

Lifecyclemanagement in ICT

Exemplary LCA study of an ICT Product

Seminararbeit von
HENNING KRÖGER

an der KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

eingereicht am : 30. September 2017
Studiengang : Wirtschaftsingenieur
Referent :
Betreuer : Andreas Fritsch

Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren
KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

ZUSAMMENFASSUNG

Inhalt dieser Arbeit ist ein beispielhafte Ökobilanz für Lötdraht gewonnen aus recycletem Altlot. Als Quelle dient ein deutscher Verein, der im Rahmen seines Transparenzstrategie eine Supply-Chain öffentlich zugänglich gemacht hat. Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst kurz auf die Thematik der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 eingegangen. Anschließend findet eine Betrachtung des verwendeten EDV-Tools openLCA statt in welcher anschließend, basierend auf der zugänglichen Supply-Chain, eine Modellierung des Produktionsprozess beschrieben wird. Die wird im Gate-to-Gate Prinzip durchgeführt und betrachtet nur die Produktion des Drahtes. Die Nutzung und Entsorgung bleiben somit unbetrachtet. Durch die verwendeten kostenfreien Datenbanken mussten viele Annahmen und Restriktionen getroffen werden, welche erheblichen Einfluß auf das Endergebnis haben. Dieses ergibt vordergründig eine Belastung der Umwelt durch die Energieproduktion sowie den Transport durch Lastwagen zum Produktionsstandort.

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 4.0 International zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	EINFÜHRUNG IN DIE ÖKOBILANZ	2
2.1	Anfänge der Ökobilanz	2
2.1.1	Definition	2
2.1.2	Phasen einer Ökobilanz	3
2.2	Untersuchungshilfe: openLCA	4
2.2.1	Existierende Datenbanken	4
2.2.2	openLCA - Einführung	5
2.2.3	Grundlagen zur Modellierung	6
3	ANNAHMEN UND MODELIERUNG	9
3.1	Annahmen zur Modellierung	9
3.1.1	Altlot Recycling	10
3.1.2	Sekundärgewinnung aus Krätze	11
3.1.3	Sekundärgewinnung aus Elektronikschrott	12
3.1.4	Kolophonium aus Brasilien	14
3.1.5	Lötdrahtherstellung	14
3.2	Modelbildung in openLCA	15
3.3	Ergebnisse	15
3.3.1	Global Warming Potential[GWP]	16
3.3.2	Acidification Potential[AP]	17
3.3.3	Ozone layer depletion[ODP]	18
3.3.4	Human toxicity[HTP]	19
4	PERSÖNLICHER EINDRUCK	21
	LITERATURVERZEICHNIS	22

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Vereinfachter Lebensweg in Anlehnung an [KGo9]	2
Abbildung 2	Phasen der Ökobilanz nach ISO 14040	3
Abbildung 3	Beispiel eines Projekts mit zwei Produktsystemen	6
Abbildung 4	Supplychain von Fairlötet	9
Abbildung 5	Recycling von Elektroschrott bei der Firma Metran	12
Abbildung 6	Finales Model in openLCA	15
Abbildung 7	Treibhausemissionen der Löt drahtmodellierung	16
Abbildung 8	Versäuerungspotential der Löt drahtmodellierung	17
Abbildung 9	Versäuerungspotential der Löt drahtmodellierung	18
Abbildung 10	Wie Emission zu Vergiftungen führen können	19
Abbildung 11	Vergiftungspotential der Löt drahtmodellierung	20

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Angenommene Maschinenelemente zur Zinn- gewinnung	13
-----------	--	----

LISTINGS

ABKÜRZUNGEN

EINLEITUNG

Im Rahmen des Seminares *Lifecyclemanagement in ICT* soll beispielhaft eine Ökobilanz (auch Lifecycleanalyse (LCA) genannt) für einen Hersteller von recycelten Lötendraht durchgeführt werden. Anhand gegebener Informationen soll dieser Beschaffungs- und Herstellungsprozess mit der zu Hilfenahme des Tools *OpenLCA* des Vereins *Fairlötet* betrachtet werden. Wenn möglich soll auch ein Vergleich zu traditionell produziertem Lötendraht gezogen werden. Nach kurzer Behandlung der Ökobilanzierung wird diese Arbeit dann auf die grundlegenden Elemente sowie die Funktionsweise des Programm *openLCA* eingehen sowie der Ergebnis zu Grunde liegenden Modelerzeugung innerhalb der Software. Die erzeugten Ergebnisse werden anschließend dargestellt. Eine tiefergehende Auswertung der Ergebnisse kann aufgrund des getroffenen Annahmen nicht gewährleistet werden, da hierfür themenspezifische Kenntnisse im Bereich Stoffströme sowie Umweltbelastung von Nöten sind.

Bei dem Untersuchungsgegenstand handelt es sich um Lötzinn welches durch den Verein *Fairlötet e.V.*, gegründet 2014 auf der Messe: "Maker Fairein Hannover, vertrieben wird. Leitbild des Vereins ist die Entwicklungszusammenarbeit mit Bezug auf die sozialen Problematiken in der globalisierten Elektronikproduktion.

Als ersten Meilenstein soll ein faires Lötzinn unter Vermeidung Zinns aus ausbeuterischen Bedingungen sowie die Zerstörung einmaliger Naturräume zu dessen Gewinnung. Aufgrund der aktuellen RoHS-Norm ist es bleifrei.

Der Vereien will größt mögliche Transparenz bieten und hat daher bekannte Elemente der Supply-Chain bis zum 2nd-Tier offengelegt. Als Produzent hat man sich das deutsche Unternehmen Stannol GmbH sichern können. Die erste Charge konnte sogar komplett aus Recyclingmaterial erstellt werden. Auf die Zusammensetzung sowie Gewinnung des Material wird in einem späterem Kapitel eingegangen. Soll die Umweltwirkung eines Produktsystems berechnet werden, so wird im ALLgemeinen dessen Ökobilanz ermittelt. Hierbei wird über den gesamten Lebensweg die potentielle Wirkung des Produktsystems auf verschiedene Umweltaspekte untersucht. Der Lebensweg eines Produktes wird heutzutage auch durch innerbetriebliche und zwischenbetriebliche Transportprozesse determiniert. Für die Erstellung einer Ökobilanz werden umfangreiche Daten benötigt. Diese werden gewöhnlich aus Datenbanken entnommen. Auf diese wird im Kapitel

EINFÜHRUNG IN DIE ÖKOBILANZ

ANFÄNGE DER ÖKOBILANZ

Die Methode der Ökobilanz (Life Cycle Assessment (LCA)) gilt als Kernmethode des Umweltmanagements und stammt ursprünglich aus der Schweiz. In der Bundesrepublik Deutschland wurden Mitte der 1970er Jahre erste Produktsysteme ökobilanziell untersucht. Mit zunehmender Brisanz begann man in den 1990ern mit der Entwicklung eines Standards für Ökobilanzierungen, welcher 1997 erstmal veröffentlicht wurde. Aktuell gibt es zwei international gültige Standards. Die DIN EN ISO 14040 definiert die Prinzipien und Methoden der Ökobilanz. In der DIN EN ISO 14044 werden die Phasen der Ökobilanz genauer erläutert.

Definition

Die Ökobilanz ist eine Methode, um Produktsysteme auf ihre (schädlichen) Umweltwirkungen zu analysieren. Die Wirkungen werden dabei im Laufe des gesamten Lebensweg des Produkts betrachtet, d.h. von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung, bis zur Anwendung, Abfallbehandlung bzw. endgültigen Beseitigung.

Man unterscheidet dabei zwischen *Cradle to Gate*, der Betrachtung der Herstellung eines Halbwertszeugs oder Produktes/Service, und *Cradle to Grave*, die Betrachtung des gesamten Lebensweg von Erzeugung bis Vernichtung. Die Betrachtung innerhalb dieser Arbeit geschieht auf dem *Cradle to Gate* Ansatz. Sie betrachtet somit nur die

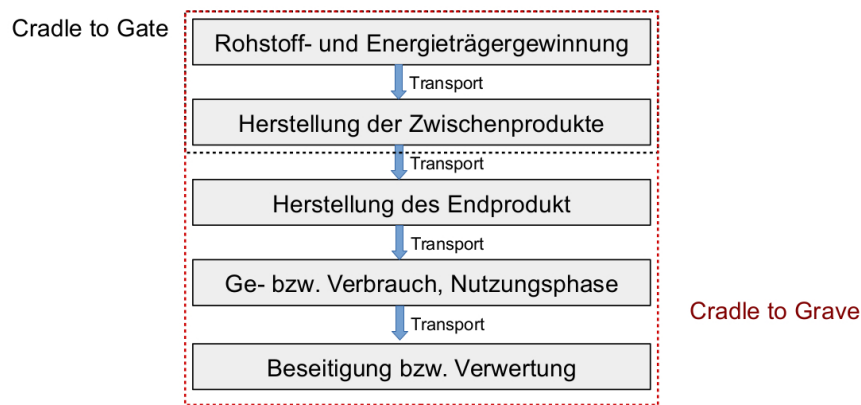


Abbildung 1: Vereinfachter Lebensweg in Anlehnung an [KG09]

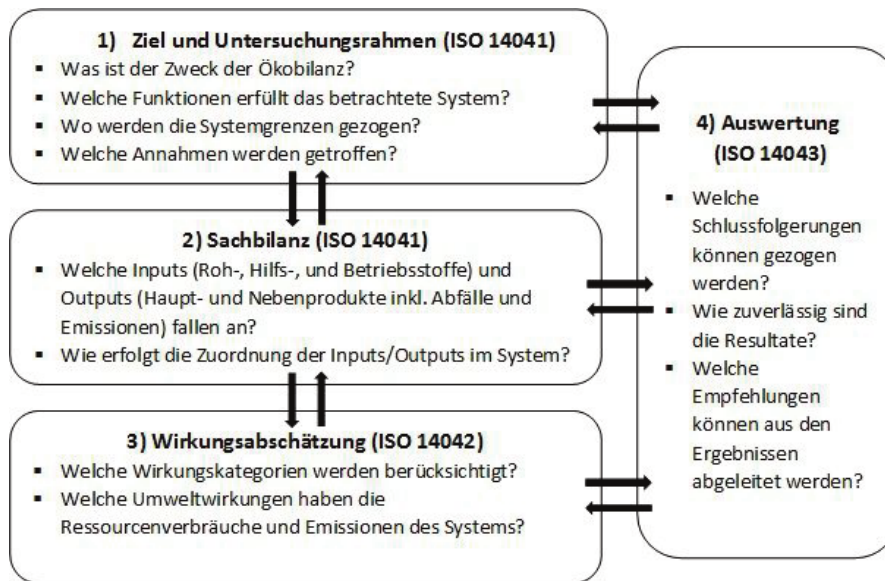


Abbildung 2: Phasen der Ökobilanz nach ISO 14040

Gewinnung der Rohstoffe sowie die Erzeugung des Produktes. Die Nutzung sowie die Entsorgung finden keine Berücksichtigung.

Phasen einer Ökobilanz

Eine Ökobilanz wird in vier Phasen eingeteilt, diese sind in Abbildung 2 dargestellt.

Eine Ökobilanz ist ein relativer Ansatz, der um eine funktionelle Einheit aufgebaut ist. Diese definiert sich über die Funktion des Produktsystems. Das ermöglicht einen Vergleich unterschiedlicher Produktsysteme solange sie die gleiche Funktion besitzen. [DIo6a] Die funktionelle Einheit muss zusammen mit dem Referenzfluss, den verwendeten Allokationsverfahren sowie den gewählten Systemgrenzen in der ersten Phase (*Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens*) dargelegt werden. Der Referenzfluss stellt die physische Menge an Inputgrößen (Material, Energie) dar, die zur Erfüllung der Funktion aus der funktionellen Einheit resultiert. [DIo6b] Dieser Zusammenhang soll durch ein Beispiel verdeutlicht werden: Bei einem Vergleich von Glühlampen mit Energiesparlampen wird als funktionelle Einheit die Leuchtwirkung bei definierter Raumgröße über eine definierte Lebensdauer gewählt. Der sich daraus ergebene Referenzfluss ermittelt sich aus der hierfür benötigten Menge an Glühlampen bzw. Energiesparlampen. Neben der funktionellen Einheit sind die Systemgrenzen der Untersuchung wichtig. Nicht jeder Material- und Energiefluss kann und/oder muss bei der Untersuchung in betracht gezogen werden. Es erfolgt stattdessen eine sinnvolle Definition von Abschneidekriterien, die aus der Relevanz resultieren

Beide Größen, funktionelle Einheit sowie Referenzfluss, dienen als

Grundlage um die In- und Outputs der Sachbilanz (Life Cycle Inventory Analysis (LCI)) zu berechnen. Hierzu wird der zu untersuchende Lebensweg des Produktes entweder in einzelne Prozessmodule unterteilt, für welche dann die jeweiligen In- und Outputströme zusammengestellt und bestimmt werden oder die Produktion wird als Gesamtprozess betrachtet und wie eine Blackbox behandelt, in welche Inputs hinein und Outputs heraus fließen.

Die Phase der LCI umfasst die Datenerhebung, Berechnung sowie Zuteilung von Flüssen und Emissionen für sämtliche Input- und Outputströme der Prozessmodule. Es stellt somit die Sachbilanz für die darauf basierende Wirkungsgradabschätzung dar und enthält Angaben zum Ressourcenverbrauch sowie Emissionen.

Es ist der umfangreichste Teil der Ökobilanz und erfordert je nach Untersuchungsobjekt ein tiefgreifendes Verständnis der Stoffströme, welche dort vorherrschen. Es sollte daher ausreichend Zeit für Untersuchungen eingeplant werden.

Nach erfolgter LCI schließt sich die Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment (LCIA)) an. Aus den ermittelten LCI-Ergebnissen werden Umweltwirkungen berechnet. Dazu werden die In- und Outputs auf Basis von Äquivalenzfaktoren bestimmte Wirkungen zugewiesen. Resultierende Emissionen werden auf Basis allgemeingültiger naturwissenschaftlicher Gesetze (Erhaltung der Masse, Hauptsätze der Thermodynamik...) berechnet.

Im letzten Schritt der Ökobilanz, der Auswertung, werden Ergebnisse aus LCI und LCIA in Bezug auf Ziel und Untersuchungsrahmen evaluiert. Dies ermöglicht den Vergleich der eigenen Ergebnisse mit schon veröffentlichten Studien und gegebenenfalls können Abweichungen analysiert werden.

UNTERSUCHUNGSHILFE: OPENLCA

Existierende Datenbanken

Einfache Ökobilanzen mit wenig tiefe oder einfachen Prozessen lassen sich händisch modellieren und berechnen. Mit zunehmender Tiefe kommen zunehmend Tabellenkalkulationsprogramme zum Einsatz. Diese bieten aber keine Einheitlichkeit der ermittelten Daten und folglich sind internationale Vergleiche aufgrund verschiedener Datenbasis schwierig. Mit zunehmender Datenmenge, immer umfangreicheren Produktlebenszyklen und die Anforderungen aus der Politik nach einheitlichen Ausweisen zur Umweltwirkung entwickelte sich der Trend zu Datenbanken und spezifischen Softwarelösungen. Dabei ist die Integration von Daten in die Software ein essentielles Merkmal, um vorhandene Ergebnisse in seine Untersuchung einfließen zu lassen. Diese Daten existieren dabei meist unabhängig der Softwarelösungen und enthalten sowohl Produktsysteme, Prozesse als auch

Produktflüsse. Einige dieser Datenbanken sind für Anwender gebührenfrei zu erhalten, dazu gehören z.B. die European Reference Life Cycle Database of the JRC (ELCD), die National Renewable Energy Laboratory DB (NREL) sowie die New Energy Extranalities Developments dor Sustainability (NEEDS).

Ferner gibt es noch kommerzielle Datenbanken wie ecoinvent oder GaBi. Diese Datenbanken enthalten mehr als tausende Datensätze zu Themen wie Energiebereitstellung, Transport, Chemikalien, Werkstoffen und Fertigungsprozessen.

Die Verwendung einer Software für Ökobilanzen hat einen Hauptzweck: Die Modellierung von Lebenszyklen der zu untersuchenden Produktsysteme sowie die sich daraus ergebene Berechnung und Darstellung der Wirkungsbilanz. Die Software muss somit die Input- und Outputströme innerhalb der definierten Bilanzgrenzen den einzelnen Wirkungskategorien zuweisen. Im angesicht des Klimawandels und zunehmender Umweltproblematiken sind die existierenden Softwarelösungen ein wichtiges Werkzeug bei der Ermittlung von Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen oder ganzen Organisationen sowie dessen Vergleich.

Innerhalb dieser Arbeit wurde als unterstützendes IT-Tool das open-Source Projekt openLCA verwendet, da dieses kostenlos ist und es ermöglicht die oben genannten kostenfreien Datenbanken zu implementieren. Es soll in dieser Section kurz erklärt werden und dessen Funktionalität dargestellt werden.

openLCA - Einführung

OpenLCA ist eine gebührenfreie Open-Source Anwendung des Berliner Unternehmen GreenDelta. Die Software selbst weist nach der Installation keinen Inhalt auf und bietet nur das Konstrukt zur Modellierung und Berechnung. Sie enthält also keinerlei Daten: weder Stoffströme noch LCIA-Methoden. Diese müssen zu Untersuchungszwecken individuell und manuell importiert werden.

Die Software ist recht ressourcen-hungrig und verlangt, gerade bei der Verwendung von Datensätzen aus ecoinvent und/oder GaBi, mindestens 3 GB RAM. Dank open-Source ist das Programm für alle gängigen Betriebssysteme (Windows, MacOS, Linux) erhältlich. Auf meinem Ubuntu-Notebook lief das Programm, neben einigen Abstürzen bei Berechnungen, recht konstant. Einsatzgebiete sind neben der Ökobilanzierung unter anderem auch die Analyse von Lebenszykluskosten sowie Ökobilanzierungen mit sozialem Aspekten. Ferner kann die Software CO₂ - und Wasserbilanzen aufstellen sowie Umweltdeklarationen für das Baugewerbe erstellen.

Um eine einheitliche Implementation aus den oben genannten Datenbanken nach openLCA sicherzustellen, gibt es neben der reinen Software openLCA auch ein online Magazin für LCA Daten, die openLCA

Nexus website. In diesem Magazin sind sowohl die kostenfreien, als auch die kostenpflichtigen Datenbanken vertreten. Es gibt zudem eine Übersicht, in welchen Staaten mit welchen Datensätzen Bilanzierungen erarbeitet worden sind.

Grundlagen zur Modellierung

Um ein Prozesssystem mit seinen ganzen Prozessen und dessen jeweiligen In- und Outputs zu modellieren braucht es in openLCA folgende Elemente:

- Projekte
- Produktsysteme
- Prozesse
- Flüsse

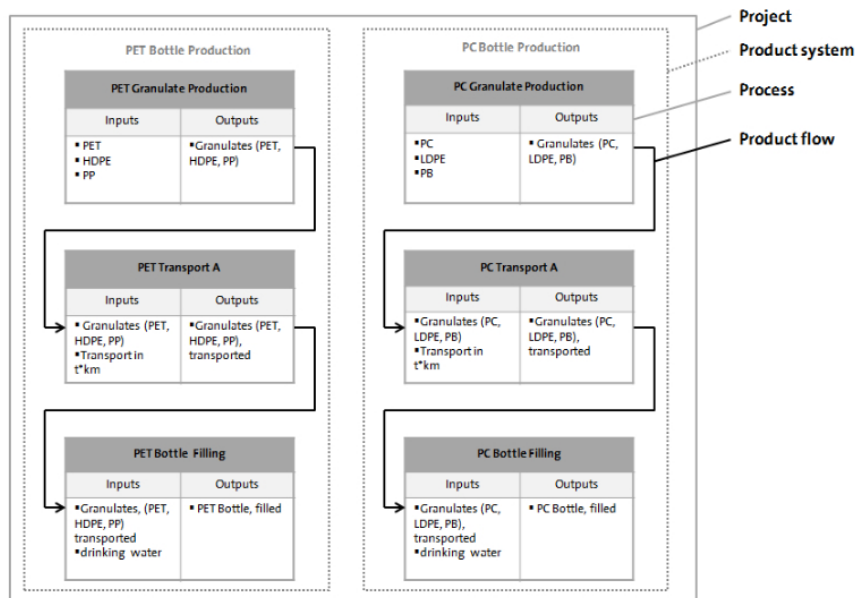


Abbildung 3: Beispiel eines Projekts mit zwei Produktsystemen [Gr16]

Grafik 3 zeigt beispielhaft ein simples Projekt mit allen oben genannten Elementen, welche im folgendem genauer betrachtet werden.

Flüsse

Flüsse sind alle Produkt-, Material- oder Energieinputs und Outputs von Prozessen die sich innerhalb des zu untersuchenden Produktsystems befinden. openLCA unterscheidet dabei zwischen drei Flusstypen:

- **Elementarflüsse:** Material oder Energie I/Os der Umwelt, welche direkt das System betreten oder verlassen (z.B. Emissionen in die Luft)
- **Produktflüsse:** Material oder Energieaustausch zwischen Prozessen innerhalb des Systems (z.B. Halbwerkzeug)
- **Abfallflüsse:** Material oder Energie welches Produktsystem verlässt. (z.B: Verschnitt von Blechen)

Jedem Fluss kann eine Referenz als Flusseigenschaft zugeordnet werden (Masse, Volumen, Fläche ...) welche auch nachträglich verändert werden kann. Mengen können als Wert, Formel oder Parameter eingegeben werden. Um Flüsse bei der Wirkungsgradabschätzung richtig zuzuordnen, wird ihnen ein Entstehungsprozess zugeordnet. Für Strom, gemessen in kWh, wäre dies z.B. ein Steinkohlekraftwerk mit einer Leistung von 800 MW. Diese sind in den Datenbanken den jeweiligen Flüssen zugeordnet. Bei Implementierung mehrerer Datenbanken, z.B. aus einer aus der EU und einer aus USA, kann es zu redundanten Einträgen mit unterschiedlichen Einfluß auf die Wirkungsgradabschätzung (LCIA) kommen. Es ist daher ratsam, bei mehrfachen Auftreten gewisser Flüsse, z.B. Energiezuführung durch Strom oder Erdgas, den selben Entstehungsprozess als Quelle zu wählen.

Prozesse

Prozesse sind interagierende Aktivitäten, die Inputs in Outputs transformieren. openLCA unterscheidet zwei Arten von Prozessen:

- **Unit Process:** kleinste Untersuchungseinheit für welche In- und Outputs berechnet werden.
- **System Process:** Einheiten, für welche In- und Output gesammelt werden.

Jedes Produktsystem lässt sich auf die eine oder die andere Weise darstellen. Meist werden beide Arten verwendet, wenn man für manche Prozesse nicht unnötig tiefe darstellen möchte oder tiefere Prozesskenntnisse fehlen. In diesem Fall wird der Prozess wie eine "Black-Box" behandelt in den bestimmte Elemente hinein und andere heraus fließen. Diese sind, ebenso wie Flüsse in den zuvor genannten Datenbanken enthalten. Auch hier kann es durch Implementierung mehrerer Datenbanken zu Redundanzen mancher Prozesse kommen. Größere Unterschiede konnten dabei nicht festgestellt werden.

Produktsystem

Beinhaltet alle Prozesse und Flüsse innerhalb der Systemgrenzen. Dies kann ein Netzwerk von Prozessen, definiert durch den Referenzprozess, oder auch nur ein einzelner Prozess sein. Auf der Ebene von Produktsystemen können Wirkungsabschätzungen vom Referenzprozess für alle stromaufwärts verbundenen Prozesse berechnet werden. Diese Produktsysteme können dabei durch openLCA automatisch oder manuell erstellt werden und mittels eines Modelgraphen visualisiert werden.

Projekt

Projekte dienen ausschließlich dafür Produktsysteme untereinander vergleichen zu können.

Diese Elemente sind Teil der Life Cycle Inventory Analysis (LCI), der Sachbilanz aller verwendeter Ressourcen sowie sämtlicher Emissionen und damit Basis des Life Cycle Impact Assessment (LCIA), der Wirkungsabschätzung. Es wird damit auch deutlich, warum es wichtig ist, bei der Modelerzeugung und Generierung der LCI viel Zeit aufzuwenden. Je präziser eine LCI, also die Modellierung aller Prozesse und Flüsse, um so präziser und aussagekräftiger sind die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung.

ANNAHMEN UND MODELIERUNG

In diesem Kapitel soll es nun um die Modellierung der Supply Chain von Fairlötet e.V. gehen. Um diese in openLCA darstellen zu können mussten einige Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden.

ANNAHMEN ZUR MODELIERUNG

Die von Fairlötet im Internet öffentlich bereitgestellte Supply Chain ist in Abbildung 4 zu sehen. Wie zu erkennen ist, liegt der Fokus von Fairlötet auf den Arbeitsbedingungen. Es soll trotzdem als Grundlage für die Ökobilanz dienen.[fa17]

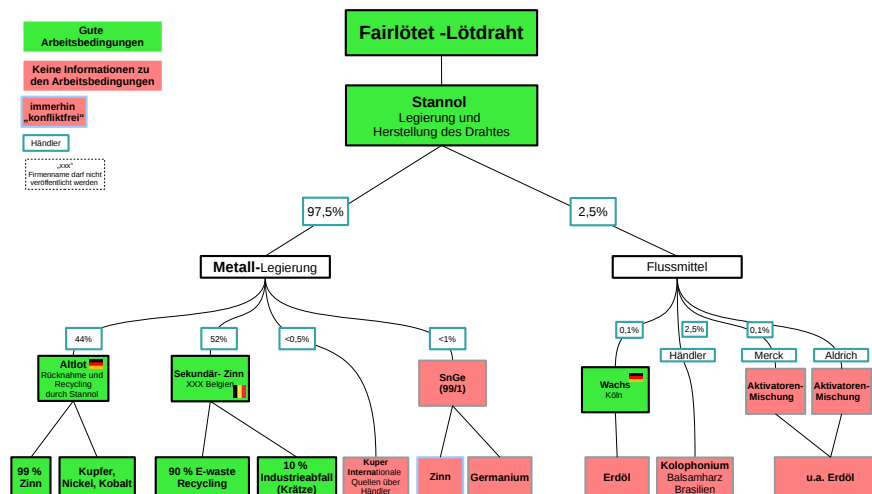


Abbildung 4: Supplychain von Fairlötet

Wie aus der Abbildung 4 erkennbar, sind die Hauptelemente bei der Produktion des Lötzinns Zinn und Kolophonium, ein Hauptbestandteil von Baumharz. Auf diesen liegt daher auch das Hauptaugenmerk der Ökobilanz. Es werden folgende Prozesse in openLCA im Produktsystem modelliert:

- Altlot recycling durch Stannol
- Sekundärzinngewinnung aus E-Waste und Krätze
- Kolophonium aus Brasilien

Um diese Elemente in Prozesse innerhalb openLCA übertragen zu können wurden folgende Annahmen getroffen:

Altlot Recycling

Dieser Prozess ist mit 44% am Gesamtprozess ein wichtiger Faktor. Er wird direkt bei Lötendrahtproduzenten Stannol durchgeführt. Da leider keine genauere Informationen zur Rückgewinnung von Lötzinn aus Altlot gefunden werden konnte, wird angenommen, dass in diesem Prozess altes, bleifreies Lot zusammengetragen und wieder eingeschmolßen wird.

Der Transport erfolgt dabei via Kleintransporter welche eine angenommene Gesamttransportstrecke von 500km zurücklegen. Ferner wird angenommen, dass zum Schmelzen ein erdgasbetriebener Schmelzofen mit einem Wirkungsgrad von 60% verwendet wird.

Die verwendete Erdgasmenge pro Kg Lötzinn im laufenden Betrieb ergibt sich aus der benötigten Wärmemenge zum Erhitzen sowie der speziellen Wärmemenge zum Schmelzen.

$$\Delta Q = C * \Delta T$$

$$c = \frac{C}{m} = \frac{\Delta Q}{m * \Delta T}$$

$$c(\text{Zinn}) = 0,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Schmelztemperatur Zinn : 231,9°C

Raumtemperatur : 20°C

$$\rightarrow \Delta T \approx 210^\circ\text{C}$$

(1)

Erwärmen:

$$\Delta Q = 0,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 1\text{kg} * 210\text{K} = 48,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Schmelzwärme:

$$q_s = 60 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\rightarrow 48,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 60 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 108,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Annahme: Wirkungsgrad = 0,6

$$Q_{ges} = \frac{108,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,6} = 180,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0,1805 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Heizwert Erdgas} = 40 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$\rightarrow 0,0045125\text{kg Erdgas pro kg Zinn}$$

Da es in den verwendeten LCA-Datenbanken keinen Zinn-Schmelzprozess gibt, wurde dieser Prozess manuell erstellt und mit den oben genannten Flüssen versehen.

Sekundärgewinnung aus Krätze

Krätzen sind oxidierte Schichten auf flüssigen Metallen oder Legierungen. Sie enthalten unterschiedlich hohe Oxid- und Metallanteile. Eine Rückgewinnung der oxidierten Metallanteile ist in der Regel, wie z.B. bei Zinn, möglich. [FM14] Da kein geeigneter Prozess innerhalb der Datenbanken gefunden werden konnte, wurde dieser manuell erstellt. Als Basis dafür wurde der SSeparo Zinn-Recycler" der Firma Streckfuss System GmbH und Co. KG verwendet. Dieser kann bis zu 20kg Krätze aufnehmen und wirbt mit einer Recyclingquote von bis zu 0,7 bei einer Leistungsaufnahme von 2 kW. Leider sind keine Angaben über die Dauer des Recyclingvorganges auffindbar gewesen, weshalb die Annahme getroffen wurde, dass dieser 1h bei 20kg beträgt.

Sekundärgewinnung aus Elektronikschrott

Derzeit existieren drei Verfahren zum Recycling von Elektronikschrott:

- Vorbehandlungen, wie das Entfernen funktionstüchtiger Baugruppen
- Physisches Recycling, durch z.B. Zerkleinern und Trennen der Bestandteile
- Chemisches Recycling, durch Auflösen der Bestandteile in verschiedenen Säuren. Eine aktuelle Untersuchung zeigt A. Chaurasia et. al. aus 2013, in welcher durch Salpetersäure Zinn und Kupfer aus PCBs ausgelöst wurde. [Ch13]

Als Basis für das Modell in openLCA soll der Recyclingprozess der Firma Metran aus Deutschland dienen, gefunden in Martens und Goldmann *Recyclingtechnik* von 2016, dargestellt in Abbildung 5.

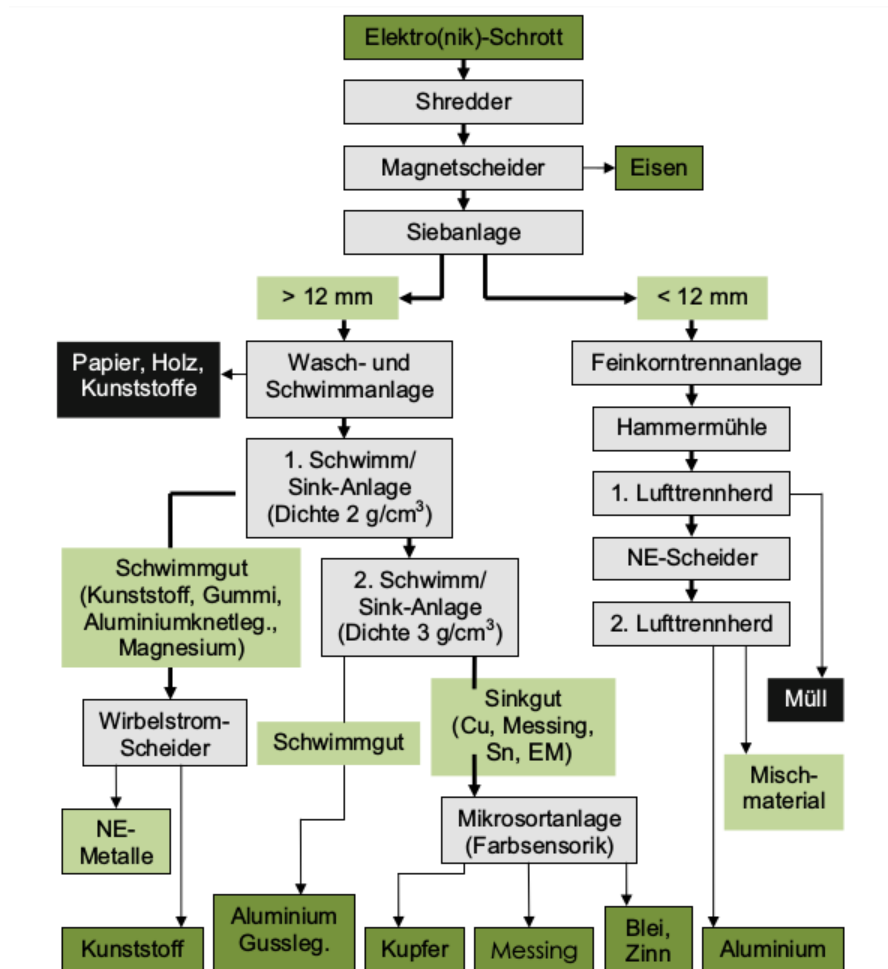


Abbildung 5: Recycling von Elektroschrott bei der Firma Metran

Dieser mechanische Trennungsprozess basiert auf den verschiedenen physikalischen Eigenschaften der Materialien welche im Elek-

troschrott vorkommen. Dabei spielt die Größe und Form einzelner Partikel eine wesentliche Rolle. Es ist daher im Gesamtprozess mindestens eine Mahlstufe nötig um die benötigten Eigenschaften sicherzustellen. Nach dem Zerkleinern erfolgen verschiedene Bearbeitungsverfahren um die einzelnen Bestandteile anhand ihrer Eigenschaften zu trennen. Nach dem Zerkleinern folgt die Trennung nach magnetischen und nicht magnetischen Elementen, welche durch einen Elektromagneten voneinander getrennt werden. In der folgenden Siebanlage werden die Splitter nach Größen getrennt. In diesem Fall größer oder kleiner 12 mm. In der anschließenden Sink-Schwimmanlage werden anhand der verschiedenen Materialdichten Wertstoffe voneinander getrennt. Die betrachtete Anlage hat zwei Stufen um Kunststoffe sowie Aluminium und Gusseisen von den anderen Metallen zu trennen. Es wird angenommen, dass das verwendete Wasser dabei in einem Closed-Loop Kreislauf aufbereitet und wiederverwendet wird. [JH15] Als letzter Separierungsschritt folgt eine Mikrosortieranlage durch Farbsensorik. Leider waren diese Prozessschritte nicht teil der kostenfreien Datenbanken und mussten daher manuell erstellt werden. Aus dem Text von Martens und Goldmann, auf dem die Zinntrennung basiert, gehen weder genaue Stoffströme hervor, noch werden Maschinenelemente benannt. So mussten auch für diesen Prozess Annahmen bezüglich der Anlagen verwendet werden.

Tabelle 1: Angenommene Maschinenelemente zur Zinnengewinnung

Anlagenelement	Maschine	Leistungsaufnahme	Durchfluss
Shredder	BHS RPM 0813	55kW	20t/h
Magnetscheider	Goudsmit Recycling	3kW	6t/h
Siebanlage	Annahme	10kW	6t/h
Sink-Schwimmanlage	KM-Recycling	95kW	6-8t/h
Mikrosortieranlage	Annahme	10kW	6 t/h
Sonstiges	Annahme	20 kW	—

Mit den oben angenommenen Werten, erhalten wir eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 0,034kWh/kg recyceltem Zinn bei laufendem Betrieb. Unter Sonstiges fallen der Transport zwischen den Anlagenteilen sowie zusätzliche Leistungsaufnahme für Wartung und Reinigung. Bei der Sink-Schwimmanlage handelt es sich um eine Anlage mit integrierter Filteranlagen für das Wasser, so dass dieses im Closed-Loop-Prinzip die Anlage nicht verlässt. Aufgrund des Standortes von Stannol im Ruhrgebiets, wird angenommen, dass der benötigte Strom für alle diese Anlagen in einem Steinkohlekraftwerk produziert wurde.

Kolophonium aus Brasilien

Kolophonium ist ein Bestandteil von Baumharz. Da keine genaueren Informationen zur Gewinnung von Baumharz in Brasilien gefunden wurden, wurde die Herstellung von Kolophonium aus der Lötzinn-Betrachtungen ausgenommen. Mit in die Ökobilanz spielt aber der Transport von Brasilien nach Deutschland.

Es wird angenommen, dass dieses mittels eines Containerschiffs von Sao-Paulo (Brasilien) nach Hamburg (Deutschland) verschifft wird, als Strecke werden 12.500 km beanschlagt.

Lötdrahtherstellung

Final muss aus den gewonnen Materialien noch der eigentliche Draht gezogen werden. Dazu wird angenommen, dass alle Bestandteile in einem Schmelzofen mittels Erdgas geschmolzen werden und anschließend in einer Draht-Zieh-Maschine zum gewünschten Lötzinndraht verarbeitet wird. Für den Ofen wurde wieder ein Wirkungsgrad von 0,6 angenommen. Für die Leistungsaufnahme der Drahtziehmaschine wird als Referenz die L1-3S der Firma Collin [Dr17] genommen, welche eine Motorleistung von 11kW besitzt.

MODELBUILDUNG IN OPENLCA

Modellieren wir alle Prozess und Flüsse analog zu unseren getroffenen Annahmen, so erhalten wir das Produktsystem, welches in Abbildung 6 visualisiert wurde. Eine Modellierung mit Parametern war aufgrund der damit einhergehenden hohen Systemressourcen nicht möglich. Diese hätten es ermöglicht, eine schnelle Anpassung der Prozessrelationen der Stoffströme durchzuführen, ohne einzelne Prozesse in openLCA zu bearbeiten. Sämtliche Flüsse haben als Referenz Masse in kg, da unser Prozessoutput ebenfalls in kg angegeben ist.

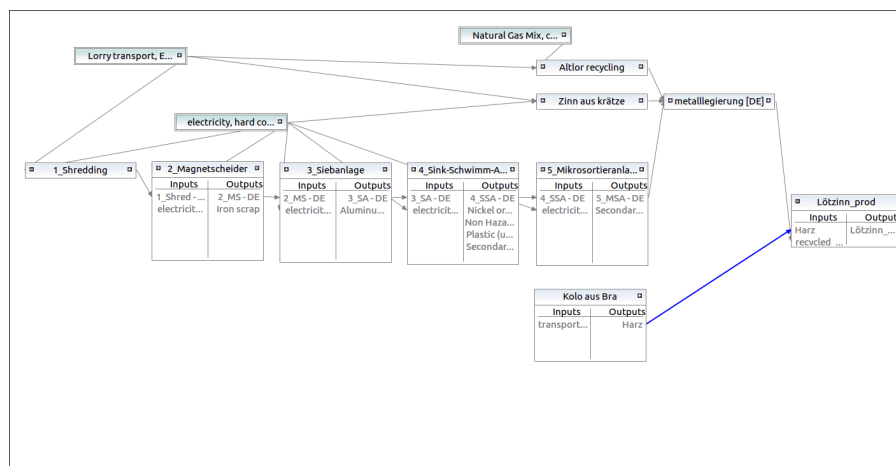


Abbildung 6: Finales Model in openLCA

ERGEBNISSE

Das Emissionen in Luft, Wasser oder Boden Auswirkungen auf die Umwelt haben können ist trivial, jedoch gibt es dabei viele Faktoren zu berücksichtigen. Indikatoren sind typischer Weise numerische Messungen, welche Schlüsselinformationen eines physikalischen, sozialen oder ökonomischen System widerspiegeln. Anhand von Ihnen lassen sich Trends oder Ursache-Wirkungs-Beziehungen darstellen. Diese zu Messen, gerade im Umweltbereich, wo eine Ursache-Wirkungsbeziehung nicht immer offensichtlich ist und sich zeitlich verzögert auftreten kann, ist schwierig und nicht unumstritten. Es existieren daher viele verschiedene Kennzahlen. Einige besitzen nur eine unzureichende Dokumentation oder fallen durch fehlender Transparenz auf. [Ve01] Die Auswirkungen des untersuchten Produktsystems auf die Umwelt sollen in dieser Arbeit mittels folgender vier Indikatoren dargestellt werden:

Global Warming Potential[GWP]

Diese Kennzahl stellt das Treibhauspotenzial dar. Die Kennzahl wurde 1990 im *"First Assessment Report"* der *Intergovernmental Panel on Climate Change* erstmals benannt und hatte den Anspruch mögliche Schwierigkeiten darzustellen. Sie etablierte sich schnell als Kernindex der Umweltpolitik. Die Kennzahl wird hauptsächlich durch CO₂ und CH₄ Emissionen beeinflusst, die einen Hauptbestandteil der Treibhausgase darstellen. Sie wird daher gemessen in kg carbon dioxid equivalenz.(kg CO₂e) [Sho9]

Für unser Model lassen sich folgende Hauptverursacher für Treibhausgase identifizieren: Die Stromproduktion sowie der Transport von Werkstoffen mit kleinen Transportern.

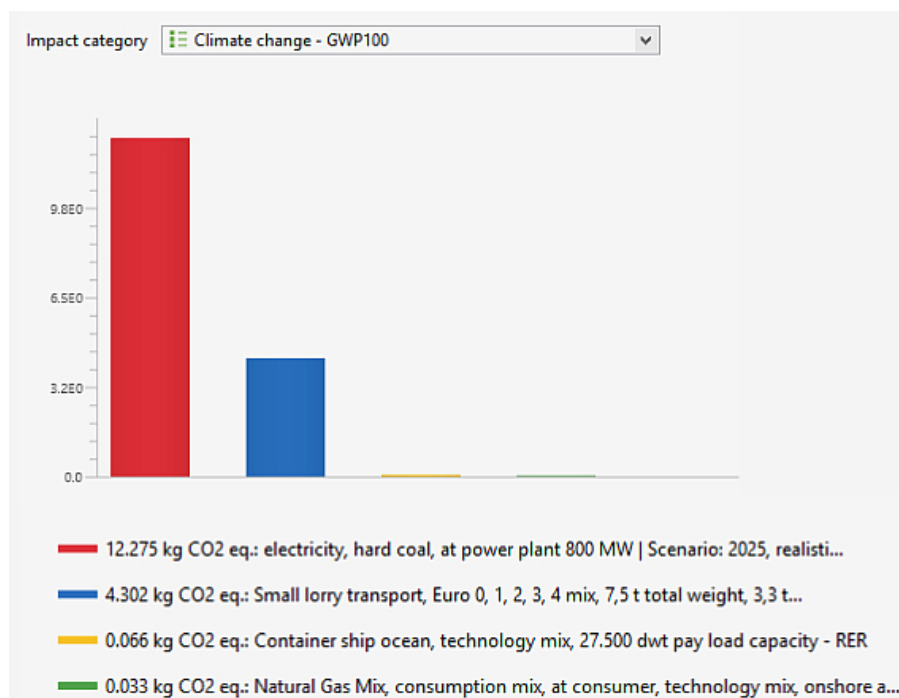


Abbildung 7: Treibhausemissionen der Lötdrahtmodellierung

Acidification Potential[AP]

Eine Darstellung des Versäuerungspotential (Fähigkeit H^+ Ionen zu bilden) von Substanzen. Meist ausgelöst durch Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxide (NO_x). Gemessen in äquivalenten kg von Sulfur dioxide ($kg\ SO_2\ eq.$).

Wie bereits bei den Treibhausemissionen, sind der Transport sowie die Stromerzeugung die wesentlichen Erzeuger der Versäuerungspotentiale, welche sich mit $0,039\ kg\ SO_2$ pro $10\ kg$ produzierten Lötzinn niederschlagen. Allerdings sind beide Emissoressoren ähnlich stark vertreten.

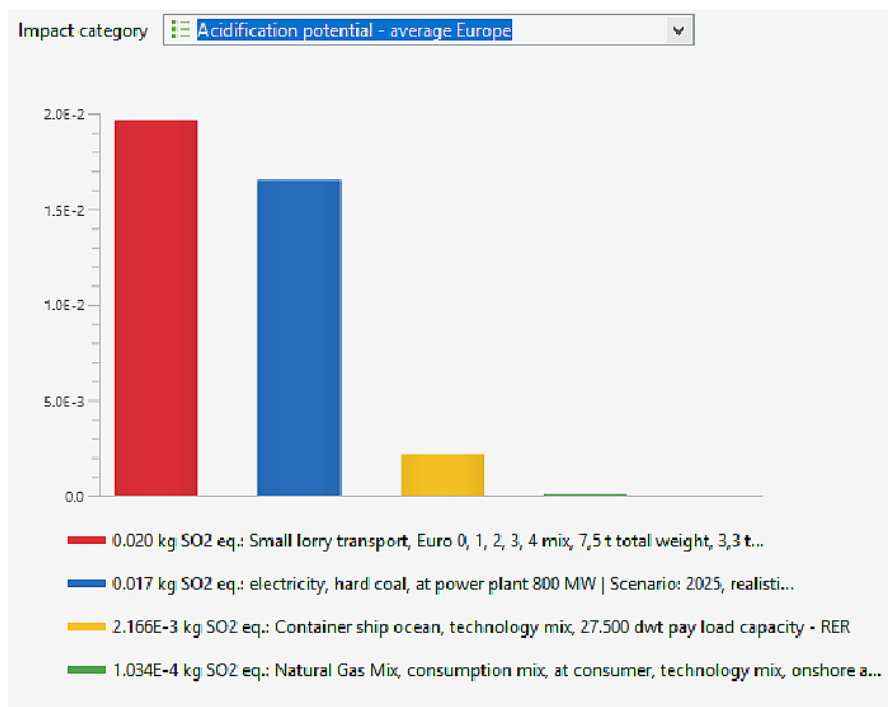


Abbildung 8: Versäuerungspotential der Lötdrahtmodellierung

Ozone layer depletion[ODP]

Stellt den Gefährdungsgrad der Emissionen in die Luft dar, welche die Ozonschicht beschädigen/ abbauen. Ozon (O_3) ist eine Schicht der Erdatmosphäre, welche einen Großteil der UVB Strahlung der Sonne blockiert und diese nicht zur Erde lässt. Ozon ist eine sehr reaktive Substanz und wird stark von der Temperatur beeinflusst, sodass auch der Treibhauseffekt eine Wirkung auf den Abbau von Ozon hat. Gemessen wird diese Kennzahl in äquivalenten kg Fluorchlorkohlenwasserstoff

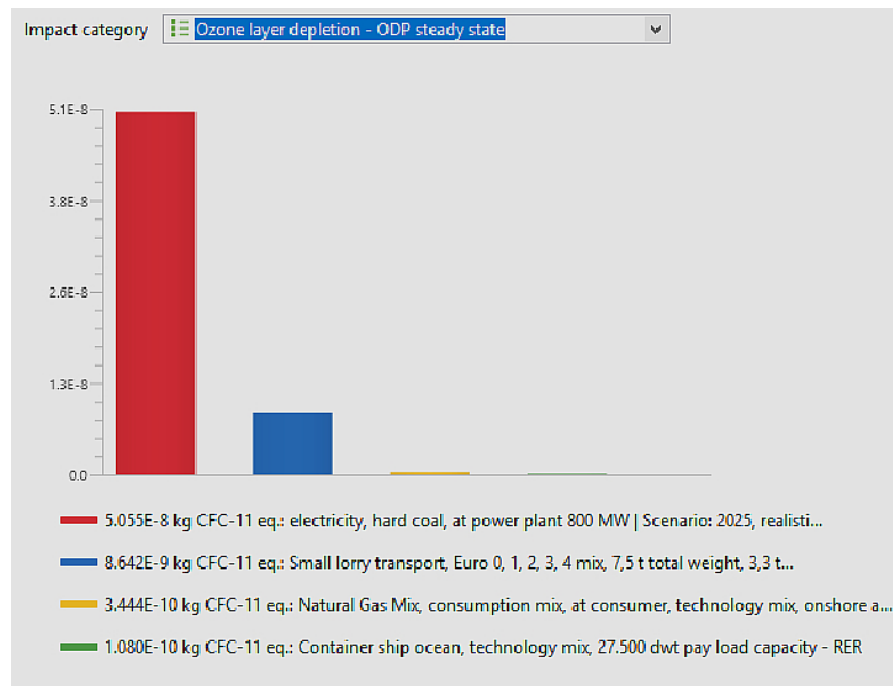


Abbildung 9: Versäuerungspotential der Lötdrahtmodellierung

Analog zu den Ergebnissen der Treibhausgase sowie der Versäuerung ist auch hier der größte Emmissionierer die Stromproduktion, sowie der Transport.

Human toxicity[HTP]

Ein Index, der die Gefahr von chemischen Emissionen in die Umwelt und dessen toxische Wirkung auf den Mensch durch Inhalation, Einnahme von vergifteten Lebensmitteln sowie den Hautkontakt wiedergibt. Dargestellt in Abbildung 10. Gemessen in äquivalenten kg 1,4-Dichlorbenzol.

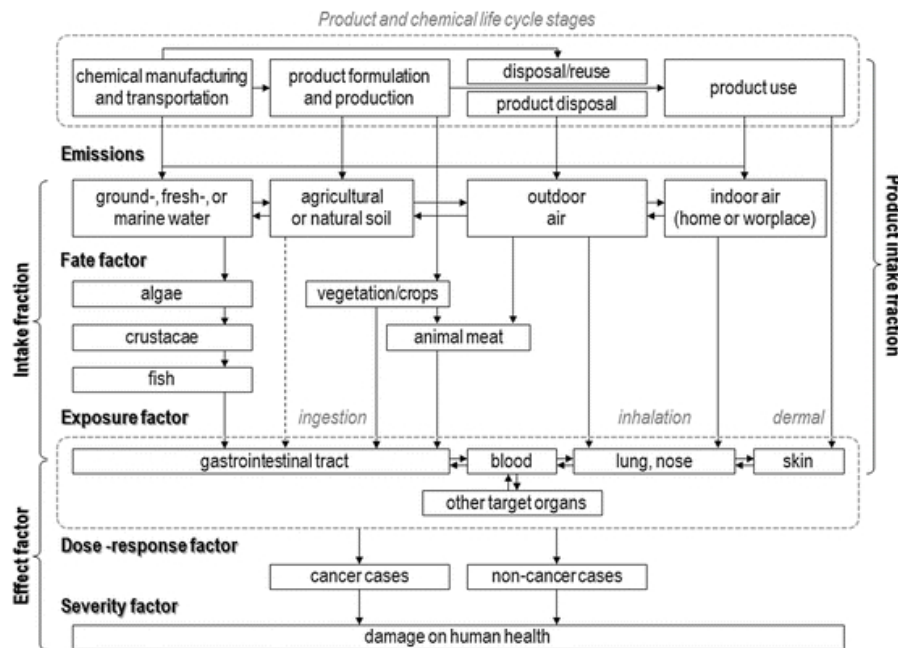


Abbildung 10: Wie Emission zu Vergiftungen führen können
[HH15]

Anders als bei den anderen Kennzahlen, tritt hier erstmals die Produktion des Lötzinns als Faktor mit auf. Dies könnte auf hochtoxische organische Zinnverbindungen zurückzuführen sein. Hier zeigt die Darstellung zusammengefasster Prozesse die damit einhergehende Ungenauigkeit. Je tiefer die Zerlegung in einzelne Prozessschritte stattfindet, umso besser lassen sich die Ergebnisse zuordnen und einzelne Verursacher identifizieren.

Abschließend wäre ein Vergleich mit der klassischen Produktion von Lötzinn, durch Zinngewinnung aus Mienen, interessant. Leider konnten keine passenden Daten oder Analysen diesbezüglich gefunden werden. Es lässt sich jedoch absehen, dass alleine der Abbau der Erze in den Mienen einen erheblichen Einschnitt in die Natur bedeuten.

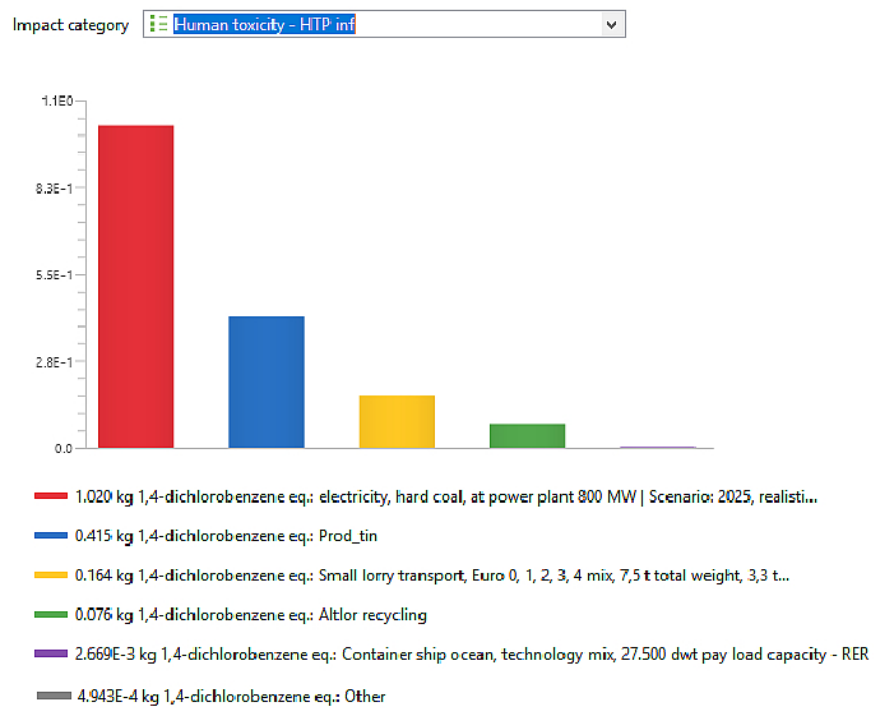


Abbildung 11: Vergiftungsspotential der Lötdrahtmodellierung

PERSÖNLICHER EINDRUCK

OpenLCA ist ein simples aber zugleich recht umfangreiches und mächtiges Tool. Es kommt per se mit keinerlei Daten und Bedarf einiger Einarbeitungszeit um einen erfolgreichen Umgang zu ermöglichen. Zum leichteren Einstieg stellt GreenDelta einige wenige Tutorials bereit, in denen die grundlegenden Eigenschaften und Verfahren gezeigt werden. Als Datenbasis werden immer vorhandene Daten aus den kostenfreien Datenbanken verwendet. Dies sichert jedem Nutzer die Möglichkeit, die vorgenommenen Schritte nachzuvollziehen. Hat man dieses erste Level erreicht und versucht nun, kompliziertere Modelle oder möchte Prozesse integrieren, die noch nicht in einer Datenbank zu finden sind, so stößt man schnell an seine Grenzen. Es fehlt an dieser Stelle eine geeignete Dokumentation. An dieser Stelle ist es dann essenziell den abzubildeten Prozess genau zu kennen, da sämtliche Stoffströme manuell erzeugt und dem jeweiligen Prozess zugeordnet werden müssen. Den Prozess in seinen Teilschritten zu kennen erleichtert das Ermitteln der wichtigsten Stoffströme. Diese können anschließend je nach benötigter Untersuchungstiefe erweitert werden. Im Fall dieser Arbeit ist das Ergebniss äußerst kritisch zu betrachten und mehr als Tendenz zu interpretieren, da dem Author tieferes Fachwissen der Abfallwirtschaft und Metallrecycling fehlen. Alle Prozesse wurden jedoch versucht anhand vorhandender Literatur und Maschinen der Abfallwirtschaft darzustellen. Mit Sicherheit wurden aber nicht alle Stoffströme der einzelnen Anlagen und Prozesse berücksichtigt, wodurch das Ergebniss als nicht vollständig betrachtet werden sollte. Es kann jedoch als eine erste Basis für weitere Untersuchungen in dem Bereich dienen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [Ch13] Chaurasia: Extraction of tin and copper by acid leaching of PCBs. International Journal of Metallurgical Engineering, S. 243–248, 2013.
- [DIo6a] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, 2006.
- [DIo6b] DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, 2006.
- [Dr17] Drahtziehmaschine, [http : //collin.de/?page_id = 18](http://collin.de/?page_id=18) Stand:26.6.2017.
- [fa17] fairlötet: Lieferkette HS10 FAIR, [http :
//fairloetet.de/media/wysiwyg/downloads/lieferkette_fairloetet_1115.pdf](http://fairloetet.de/media/wysiwyg/downloads/lieferkette_fairloetet_1115.pdf), Stand:08.07.2017.
- [FM14] Förtsch, G.; Meinholz, H.: Handbuch Betriebliche Kreislaufwirtschaft. 2014.
- [Gr16] GreenDelta: openLCA 1.5; Basic Modelling, [http :
//www.openlca.org/wp – content/uploads/2016/10/1.5 – Basic – Modelling.pdf](http://www.openlca.org/wp-content/uploads/2016/10/1.5-Basic-Modelling.pdf); Stand:07.07.2017.
- [HH15] Hauschild, M.; Huijbregts, M.: Life Cycle Impact Assessment. 2015.
- [JH15] Jadhav, Umesh; Hocheng, H: Waste solder and printed circuit board: The emerging secondary sources for recovery of metals. 72:5–15, 03 2015.
- [KG09] Klöpffer, W.; Grahl, B., Hrsg. Ökobilanz(LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2009.
- [MG16] Martens, H.; Goldmann, D.: Recyclingtechnik. Springer-Vieweg, 2016.
- [Sho9] Shine, K.P.: The global warming potential - the need for an interdisciplinary retrieval. Climatic Change, 96:467–472, 2009.
- [Ve01] Veleva, V.: Indicators of sustainable production. Journal of Cleaner Production, S. 447–452, 2001.