiel Terra Handgeschirreiniger



Die Tortendiagramme zeigen, dass die Phase „Herstellung der Flasche“, die den Haupttreiber darstellt, prozentual abnimmt durch die Erhöhung des PET-Rezyklatanteilas auf 100%. Damit nimmt der Carbon Footprint der Gesamtverpackung um ca. 15% ab.

Betrachtet man hingegen nur das PET Material der Flaschen entspricht die Einsparung sogar >30% des Carbon Footprints.

1 g PET Rezyklat spart also im Austausch gegen 1 g PET 2,15 g Kohlendioxid.



Die CO₂e-treibenden Prozesse bei den betrachteten Verpackungen sind in der Regel

- die Herstellung der Flasche
- die Herstellung der Trigger und
- die Distribution

Produktverpackung	Produkt/Szenario	Treibende Prozesse
PET Flaschengewicht 34 g	Badreiniger	»Herstellung des Triggers«
		»Herstellung der PET-Flasche«
PET Flaschengewicht 34 g	Glasreiniger	»Herstellung des Triggers«
		»Herstellung der PET-Flasche«
PET Flaschengewicht 35 g	Handgeschirrspülmittel	»Herstellung der PET-Flasche«
		»Distribution«

Auffällig bei der Distribution des Handgeschirrspülmittels ist, dass über weite Strecken transportiert wird. Darüber hinaus könnte überlegt werden, ob die Carbon Footprint Analyse zukünftig unterstützend zur Standortauswahl genutzt werden kann, um CO₂e-Emissionen zu optimieren. Darüber hinaus fällt auf, dass alle Produktverpackungen aus einem Materialmix bestehen PET, PP (Polypropylen ist ein teilkristalliner Thermoplast und gehört zu der Gruppe der Polyolefine. Polypropylen wird durch Polymerisation des Monomers Propen mit Hilfe von Katalysatoren gewonnen), PE-HD (Polyethylen ist ein durch Polymerisation von Ethen [CH₂=CH₂] hergestellter thermoplastischer Kunststoff und gehört zur Gruppe der Polyolefine) sowie Papier (Label). Für ein optimales Recycling wäre es sinnvoll, die Materialvielfalt zu reduzieren. Auch vor dem Hintergrund des Recyclateinsatzes, könnte für die Herstellung der Gesamtverpackung insgesamt ein höherer Recyclatanteil verwendet werden, der sich wiederum positiv auf den Carbon Footprint auswirkt.

Die in dieser Studie ermittelten CO₂e-Werte sowie die abgeleiteten Erkenntnisse können in die zukünftige Verpackungsentwicklung einfließen.

7. Referenzen / Links

7.1. Publikationen

DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Beuth Verlag

DIN EN ISO 14044, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, Beuth Verlag

7.2. Internet

Hintergrundinformationen inklusive Fallstudien zum „Carbon Footprint“
www.pcf-projekt.de

Hintergrundinformationen und Methodik zum EU „Environmental Footprint of Products“
http://ec.europa.eu/environment/eussd/product_footprint.htm

Hintergrundinformationen und Methodik zum EU „Environmental Footprint of Organizations“
http://ec.europa.eu/environment/eussd/corporate_footprint.htm

Homepage der „Ecoinvent“ Datenbank
<http://www.ecoinvent.ch/>



**Forum PET in der IK - Industrievereinigung
Kunststoffverpackungen e.V.**
Kaiser-Friedrich-Promenade 43