

# Verbesserung der Umweltwirkung von Stetigförderern mit Kunststoffketten

Improvement of environmental impacts of continuous conveyors with plastic sliding chains

Marcus Bona  
Lynn Lüdemann  
Jens Sumpf  
Markus Golder

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

**K**unststoffgleitkettenförderer, welche im intralogistischen Transport innerhalb von Handels- und Produktionseinrichtungen eingesetzt werden, haben großen Einfluss auf Klimagasemissionen. Die effiziente Reduktion der Umweltschädigungen in der Intralogistik impliziert jedoch genaue Kenntnisse über deren Entstehung. In einem aktuellen Forschungsprojekt, gefördert durch die Röchling Stiftung, wird deshalb die systematische Analyse von Scharnierbandkettenförderern durchgeführt, die u. a. in der Getränkeindustrie zum Einsatz kommen. Hierbei wird der gesamte Lebenszyklus, d. h. die Herstellungs-, Nutzungs- sowie Entsorgungsphase, einbezogen. Die daraus erstellten Ökobilanzen der Förderanlagen dienen als Grundlage zur Bestimmung der ökologisch relevanten Einflussparameter. Es wird aufgezeigt, in welchem Maße bspw. Werkstoffe, Kettendesign, Anlagenlayout oder Belastungsparameter zum ökologischen Fußabdruck beitragen und wo Verbesserungspotential besteht. Zusätzlich soll ein Ausblick auf eine mögliche Rückführung von wertvollen Rohstoffen, im speziellen technischen Kunststoffen, gegeben werden. Im Fokus stehen dabei Recyclingkonzepte für gebrauchte Kunststoffgleitketten.

[Schlüsselwörter: Stetigförderer, Kunststoffkette, Umweltwirkung, Ökobilanz, Recycling]

**P**lastic slide chain conveyors are used in intralogistical transport and have a large influence on greenhouse gas emissions. To reduce environmental damage, it is necessary to know where the origin of those degradations are. For that reason, a systematic analysis of slat-band chain conveyors is conducted. These conveyors are often exploited in the beverage industry. Within the project, which is supported by the Röchling Foundation, the entire life cycle i. e. the production phase, use phase and disposal phase are included. The life cycle assessment of the

conveyors resulting will serve as the basis for determining ecologically relevant influence parameters. It is shown here how e. g. materials, design of the chain, conveyor layout or stress parameters affect the ecological footprint and where the potential for improvement lies. In addition, an outlook of the recovery of engineering plastics is given. The focus here is the recycling of plastic slide chains.

[Keywords: continuous conveyor, plastic chain, environmental impact, life cycle assessment, recycling]

## 1 EINLEITUNG

Die bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe, wie Kohle Erdöl oder Erdgas, freigesetzten Kohlen- und Stickoxide führen zu einem stetigen Anstieg die Konzentration an Treibhausgasen in der Erdatmosphäre. Als Ursache für den Klimawandel ist dieser durch den Menschen verursachte Treibhauseffekt inzwischen weltweit anerkannt. Die Eindämmung der daraus resultierenden globalen Durchschnittstemperaturerhöhung stellt jedoch schon jetzt eine der größten ökologischen Herausforderungen der Menschheit dar. Die vorangegangenen Angaben zeigen den dringenden weltweiten Handlungsbedarf um dieser Entwicklung entgegen zu wirken. Wirtschaft und Industrie müssen nach ökologischen Gesichtspunkten langfristig umgestaltet werden, wobei ein effizienter und vor allem nachhaltiger Umgang mit Ressourcen und Rohstoffen gefordert wird.

Einen wesentlichen Anteil an Klimagasemissionen hat auch der Transportsektor. Als Folge der Globalisierung und dem damit verbundenen weltweiten Waren- und Güteraus-tausch ist dieser in Europa für rund ein Viertel aller CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich [Bre12]. Der interne Transport innerhalb von Fabriken, Produktionseinrichtungen oder

Warenverteilzentren weist neben dem Güterverkehr ebenfalls eine hohe Relevanz bei der Emission von schädlichen Klimagasen auf.

Der Einfluss von Stetigfördersystemen auf die Natur wurde bisher nur wenig untersucht. Aus diesem Grund, und um den steigenden ökologischen Anforderungen in Produktion, Transport und Handel Rechnung zu tragen, befasst sich das Forschungsthema erstmals mit der Berechnung der Umweltwirkungen von Stetigförderern mit Kunststoffketten.

## 2 REFERENZFÖRDERER

Eine große Bedeutung bei intralogischen Förderaufgaben besitzen Kunststoffgleitkettenförderer. Diese werden wegen ihrer flexiblen und komplexen Streckenführung sowie ihrer positiven tribologischen Eigenschaften und geringer Kettenmasse oft zum Transport von Stückgütern eingesetzt. Aufgrund der enormen Bandbreite an Varianten, ihres modularen Aufbaus sowie möglichen Förderaufgaben ist für Stetigförderer in der industriellen Anwendung jedoch kein festes Layout annehmbar. Als theoretische Basis für die Berechnung des Ökologischen Fußabdrucks wurde daher ein sogenannter Referenzförderer erarbeitet, an dem durch analytische Berechnungsansätze eine Ökobilanz erstellt und umweltrelevanter Einflussfaktoren detektiert werden können.

Beim Referenzförderer handelt es sich um einen herkömmlichen Scharnierbandkettenförderer (Abbildung 1) mit typischen Streckenelementen, dessen Förderleistung auf 600 kg/min festgelegt wurde. Der Förderstrecke, das heißt die Entfernung zwischen Antrieb und Umlenkung, beträgt 5 Meter. Das Streckenlayout beinhaltet zudem eine magnetische 90°-Horizontalkurve mit einem Radius von 0,5 m sowie zwei gleich lange gerade Abschnitte von jeweils 3,04 m.

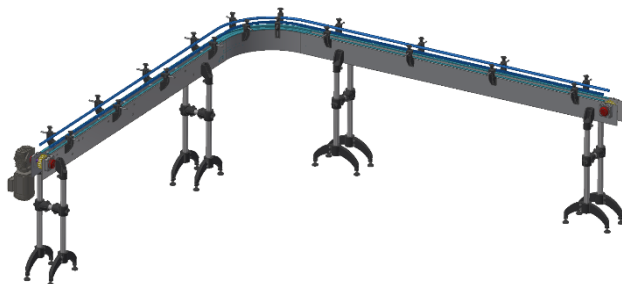


Abbildung 1. Referenzförderer

Neben dem Förderprofil aus Edelstahl besteht das System weiterhin aus acht Stützen mit jeweiligen Anbauteilen, Seitenführungen sowie Antriebs- und Umlenkeinheiten. Der Antrieb erfolgt, wie bei den meisten Stückgutförderern üblich, mit einem Drehstrom-Asynchrontriebemotor. Bei der verwendeten Kette handelt es sich um eine kurvengängige Scharnierbandkette aus Polyoxymethylen (POM) mit einer Breite von 82,5 mm und einer Teilung von

38,1 mm. Diese hat im gewählten Förderlayout eine Länge von rund 14,4 m. Alle Berechnungsansätze erfolgen mit festgelegten oder theoretischen Werten, die u. a. aus Förderstechnikatalogen entnommen wurden.

## 3 ÖKOBILANZIERUNG

### 3.1 ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN

Mit der Ökobilanzierung kann die Auswirkung von Produkten auf die Umwelt über deren gesamten Lebenszyklus berechnet, aufgezeigt und nachvollzogen werden. Die Lebenszyklusanalyse des Referenzförderers erfolgt nach den Grundlagen der Normenreihe DIN 14040 ff. Laut DIN ist folgender Ablauf vorgesehen:

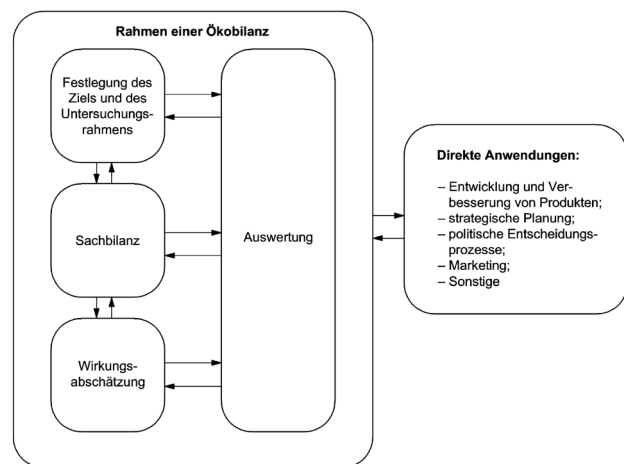


Abbildung 2. Phasen einer Ökobilanz [DIN14040]

In der ersten Phase der Ökobilanz werden das Ziel, d. h. der geplante Anwendungsbereich, die Intention für die Durchführung und der Nutzen festgelegt. Der Untersuchungsrahmen grenzt das zu untersuchende Produkt ein, es werden Systemgrenzen und Abschneidekriterien festgelegt sowie Annahmen getroffen. Um Unterschiede der Inputströme und Wirkungen bzgl. der Lebensphasen entsprechend berücksichtigen zu können, erfolgt weiterhin die Einteilung des Lebenszyklus in Lebensphasen (sogenanntes Produktsystem). In der Regel wird nach Upstream, Core und Downstream differenziert. *Upstream-Prozesse* (von der Wiege bis zum Fabrikator) umfassen die Vorprodukte, die in den eigentlichen Herstellungsprozess einfließen, z. B. Rohmaterialien bzw. Produktion von Vor- oder Zwischenprodukten. *Core-Prozesse* (vom Fabrikeingang bis zum Fabrikausgang) umfassen alle Prozesse innerhalb des herstellenden und somit herausgebenden Unternehmens plus den Transport zum Anwender. In *Downstream-Prozessen* (vom Fabrikausgang bis zur Entsorgung) werden in der Regel die Produktnutzung und die Entsorgungsverfahren zusammengefasst.

Ein weiterer wichtiger Gegenstand ist die Festlegung der sogenannten funktionellen Einheit. Diese stellt eine

Vergleichsbasis dar, auf die die späteren Umweltwirkungen bezogen werden können.

### 3.2 SACHBILANZ

Im zweiten Schritt der Ökobilanz wird die Sachbilanz – ein Flussmodell des Produktsystems mit allen Input- und Outputflows für jeden Prozess des Lebenswegs – erstellt und der funktionellen Einheit gegenübergestellt. Die Sachbilanz umfasst Datenerfassungs- und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung der Ein- und Ausgänge des Produktsystems. Die Datenerhebung kann in vier Hauptgruppen unterteilt werden: Inputs (Energie, Rohstoffe, Hilfsstoffe, usw.), Outputs (Produkte, Nebenprodukte und Abfälle), Emissionen (Luft, Wasser, Boden) sowie andere Umweltaspekte. Für die Datenerfassung sind verschiedene Methoden anwendbar, z. B. Messen, Schätzen, Berechnen usw.

### 3.3 WIRKABSCHÄTZUNG

An die Sachbilanz schließt sich die Wirkabschätzung an. Die zuvor berechneten Ergebnisse werden hier in verschiedene Wirkungskategorien eingeteilt, anhand derer die Umweltwirkungen des Produktes quantitativ dargestellt und bewertet werden können. Wirkungskategorien werden in der Regel durch wissenschaftliche Organisationen/Institute festgelegt und die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse definiert. Die derzeitige Anzahl an Wirkungskategorien ist sehr groß und umfasst zum Beispiel das Globale Erwärmungspotential (GWP), die Versauerung, die Eutrophierung, den Stratosphärischen Ozonabbau oder die Landnutzung [ifeu19].

### 3.4 AUSWERTUNG

Die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkabschätzung werden in der Auswertungsphase zusammen analysiert. Es sollen daraus relevante Einflussparameter detektiert sowie Schlussfolgerungen und Empfehlungen abgeleitet werden.

## 4 BERECHNUNG DER ÖKOBILANZ DES REFERENZFÖRDERERS

### 4.1 ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN

Als Ziel wurde die Berechnung der Umweltkennwerte des Referenzförderers mit einer Aufteilung bezüglich der einzelnen Lebensphasen definiert. Als Untersuchungsrahmen wurde festgelegt, dass zunächst ausschließlich Daten aus Katalogen und dem Layout des Systems entnommen werden. Die Berechnung der Nutzungsphase erfolgte über die wirkenden Kräfte unter Verwendung von Daten aus generischen Datenbanken (ecoInvent v2.3 und ELCD). Als funktionelle Einheit wurde der Massestrom gewählt, d. h. sämtliche Umweltergebnisse wurden auf die Einheit t x km (Tonne mal Kilometer) bezogen. Der Referenzfluss ist der

physisch vorhandene Förderabschnitt (inkl. Antrieb, Gestell, Führung), der zum Transport benötigt wird. Es wurde von einer Lebensdauer von 10 Jahren ausgegangen und das Abschneidekriterium mit 1 % festgelegt. Das heißt, alle Werte kleiner als 1 % der Gesamtmenge der Flüsse wurden nicht in die Berechnung einbezogen. Die Sachbilanz und die Wirkabschätzung wurden mit Hilfe der open source-Software openLCA erstellt.

Für das Fördersystem wurden folgende Festlegungen bezüglich der Lebensphasen getroffen. Der *Upstream* umfasst alle Prozesse zur Herstellung der Rohmaterialien wie z. B. die Herstellung des Kunststoffgranulats sowie zugekaufter Zwischenprodukte wie Stahlbleche.

Im *Core* wurden alle Prozesse, die mit der Herstellung und Montage beim Kettenlieferanten und Anlagenbauer zu tun haben, zusammengefasst. Diese Herstellung des eigentlichen Fördersystems umfasst bspw. das Spritzgießen der Kettenkomponenten, die mechanische Bearbeitung von Metallteilen sowie die erforderlichen Montageprozesse, aber auch die Lieferung zum Anwender. Zudem wurde die Bereitstellung der benötigten Motoren berücksichtigt. Die Herstellung der benötigten Maschinen und Anlagen zur Produktion wurden jedoch außen vor gelassen.

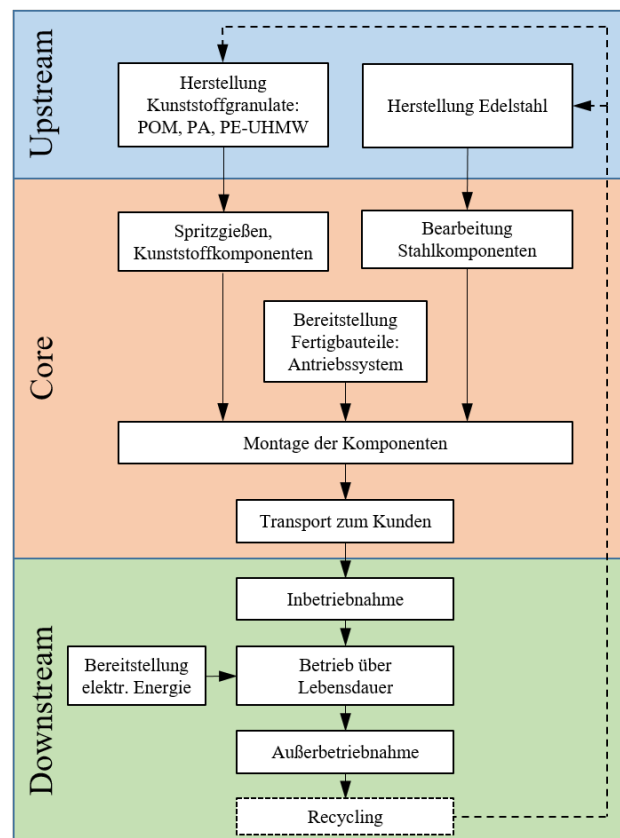


Abbildung 3. Prozesse und Lebensphasen des Referenzförderers

Der Downstream, also die Nutzung sowie Entsorgung des Förderers, beinhaltet die Bereitstellung der Energie und

weiterer notwendiger Betriebsmittel sowie Wartungsprozesse beim Anwender des Kettensystems. In zukünftigen Arbeitsschritten werden hierbei auch die Aspekte einer möglichen Weiternutzung oder Wiederaufbereitung (z. B. Recycling der Kunststoffe) von Komponenten im Vergleich zur (derzeit üblichen) Entsorgung einbezogen.

In Abbildung 3 ist die Aufteilung der Lebensphasen noch einmal übersichtlich dargestellt.

## 4.2 SACHBILANZ DES REFERENZFÖRDERERS

### 4.2.1 UPSTREAM UND CORE

In der Sachbilanz des Referenzförderers wurden alle Inputflüsse anhand des zuvor festgelegten Lebensweges (Upstream, Core, Downstream) aufgelistet und quantitativ erfasst. Die Datenerhebung erfolgte dabei über die Berechnung der benötigten Materialien zur Herstellung des Referenzförderers. In Tabelle 1 ist ein Überblick über die Inputströme anhand der Lebensphasen gegeben.

Tabelle 1. Inputs des Produktsystems Referenzförderer

|          | Prozesse                              | Komponenten                            | Menge | Einheit |
|----------|---------------------------------------|--|-------|---------|
| Upstream | Herstellung POM-Granulat              | Kettenglied                            | 10    | kg      |
|          | Herstellung PE-UHMW Pulver            | Gleitleiste, Seitenführung             | 1,8   | kg      |
|          | Herstellung PE-UHMW Halbzeug (Platte) | Kurvenführung                          | 4,2   | kg      |
|          | Herstellung PA-Granulat               | Füße, Halter, Kettenräder, Anbauteile  | 19,4  | kg      |
|          | Herstellung Edelstahl                 | Führungsprofil, Bolzen, Stützen        | 89,3  | kg      |
| Core     | Spritzgießen                          | Kettenglied, Füße, Halter, Kettenräder | 29,4  | kg      |
|          | RAM-Extrusion                         | Gleitleiste, Seitenführung             | 1,8   | kg      |
|          | Kunststoffbearbeitung                 | Kurvenführung                          | 4,2   | kg      |
|          | Metallbearbeitung                     | Seitenführung, Bolzen, Stützen         | 89,3  | kg      |
|          | Laserschneiden                        | Seitenführung                          | 1     | h       |
|          | Antriebseinheit                       | Motor                                  | 20    | kg      |
|          | Transport zu Anwender                 | Straßentransport                       | 0,075 | tkm     |

### 4.2.2 DOWNSTREAM – ANALYTISCHE ENERGIEBEDARFSERMITTLUNG AM REFERENZFÖRDERER

Die Ressourcenverbräuche der Phasen Upstream und Core wurden bereits ermittelt (Tabelle 1). Um die Downstream Phase berechnen zu können, werden Input-Daten bzgl. des Energieverbrauches über die gesamte Nutzungsdauer benötigt. Die analytische Energiebedarfsermittlung des Referenzförderers basiert auf den folgenden Ausgangsgrößen und Annahmen:

- Spezifische Kettenmasse POM  $q_Z = 1,01$  kg/m
- Spezifische Gutgewicht  $q_G = 20$  kg/m
- Spezifische Kettenmasse Magnetkurve  $q_M = 4,5$  kg/m
- Reibwert Kette vs. Führungsschiene  $\mu_{ZS} = 0,2$
- Fördergeschwindigkeit:  $v = 30$  m/min
- Wirkungsgrad Getriebe  $\eta_G = 0,81$ , konstant

- Wirkungsgrad Motor  $\eta_M = 0,84$ , konstant
- Wirkungsgrad, sonstige Verluste  $\eta_s = 0,95$ , konstant

Die Ermittlung des Energieverbrauches des Scharnierbandkettenförderers setzt zunächst die Ermittlung der maximalen Kettenzugkraft voraus. Die Berechnung erfolgt hierbei in mehreren Schritten. Zunächst wird der Förderer in Abschnitte segmentiert. Ein neuer Abschnitt beginnt bei Änderungen in der Belastung (anderes Gutgewicht, Staurecken, usw.) sowie beim Wechsel von Geraden und Kurvenabschnitten. Die maximale Kettenkraft ergibt sich dabei durch Addition der Kräfte aller Einzelsegmente. Die Berechnung wird im Auslauf der Kette aus dem Kettenrad begonnen. In diesem als Kettensack bezeichneten Bereich ist die Kettenzugkraft annähernd 0 N.

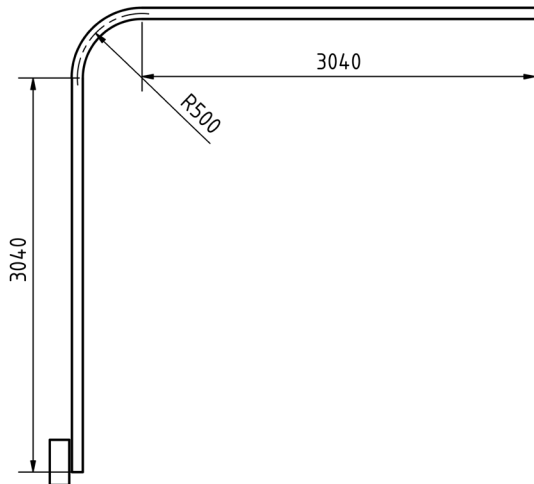


Abbildung 4. Maße des Referenzförderer

Die ermittelte Kettenkraft des ersten Abschnittes geht dann als Startwert in die Berechnung des nachfolgenden Abschnittes ein. Somit ergibt sich die maximale Kettenzugkraft beim Einlauf der Kette in die Antriebseinheit. Nachfolgend sind die Gleichungen für die Berechnung eines geraden Förderabschnittes sowie eines horizontalen Gleitbogens angegeben [Aue06]:

Gerader Abschnitt:

$$F_n = F_{n-1} + [L_i \cdot (q_G + q_Z) \cdot g \cdot \mu_{ZS}] \quad (1)$$

Horizontaler Gleitbogen:

$$F_n = [F_{n-1} + r \cdot (q_G + q_Z) \cdot g] \cdot e^{\mu_{ZS} \cdot \varphi} - r \cdot (q_G + q_Z) \cdot g \quad (2)$$

Hierbei steht  $g$  für die Erdbeschleunigung,  $r$  für den Kurvenradius und  $\varphi$  für den Umschlingungswinkel. Für den hier gewählten Referenzförderer wird zunächst die Kettenzugkraft im Untertrum in Abhängigkeit des Layouts (Geraden, Gleitbögen) und unter ausschließlicher Berücksichtigung der Kettenmasse berechnet.

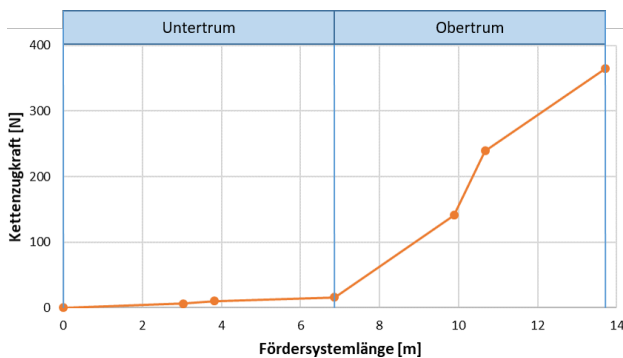


Abbildung 5. Kettenzugkraft über der Förderlänge

Hinzu kommen dann, wie oben beschrieben, die Kräfte im Obertrum, wobei zudem das Gutgewicht berücksichtigt wird. Die so ermittelte Kettenmaximalkraft liegt

bei 364,6 N und kann aus Abbildung 5 nachvollzogen werden. Wird die maximale Kettenzugkraft mit der Fördergeschwindigkeit multipliziert, ergibt sich die erforderliche mechanische Leistung zum Betreiben des Referenzförderers. Um weitere Reibungsverluste, wie etwa das seitliche Anlaufen der Kette, Lagerreibung, Schwenkbewegung der Kettengelenke oder die Reibung zwischen Kette und Kettenrad zu berücksichtigen wird ein weiterer Wirkungsgrad  $\eta_s$  eingeführt, welcher diese Verluste berücksichtigt.

$$P_{mech} = F_{nmax} \cdot \frac{v}{\eta_s} \quad (3)$$

Die elektrische Leistung ergibt sich unter Berücksichtigung der Verluste von Motor und Getriebe nach Gleichung (4).

$$P_{elektr} = \frac{P_{mech}}{\eta_G \cdot \eta_M} \quad (4)$$

Die analytisch berechnete elektrische Leistung des Referenzförderers beträgt 282,3 W, wodurch sich ein Gesamtenergieverbrauch über 10 Jahre von 16202 kWh ergibt. Mit dem berechneten Energieverbrauch kann nun mit den weiteren Eingangsparameter Fördergeschwindigkeit, Gutgewicht, Lebensdauer und Arbeitszeit die funktionelle Einheit ermittelt und die Downstream-Phase berechnet werden. Im vorliegenden Fall ergibt sich eine funktionelle Einheit in Höhe von 2073,6 t x km.

### 4.3 WIRKABSCHÄTZUNG DES REFERENZFÖRDERERS

Zur Bewertung der Berechnungen der Sachbilanz des Referenzförderers werden die Ergebnisse nun in Wirkungskategorien eingeteilt. Im Rahmen des Beitrages sollen jedoch nur das Globale Erwärmungspotential (GWP, global warming potential), die Eutrophierung und die Versauerung betrachtet werden.

Der anthropogene Treibhauseffekt (GWP) ist dabei ein Synonym für die durch den Menschen erzeugten Emissionen von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> oder Methan durch Verbrennung fossiler Energieträger, die eine Aufheizung der Atmosphäre bewirken. Der GWP wird in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben und drückt den gesamten Lebensweg eines Produktes in einer entsprechenden CO<sub>2</sub>-Menge aus.

Nitrate und Phosphate sind essentielle Bestandteile des Ökosystems. Nichtsdestotrotz verursachen sie übermäßiges Algenwachstum und eine Verringerung der Sauerstoffkonzentration, wenn ihr Anteil ein bestimmtes Maß übersteigt. Die Eutrophierung (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Äquivalent) wird dementsprechend als Überintrag von Nitraten und Phosphaten bezeichnet. Ebenso wirken sich Emissionen von Ammoniak, Nitrogen, Stickoxiden und Phosphor auf die Eutrophierung aus.

Die Wirkungskategorie Versauerung wird in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben. Saure Gase wie Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) reagieren in der Atmosphäre mit Wasser und dabei entsteht saurer Niederschlag. Dort wo dieser Niederschlag niedergeht, oftmals in einiger Entfernung zur Quelle, wird das Ökosystem nachhaltig verändert. Säurehaltige Niederschläge entstehen durch Ammoniak, Schwefeldioxid und Stickoxid hauptsächlich durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen zur Erzeugung von Energie und Wärme.

#### 4.4 ERGEBNISSE DER ÖKOBIANZ DES REFERENZFÖRDERERS

Die Ergebnisse der Ökobilanz des Referenzförderers sind in Abbildung 6 nach den Wirkungskategorien Globales Erwärmungspotential, Eutrophierung und Versauerung dargestellt. Es zeigt sich, dass beim GWP und der Eutrophierung der Upstream – also die Herstellung der Rohmaterialien – sowie der Core – die eigentliche Herstellung der Bauteile und Komponenten – den größten Einfluss auf die Umweltwirkung haben (> 40 %). Die Auswirkungen aufgrund der Nutzung des Förderers ist dagegen mit rund 10 % eher gering. Ein anderes Bild zeigt sich bei der Versauerung. Hier hat die Nutzungsphase (Versorgung mit Elektrizität) einen sehr großen Effekt (69 %) auf die Erzeugung saurer Gase. Dementgegen sind Upstream und Core als geringe Determinanten zu bewerten.

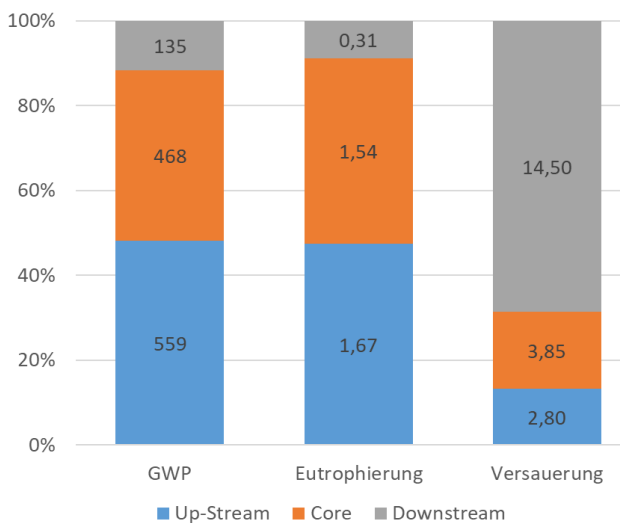


Abbildung 6. Wirkungskategorien aufgeteilt nach Lebensphasen

Zur Veranschaulichung der Umweltwirkung der einzelnen Fördersystemkomponenten sind in Abbildung 7 das Globale Erwärmungspotential in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent und in Abbildung 8 die Versauerung in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent noch einmal gezeigt. Eine Aufschlüsselung nach ihren Werkstoffen verdeutlicht, welche Materialien und Komponenten in welcher Lebensphase die wesentlichste Wirkung auf die Umwelt haben.

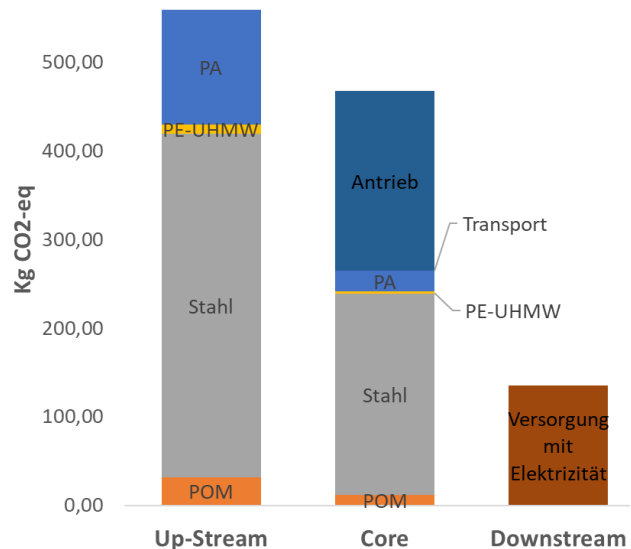


Abbildung 7. Globales Erwärmungspotential des Referenzförderers in [kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent]

Es wird deutlich, dass die Herstellung von Stahlhalbzeugen (Upstream) wie Bleche und Profile mit 387 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent sowie die Fertigung der Führungsprofile, Stützen und Kettenbolzen (Core) mit 226 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent den weitaus größten Teil des GWPs ausmachen. Die Umweltwirkung der Kunststoffbauteile wie Polyamid (Füße, Halter, Kettenpins) und Polyoxymethylen (Kette) sind in dieser Wirkkategorie weniger hoch.

Werden die Ergebnisse jedoch in Bezug zur Materialverteilung (Tabelle 1, Upstream) gesetzt wird deutlich, dass Stahl zwar der Werkstoff ist, welcher für den größten CO<sub>2</sub>-Ausstoß verantwortlich ist, dieser jedoch mit über 58 % auch den größten Materialanteil am Referenzförderer besitzt. In Relation zu ihrem Einsatz im Referenzförderer ist die Umweltwirkung der Werkstoffe somit ausgeglichener und eine Wiederverwendung durch ein Recycling erscheint sinnvoll.

Ein anderes Bild zeichnet sich bei der Versauerung (Abbildung 8). Wie bereits in Abbildung 6 verdeutlicht, ist die Versorgung mit Elektrizität während der Nutzung des Referenzförderers mit 14,5 kg Schwefeldioxid-Äquivalent am einflussreichsten. Die Produktion der Bauteile hat dagegen mit insgesamt rund 6,6 kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent eine weniger große Wirkung.

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen den deutlichen Einfluss des Anlagenlayouts und der Förderaufgabe auf die Ergebnisse der Ökobilanz. Eine allgemeine Aussage zur Umweltwirkung von Stetigförderern mit Kunststoffketten ist demnach nicht möglich. Je nach Materialverteilung und dem aus der Förderaufgabe resultierenden Energieverbrauch einer Anlage ergeben sich individuelle Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Umweltwirkung, welche bereits in der Planungsphase einer Förderanlage berücksichtigt werden müssen. Im folgenden Abschnitt werden Einflussparameter auf die Umweltwirkung

nach ihrem Auftreten in den Lebenszyklusphasen der Ökobilanz beleuchtet. In Abhängigkeit des Layouts lässt sich durch Anpassung dieser Parameter der ökologische Fußabdruck mehr oder minder verbessern.

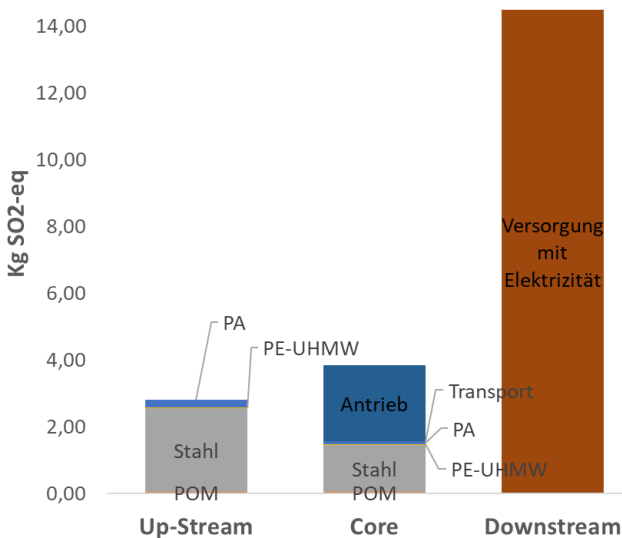


Abbildung 8. Versauerung durch den Referenzförderer in [kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent]

## 5 ÖKOLOGISCH RELEVANTE EINFLUSSPARAMETER

### 5.1 DOWNSTREAM - ENERGIEBEDARF

Vor allem im Hinblick auf die Versauerung ist der Energieverbrauch einer Förderanlage, welcher sich beim Anwender insbesondere durch die Energiekosten ausdrückt, ein bedeutender Faktor. Wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, wird dieser durch zahlreiche Größen beeinflusst. Nachfolgend werden die bedeutendsten Parameter analysiert. Alle Berechnungen beziehen sich dabei auf den Referenzförderer.

#### 5.1.1 REIBWERT

Eine Modifikation des Reibwertes zwischen Förderkette und Gleitschiene hat immense Auswirkungen auf die Kettenzugkraft und die Antriebsleistung. Nach Gleichung (1) besteht in geraden Förderabschnitten ein linearer Zusammenhang zwischen dem Reibkoeffizienten und der Zugkraft, in horizontalen Gleitbögen dagegen erhöht sich die Kettenkraft exponentiell (Gleichung (2)). Abbildung 9 verdeutlicht die Zusammenhänge am Beispiel des Referenzförderers.

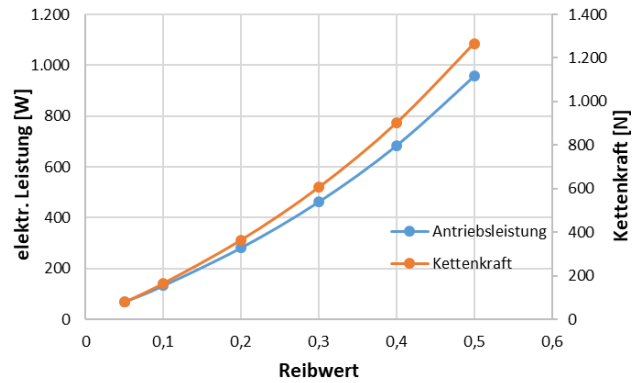


Abbildung 9. Elektrische Leistung und Kettenkraft am Referenzförderer in Abhängigkeit vom Reibwert zwischen Förderkette und Gleitschiene

#### 5.1.2 ANTRIEB

Motor, Frequenzumrichter und Getriebe sind Komponenten des Antriebs eines Förderers. Jedes dieser Bauteile besitzt einen Wirkungsgrad, welcher mehr oder minder lastabhängig ist. Der im Referenzförderer gewählte Drehstrom-Asynchronmotor wurde bei der analytischen Energiebedarfsermittlung mit konstanten Verlusten angenommen. In der Realität fällt jedoch der Wirkungsgrad stark ab, wenn der Motor unterhalb des Nennmoments betrieben wird. Drehstrom-Asynchronmotor sollten demnach aus ökologischen Gesichtspunkten in Nähe der Nennlast betrieben werden. Gegebenenfalls sind Motoren mit einer zu großen Motornennleistung gegen kleinere zu ersetzen.

#### 5.1.3 GUTGEWICHT UND FÖRDERGESCHWINDIGKEIT

Die maximale Kettenzugkraft verhält sich proportional zur Beladung. Gleiches gilt für die Antriebsleistung und die Fördergeschwindigkeit.

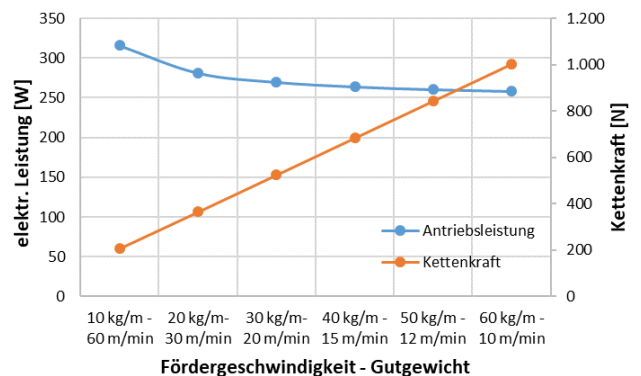


Abbildung 10. Elektrische Leistung und Kettenkraft am Referenzförderer in Abhängigkeit von der Fördergeschwindigkeit und des Gutgewichtes

Für den Referenzförderer soll ein Gutstrom von 600 kg/min erreicht werden. Aus Abbildung 10 wird deutlich, dass bei einem spezifischen Gutgewicht von 20 kg/m und einer Geschwindigkeit von 30 m/min eine elektrische Leistung von 281 W benötigt wird. Eine Reduzierung der elektrischen Leistung (konstante Antriebswirkungsgrade

angenommen) kann durch die Minderung der Fördergeschwindigkeit und die gleichzeitige Erhöhung der spezifischen Gutmasse erreicht werden. Der damit einhergehende Anstieg der Kettenzugkraft muss jedoch in Hinblick auf die zulässige Zugkraft überprüft werden. Am Referenzförderer kann so die elektrische Leistung bei einem theoretischen spezifischen Gutgewicht von 60 kg/m und einer Kettengeschwindigkeit von 10 m/min auf 258 W gesenkt werden.

#### 5.1.4 FÖRDERLAYOUT

Auch das Förderlayout hat Einfluss auf den Energieverbrauch und die damit verbundene Umweltwirkung eines Förderers. Gerade in Gleitkurven, in denen neben der durch die Ketten- und Gutmasse induzierten Reibung auch eine Umschlingungsreibung vorliegt, kommt diese Tatsache zum Tragen. Die resultierende Kraft am Ausgang der Gleitkurve ist demnach umso größer je größer die Zugkräfte am Kurveneingang sind (Gleichung (2)). Für die Auslegung einer Förderanlage bedeutet dies, dass Gleitkurven möglichst weit entfernt vom Antrieb zu legen sind, wenn dies durch die baulichen Gegebenheiten möglich ist. Wird dieser Ansatz bereits in der Planungsphase einer Förderanlage berücksichtigt kann der Energieverbrauch maßgeblich verringert werden.

#### 5.2 CORE - ENTSORGUNG/RECYCLING

Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen den großen Einfluss der Herstellung des Kunststoffrezyklats auf das Globale Erwärmungspotential. Gerade bei Kunststoffgleitkettenförderern in denen wertvolle technische Polymere wie POM, PBT, PA oder PE-UHMW Anwendung finden, werden gebrauchte, ausgesonderte Komponenten, welche z. B. beim Umbau eines Förderers oder beim verschleißbedingten Austausch anfallen, derzeit im Restmüll entsorgt und verbrannt. Durch Recycling dieser Werkstoffe könnte die Umweltwirkung von Förderern deutlich verbessert werden. Zu diesem Zweck wird an der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz der Ansatz verfolgt, gebrauchte Kunststoffgleitketten (Multiflex) zu recyceln. Hierbei steht die Entwicklung eines POM-Rezyklats aus Kunststoffgleitketten zur erneuten Verwendung speziell in Gleitkettenfördersystemen im Vordergrund. Zudem soll ein umwelt- und ressourcenschonendes Kettenfördersystem auf Basis dieser recycelten Kunststoffe sowie eines recyclinggerechten Designs oder wiederverwendeter Komponenten entwickelt werden. Zur Umsetzung des ökologischen Designs sollen zwei Lösungsansätze verfolgt werden:

1. Fertigung des gesamten Zugelements aus rezykliertem POM
2. mehrteilige Ausführung der Kette mit anteiligem Einsatz von Rezyklat.

Im ersten Lösungsansatz ist das gesamte Zugelement aus rezykliertem POM zu fertigen (Abbildung 11, links). Hierbei wären keine Änderungen an der Geometrie des

Kettenkörpers vorzunehmen, sodass vorhandene Spritzgießwerkzeuge unverändert verwendet werden können und auch der Ansatz der Wiederverwendung des Stahlbolzens problemlos möglich ist.

Die zweite Lösungsvariante befasst sich mit dem lokalen Austausch von Kettenneumaterial gegen Rezyklat. Ziel ist es, in mechanisch weniger stark belastete Bereiche Rezyklat zu integrieren. Dies betrifft z. B. die Tragplatte, welche lediglich das zu transportierende Gut aufnimmt und dessen Gewichtskraft über die Gleitleiste in das Gestell des Förderers einleitet. Zur Realisierung dieses Ansatzes muss das Zugelement der Ketten mehrteilig gestaltet werden. Das heißt, der Kettengrundkörper und die Tragplatte werden als jeweils einzelne Elemente im Spritzgießverfahren gefertigt und z. B. durch eine Schnappverbindung gekoppelt (Abbildung 11). Nachteilig wirkt sich die Mehrteiligkeit der Kette auf die Herstellung aus. Neben dem zusätzlichen Spritzgießen der Tragplatte muss diese außerdem in einem weiteren Montageschritt auf das Zugelement gebracht werden.

Die Herstellung von Rezyklaten mit den Verfahrensschritten Mahlen, Regranulieren und Compoundieren bedarf natürlich ebenfalls Energie. Die Frage ob und in welchem Maße das Recycling von Kunststoffketten sinnvoll ist, soll in dem anlaufenden Forschungsvorhaben untersucht werden.

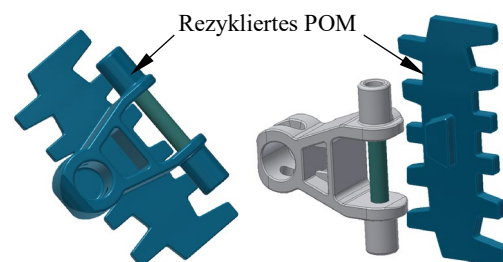


Abbildung 11. Umweltschonende Kette, links: einteiliges Zugelement aus Rezyklat, rechts: mehrteiliges Zugelement (Tragplatte aus Rezyklat)

#### 5.3 LEBENSDAUER

Der beispielhaft gewählte Referenzförderer hat einen errechneten GWP von rund 1162 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Abbildung 6) bei einer Lebensdauer von 10 Jahren. Der Downstream, also der Energieverbrauch während der Nutzung, beträgt 135 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Bei Reduzierung der Lebensdauer auf 5 Jahre würde sich dementsprechend der GWP der Downstream-Phase ebenfalls halbieren. Die Werte aus den Phasen zur Herstellung des Förderers bleiben jedoch gleich. Die nachfolgende Tabelle stellt den GWP in Abhängigkeit der Lebensdauer dar. Aufgrund der konstanten Werte aus dem Upstream und Core kommt es zu keiner großen Änderung des Gesamt-GWP über die verschiedenen Lebensdauern. Das Beispiel zeigt die Relevanz der Benutzungsdauer in Bezug auf die Umweltwirkung eines Förderers.



Tabelle 2. GWP des Referenzförderers nach Lebensdauer

| Lebensdauer [Jahre] | GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent] |
|---------------------|--------------------------------------|
| 2                   | 1054                                 |
| 5                   | 1094                                 |
| 10                  | 1162                                 |
| 20                  | 1297                                 |

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im vorliegenden Beitrag wurde ein ökologischer Fußabdruck eines repräsentativen Scharnierbandkettenförderers, dem sogenannten Referenzförderer, berechnet. Die Ergebnisse der Ökobilanz wurden anhand der Wirkungskategorien Globales Erwärmungspotential, Eutrophierung und Versauerung dargestellt. Entgegen den Erwartungen hat jedoch nicht die Nutzungsphase mit der Versorgung mit elektrischer Energie den größten Einfluss auf den Treibhauseffekt, sondern die Herstellung der Rohmaterialien und des eigentlichen Fördersystems. Nichtsdestotrotz besitzt der Energieverbrauch eines Fördersystems beim Anwender große Bedeutung, sodass Einflussfaktoren diesbezüglich eruiert wurden. Die durch die Antriebseinheit verursachten Verluste sollen dabei im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens gezielt untersucht und Versuche zur Ermittlung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Belastung durchgeführt werden. Weiterhin erfolgen Messungen der Energieverbräuche bei Praxispartnern, die zur Optimierung und Anpassung des analytischen Berechnungsmodells genutzt werden. Darüber hinaus wird ein mögliches Recycling von Förderketten in der Entsorgungsphase weiter spezifiziert. Ziel des von der Röchling Stiftung geförderten Forschungsvorhabens ist die ökologische Gesamtbetrachtung eines Förderers und die Erstellung einer Produkt-Kategorie-Regel, die eine genormte Berechnungsvorschrift für die ökologische Deklaration von Fördersystemen darstellt.



## LITERATUR

- [Bre12] W.-R. Bretzke, K. Barkawi: Nachhaltige Logistik, Antworten auf eine globale Herausforderung, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg 2010, 2012
- [DIN14040] DIN EN ISO 14040:2006, Environmental management - Life Cycle Assessment – principles and framework (ISO 14040:2006), German and English version (EN ISO 14040:2006)
- [ifeu19] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: <https://www.ifeu.de/methoden/wirkungsabschaetzung/>, Zugriff 10.07.2019
- [Aue06] Auerbach, P.: Zur Beanspruchung und Lebensdauer raumgängiger Gleitketten aus Kunststoff. Dissertation, TU Chemnitz, 2006.

---

**M.Sc. Marcus Bona**, Research Assistant and member of the group “Plastic Components and Tribology” at the “Professorship of Materials Handling, Conveying and Conveying Engineering“, Technische Universität Chemnitz.

**Dipl.-Wirt.-Ing. Lynn Lüdemann**, Research Assistant and member of the group “Plastic Components and Tribology” at the “Professorship of Materials Handling, Conveying and Conveying Engineering“, Technische Universität Chemnitz.

**Dr.-Ing. Jens Sumpf**, Group Leader “Plastic Components and Tribology” at the “Professorship of Materials Handling, Conveying and Conveying Engineering“, Technische Universität Chemnitz.

**Prof. Dr.-Ing. Markus Golder**, Leader of the “Professorship of Materials Handling, Conveying and Conveying Engineering“, Technische Universität Chemnitz.

Address: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Germany,  
 Phone: +49 (0) 371 531 32166, Fax: +49 (0) 371 531 832166,  
 E-Mail: [marcus.bona@mb.tu-chemnitz.de](mailto:marcus.bona@mb.tu-chemnitz.de)