

Ökobilanzergebnisse von Stetigförderern – Einfluss von funktioneller Einheit, Untersuchungsrahmen und Datenqualität

Lynn Lüdemann, Jens Sumpf, Markus Golder

Professur Förder- und Materialflusstechnik
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Fakultät für Maschinenbau
Technische Universität Chemnitz

Umweltprodukterklärungen stellen die Ergebnisse von Ökobilanzen von Produkten dar. Dabei werden über einen potentiellen Lebenszyklus Treibhausgasemissionen, Versauerungspotentiale bzw. Ressourcenverbräuche berechnet. Ziel ist es, funktional äquivalente Produkte hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit miteinander vergleichen und auswählen zu können. Neben der Wahl einer passenden funktionellen Einheit, ist die Festlegung sogenannter Bilanzierungsregeln im Rahmen einer PCR (Produktkategorie-Regel) essentiell. Welchen Einfluss die Festlegung der gewählten Parameter auf die Bilanzierungsergebnisse hat kann z. B. mittels einer Sensitivitätsanalyse geprüft werden. Diese ist optionaler Bestandteil einer Ökobilanzierung und wird im Hintergrundbericht einer PCR zur Erklärung der gewählten Parameter, den Stakeholdern zur Verfügung gestellt. Durchführung und Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Ökobilanzierung von Stetigförderern werden nachfolgend diskutiert und evaluiert.

[Sensitivitätsanalyse, Ökobilanzierung, Produktumwelterklärung, Produktkategorie-Regel, Datenqualität]

Environmental product declarations present the results of life cycle assessments of products. Greenhouse gas emissions, acidification potentials and resource consumption are calculated over a potential life cycle. The aim is to be able to compare and select functionally equivalent products with regard to their environmental preferability. In addition to the selection of a suitable functional unit, the definition of so-called assessment rules within the framework of a PCR (product category rule) is essential. The influence of the selected parameters on the results is checked within the scope of a sensitivity analysis. This can be part of LCA and is made available to the stakeholders in the background report of a PCR. The implementation and results of the sensitivity analysis for the life cycle assessment of continuous conveyors are discussed and evaluated below.

[Keywords: Sensitivity Analysis, Life Cycle Assessment, Environmental Product Declaration, Product Category Rules, Data quality]

1 EINLEITUNG

Technische Produktsysteme wie Fahrzeuge, Maschinen, Aufzüge oder Förderer erzeugen im Laufe ihres Produktlebenszyklus Umweltwirkungen. Ausgehend von der Herstellung durch Ressourcengewinnung und -verarbeitung, über den Gebrauch inkl. möglicher Transporte hin zur Entsorgung werden verschiedene Emissionen oder Ressourcenströme generiert, die in der Regel einen negativen Effekt auf das komplexe Ökosystem der Erde haben. Bisherige lineare, auf immer mehr Ressourcenverbrauch und immer mehr Emissionserzeugung, angelegte Wirtschaftsweisen führten zur Entstehung und Verschärfung der Klimakatastrophe.

Um diese abzumildern, hat sich eine Mehrheit auf verbindliche Klimaziele zur Begrenzung der Erderwärmung verständigt. Suffizienz, Effizienz und Konsistenz sind Strategien zur Minimierung des Umwelteinflusses menschlichen Handelns. Dabei sind manchmal Ansätze aus diesen Strategien gegenläufig, wie z. B. der Einsatz stark-reibungsreduzierender Materialien (Effizienz), der einerseits den Energieverbrauch in der Nutzungsphase deutlich senkt aber andererseits in der Herstellung mehr/ seltenere Ressourcen (Suffizienz) und Prozessenergie benötigt.

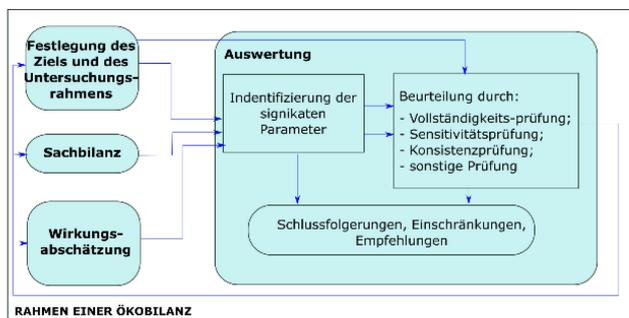
Deshalb sind Methoden zur Bewertung und Ermittlung eines sogenannten „Umweltfußabdruck“, um Produktsysteme in ihrem Lebenszyklus erforderlich, und ggf. verbessern zu können. Dazu wurden diverse Methoden entwickelt, wie z. B. Ökobilanzierung. Ziel ist es, Herstellern und Nutzern Empfehlungen, Schlussfolgerungen aber auch Verbote zur Verfügung zu stellen bzw. zwei oder mehrere Produktsysteme miteinander vergleichen, das „Umweltfreundlichere“ zu identifizieren oder neue Produkte zu entwickeln.

Ziel der vorliegenden Forschung ist die Erstellung einer sogenannten Produktkategorie-Regel (PCR) für die Bilanzierung und Veröffentlichung von Umweltprodukterklärungen von Stetigförderern. In PCRs werden Modellierungsparameter, wie Untersuchungsrahmen, Datenqualitätsregeln bzw. funktionelle Einheit definiert, anhand derer die Ökobilanzergebnisse verglichen werden können.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 ÖKOBILANZIERUNG

Ökobilanzen (ÖB) dienen der Eruiierung und Darstellung von Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlaufe seines gesamten Lebenszyklus. Bei der Ökobilanzierung handelt es sich um ein mehrstufiges iteratives Verfahren welches einem genormten methodischen Rahmen unterliegt. Während die Schritte und Abläufe einer Ökobilanz vorgegeben sind, müssen die Eingangsparameter, insbesondere der Untersuchungsrahmen, durch den Bilanzierer festgelegt werden. Die resultierenden Ergebnisse werden im Rahmen des letzten Schrittes „Auswertung“ validiert, und führen eventuell zu einer Anpassung der Eingangsparameter (vgl. Abbildung 1).



Insbesondere bei Anwendung der ÖB-Ergebnisse im Rahmen von Marketinginstrumenten wie Umweltdeklarationen muss der Einfluss von Änderungen des Untersuchungsrahmens (z. B. Systemgrenzen, Untersuchungsphasen, Datenqualität) ebenso wie die Zweckmäßigkeit des festgelegten Systemnutzens¹, durch die Anwendung von beispielsweise Sensitivitätsanalysen (SA) validiert werden.

Eine Ökobilanz gliedert sich in vier Phasen: (1) Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens; (2) Aufstellung der Sachbilanz; (3) Berechnung der Wirkungsbilanz; kritische Bewertung und Beurteilung der Ergebnisse im Rahmen der (4) Auswertung.

Nach der Definition des Ziel- und Untersuchungsrahmens erfolgt die Aufstellung der Sachbilanz. Dabei müssen alle Prozesse im Lebenszyklus berücksichtigt werden. Im Allgemeinen wird zwischen einer cradle-to-grave und einer cradle-to-gate Betrachtung unterschieden. Ersteres berücksichtigt alle Prozesse einschließlich Nutzung und Entsorgung, bei Bauprodukten kann oftmals nur cradle-to-Gate bilanziert werden, weil der Untersuchungsgegenstand in

andere Produkte übergeht. In einer echten Kreislaufwirtschaft (circular economy) werden manchmal cradle-to-cradle Untersuchungen gemacht.

Wirkungsbilanzierung bedeutet, dass dem Produktsystem zuordenbare Entnahmen (Input) oder Eintragungen (Output) ins Ökosystem mittels Bewertungsschemata umweltschädlichen Wirkungen zugeordnet werden. Ein klassisches Beispiel hierfür ist der Einfluss von Kohlendioxid-Emissionen auf den menschengemachten Klimawandel. Der natürliche Treibhauseffekt bewirkt die Entstehung einer Atmosphärenschicht, welche die Sonnenstrahlung reflektiert und dadurch die Erde für Mensch & Tier bewohnbar macht. Hierbei ist ein natürlicher Kreislauf durch Aufnahme und Abgabe von Emissionen z. B. durch die Vegetation zu beobachten.

Übermäßige, durch den Menschen verursachte Emissionen bewirken eine Konzentration derselbigen in der Atmosphäre, wodurch zu viel radiative Strahlung zurückgeworfen wird. Dies bewirkt mittel- und langfristig eine Erwärmung der Atmosphäre, in der unter anderem mehr Wasser gespeichert werden kann, welches dann Wetterextreme auslöst. Die Wirkung der Emissionen wird anhand der Wirkung von CO₂ bewertet. Liegt wie bei Methan eine vierfache Strahlungsverstärkung vor, so bewirkt ein C₂H₄ Molekül ein vierfaches CO₂ Äquivalent. Deshalb erfolgt die Angabe des GWP (global warming potentials) immer in CO₂-eq.

Andere Wirkungskategorien sind Versauerung, durch SO₂-Emissionen (Acidification potential), Eutrophierung, also Überdüngung durch PO₄³⁻-Emissionen (eutrophication potential), Ozonbildung (NMVOC-eq), ADP (abiotisches Abbaupotential) als Maß für die Verwendung von nichterneuerbaren Ressourcen zur Energiegewinnung und der Wasserfußabdruck (water scarcity potential).

2.2 FUNKTIONELLE EINHEIT

Die funktionelle Einheit (fE) repräsentiert die Funktion eines Produktsystems, sie bildet den Referenzwert für die Umweltperformance und muss eindeutig bestimmbar sein. Zur Definition der funktionellen Einheit lassen sich einerseits Normen, Guidelines bzw. Fachbücher konsultieren, andererseits können verschiedene Ansätze aus der Literatur geprüft und ggf. weiterentwickelt werden.

¹ Repräsentiert durch die funktionelle Einheit.

Bezugnehmend auf die einschlägigen Normen, Guidelines bzw. andere Produktkategorieeregeln (vgl. z. B. [5, 6, 8, 9, 16, 17]) können für die funktionelle Einheit folgende Vorgaben dargestellt werden:

- beruht auf vorgesehenen Funktionen oder Leistungen des Produktes
- Einheit, Größe, Dauer und Qualitätsniveau der Leistung/ Funktion sollte definierbar sein
- als Vergleichseinheit verwendbar sein
- Was? Wieviel? Wie gut? Wie lange?
- Bezugsgröße, auf die die Stoffströme (Input/ Output) bezogen werden können
- Kann ggf. in Abhängig vom Adressaten variieren (intern/ extern)

Beispiele für fEs sind der Personenkilometer (z. B. bei Bussen), die Menge an bereitgestellter Energie (Energieerzeugung, wie Wind- oder Wasserkraftanlagen) oder die Menge an bereitgestellten Getränken (Getränkeverpackungsvergleich). Diese genannten fE werden konkretisiert für einen potentiellen Lebenszyklus. So wird z. B. bei Schienenfahrzeugen die fE „Personenkilometer“ analog der zulässigen Personenzahl nach EN 15663 kalkuliert und diese dann mit der konkreten Strecke, Auslastung, Energiebereitstellung untersetzt, um die gesamte fE zu ermitteln. Die Umweltbelastungen werden dann im Rahmen von EPDs für 1 fE angegeben.

2.3 PRODUKTUMWELTERKLÄRUNGEN (EPD)

Umweltlabel sind Instrumente zur Messung und Darstellung der Nachhaltigkeitsperformance von Produkten, ihre Erstellung erfolgt nach den Regeln der ISO 14020 Serie. [12] Sie sind ein Instrument der integrierten Produktpolitik, weil sie durch Push-Effekte den Markt für umweltfreundlichere Produkte stärken (sollen). Das hier dargestellt Label Typ III (Umweltprodukterklärung - EPD) beruht auf den Ergebnissen einer sogenannten Ökobilanz. (vgl. 2.1) Um dem Grundsatz der Vergleichbarkeit gerecht zu werden, sieht die Norm u.a. vor:

- Gründung von Programmbetreibern zum geregelten Management der Umweltprodukterklärungen und ihres Erstellungsprozesses
- Unabhängige Verifizierung der ermittelten Daten, bzgl. ihrer Normenkonsistenz (ISO 14040/44)
- Erstellung und gegenseitige Anerkennung von Produktkategorieeregeln, die die definierten Parameter für die Berechnung bereitstellen.

EPDs dienen in erster Linie dem Informationsaustausch zwischen anbietenden Wirtschaftsbetrieben und werden

derzeit häufig in der Bauindustrie angewendet. Dort werden sie teilweise in Bewertungsschemata integriert. [2]

2.4 STETIGFÖRDERER

Stetigförderer sind ortsfeste Maschinen die zweckgebunden dem Transport von Gütern (bzw. Personen) zwischen Maschinen oder Bearbeitungsprozessen dienen. In Produktions- oder Handelsbetrieben zählen sie somit zu den Arbeitsmitteln der innerbetrieblichen Fördertechnik, neben Fördern können auch Funktionen wie Verteilen, Sammeln, Sortieren oder Lagern in einem Stetigförderer integriert sein. [14]

Abgegrenzt zum Stetigförderer gibt es noch die sogenannten Unstetigförderer, wie z. B. Gabelstapler, die flexibler eher unregelmäßige, unstetige Transportprozesse realisieren.

Nachfolgende Untersuchungsergebnisse beziehen sich auf Gleitkettenförderer, deren Hauptelement eine Förderkette, z. B. Scharnierband-, Matten- oder Multiflexkette ist. Weiterhin müssen Bestandteile wie Gestell, Streckenprofil, Umlenkung und Antrieb genannt werden, je nach Anforderungsprofil und Förderlayout werden Bogenräder bzw. Gleitbögen implementiert. Die Gleitkette wird aus spritzgegossenen technischen Kunststoffen wie POM oder PBT gefertigt. Zur Reduktion der Reibungsverluste sind Gleitbahnen aus ultrahochmolekularem Polyethylen (PE-UHMW) auf das Streckenprofil aufgebracht. Kunststoffketten haben die Stahlketten abgelöst, sie besitzen diverse Vorteile, wie schmierungsfreier Betrieb, geringes Eigengewicht und kostengünstige Fertigung, allerdings treten auch verringerte Festigkeits- und Steifigkeitskennwert sowie temperatur- und altersbedingte Degradationserscheinungen auf.

2.5 SENSITIVITÄTSANALYSEN

Sensitivitätsanalysen gehören zu den Instrumenten der Unsicherheitsanalysen (uncertainty analysis) und dienen der Überprüfung des Einflusses von Änderungen der Inputdaten auf das Ergebnis. Damit können die Robustheit der Methode geprüft und Empfehlungen bzgl. der zu wählenden Parameter abgeleitet werden. Im Rahmen von Ökobilanzen sind mehrere Unsicherheitsquellen identifizierbar, diese betreffen z. B. epistemische (unvollständiger Wissensstand) oder stochastische Fehler (zufällige Fehler örtlicher oder zeitlicher Natur).

Durch die Berechnung und Darstellung des Empfindlichkeitsgrades (sensitivity ratio – SR) können sensitive Eingangsgrößen identifiziert werden, diese führen zu einer übermäßigen Änderung des Ergebnisses und müssen sorgfältig festgelegt werden. Nach Huijbregts ([15]) können insgesamt sechs Quellen der Unsicherheit identifiziert werden: Parameter, Modellierung, Auswahl, Zeit, Raum (geographisch) und Technologie - die meisten betreffen Parameterauswahl in der Sachbilanzphase. Bei der Festlegung

des Ziel- und Untersuchungsrahmens gehört die Wahl der funktionellen Einheit (fE) zu den Modellierungsunsicherheiten und sollte durch Szenarioanalysen überprüft werden.

3 KONZEPT DER PRODUKTKATEGORIE-REGEL

3.1 EINFÜHRUNG

Eine Zusammenstellung spezifischer Regeln, Anforderungen und Leitlinien um Typ III Umweltprodukterklärungen oder Fußabdruckkommunikationen, wie den Waterfootprint (WFP) bzw. den Carbonfootprint (CFP) für eine oder mehrere Produktkategorien zu erstellen - wird Produktkategorieregel (PCR) genannt. PCRs sind die Grundlage für Vergleichbarkeit und Konsistenz der genannten Dokumente. War ihre Erstellung zunächst in den spezifischen Normen ISO 14025, 14067 und 14046 geregelt, machten mangelnde Qualität und unterschiedliches Erfahrungsniveau die Herausgabe einer eigenen PCR Norm (ISO 14027) notwendig.

3.2 PCR FÜR STETIGFÖRDERER

Nach aktuellen Erkenntnissen existiert bisher keine PCR für die Kategorie „Stetigförderer“ bzw. „Continuous Conveyor“. In Anlehnung an die Vorgaben aus der PCR-Norm (vgl. [6]) und den allgemeinen Programmanweisungen (vgl. [8]) wird zurzeit ein entsprechender Vorschlag entwickelt. Vorbereitend sollten einerseits sämtliche Forschungsfelder, -quellen geprüft und andererseits eigene Ökobilanzergebnisse generiert werden, um entsprechende Ableitungen treffen zu können.

3.2.1 PRODUKTKATEGORIE STETIGFÖRDERER

Das Internationale EPD System (IES, environdec®) bedient sich eines von der UN bereitgestelltem Klassifizierungssystem (CPC-Code, vgl. [18]), um seine Produkte zu ordnen. Für jede festgelegte Produktkategorie gelten die gleichen Regeln bzgl. der Bilanzierung, dadurch ist jedoch nicht automatisch Vergleichbarkeit gegeben, wie am Beispiel der Schienenfahrzeuge (CPC 495 Rolling Stock) leicht erklärbar ist. Schienenfahrzeuge wie Straßenbahnen oder Regionalzüge haben die gleiche Funktion „Transport von Passagieren über eine bestimmte Strecke“ und können nach den gleichen Regeln bilanziert werden, die Ergebnisse sollten aber nur verglichen werden, wenn der Anwendungsbereich (z. B. Straßenbahnen untereinander) analog ist.

Die Klasse 4355 umfasst pneumatische und andere kontinuierlich arbeitende Hebewerke und Förderer für Güter oder Materialien. Abgrenzend dazu sind unter CPC 4353 Gabelstapler, Flurförderzeuge und Zugmaschinen subsumiert und unter 4354 Aufzüge, Hebebühnen, Fahrtreppen und Fahrsteige – insbesondere erstere arbeiten diskontinuierlich, was bedeutet, dass eine andere funktionelle Einheit definiert werden muss

Für die nachfolgende Untersuchung wird festgelegt, dass der CPC Code 4355 für die Produktkategorie „Stetigförderer – Chain Conveyor Systems“ verwendet werden wird. Um der auftretenden Vielfalt bei der technischen Ausführung gerecht zu werden, soll in die PCR ein Template integriert werden, welches verpflichtende technische darzustellende Parameter als Vorgabe für die EPD enthält.

3.3 FESTZULEGENDE PARAMETER

Für die Erstellung der PCR „Stetigförderer“ können verschiedene Vorlagen, Guidelines usw. verwendet werden. Neben der einschlägigen Norm 14027 (vgl [6]) müssen insbesondere die Vorgaben aus Annex A der Programmanleitungen von environdec® beachtet werden (vgl. [8]). Hierin werden die Grundlagen bzgl. der Anwendung der Ökobilanzierungsmethode dargelegt. Folgende Regeln werden aufgezählt:

- **Modellierungsansatz:** Verwendung beschreibender (attributional) Ökobilanzierung (nicht konsequenzorientierte, consequential ÖB²)
- **Deklarierte/ Funktionelle Einheit:** messbar, klar definiert, qualitativ & quantitativ darstellbar, usw.
- **Systemgrenzen:** legt fest, welche Prozesse berücksichtigt werden und welche Prozesse weggelassen werden können, weiterhin erfolgt eine Einteilung in LZ-Stadien
- **Anforderungen an Daten und Datenqualität:** Festlegung der Datentypen (spezifisch oder generisch) für die jeweiligen LZ-Stadien
- **Allokationsregeln:** Allokation bedeutet Verteilung/ Aufteilung von Umweltlasten auf Prozesse mit mehr als einem Output oder Input, insbesondere bei der Berücksichtigung von Recyclingprozessen wichtig.
- **Modellierung von EoL Szenarien:** sollten realistisch sein
- **Modellierung der Nutzung:** muss in PCR festgelegt werden und ist wichtig für die Vergleichbarkeit von EPDs

² Bei beschreibenden ÖBs werden Umweltbelastungen jeweils Anteilen zu Produkten oder Prozessen zugeordnet. Bei konsequenzorientierten, wird die Entscheidung für ein Produkt ökobilanziell bewertet. (vgl. [11])

Nachfolgend werden die Punkte „Funktionelle Einheit“ und „Systemgrenzen“ tiefergehend untersucht. Beide haben einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz und dadurch auch auf die Aussagekraft der EPD.

4 ÖKOBLANZIERUNG EINES BEISPIELFÖRDERERS

4.1 UNTERSUCHUNGSOBJEKT

An der Professur FTM (Förder- und Materialflusstechnik) der TU Chemnitz wird ein Praktikumsförderer (PF) für die Demonstration und Durchführung von Versuchen z. B. zur Ermittlung des Kettenzugkraftverlaufes oder für Funktions- und Verschleißtests eingesetzt. Abbildung 2 zeigt diesen Förderer. Er ist 6,75 m lang und ist mit einer horizontalen Gleitkurve ausgerüstet. Der Antrieb arbeitet mit einem Wirkungsgrad von ca. 0,5, der Reibwert zwischen Kette und Gleitschiene beträgt ca. 0,36.

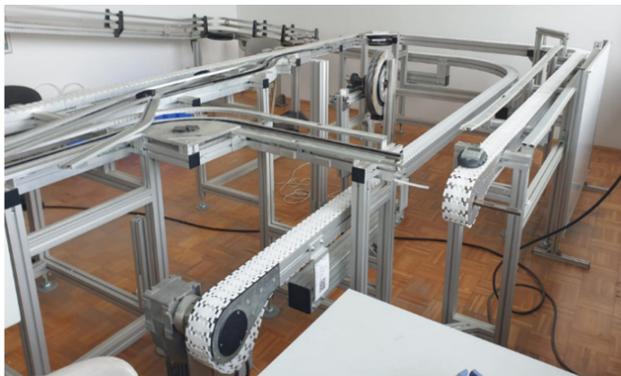


Abbildung 2 Praktikumsförderer

Das Ziel der Untersuchung ist die Festlegung und Validierung einer geeigneten funktionellen Einheit (fE) mit dem übergeordneten Ziel der Vergleichbarkeit, sowie die Bestimmung des Bilanzierungsrahmens durch Überprüfung der sogenannten Cut-Off-Regel.

4.2 SACH- UND WIRKUNGSBILANZ

Ein Ausschnitt des Lebenszyklus des Praktikumsförderers ist in Abbildung 3 dargestellt. Dabei wurden die Herstellungsschritte und Materialien aus allgemeinen Kenntnissen der Fertigungstechnik antizipiert. Die Mengen der Input- und Outputflüsse wurden mittels Messung (Wiegen, Zählen) ermittelt. Für die Nutzungsphase wurde ein Referenzeinsatzszenario festgelegt (Belastung $5 \frac{kg}{m}$) und mittels Messung der auftretenden Kräfte und angefallenen Leistungswerte die notwendigen Eingangswerte für die Nutzungsphase ermittelt.

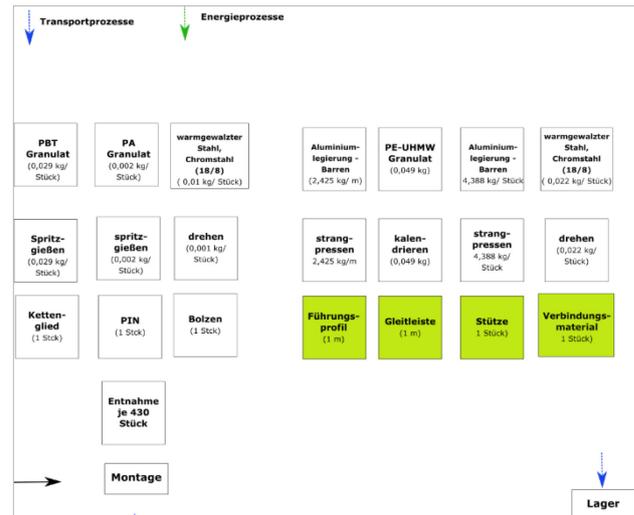


Abbildung 3 Lebenszyklus Praktikumsförderer (Ausschnitt)

Die Wirkungsbilanz wurde mit Hilfe der Software openLCA sowie der ecoInvent v3.7 (APOS³) Datenbank berechnet. Das internationale EPD-System verweist in seinen Programmanweisungen auf ihre Webseite, in der alle notwendigen zu bilanzierenden Wirkungskategorien aufgeführt sind. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Bilanzierung des Praktikumsförderers differenziert nach den Bauteilen bzw. Lebenszyklusphasen dargestellt.

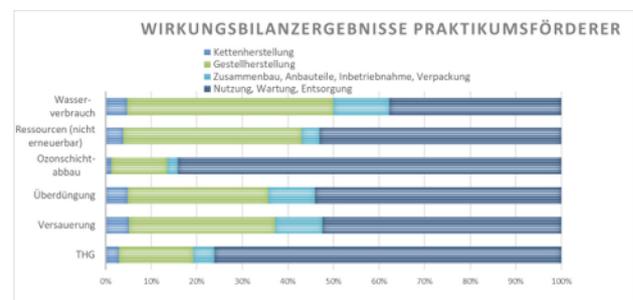


Abbildung 4 Wirkungsbilanzergebnisse, Praktikumsförderer

In fast allen Kategorien erweist sich die Nutzungsphase als dominant. Eine Bewertung der berechneten Ergebnisse kann beispielsweise aufgrund eines Vergleiches erfolgen. Der hier bilanzierte Stetigförderer erzeugt bei einer Belastung von $5 \frac{kg}{m}$ Förderstrecke und einer Geschwindigkeit von $11,84 \frac{m}{min}$, einen Fördergutstrom in Höhe von $71,90 \frac{kg}{min}$. Dabei werden 132,44 Watt Motorwirkleistung abgerufen und über 5 Jahre ca. 3.867 kWh Strom verbraucht. Es entstehen 3,925 t CO₂-eq für Materialgewinnung, Bauteilherstellung, Montage, Inbetriebnahme, Betrieb, Wartung und Entsorgung.

³ Allocation at Point of Substitution – empfohlene Datenbank für Allokationsprozesse, vgl. [7].

Als Referenz kann der durchschnittliche Verbrauch eines Deutschen in Höhe von 8,4 t CO₂-eq pro Jahr genannt werden. In diesem Zusammenhang wirken die 3,925 t wenig, jedoch müssten die Emissionen zur Aufhaltung des Klimawandels auf 0,6 t CO₂-eq pro Kopf & Jahr gesenkt werden, d. h. eine durchschnittliche Reduktion um 1400%.⁴

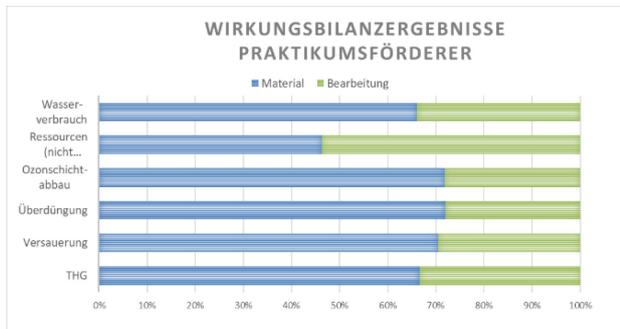


Abbildung 5 Wirkungsbilanzergebnisse PF, nach Material, Bearbeitung

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse einer ausschließlichen Cradle-to-Gate Betrachtung zwischen Material und Verarbeitung differenziert dargestellt. Dabei fällt eindeutig die Dominanz der Materialbereitstellung auf, d. h. eine Optimierung derselbigen durch Einsatz von recycelten Materialien verbessert die Umweltperformance nachhaltig.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass neben einer Verringerung der Umweltwirkungen in der Materialbereitstellungsphase, die Optimierung und Verlängerung der Nutzungsphase den größten Einfluss auf die Umweltwirkung haben.

5 SENSITIVITÄTS- & SZENARIOANALYSEN IM RAHMEN DER PCR-ENTWICKLUNG

5.1 STAND DER WISSENSCHAFT

Sensitivitäts- und Szenarioanalysen gehören zu den Methoden der Auswertungsphase einer Ökobilanz oder Sachbilanz-Studie, mit dem Ziel der Bewertung der Zweckmäßigkeit der Festlegung des Systemnutzens durch die funktionelle Einheit oder der definierten Systemgrenzen. Sensitivitätsanalysen ermöglichen eine Aussage inwieweit Änderungen in den Inputdaten sich auf die Höhe der Indikatorergebnisse auswirken. Durch die iterative Konzeption der Ökobilanzierung können die Ergebnisse Rückwirkungen auf den gewählten Untersuchungsrahmen oder die Ermittlung der Sachbilanzdaten haben. (vgl. [11])

5.2 SYSTEMGRENZEN & DATENQUALITÄT

Die Festlegung der Systemgrenzen im Rahmen der Durchführung einer Ökobilanz wirkt sich entscheidend auf ihre Ergebnisse aus. Hierbei kann einerseits zwischen den Bestandteilen des Produktsystems an sich, als auch zwischen den Grenzen des Produktsystems bzgl. geographischer, zeitlicher und technologischer Geltungsbereiche unterschieden werden. In den Programmanleitungen des IES wurde festgelegt, dass alle umweltrelevanten Prozesse berücksichtigt werden müssen, mindestens in einem Umfang von 99% von Energieeinsatz, Produktmasse und Umwelteinfluss.

Bei der Entwicklung der PCR muss diese Angabe konkretisiert werden, d. h. es müssen für die definierten Lebenszyklusstadien alle zu berücksichtigenden bzw. wegzulassenden Prozesse dargestellt werden. Dabei wird seitens des IES der sogenannte Wiege-zur-Bahre (cradle-to-grave) Ansatz verfolgt, d. h. der Lebenszyklus beginnt mit der Erzeugung der Materialien und endet mit ihrer Entsorgung. Die Nutzungsphase kann nur weggelassen werden, wenn das Produkt in andere Produkte übergeht (cradle-to-gate, i. A. bei Baumaterialien) oder die Nutzung nicht vorhersehbar ist.

Lebenszyklusprozesse im Rahmen von PCR/ EPD-Erstellung werden im Allgemeinen auf drei Phasen aufgeteilt: Upstream, Core und Downstream. Inhalte der Phasen sind z. B. Entnahme und Verarbeitung von Rohmaterialien im Upstream; Produktion, Herstellung und Zusammenbau im Core sowie Bereitstellung von Energie und anderen Hilfsstoffen im Downstream.

Diese Differenzierung mag etwas unklar erscheinen, sie hat aber einen großen Einfluss auf die anzuwendende Datenqualität, d. h. ob spezifische Daten (also primäre bzw. standortspezifische) verwendet werden müssen oder durchschnittliche bzw. abgeschätzte generische Daten verwendet werden können. Ersteres gilt für alle Prozesse innerhalb des Cores und ist entsprechend aufwendig. Leichter zu ermittelnde, generische Daten dürfen z. B. für Upstream Prozesse verwendet werden. Neben der Beurteilung der Datenqualität ist die Frage welche Prozesse berücksichtigt werden müssen, relevant für die Aufstellung des Bilanzierungsrahmens.

5.3 BEURTEILUNG DER CUT-OFF-REGEL DURCH SA

Das IES definiert eine sog. Cut-off Regel bei 1% und zwar für die Parameter: Umwelteinfluss, Masse und Energienutzung.

⁴ Quelle: myclimate.org

Ausgehend von der Gesamtmasse des Praktikumsförderers konnten folgende Bauteile als relevant für die 1% Regel identifiziert werden:

- PIN⁵ 0,73% Anteil an Gesamtmasse
- Kettenrad 0,57% Anteil an der Gesamtmasse
- Verpackungsmaterial (Folie)⁶ 0,43% Anteil an der Gesamtmasse

Da die Summe aller drei Parameter mehr als 1% beträgt, soll mittels einer Sensitivitätsprüfung die Cut-Off-Regel verifiziert werden. Für die Anteile an den Wirkungskategorien Treibhauseffekt (GWP), Versauerung (AP), Überdüngung (EP), Ozonabbau (POCP), Ressourcenverbrauch (ADP) und Wasserknappheit (Scarcity) konnten folgende Anteile berechnet werden:

Tabelle 1 Anteile am Gesamtwirkungsindikator

Bauteil	PIN	Kettenrad	Verpackungsfolie
GWP	0,26%	0,21%	0,037%
AP	0,34%	0,47%	0,051%
EP	0,69%	0,29%	0,027%
ODP	0,17%	0,13%	0,006%
ADP	0,03%	0,02%	0,09%
Water-Scarcity	0,12%	0,10%	0,16%

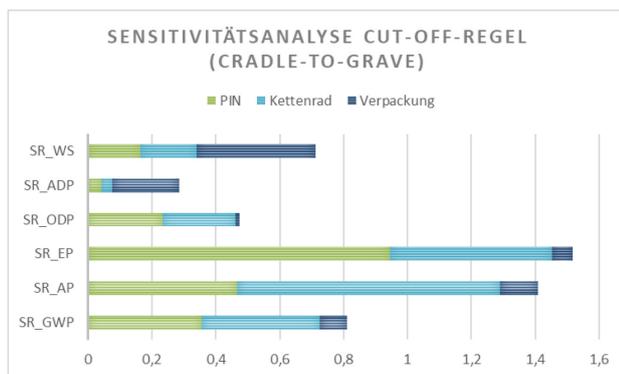


Abbildung 6 Ergebnisse SA Cradle-to-Grave

Da grundsätzlich die Verwendung der Cut-Off Regel vermieden sollte, weil möglichst alle relevanten, identifizierbaren, verfügbaren Input-Daten berücksichtigt werden müssen, wird mittels der SA gezeigt, dass die Einbeziehung der Daten für den PIN und das Kettenrad notwendig sind.

Die Berücksichtigung des Verpackungsmaterials ist diskutabel.

Sensitivitätsanalysen bestimmen den Einfluss der Änderung eines Inputparameters auf die Änderung der Outputgrößen. Im untersuchten Fall wird die Anwendung der 1%-Cut-Off Regel anhand der Ergebnisse der Wirkungsanalyse geprüft. Dazu wird das sog. Sensitivitätsverhältnis (SR-sensitivity ratio) ermittelt, nach [3] gilt

$$SR_i = \frac{\frac{\Delta \text{Ergebnis}_i}{\text{Ergebnis}_i}}{\frac{\Delta \text{Parameter}_i}{\text{Parameter}_i}} \quad (1)$$

Wenn die SR größer als Eins ist, dann kann von einer hohen Sensitivität ausgegangen werden, d. h. der Einfluss des Parameters ist zu groß, um ihn wegzulassen. Mit Hilfe der obigen Formel wurden die SRs für die einzelnen Wirkungskategorien und die identifizierten Bauteile ermittelt. Dabei ergaben sich die in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse.

In Summe überschreiten alle drei Bauteile die 1%-Cut-Off-Regel in den Wirkungskategorien Versauerung (AP) und Eutrophierung (EP), d. h. sie dürften auf keinen Fall insgesamt weggelassen werden. Außer beim Wasserbedarf hat die Verpackungsfolie die geringsten Sensitivitätsratios, so dass hier die Anwendung der 1%-Regel möglicherweise in Frage kommt.

Bauteil	PIN	Kettenrad	Verpackungsfolie
GWP	1,11%	0,87%	0,16%
AP	0,72%	0,99%	0,11%
EP	1,5%	0,63%	0,06%
ODP	1,06%	0,83%	0,04%
ADP	0,06%	0,05%	0,18%
Water-Scarcity	0,19%	0,15%	0,24%

Tabelle 2 Anteile Gesamtwirkungsindikator (nur cradle-to-gate)

Deshalb wird zusätzlich noch die SR ausschließlich für die Herstellungsphase (cradle-to-gate) berechnet, also die durch die Nutzung entstandenen Emissionen werden nicht berücksichtigt. Dabei ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Anteile. Die Sensitivitätsverhältnisse sind in Abbildung 7 dargestellt:

⁵ Verbindungselement zwischen Bolzen und Kettenglied im Kettengelenk.

⁶ Es wurde eine Menge von 0,5 kg PE-Folie angenommen, die zur Verpackung des Förderers verwendet wird.

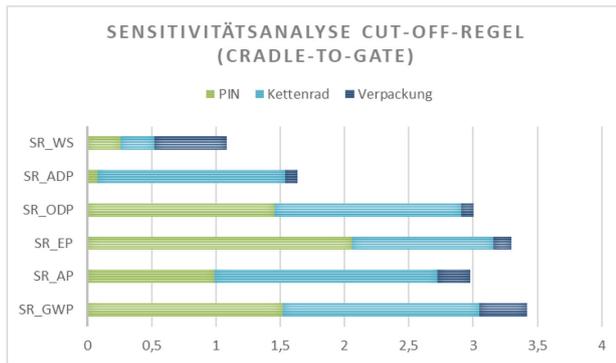


Abbildung 7 Ergebnisse SA cradle-to-gate

In allen untersuchten Wirkungskategorien überschreiten die berechneten SR die Marke von Eins. Das Verpackungsmaterial an sich liegt aber immer deutlich unter Eins und qualifiziert sich somit für die Anwendung der Cut-Off-Regel, d. h. es könnte weggelassen werden.

5.4 ÜBERPRÜFUNG DER DATENQUALITÄT MITTELS SA

5.4.1 MENGE / MASSE DES VERPACKUNGSMATERIALS

Die oben durchgeführte Analyse sollte bezüglich der Datenqualität noch weiter differenziert werden. Qualitätsanforderungen an Daten umfassen im Rahmen einer Ökobilanz die Beantwortung folgender Fragen:

- Genauigkeit
- Vollständigkeit
- Repräsentativität
- Konsistenz
- Nachvollziehbarkeit

Im oben beschriebenen Fall der „Weglassbarkeit“ der Daten für die Verpackung sollten folgende Unsicherheiten durch Sensitivitätsanalyse überprüft werden:

- Menge des Verpackungsmaterials
- Art des Verpackungsmaterials
- Entsorgung des Verpackungsmaterials

Die Ökobilanz des Praktikumsförderers wurde zunächst mit fiktiven Werten für die Menge an Verpackungsmaterial gerechnet. Die Masse/ Menge ist der sog. Parameter m , mit m_{ini} =Ausgangsparameter (ursprüngliche Masse) und Δm die Änderung desselben.

Für die Cradle-to-Gate Untersuchung konnten bzgl. des Parameters Masse folgende Ergebnisse ermittelt werden. Formel (1) mit V_E (Ergebnisverhältnis) und V_P (Parameterverhältnis) kann dementsprechend umgeformt werden:

$$SR = \frac{V_E}{V_P} = \frac{\frac{\Delta m}{m_{ini}}}{\frac{\Delta WI}{WI_{ini}}} \quad (2)$$

Aus der ecoInvent Datenbank wird ein fester Wert für das Wirkungsbilanzergebnis WI_i pro kg Material entnommen werden. Dieser Faktor wird als WIF bezeichnet, es folgt:

$$\Delta WI = WIF \cdot \Delta m \quad (3)$$

Wird Formel 3 in Formel 2, eingesetzt, kann Δm gekürzt werden und es ergibt sich beispielsweise für den Wirkungsindikator Global Warming folgende Formel für die Berechnung der Sensitivitätsratio (SR_{GWP}):

$$SR_{GWP} = \frac{\Delta GWP}{GWP_{ini}} \cdot m_{ini} \quad (4)$$

Die Sensitivitätsratio für den Fluss (packaging film production – PFP) für die Wirkungskategorie GWP ermittelt sich nach (4) wie folgt:

$$SR_{GWP}^{PFP} = \frac{GWP_{PFP}}{GWP_{ini}} \cdot m_{ini} = \frac{2,905}{929,15} \cdot 115,8 = 0,36$$

Dabei ist GWP_{PFP} der spezifische Wert der CO₂-eq für die Bereitstellung von 1 kg Verpackungsmaterial und GWP_{ini} das ursprüngliche Ergebnis der gesamten Bilanzierung. Mit Hilfe des Ergebnisverhältnisses $\frac{GWP_{PFP}}{GWP_{ini}}$ lässt sich nun die Inputgrenze des Verpackungsmaterials bestimmen. Wenn mehr als 3,12 kg Verpackungsmaterial benötigt würden, wird die 1% Cut-Off-Regel überschritten und das Material muss berücksichtigt werden.

5.4.2 ART/ FLUSS DES VERPACKUNGSMATERIALS

Für die Folie wurde der Fluss „packaging film production, low density polyethylene | APOS,U“ verwendet. Dieser beinhaltet die Herstellung von PE-Folie durch Extrusion und nimmt hierfür generische Werte aus einem europäischen Produktionsmix. Solche generischen Datensätze werden durch die verwendete ecoInvent Datenbank (Version 3.7) bereitgestellt und bestehen aus verknüpften Input-/ Output-Tabellen. Bei der Verwendung der Daten muss berücksichtigt werden, dass sie nicht fix sind, sondern eine Verteilungsfunktion für ihre Beschreibung verwendet werden kann. Die zu berücksichtigenden Unsicherheiten beruhen auf folgende Informationen: Art des Stoffflusses, Verlässlichkeit der Informationsquelle, geographischer Geltungsbereich sowie technologischer und zeitlicher Geltungsbereich.

Zur Bewertung der Unsicherheit wurden in den letzten Jahren Schemata entwickelt, die ausgehend von einer Punktvorgabe in den oben genannten Kategorien eine Gesamtunsicherheit berechnen, mit deren Hilfe die Unsicherheit des Ergebnisses abgeschätzt werden kann. Hierzu wird auf die sog. Monte-Carlo-Analyse zurückgegriffen. Für die oben genannten Kriterien wurden Abstufungen entwickelt und entsprechend der häufig verwendeten Pedigree Matrix finden sich für den Fluss „packaging film production, low density polyethylene | APOS,U“(pfp) die Werte in Tabelle 3 in der ecoInvent DB. Aus den gezeigten Werten lässt sich die Gesamtunsicherheit zu 1,568 berechnen, die anschließende Monte-Carlo-Analyse führt zu folgenden Ergebnissen:

- Mittelwert 3,112 kg CO₂-eq/kg pfp;
- 5%-Intervall 2,33kg CO₂-eq/kg pfp und
- 95% Intervall 3,413 kg CO₂-eq/kg pfp.

Rechnet man mit dem 95% Intervall nochmals das maximale Sensitivitätsratio aus, so ergibt sich ein Wert $SR_{GWP}^{PFP} = 0,38$. Dies ist nur eine geringfügige Abweichung/ Streuung und muss somit nicht weiter berücksichtigt werden.

5.4.3 ENTSORGUNG DES VERPACKUNGSMATERIALS

Neben der Herstellung der Kunststoffolie fürs Verpackungsmaterial muss exakterweise auch die Entsorgung berücksichtigt werden. In der ecoInvent Datenbank finden sich auch Abfallprozesse, wie z. B. „Waste incineration of plastics (unspecified) fraction in municipal solid waste (MSW), at plant, average European waste-to-energy plant, without collection, transport and pre-treatment“ oder Waste incineration of plastics (PE, PP, PS, PB), at plant, average European waste-to-energy plant, without collection, transport and pre-treatment“ für die jeweils die Wirkungsindikatoren ermittelt werden können. In Tabelle 4 werden diese jeweils gegenübergestellt.

Da der zu verbrennende Kunststoff negativ als Output in die Bilanztabellen geht, sind die Ergebnisse außer für das Treibhauspotential ebenso negativ. Das THG ist positiv, weil durch die Verbrennung von Kunststoff Treibstoff als Energielieferant gespart werden kann und damit wiederum CO₂-Emissionen reduziert werden.

Tabelle 3: Pedigree Matrix für Kunststoffolie (vgl. [1])

Reliability	Verified data based on measurements	Verified data partly based on measurements	Non-verified data partly based on qualified estimate	Qualified estimate (e.g. by industrial expert)	Non-qualified estimates
Completeness	Representative data from all sites relevant for the market considered, over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from >50% of the sites relevant for the market considered, over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from only some sites (<<50%) relevant for the market considered or >50% of sites but from shorter periods	Representative data from only one site relevant for the market considers or some sites but from shorter periods	Representativeness unknown or data from a small number of sites and from shorter periods
Temporal	Less than 3 years of the difference to the time period of the data set	Less than 6 years of difference to the time period of the data set	Less than 10 years of difference to the time period of the data set	Less than 15 years of difference to the time period of the data set	Age of data unknown or more than 15 years of difference to the time period of the data set
Geographical	Data from area under study	Average data from larger area in which area under study is included	Data from area with similar production conditions	Data from area with slightly similar production conditions	Data from unknown or distinctly different area
Further	Data from enterprises, processes and materials under study	Data from processes and materials under study but from different enterprises	Data from processes and materials under study but from different technology	Data on related processes or materials	Data on related processes on laboratory scale or from different technology

Tabelle 4: Wirkungsindiktorenergebnisse Kunststoffverbrennung

Wirkungskategorie	Kunststoffverbrennung unspezifisch	Kunststoffverbrennung (PE, PP, PS, PB)
THG [kg CO ₂ -eq]	0,68299	0,87492
AP [kg SO ₂ -eq]	-0,00833	-0,01270
EP [kg PO ₄ ---eq]	-0,00031	-0,00053
POCP [kg NMVOC]	0,00297	-0,00492
ODP [kg CFC-eq]	-1,42824E-7	--2,0947E-7
ADP (fossil fuel) [MJ]	0	0
Water scarcity [m ³]	0,15087	0,15971

5.5 FUNKTIONELLE EINHEIT FÜR STETIGFÖRDERER

5.5.1 STAND DER WISSENSCHAFT

Durch Literaturrecherchen konnten zwei unterschiedliche Ansätze bei der bisherigen im weitesten Sinne ökologischen Bewertung von Stetigförderern identifiziert werden. Lottersberger hat in seiner Dissertation die Entwicklung und Bewertung energieeffizienter Materialflusstechnik untersucht (vgl. [10]), dabei hat er eine Energieeffizienz-kennzahl EE eingeführt, die sich als Energiebedarf pro Zyklus versus dem Logistischen Ertrag W_{L2} berechnet. Dieser ist definiert als Produkt aus gesamter transportierter Masse und Länge des Förderers:

$$W_{L2} = M_{ges} \cdot L_F \quad (5)$$

Habenicht erforschte im Rahmen seines Dissertationsvorhabens den Energiebedarf einzelner Elemente von Stückgutförderern und definiert hierfür den Begriff der Systemlast. Diese umfasst sämtliche Quelle-Senke-Beziehungen und bestimmt die Höhe der elektrischen Leistung. Zwischen Quelle und Senke müssen

- ein topologisches Profil überwinden,
- ein Materialstrom erzeugt sowie
- Totlasten bzw. Verlustleistungen kompensiert

werden. Ziel von Lottersberger war die Ermittlung einer Kennzahl zur Bestimmung der Energieeffizienz, dabei konzentrierte er sich auf einen bestimmten Zeitpunkt, an dem er dem gemessenen Energieverbrauch den aktuellen Ertrag gegenüberstellte. Habenicht setzte den Fokus auf die Bewertung des Gesamtsystems und berücksichtigt deshalb sämtliche deterministische Komponenten, wie z. B. Förderrichtung, Neigungswinkel, Anzahl Pufferplätze usw.

5.6 WIRKUNGSBILANZERGEBNISSE VS. FUNKTIONELLE EINHEIT

Die fE von Stetigförderern muss ihre Leistung repräsentieren, diese ist die Bereitstellung eines konstanten, stetigen Transportstroms von Gütern einer gewissen Größe/ Gewicht/ Abmessung/ Menge über ein festgelegtes Layout, in einer bestimmten Qualität (Geschwindigkeit, Schutz) von einer Quelle zu einer Senke.

Ausgehend von Vorgaben aus der Theorie der Ökobilanzierung muss die Vergleichbarkeit und die Bereitstellung einer konkreten Berechnungsvorschrift im Vordergrund der Untersuchungen stehen. Vergleichbarkeit bedeutet, dass verschiedene Fördererprinzipien/ -mechanismen/ Optimierungen, die grundsätzlich für die gleiche Förderaufgabe geeignet sind, in ihrer Umweltperformance auf Basis der fE vergleichbar sind.

Als ein erster Ansatz wird die funktionelle Einheit (fE0) als Produkt der Summe des transportierten Gutes

(Masse oder Anzahl) mit der Summe der zurückgelegten Strecke definiert. Es gilt

$$fE0_{Masse} = \sum_{transp. Masse} \cdot \sum_{zurückgel. Strecke}$$

oder

$$fE0_{Stück} = \sum_{transp. Stückzahl} \cdot \sum_{zurückgel. Strecke}$$

Konkretisiert berechnet sich die funktionelle Einheit nach

$$fE0_{Masse} = I_m \cdot T \cdot L \quad (6)$$

mit der Nutzungsdauer T, der Länge L der Förderstrecke und dem Massenstrom I_m in $[\frac{kg}{m}]$. Der Massenstrom lässt sich mittels der Berechnungsgrundlagen der Norm 22200 (vgl. [4]) nach folgender Formel berechnen:

$$I_m = v_K \cdot q_G \quad (7)$$

Mit v_K (Kettengeschwindigkeit in $[\frac{m}{min}]$) und spezifischem Gutgewicht q_G in $[\frac{kg}{m}]$ ergibt sich die fE0 zu:

$$fE0_{Masse} = v_K \cdot q_G \cdot T \cdot L \quad (8)$$

mit T als dem Produkt aus Lebensdauer (LD in Jahren), täglicher Arbeitsdauer (AD) und Arbeitstagen pro Jahr (AT):

$$T = LD \cdot AD \cdot AT \quad (9)$$

Die hier dargestellte funktionelle Einheit wird nun als Nenner eingesetzt, um die spezifischen Umweltwirkungen zu ermitteln. Im Anschluss daran sollen verschiedene Szenarien bzgl. der Änderung der absoluten bzw. spezifischen Umweltwirkung eine Aussage darüber ermöglichen, ob die gewählte fE0 geeignet ist.

Aus den oben dargestellten Ergebnissen der Wirkungsbilanz des Praktikumsförderers lassen sich mit der Materialbereitstellung und der Nutzungsphase zwei Hauptoptimierungsfelder identifizieren. Daraus ergibt sich für die Umweltwirkung

$$WIG_i, \text{ mit } i \in \{GWP, AP, EP, ODP, ADP, WS\} \quad (10)$$

folgende Formel:

$$WIG_i = WIH_i + WIN_i \quad (11)$$

Idealisiert dargestellt setzt sich also die gesamte spezifische Umweltwirkung WIG_i zusammen aus einem Anteil für die Materialbereitstellung bzw. Herstellung WIH_i und einem Anteil für die Nutzung (inkl. Wartung) WIN_i .

5.6.1 MATERIALBEREITSTELLUNG/HERSTELLUNG

Materialbereitstellung und -verarbeitung erfolgt im Upstream und ist teilweise proportional zu dem physischen Objekt Förderer. Dabei ist der Anteil für die Herstellung der Kette und des Gestells linear abhängig von der zu überwindenden Strecke bzw. der Länge des Förderers. Ein konstanter Faktor für Zusammenbau und Anbauteile (wie Motor und Getriebe) ist hingegen unabhängig von der Kettenlänge. Unter dieser Annahme gilt für den Wirkungsindikator der Herstellung

$$WIH_i = f(L) + WIHK_i \quad (12)$$

$$WIH_i = WIHF_i \cdot L + WIHK_i \quad (13)$$

$$WIHF_i = \text{konstant}$$

In der EPD erfolgt die Darstellung der Wirkungsbilanzergebnisse im Verhältnis zur funktionellen Einheit. Dabei wird das Ergebnis aus Gleichung (12) durch das Ergebnis aus Gleichung (8) dividiert, dabei kürzt sich die Fördererlänge L aus dem ersten Term heraus. Das Ergebnis wird nachfolgend durch den Index „spez“ gekennzeichnet. Je länger die Kette ist umso stärker ist der längenabhängige Anteil.

Die lineare Beziehung zwischen Fördererlänge und Umweltwirkung der Herstellung lässt sich plausibel mit der Wirklichkeit validieren. Ein längerer Förderer erfordert einen höheren Aufwand und erzeugt somit höhere Umweltwirkung. Weil aber gleichermaßen auch mehr Leistung/Funktion verfügbar ist, bleibt die WIG_{i_spez} (also pro funktionelle Einheit $fE0$) gleich. Wenn dementsprechend Verbesserungen in der Herstellungsphase z. B. durch den Einsatz von „umweltwirkungsärmeren“ Recyclingkunststoffen vorgenommen werden, so sind diese durch Reduktion der WIG_{i_spez} eindeutig nachweisbar.

5.6.2 NUTZUNGSPHASE

Für die Nutzungsphase lässt sich sowohl der absolute Umweltwirkungskennwert WIN_i als auch der spezifische WIN_{i_spez} berechnen. Je länger der Förderer benutzt wird, desto stärker wird sein Einfluss bezogen auf das Gesamtumweltwirkungsergebnis WIG . Dieser Umweltwirkungskennwert wird einerseits durch den Energieverbrauch und andererseits durch Wartungsprozesse (Fahrten, Material) erzeugt.

Der Fokus liegt zunächst auf dem Energieverbrauch EV . Dieser ist abhängig vom zu erzeugenden Gutstrom \dot{m} und wird beeinflusst durch physikalische Wirkprinzipien wie Reibung oder elektrischem Wirkungsgrad:

$$WIN_i = f(\dot{m}, EV) \quad (14)$$

Diese Abhängigkeit ist nicht linear, sondern hängt von diversen Einflussgrößen ab. Nachfolgende Betrachtungen wurden an dem Modell eines vereinfachten Referenzförderers⁷ vorgenommen. Dieser „Basisfall“ ist 5 m lang (Kettenlänge 10 m), das Eigengewicht der Ketten m_K beträgt $1 \frac{kg}{m}$, das spezifische Gutgewicht $m_G = 5 \frac{kg}{m}$, der Reibkoeffizient μ ist 0,4, es sind keine Kurven und kein Anstieg im Layout vorgesehen. Die maximale Umfangskraft kann wie folgt berechnet werden (vgl. [13]):

$$F_{\max} = L \cdot (2 \cdot q_K + q_G) \cdot g \cdot \mu \cdot g \quad (15)$$

Dieser Term resultiert aus der Anpassung der Formel für die Reibkraft entlang einer geraden Strecke ohne Steigung. Die allgemeine Formel für die mechanische Leistung ist $P = F \cdot v$, daraus ergibt sich nach Einsetzen der Gleichung (15), der Übersetzung \ddot{u} und dem Antriebswirkungsgrad η für die effektive Motorwirkleistung

$$P_{\text{eff}} = \frac{\pi \cdot d_A \cdot n \cdot L \cdot g \cdot \mu \cdot (2q_K + q_G)}{\ddot{u} \cdot \eta} \quad (16)$$

Für die Ermittlung des Gesamtverbrauchs EV_{ges} [kWh] muss die Gleichung noch mit der Gesamtbetriebsdauer T multipliziert werden:

$$EV_{\text{ges}} = \frac{\pi \cdot d_A \cdot n \cdot L \cdot g \cdot \mu \cdot (2q_K + q_G)}{\ddot{u} \cdot \eta} \cdot T \quad (17)$$

Der absolute Umweltwirkungskennwert für das Treibhausgaspotential $WINGWP$ wird mittels des GWP_{spez} pro Kilowattstunde in Höhe von 0,7145 kg CO₂-eq/kWh berechnet plus einen absoluten Anteil für die Wartung. Kombiniert man die Formeln (17) und (8), so ergibt sich für die spezifische Umweltwirkung der Nutzungsphase $WIN_{\text{spez_GWP}}$

$$WIN_{\text{spez_GWP}}^{fE0} = \frac{EV_{\text{ges}}}{fE0} \cdot GWP_{\text{spez}} + \frac{WINK_i}{fE0} \quad (18)$$

Durch Kürzung von T , L und v reduziert sich die obige Gleichung zu

$$WIN_{\text{spez_GWP}}^{fE0} = \frac{g \cdot \mu \cdot (2 \cdot q_K + q_G)}{\eta \cdot q_G} \cdot GWP_{\text{spez}} + \frac{WINK_i}{fE0} \quad (19)$$

Diese Größe ist von der Förderstrecke unabhängig, sie wird nur vom Reibkoeffizient, der Ketteneigenmasse, dem Gutgewicht und dem Wirkungsgrad η bestimmt.

⁷ Mit den Inputdaten des Praktikumsförderers

5.7 ERGEBNISSE FÜR REFERENZFÖRDERER

Die Formeln (6) bis (19) werden nun für den oben dargestellten Referenzförderer ausgewertet. Die Eingangsparameter der Nutzungsphase sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Eingangsparameter Referenzförderer

Teilkreisdurchmesser Antriebsritzel d_A	0,13 m
Förderstrecke L	5 m
spezifisches Kettengewicht q_K	$1 \frac{kg}{m}$
spezifisches Gutgewicht q_G	$5 \frac{kg}{m}$
Reibkoeffizient μ	0,4
Antriebswirkungsgrad η	0,435
Nenn Drehzahl n	$1.400 \frac{1}{min}$
Lebensdauer LD	5 Jahre
tägliche Arbeitsdauer (AD)	16 h
jährliche Arbeitstage (AT)	365 Tage

Daraus berechnen sich die in Tabelle 6 dargestellten Größen für Umfangskraft, Motorwirkleistung, Gesamtverbrauch und funktionelle Einheit. Wie oben dargestellt, werden mit einer Szenario-Analyse verschiedene Szenarien berechnet und bewertet. Im vorliegenden Fall steht die Verwendung der $fE0$ als Vergleichseinheit im Rahmen von Produktumwelterklärungen im Vordergrund.

Tabelle 6: Ergebnisse Referenzförderer

Größe	Ergebnis	Formel
Umfangskraft F_U	137,34 N	(15)
Motorwirkleistung P_{eff}	62,3 W	(16)
Gesamtverbrauch EV_{ges}	1.819,59 kWh	(17)
Fördergutstrom I_m	$59,21 \frac{kg}{min}$	(7)
Funktionelle Einheit $fE0$	518,69 t · km	(8)

5.7.1 HERSTELLUNGSPHASE DES REFERENZFÖRDERERS

Der Referenzförderer besteht aus einer Kunststoffgleitkette mit Gliedern aus PBT⁸, Gleitschienen aus PE-UHMW⁹ und einem Gestell aus Aluminiumprofilen.

Aus den Ergebnissen der Ökobilanz des Praktikumsförderers konnten folgende Werte für die Herstellungsphase abgeleitet werden:

- 0,37 kg CO₂-eq/ Stück (Kettenglied, inkl. PIN und Bolzen) → $WIHF_{GWP}$
- 114,70 kg CO₂-eq/ m (Gestellkonstruktion) → $WIHF_{GWP}$
- 165 kg CO₂-eq für Zusammenbau und Montage → $WIHK_{GWP}$
- 0,7145 kg CO₂-eq/ kWh in der Nutzungsphase
- 129,7 kg CO₂-eq pauschal für die Wartung → $WIHK_{GWP}$

Wie in Gleichung (12) hergeleitet, sind die Umweltbilanzergebnisse für die Herstellung sowohl abhängig von der Länge des Förderers und bestehen aus einem unabhängigen Anteil. Deshalb wurde zunächst die Größe Förderstrecke (L) um jeweils 10% erhöht. In Abbildung 8 ist das Ergebnis grafisch dargestellt. Der durch Trendlinienbestimmung berechnete Anstieg in Höhe von 68,358 stellt den oben genannten Faktor $WIHF_{GWP}$ dar.

Als nächstes wird der spezifische $WIH_{spez_GWP}^{fE0}$ durch Teilung durch die funktionelle Einheit $fE0$ ermittelt. Das Ergebnis wird repräsentiert durch die blaue Kurve. Diese ist leichtfallend, weil mit Erhöhung der funktionellen Einheit der Einfluss des konstanten Anteils von Zusammenbau und Montage abnimmt.

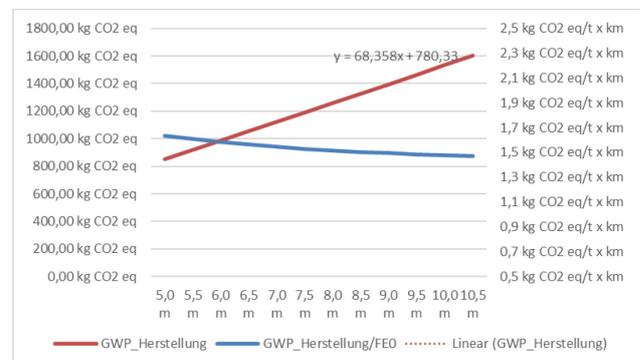


Abbildung 8 Beziehung WIH_{GWP} und Förderstrecke

5.7.2 NUTZUNGSPHASE DES REFERENZFÖRDERERS

Auf die Ergebnisse der Nutzungsphase wirken die oben genannten Parameter Reibung, Wirkungsgrad, Steigung, Lebensdauer, Streckenlänge, Drehzahl (resp. Ketten geschwindigkeit) und Gutgewicht. Deshalb wurde im Rahmen einer Szenarioanalyse ihr Einfluss validiert. Die

⁸ Polybutylenterephthalat

⁹ ultrahochmolekulares Polyethylen

Sensitivitätsverhältnisse (SR), ausgehend vom Referenzfall für eine 10%ige Änderung, sind in Abbildung 9 dargestellt.

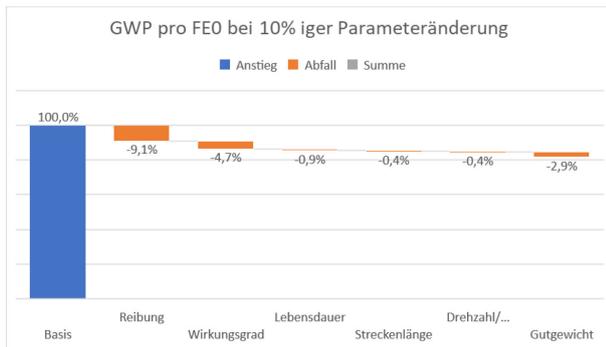


Abbildung 9 Prozentuale Änderung des spez. GWP-Wertes bei 10%iger Änderung der Parameter

Die Senkung der Reibung um 10% führt zu einer Senkung des spez. $WIN_{spez,GWP}^{fE0}$ um 9,1%. Weniger Einfluss haben Wirkungsgrad, Lebensdauer, Drehzahl und Gutgewicht, wobei diese jeweils um 10% erhöht wurden. Wie oben dargestellt, kann die Streckenlänge gekürzt werden und somit müsste sich hier eine Änderung um 0% ergeben. Jedoch fließt in die Berechnung ein Anteil für die Wartung mit ein, der sich durch Erhöhung der fE0 entsprechend reduziert.

5.8 EIGNUNG VON fE0

Der gezeigte Ansatz mit der Berechnung von fE0 nach Gleichung (8) kann zu den in Gleichung (20) und (21) dargestelltem Zusammenhang subsumiert werden.

$$WIG_{i_spez}^{fE0} = WIH_{i_spez}^{fE0} + WIN_{i_spez}^{fE0} \quad (20)$$

$$WIG_{i_spez}^{fE0} = f(L) + WIHK_i + f(\alpha, \mu, \eta, q_K, q_G) \quad (21)$$

Der Gesamtwirkungsindikator besitzt also Terme, die einerseits abhängig und andererseits unabhängig von der Förderlänge sind. Für den Fokus der Vergleichbarkeit im Rahmen von EPDs führt das unter Umständen zu inkonsistenten Ergebnissen.

Die Ergebnisse des Vergleiches eines Kunststoffkettenförderers mit einem Stahlkettenförderer auf Basis des Praktikumsförderers sind in Abbildung 10 dargestellt. Neben der Wahl der unterschiedlichen Technologie wurde darüber hinaus noch die Kettenlänge variiert, indem die 5 m lange Kunststoffkette mit einer 10 m langen Stahlkette verglichen wurde.

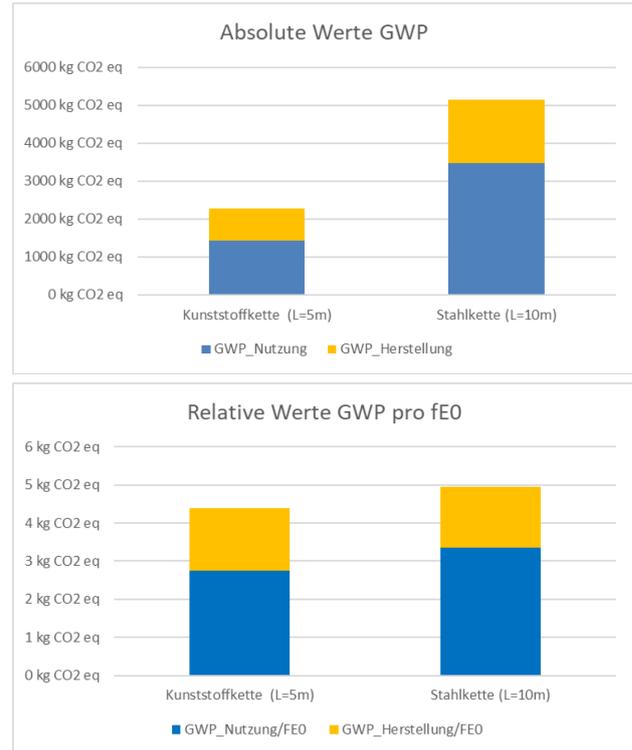


Abbildung 10 Absolute (oben) und relative Ergebnisse (unten) des GWP des Stahlkettenförderers im Vergleich zum Kunststoffkettenförderer

Wie man klar erkennen kann, ist bei der Darstellung des relativen Ergebnisses der Einfluss der Fördererlänge nur gering. Die deutlich längere Stahlkette hat trotz hoher Verbrauchswerte (160,2 Watt gegenüber 62,3 Watt) ein ähnliches Wirkungsindikatorergebnis wie die Kunststoffkette. Dies ist sachlich nicht richtig. Deshalb eignet sich die fE0 nicht als Vergleichsbasis.

Zur weiteren Untersuchung wurde eine alternative funktionelle Einheit fE1 verwendet, diese wird unter Weglassung der Länge L berechnet:

$$fE1_{masse} = v_K \cdot q_G \cdot T \quad (22)$$

Bei Verwendung dieser Gleichung ergeben sich die in den Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellten Ergebnisse.

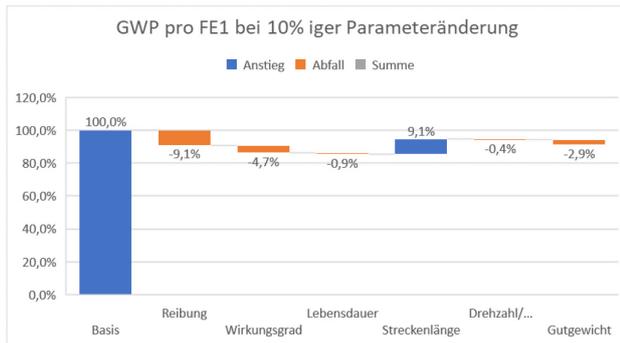


Abbildung 11 Prozentuale Änderung des spez. GWP-Wertes bei 10%iger Änderung der Parameter (unter Verwendung von fE1)

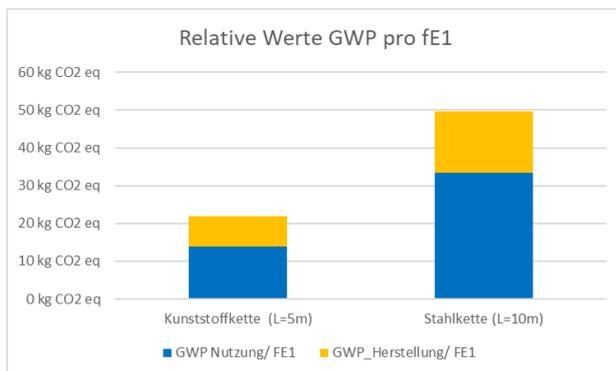


Abbildung 12 Vergleich GWP Stahl vs. Kunststoff bei Verwendung von fE1

Auf den Abbildungen ist deutlich erkennbar, dass die Nichtberücksichtigung der Förderstrecke zu konsistenteren Ergebnissen führt. Dieser Nachweis ließe sich auch für andere Layoutgrößen wie Steigungen, Kurven usw. führen. Da sie sowohl die funktionelle Einheit beeinflussen, als auch den Energieverbrauch, aber bei der Berechnung der spezifischen Wirkungsindikatoren nicht berücksichtigt werden, muss ein anderes Vorgehen für die Berücksichtigung der Fördererfunktion im Sinne einer funktionellen Einheit vorgesehen werden.

5.9 ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel der aktuellen Forschung ist die Ableitung einer funktionierenden fE mit dem Fokus auf die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen technologischen Förderprinzipien. Grundsätzlich muss die Förderstrecke bei der Ermittlung der funktionalen Leistung eines Förderers berücksichtigt werden. Im vorigen Absatz wurde gezeigt, dass Layoutgrößen sowohl auf die fE als auch auf den Energieverbrauch Einfluss haben und bei einer relativen Betrachtung nicht mehr wirksam sind. Dies widerspricht aber dem Grundsatz der Vergleichbarkeit und verfälscht die Ergebnisse.

Eine Möglichkeit diese Herausforderung zu lösen wäre, die Fördererlänge für die Ermittlung der spezifischen Wirkungsindikatorwerte wegzulassen. Fraglich ist, inwieweit die Vergleichbarkeit dann gewährleistet ist. Diese

wird Schwerpunkt weiterer Untersuchungen sein. Ein möglicher Ansatz ist es, innerhalb der PCR einen Referenzförderer zu definieren, der dann entsprechend bilanziert werden müsste. Ob damit eine logische, verwertbare Bewertung möglich ist, wird weiterhin im Rahmen des laufenden Projektes geprüft werden müssen.

6 AUSBLICK UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im vorliegenden Beitrag wurde gezeigt, wie mittels Sensitivitäts- und Szenario-Analysen die Eignung von Eingangsparemtern für Ökobilanzen validiert werden können. Insbesondere wenn die Ergebnisse von Ökobilanzen im Rahmen von (vergleichenden) Umweltproduktdeklarationen veröffentlicht werden sollen, ist eine solche Analyse notwendig.

Die Entwicklung einer geeigneten Vergleichskennzahl (aka funktionelle Einheit) ist wichtig, um das Instrument EPD adäquat einsetzen zu können. Dazu eignen sich die vorgestellten Instrumente, auch für weitere PCR-Entwicklungen können solche Analysen durchgeführt werden. Zur Definition einer geeigneten fE sind weitere Untersuchungen erforderlich. Zusätzliche Schritte wie die Verbesserung der Lesbarkeit von EPDs, z. B. durch verbindliche Verwendung eines Deckblattes, sind ebenfalls Bestandteil des laufenden Projektes. Die Verwendbarkeit wird durch Einsatz bei der Veröffentlichung von EPDs z. B. für Rollenförderer überprüft werden.

LITERATUR

- [1] Andreas Ciroth. 2013. *Refining the pedigree matrix approach in ecoinvent: Towards empirical uncertainty factors*. LCA Discussion Forum Zürich, Zürich.
- [2] BRE Group. 2021. *BREEAM The world's leading sustainability assessment method for masterplanning projects, infrastructure and buildings*. www.bregroup.com. Accessed 26 May 2021.
- [3] Clavreul, J., Guyonnet, D., and Christensen, T. H. 2012. Quantifying uncertainty in LCA-modelling of waste management systems. *Waste management (New York, N.Y.)* 32, 12, 2482–2495.
- [4] DIN. 1994. *Gliederbandförderer. Berechnungsgrundsätze 53.040.10*. Beuth, Berlin 53.040.10, DIN 22 200.
- [5] DIN and Deutsches Institut für Normung - NAGUS (DIN-Institut Grundlagen des Umweltschutzes). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017), Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018, Berlin: DIN, 2018*.

- [6] DIN-Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) and DIN CEN ISO / TS 14027. *Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Entwicklung von Produktkategorieeregeln (ISO/TS 14027:2017)*.
- [7] ecoinvent.org. 2015. *Introduction to ecoinvent 3*. youtube.com/watch?v=7PSytXSmEkQ.
- [8] Environdec. 2021. *General Programme Instructions for the International EPD System*, www.environdec.com.
- [9] European Commission. 2017. *PEFCR Guidance document. Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs)*.
- [10] Florian Lottersberger. 2016. *Beitrag zu einer energieeffizienten Materialflusstechnik Grundlagen zur Ermittlung, zum Vergleich und zur Steigerung der Energieeffizienz*. Dissertation, TU Graz.
- [11] Frischknecht, R. 2020. *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Lehrbuch. Springer Spektrum, Berlin.
- [12] ISO and DIN. *Environmental labels and declarations - General principles (ISO 14020:2000); German Version ENISO14020:2001*.
- [13] Jens Sumpf, Ralf Bartsch, André Bergmann. 2018. *Auslegung von Stetigförderern mit Kunststoffgleitketten*. VDI-Fachkonferenz Umschlingungsgetriebe, Stuttgart.
- [14] Karl-Heinz Wehking. 2020. *Technisches Handbuch Logistik 1*. Springer Berlin Heidelberg.
- [15] Mark A. J. Huijbregts. 1998. Application of Uncertainty and Variability in LCA. Part I: A General Framework for the Analysis of Uncertainty and Variability in Life Cycle Assessment. *International Journal of LCA* 5, 5, 273–280.
- [16] Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN and DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2014. *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013*.
- [17] Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN. 2011. *Umweltkennzeichnung und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen. Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006)*; 13.020.50. Beuth Verlag, Berlin 13.020.50, DIN EN ISO 14025.
- [18] United Nations Publication. 2015. *Central Product Classification (CPC). Version 2.1*. United Nations Publication, New York.

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Lynn Lüdemann, Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Fachgruppe: Kunststoffkomponenten und Tribologie,
Email: lynn.luedemann@mb.tu-chemnitz.de,
Tel.: +49(0)371/531-37144

Dr.-Ing. Jens Sumpf, Fachgruppenleiter: Kunststoffkomponenten und Tribologie,
Email: jens.sumpf@mb.tu-chemnitz.de,
Tel.: +49(0)371/531-32853

Prof. Dr.-Ing. Markus Golder, Professor; Professur Förder- und Materialflusstechnik
Email: markus.golder@mb.tu-chemnitz.de,
Tel.: +49(0)371/531-36902

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, TU Chemnitz, 09126 Chemnitz