

Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW

Technische Hochschule Mittelhessen

Kunststofferzeugnisse Occhipinti

Effizienz-Agentur NRW

***Vorgehensweise für Kunststoffverarbeiter zur  
Bewertung von Sekundär-CO<sub>2</sub>-Äquivalenten beim  
Einsatz von Rezyklaten***

*Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem AZ: 35250/01  
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt*

von

M.Sc. Jan Tinz\*

Dipl.-Ing. Andreas Kürten

Prof. Dipl.-Ing. Holger Rohn

Lüdenscheid, 30. Mai 2023

---

\* bis Oktober 2022 an der THM, ab Juli 2022 am KIMW beschäftigt

**Bezugsquelle des Forschungsberichts:**

Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH (KIMW)

Karolinenstrasse 8  
58507 Lüdenscheid  
NRW / Deutschland

Jan Tinz, M. Sc.  
Anwendungstechnik

Tel.: +49 2351 1064 – 896  
Fax: +49 2351 1064 – 190

Email: [tinz@kunststoff-institut.de](mailto:tinz@kunststoff-institut.de)  
Internet: [www.kunststoff-institut.de](http://www.kunststoff-institut.de)

Technische Hochschule Mittelhessen (THM)  
Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen

Wilhelm-Leuschner-Straße 13  
61169 Friedberg  
HE / Deutschland

Prof. Dipl.-Ing. Holger Rohn  
Life Cycle Management

Tel.: +49 6031 604 – 5769

Email: [holger.rohn@wi.thm.de](mailto:holger.rohn@wi.thm.de)  
Internet: [www.thm.de/wi](http://www.thm.de/wi)

---

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	II
Tabellenverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis .....	III
Zusammenfassung .....	IV
1 Einleitung .....	1
1.1 Aktuelle Problemstellung .....	1
1.2 Projektziele .....	2
2 Gegenstand des Forschungsprojekts .....	3
2.1 AP 1 – Entwicklung eines Standardprozesses .....	3
2.2 AP 2 – CO <sub>2</sub> -Bilanzierung eines Spritzgießbauteils .....	3
2.3 AP 3 – Einsatz rezyklierter Kunststoffe .....	3
2.4 AP 4 – Erstellung eines Handlungsleitfadens .....	4
2.5 AP 5 – Datenaufbereitung für eine Stoffdatenbank.....	5
2.6 AP 6 – Projektmanagement .....	5
3 Projektergebnisse .....	6
3.1 Auswahl der Ökobilanzierungssoftware und Datenbanken .....	6
3.1.1 Bewertung von Datenbanken .....	6
3.1.2 Auswahl der Softwarelösung .....	8
3.1.3 Grundlagen zur ausgewählten Software .....	10
3.2 Entwicklung des Standardprozesses.....	11
3.2.1 Energieeffizienz eingesetzter Spritzgussmaschinen .....	12
3.2.2 Auswirkungen des Rezyklats auf den Stromverbrauch .....	14
3.2.3 Vergleich der Zugfestigkeit von Neuware und Rezyklat.....	16
3.3 Mechanisches Recycling in der Kunststoffbranche .....	17
3.3.1 Prozessmodule der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti .....	18
3.3.2 Sensitivitätsanalyse für Entsorgung und Energie .....	21
3.3.3 Einsparpotential durch den Einsatz von Kunststoffmahlgut .....	26
3.3.4 Inline-Recycling von Angüssen und Ausschuss .....	27
3.4 Allokationsverfahren beim Recycling im offenen Kreislauf .....	28
4 Fazit und Ausblick.....	35
Literaturverzeichnis .....	IV

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zugstäbe als Standardprodukt des Spritzgießprozesses mit Anguss.....	11
Abbildung 2: Zugfestigkeit der Primär- und Sekundärrohstoffe .....	16
Abbildung 3: Teilprozesse zum mechanischen Recycling von Kunststoffteilen .....	18
Abbildung 4: In- und Outputs des Prozessmoduls "Kunststoffteile transportieren" .....	19
Abbildung 5: In- und Outputs des Prozessmoduls "Kunststoffteile sortieren" .....	19
Abbildung 6: In- und Outputs des Prozessmoduls "Kunststoffteile mahlen" .....	19
Abbildung 7: In- und Outputs des Prozessmoduls "Mahlgut trennen und verpacken" .....	20
Abbildung 8: Treibhauspotential in CO <sub>2</sub> -Äquivalente von 1 kg Mahlgut aus ABS .....	23
Abbildung 9: Treibhauspotential in CO <sub>2</sub> -Äquivalente von 1 kg Mahlgut aus PA66GF30 ...	24
Abbildung 10: Treibhauspotential in CO <sub>2</sub> -Äquivalente von 1 kg Mahlgut aus PC .....	25
Abbildung 11: Materialfluss bei Anwendung der 100:0 Regel .....	30
Abbildung 12: Materialfluss bei Anwendung der 50:50 Regel .....	31
Abbildung 13: Materialfluss bei Anwendung der 0:100 Regel .....	32

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich von Datenbanken für Ökobilanzen.....	7
Tabelle 2: Nutzwertanalyse zur Bewertung von Datenbanken .....	8
Tabelle 3: Auflistung aller relevanter Softwareanwendungen .....	9
Tabelle 4: Versuchsplan für neuwertiges Kunststoffgranulat.....	12
Tabelle 5: spezifischer Energieverbrauch bei der Produktion und Nutzungsphase .....	13
Tabelle 6: PCF von 1.000 Zugstäben der Sumitomo Demag IntElect 130/520-250 D30 .	14
Tabelle 7: PCF von 1.000 Zugstäben der Krauss Maffei CX 130/380 D30 .....	14
Tabelle 8: Einfluss von Neuware (N) und Rezyklat (R) auf den Energieverbrauch .....	15
Tabelle 9: Datensätze zur Berechnung des PCF von Mahlgut .....	20
Tabelle 10: Spezifischer Energiebedarf und Product Carbon Footprint je 1 kg Mahlgut ...	21
Tabelle 11: Datensätze in den Sensitivitätsanalysen 1 bis 3 .....	22
Tabelle 12: Life Cycle Impact Assessment von 1 kg Mahlgut aus ABS .....	22
Tabelle 13: Life Cycle Impact Assessment von 1 kg Mahlgut aus PA66GF30 .....	23
Tabelle 14: Life Cycle Impact Assessment von 1 kg Mahlgut aus PC .....	24
Tabelle 15: Life Cycle Impact Assessment von 1 kg Mahlgut aus POM .....	25
Tabelle 16: Vergleich des Product Carbon Footprint mit Optimierungspotential .....	26
Tabelle 17: Durchsatzleistung und spezifischer Energieverbrauch .....	28
Tabelle 18: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen von System A bei 100:0 .....	32
Tabelle 19: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen von System B bei 100:0 .....	32
Tabelle 20: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen beider Systeme bei 50:50 .....	33
Tabelle 21: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen von System A bei 0:100 .....	34
Tabelle 22: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen von System B bei 0:100 .....	34
Tabelle 23: Vergleich des Product Carbon Footprint in Abhängigkeit der Allokation.....	35

## Abkürzungsverzeichnis

AZ	Aktenzeichen
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
AP	Arbeitspaket
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
CSR	Corporate Social Responsibility
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEW	Energieeffizienz in der Wirtschaft
ELCD	European Life Cycle Database
EN	Europäische Norm
GEMIS	Globale Emissions-Modell Integrierter Systeme
GF	Glasfaser
GHG	Greenhouse Gas Protocol
GWP	Global Warming Potential
icRS	International Conference on Resource Sustainability
ISO	International Standardisation Organisation
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
LKSG	Lieferkettensorgfaltspflichtengesetzes
N	Neuware
NEEDS	New Energy Externalities Development for Sustainability
PA66GF30	Polyamid 6.6 mit 30% Glasfaseranteil
PC	Polycarbonat
PCF	Product Carbon Footprint
POM	Polyoxymethylen
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme
R	Rezyklat

---

## Zusammenfassung

In dem Projekt SekÄqui „Vorgehensweise für Kunststoffverarbeiter zur Bewertung von Sekundär-CO<sub>2</sub>-Äquivalenten beim Einsatz von Rezyklaten“ wurde ein Handlungsleitfaden für kleine und mittlere Unternehmen entwickelt, um vor dem Hintergrund einer zukünftigen Berichtspflicht zum Product Carbon Footprint (PCF) selbstständig die eigenen Produkte bilanzieren zu können. Mit dem Fokus auf ein kunststoffverarbeitendes Unternehmen galt es zunächst, einen Standardprozess zu entwerfen, anhand dessen eine CO<sub>2</sub>-Bilanzierung durchgeführt werden konnte. Zugleich wurde eine Marktrecherche nach geeigneten Softwarelösungen zur Ökobilanzierung durchgeführt, um über die verfügbaren Datensätze aus integrierbaren Datenbanken die zu bilanzierenden Prozesse präzise abzubilden. Aufgrund der umfassenden Möglichkeiten zur Anwendung von Datensätzen aus den Stoffdatenbanken Ecoinvent und GaBi wurde die professionelle Ökobilanzierungssoftware Umberto LCA+ von iPoint systems für die projektinterne Durchführung der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung ausgewählt. Darüber hinaus wurde das ecocockpit der Effizienz-Agentur NRW verwendet, um über Schulungen basierend auf dem entwickelten Handlungsleitfaden den Schulungsteilnehmern am Kunststoff-Institut einen einstiegfreundlichen Zugang zur Berechnung eines PCF zu ermöglichen. Zur Definition des Standardprozesses wurde das Fertigungsverfahren des Spritzgießens angewendet, da hierbei mit einer Substitution von neuwertigem Granulat durch Kunststoffmahlgut unmittelbar die in der Produktion verarbeiteten Primärrohstoffe durch Sekundärrohstoffe ersetzt werden konnten. Somit wurde es möglich, auch die Transformation einer linearen Produktionskette in eine Kreislaufwirtschaft durch den betrachteten Standardprozess unter der Verwendung von Rezyklat abzubilden. Als hervorgehobenes Produkt aus dem Standardprozess wurde ein Zugstab festgelegt, so dass die Auswirkungen des mechanischen Recyclings auf die Produktqualität über Zugversuche untersucht werden konnten. Des Weiteren wurde eine ökologische Optimierung des Standardprozesses angestrebt, indem dieser auf die Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz über Einstellparameter des Spritzgießprozesses sowie dem Energieverbrauch einer hydraulischen gegenüber einer elektrischen Spritzgießmaschinen untersucht wurde. In dem Rahmen der Energieeffizienz wurde ebenfalls der mechanische Recyclingprozess selbst betrachtet, so dass die Produktion von Mahl gut am Werk des Projektpartners Kunststoffherzeugnisse Occhipinti mit dem unternehmensinternen Vermahlen von Produktionsabfällen über eine in den Produktionsprozess integrierte Schneidmühle verglichen wurde. Über die aufgenommenen Prozessschritte zum großtechnisch angelegten mechanischen Recycling von „post industrial waste“ wurde das Treibhauspotential von Mahl gut der technischen Kunststoffe Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), Polyamid 6.6 mit 30 % Glasfaseranteil (PA66GF30), Polycarbonat (PC) und Polyoxymethylen (POM) als Sekundärrohstoffe bestimmt. Durch die Anwendung von Sensitivitätsanalysen wurden die berechneten Ergebnisse validiert, indem die Abhängigkeit der Haupttreiber des berechneten PCF von den eingesetzten Datensätzen bestimmt wurde. Zudem wurden die Ergebnisse zur Analyse des Kunststoffmahlgutes auf der Ökobilanzwerkstatt 2022 in Darmstadt präsentiert und vor dem wissenschaftlichen Auditorium verteidigt. Darüber hinaus wurde auf der „International Conference on Resource Sustainability“ der Einfluss der Allokation beim Recycling im offenen Kreislauf auf den PCF diskutiert, da der Einsatz von Rezyklaten eine Multifunktionalität des Materialflusses in mehreren Produktsystemen hervorruft, welche über den Recyclingprozess die Lebenszyklusphasen der Rohstoffgewinnung und Entsorgung betrifft. Sowohl über die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von Kunststoffmahlgut als auch über den Einfluss der Allokation in offenen Recyclingkreisläufen wurde ein wissenschaftlicher Artikel verfasst. Die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von Kunststoffmahlgut wurde in der Fachzeitschrift „Waste des Herausgeber MDPI veröffentlicht (Tinz et al. 2022) und der Einfluss von Allokation durchläuft in „Resources, Conservation & Recycling Advances“ und Elsevier zurzeit den peer-review Prozess.

# 1 Einleitung

## 1.1 Aktuelle Problemstellung

Viele Unternehmen stehen in Zeiten des Klimawandels vor der Herausforderung, eine CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der eigenen firmeninternen Prozesse durchzuführen, um die geforderte Berichtspflichten auf EU-Ebene zu erfüllen. So wird mit der geplanten Richtlinie „Corporate Sustainability Reporting Directive“ (CSRD) die bislang bestehende „Corporate Social Responsibility“ (CSR) Berichterstattung aktualisiert (CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz, 2017). Daraus folgt ab dem 1. Januar 2024 eine erweiterte Berichtspflicht über eine Strategie für den Übergang zu einer nachhaltigeren Wirtschaft, um im Einklang mit dem Pariser Abkommen die globale Erwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. Dies betrifft jedoch nicht nur die direkt angesprochenen großen Unternehmen der CSRD-Richtlinie, sondern setzt vielmehr auch alle Zulieferer entlang der gesamten Lieferkette unter Druck, denn für eine Berechnung des „Product Carbon Footprint“ (PCF) ist eine CO<sub>2</sub>-Bilanzierung auch aller verarbeiteten Vorprodukte erforderlich. Dieser Prozess wird zudem durch die Einführung des Lieferkettensorgfaltspflichtengesetzes (LKSG) ab Januar 2023 unterstützt (LKSG, 2021), durch das die betroffenen Unternehmen zu sozialen und ökologischen Aspekten in ihren Lieferketten berichten müssen.

Im Gegensatz zu Großunternehmen verfügen diese Zulieferer als kleine und mittlere Unternehmen (KMU) häufig über keine interne Abteilung zur Erstellung eines PCF, da es aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll ist, hierfür eigene Kapazitäten aufzubauen. Darüber hinaus sind kostenlose Softwarelösungen wie das einsteiger-freundliche ecocockpit der Effizienz-Agentur NRW nicht bekannt. Zudem erfordern auch niederschwellige Werkzeuge zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung eine intensive Auseinandersetzung mit der Thematik, um normgerecht die Systemgrenzen der eigenen Bilanzierung einzuhalten, Abschneidekriterien zu definieren und eine Sachbilanz über die zu bilanzierenden Prozessinputs und -outputs zu erfassen.

Besondere Herausforderungen stellen Prozesse, Produkte oder gar Produktsysteme dar, welche mehr als nur eine Funktion erfüllen. Diese Multifunktionalitäten erfordern je nach betrachteter Ebene eine Zuordnung, im Allgemeinen auch Allokation genannt, der auftretenden Belastungen auf die zu bilanzierende funktionelle Einheit einer Dienstleistung oder eines Produktes (Ekvall & Finnveden, 2001). Als praxisnahes Beispiel ist hier das Recycling im offenen Kreislauf aufzuführen, da durch die Einführung eines Recyclingprozesses sowohl Abfall vermieden als auch der Bedarf an neuem Rohstoff reduziert wird. Die Nutzung desselben Materials in mehreren Produktsystemen führt in der Regel zu einer Verringerung des PCF sowie zu einem nachhaltigeren Umgang mit begrenzten Ressourcen (Fecke et al., 2022). Vor allem in der Kunststoffverarbeitung bietet das mechanische Recycling von Angussteilen oder gar Ausschuss zu Mahlgut eine energieschonende Möglichkeit, verarbeitete Kunststoffe werkstofflich zu recyceln und als Rezyklat anteilig der Produktion zurückzuführen, so dass die Ausschussquote gesenkt und der Nutzungsgrad des Rohstoffeinsatzes erhöht werden kann. Somit wurden bereits 2019 mit ansteigender Tendenz 1,9 Mio. Tonnen an Rezyklaten in der Kunststoffproduktion eingesetzt. Dies entsprach einem Anteil von 13,7 % der gesamten Menge an verarbeitetem Kunststoff (Conversio Market & Strategy GmbH, 2020).

Die zunehmende Menge an werkstofflich verarbeitetem Rezyklat setzt den Fokus der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung damit auch auf die Erfassung von Recyclingprozessen, welche bislang kaum in den gängigsten Stoffdatenbanken wie „Ecoinvent“ oder „GaBi“ enthalten sind. Hierzu gilt es unterschiedlichste Recyclingverfahren von mechanischem bis chemischem Recycling sowie das daraus folgende Produkt als Mahlgut, extrudiertes Regranulat oder gar Compound mit zusätzlichen Additiven zu differenzieren. Zudem erschwert die stark

schwankende Produktqualität zwischen Rezyklaten aus „post consumer“ und „post industrial“ Abfällen eine allgemeine Bewertung für die Integration in Stoffdatenbanken und zur Anwendung in einer Berechnung des PCF nach DIN EN ISO 14067 (European Committee for Standardization, 2018).

## 1.2 Projektziele

Vor dem Hintergrund der aktuellen Problemstellung setzt das Forschungsprojekt „SekÄqui“ dazu an, CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die Herstellung von Sekundärrohstoffen zu berechnen. Gegenstand der Untersuchung ist Rezyklat in Form von Mahlgut des Projektpartners Kunststoffherzeugnisse Occhipinti. Auf Basis der „post industrial“-Stoffströme entlang des mechanischen Recyclingprozesses am Werk wird das Treibhauspotential von je 1 kg der technischen Kunststoffe Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), Polyamid 6.6 mit 30 % Glasfaseranteil (PA66GF30), Polycarbonat (PC) und Polyoxymethylen (POM) bestimmt.

Für die Transformation linearer Produktionsketten in eine nachhaltigere Kreislaufwirtschaft können primäre Rohstoffe durch Rezyklate wie das betrachtete Mahlgut der beschriebenen Kunststoffe ersetzt werden, um durch das implementierte Recycling den PCF der daraus hergestellten Produkte zu reduzieren. Hierdurch würden die Auswirkungen der Rohstoffgewinnung und Entsorgung auf die globale Erderwärmung minimiert. Dieser Transformationsprozess wird in dem Projekt „SekÄqui“ beispielhaft für die Produktion eines Standardteiles im Spritzgussverfahren am Technikum des Kunststoff-Institut Lüdenscheid abgebildet, welches zu Beginn vollständig aus neuwertigem Granulat hergestellt wird. Mit dem Einfahren des Produktionsprozesses soll der Einfluss von Stell- und Wirkgrößen auf den Energieverbrauch einer hydraulischen und rein elektrisch arbeitenden Spritzgießmaschine untersucht werden. Im Anschluss wird der Anteil an Rezyklat sukzessive erhöht, um die Herausforderungen bei der Umstellung der Produktion auf Sekundärrohstoffe zu untersuchen und dessen Einsparpotential zu bestimmen.

Durch die Anwendung des Recyclings ergibt sich eine Nutzung des Materialstromes in mehreren Produktsystemen. Diese auftretende Multifunktionalität erfordert eine Allokation der Belastungen, welche bei der Rohstoffgewinnung, der Entsorgung sowie bei dem Recycling verursacht wurden. Somit gilt es, die Abhängigkeit des PCF von dem angewendeten Allokationsverfahren auf die betroffenen Produktsysteme zusammen mit den gesetzten Systemgrenzen und definierten Abschneidekriterien zu überprüfen. Die Bilanzgrenzen sollen gemäß „cradle to gate“ so gewählt werden, dass alle erforderlichen Prozesse ab der Entnahme der Rohstoffe aus der Ökosphäre bis zur Herstellung des fertigen Produktes am Werkstor in die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung mit aufgenommen werden. Zur Ergänzung des aufzunehmenden Produktsystems werden Datensätze aus den durch die Technische Hochschule Mittelhessen zugänglichen Stoffdatenbanken eingesetzt.

Basierend auf den gesammelten Erkenntnissen zur Integration von Rezyklaten in der Produktion verfolgt das Forschungsprojekt „SekÄqui“ als übergeordnetes Ziel die Erarbeitung eines Handlungsleitfadens, welcher die erforderlichen Schritte für die vollständige Berechnung eines PCF unter Berücksichtigung der geeignetsten Systemgrenzen und Abschneidekriterien beschreibt. Das standardisierte Vorgehen in diesem Handlungsleitfaden soll auch auf andere Produktionsprozesse übertragbar sein, sodass beispielsweise KMU dazu befähigt werden, selbstständig eigene Produkte und firmeninterne Prozesse normgerecht zu bilanzieren. Dazu wird die Anwendung kostenloser und einstiegfreundlicher Softwarelösungen zur Ökobilanzierung wie das ecocockpit der Effizienz-Agentur NRW geprüft, welche zudem die Möglichkeit bieten, validierte Daten aus dem Forschungsprojekt „SekÄqui“ in die eigene Berechnung mit aufzunehmen. Zudem wird beabsichtigt, noch während der Projektlaufzeit Schulungen am Kunststoff-Institut



Lüdenscheid zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung anzubieten, um das Schulungskonzept weiter zu verfeinern und ggf. anzupassen. Auf diese Weise sollen den Schulungsteilnehmern auch zukünftig die erarbeiteten Ergebnisse zugänglich gemacht werden.

## **2 Gegenstand des Forschungsprojekts**

### **2.1 AP 1 – Entwicklung eines Standardprozesses**

Für die Erarbeitung einer übertragbaren Vorgehensweise zur Berechnung eines PCF wurde zu Beginn des Forschungsprojektes „SekÄqui“ das Konzept für einen Standardprozess entworfen. Dieser Standardprozess musste die Anforderung erfüllen, die Transformation einer linearen Produktionskette in eine Kreislaufwirtschaft abzubilden, indem neuwertige Rohstoffe durch Rezyklate ersetzt werden können. Mit der Definition von Mess- und Wirkgrößen auf diesen Standardprozess wurde eine Versuchsmatrix erstellt, welche daraufhin als Grundlage für die Versuchsdurchführung einschließlich der zu bilanzierenden Stoffströme diente. Weiter wurden Recherchen zur grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Berechnung eines PCF durchgeführt, um die Systemgrenzen und Abschneidekriterien des Produktsystems gemäß den geltenden Richtlinien und Normen im Bereich Life Cycle Management zu setzen. Im Rahmen dieser Recherche wurden zudem verschiedene Ökobilanzierungssoftwares einschließlich der kompatiblen Stoffdatenbanken miteinander verglichen, um deren Einsatz sowohl für die projektinterne Verwendung zur Bilanzierung von Kunststoffmahlgut als auch darüber hinaus für deren Anwendung in den geplanten Schulungen zu bewerten.

### **2.2 AP 2 – CO<sub>2</sub>-Bilanzierung eines Spritzgießbauteils**

Als stellvertretender Standardprozess für die Kunststoffverarbeitung wurde das Spritzgießen eines Zugstabes gemäß den Vorgaben aus DIN EN ISO 527-2 für ein Normteil mit der Bezeichnung Typ 1A ausgewählt. Umgesetzt wurde der projektinterne Standardprozess in diesem Arbeitspaket für neuwertiges Kunststoffgranulat auf einer rein elektrisch arbeitenden Spritzgießmaschine Sumitomo Demag IntElect 130/520-250 D30 sowie auf einer hydraulischen Spritzgießmaschine Krauss Maffei CX 130/380 D30, um den Energiebedarf gemäß Euromap 60.2 mit Peripherie der Spritzgießmaschinen für die Produktion desselben Bauteiles zu vergleichen. Der Standardprozess wurde nach Qualität und Wirtschaftlichkeit optimal eingestellt. Basierend auf den Recherchen zur Berechnung des PCF aus Arbeitspaket 1 wurde das hergestellte Normteil von beiden Spritzgießmaschinen mit den Systemgrenzen „cradle to grave“ bilanziert, wodurch neben den direkten Prozessinputs auch alle vorgelagerten Prozessschritte zur Herstellung der Rohstoffe sowie alle nachfolgenden Prozessschritte zur Entsorgung des Materials in die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung über die Anwendung von Datensätzen aus Stoffdatenbanken mitaufgenommen wurden. Als Abschneidekriterium für einen zu bilanzierenden Prozessinput wurde eine Masse von 1 % bezogen auf die kumulierte Masse aus allen Stoffströmen des Produktsystems gesetzt. Zur Berechnung des PCF wurde aus dem Vergleich der Ökobilanzierungssoftware aus dem vorherigen Arbeitspaket das Programm Umberto LCA+ von iPoint-systems ausgewählt, da hierdurch sowohl die Datensätze der Stoffdatenbank Ecoinvent 3.8 als auch von GaBi SP40 2020 verwendet werden könnten. Zudem konnten die Haupttreiber der Sachbilanz zur Entstehung des PCF identifiziert werden, um damit Ansätze zur Optimierung des Standardprozesses zu bestimmen.

### **2.3 AP 3 – Einsatz rezyklierter Kunststoffe**

Für den Einsatz von Rezyklaten in dem zuvor definierten Standardprozess galt es zunächst, den Recyclingprozess zu analysieren, um den PCF bezogen auf 1 kg Mahl gut der technischen Kunststoffe ABS, PA66GF30, PC und POM zu berechnen. Datensätze über die CO<sub>2</sub>-Äquivalente von Kunststoffrezyklat lagen zum Zeitpunkt der Bearbeitung weder in der

Stoffdatenbank Ecoinvent 3.8 noch in GaBi SP40 2020 vor. Am Werk des Projektpartners Kunststoffherzeugnisse Occhipinti wurden alle erforderlichen Prozessinputs und -outputs aufgenommen.

Der Stromverbrauch der gesamten Recyclinganlage wurde für jede Kunststoffsorte im Dauerbetrieb für eine Produktionszeit von einer Stunde erfasst und auf die produzierte Menge an Mahlgut bezogen. Um Abhängigkeit der Durchsatzleistung von der Geometrie des definierten Normteils zu reduzieren, wurde diese aus den letzten 10 Auftragsdaten der Firma Kunststoffherzeugnisse Occhipinti für jede Kunststoffsorte separat berechnet. Die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung unterstützten die Entscheidung des Projektpartners, dessen Fertigung sowohl ökonomisch als auch ökologisch durch eine Investition in eine neue Mahlmühle zu optimieren.

Aus der vorgegebenen Geometrie des Normteils Typ 1A gemäß 527-2 ergab sich ein Masseverhältnis von 2:1 zwischen Produkt und Anguss, so dass je Zyklus zwei Zugstäbe sowie ein Angussteil aus dem Spritzgießprozess hervorgegangen sind. Dieses Verhältnis wurde genutzt, um zunächst 33 % des primären Kunststoffs durch sekundäres Mahlgut zu ersetzen. Schließlich wurde in einer weiteren Versuchsreihe zusätzlich 100 % Mahlgut verarbeitet, um die Auswirkungen von Rezyklat auf den Standardprozess abbilden zu können. Zudem wurde die Fließfrontgeschwindigkeit als Einstellparameter im Spritzgießprozess in drei Stufen von 100 über 200 auf bis zu 300 mm/s erhöht, um deren Einfluss auf den Energieverbrauch der Spritzgießmaschine mit Peripherie nach Euromap 60.2 für jede Kunststoffsorte zu bestimmen. Mit dem Einsatz von Rezyklaten in dem definierten Standardprozess zur Produktion eines Normteils im Spritzgussverfahren, durchläuft der Materialstrom nun mehrere Produktsysteme, so dass dessen Multifunktionalität in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung eines Produktes aus System eins bzw. zwei über ein Allokationsverfahren für das Recycling im offenen Kreislauf zugeordnet werden muss. Daher wurde der Einfluss des jeweiligen Allokationsverfahrens in Form der 100:0, 50:50, und 0:100-Regel auf den PCF über eine detaillierte Darstellung der Gutschriften und Belastungen auf die Produktlebenszyklusphasen der Rohstoffgewinnung, des Recyclings sowie der Entsorgung bestimmt.

## **2.4 AP 4 – Erstellung eines Handlungsleitfadens**

Die Erkenntnisse aus Arbeitspaket drei in der Umsetzung der Transformation einer linearen Produktionskette in eine Kreislaufwirtschaft über die Substitution von Neuware durch Rezyklat in dem definierten Standardprozess des Spritzgießens wurden in einem Handlungsleitfaden zusammengefasst, welcher die Grundlage für eine Schulung von KMU am Kunststoff-Institut Lüdenscheid bildete. Der Handlungsleitfaden wurde nach der Taxonomie von Lernzielen grundsätzlich in die drei Kapitel „kennen“, „verstehen“ und „anwenden“ unterteilt, um den Schulungsteilnehmern mit ansteigender Komplexität die Berechnung eines PCF auf Basis einer abzubildenden Prozessstruktur innerhalb gesetzter Systemgrenzen und Abschneidekriterien aufzuzeigen. Beginnend mit der Darstellung wichtiger Normen und Richtlinien zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung als spezielle Form einer Ökobilanz, deren Grundsätzen und Rahmenbedingungen in der Norm DIN EN ISO 14040 beschrieben werden, über eine Einteilung von Produkten in Lebenszyklusphasen mündet das Kapitel „kennen“ in einer Beschreibung der gängigsten Softwarelösungen zur Ökobilanzierung einschließlich der jeweils kompatiblen Stoffdatenbanken. Durch den anschließenden Abschnitt „verstehen“ sollen die Schulungsteilnehmenden den Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Bilanz aus der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens, die Erstellung einer Sachbilanz sowie die Wirkungsabschätzung auf den „midpoint factor“ Klimawandel nach ReCiPe 2016 nachvollziehen. Im letzten Kapitel „anwenden“ werden schrittweise zwei Praxisbeispiele aufgeführt, welche zum einen die projektinterne Berechnung des PCF von je 1 kg Mahlgut am Werk des Projektpartners Occhipinti beschreiben sowie zum anderen vertiefend die

---

Auswirkung des angewendeten Allokationsverfahrens auf den PCF des definierten Normteiles aus anteiligem Rezyklat aufzeigen.

Eine Pilotschulung im Rahmen des Projektkonsortiums fand am 21. Juni 2022 unter Einbeziehung aller Projektpartner statt, wobei vor allem die Firma Kunststoffherzeugnisse Occhipinti als KMU der Zielgruppe dieser Schulung entsprach. Initialisiert durch das erste Feedback basierend auf dieser Pilotschulung durchlief der Handlungsleitfaden bis Projektende einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess. Auszüge aus dem Handlungsleitfaden wurden zudem in der Seminarreihe zum Thema Nachhaltigkeit zunächst in einem Einsteiger-Seminar am 8. September 2022 sowie in einem Experten-Seminar Nachhaltigkeit vom 28. bis 29. September 2022 am Kunststoff-Institut Lüdenscheid präsentiert. Eine vollständige Umsetzung des Handlungsleitfadens in einer Schulung über die Erstellung einer CO<sub>2</sub>-Bilanz für Kunststoffverarbeiter wurde mit positiver Evaluation bereits am 17. November 2022 unter dem Titel „CO<sub>2</sub>-Bilanz für Kunststoffverarbeiter“ am Kunststoff-Institut Lüdenscheid durchgeführt.

## **2.5 AP 5 – Datenaufbereitung für eine Stoffdatenbank**

Zur Validierung der ermittelten Stoffdaten von Mahlgut aus ABS, PA66GF30, PC und POM wurde die Berechnung des PCF von der THM am Werk des Projektpartners Kunststoffherzeugnisse Occhipinti auf der Ökobilanzwerkstatt 2022 vom 21. bis 22. September im Format einer wissenschaftlichen Tagung an der TU Darmstadt präsentiert. Zudem wurden die auf diese Weise verteidigten Projektergebnisse über die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von Kunststoffmahlgut in der wissenschaftlichen Fachzeitschrift „Waste“ des Herausgebers MDPI als „open access“ zur Publikation eingereicht. Als Voraussetzungen für eine Übernahme der Stoffdaten in das lizenzfrei nutzbare ecocockpit der Effizienz-Agentur NRW wurden die Systemgrenzen des Produktsystems auf „cradle to gate“ über die Produktlebenszyklusphasen der Rohstoffgewinnung und Produktion gesetzt. Des Weiteren wurde der individuelle Stromtarif der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti durch einen deutschen Strommix der Stoffdatenbank Ecoinvent 3.8 ersetzt, um eine allgemeine Betrachtung des mechanischen Recyclings von sortenreinem „post industrial waste“ zu Kunststoffmahlgut bundesweit darzustellen.

Die Forschungsergebnisse über die Auswirkungen der Allokation auf den PCF von Produkten in einer Kreislaufwirtschaft wurden von der THM am 1. August 2022 auf einer weiteren wissenschaftlichen Konferenz online verteidigt. Als Ergebnis hat das Komitee der „International Conference on Resource Sustainability“ (icRS) 2022 von der „University of Michigan“ dazu eingeladen, die präsentierten Projektergebnisse über den Einfluss der Allokation zu veröffentlichen. Nach dem Verfassen des Fachartikels über die Auswirkung von Allokationsverfahren, befindet sich die Veröffentlichung derzeit im peer-Review Prozess. Ein weiterer Artikel zur Bewertung von Kunststoffmahlgut wurde dagegen bereits in der wissenschaftlichen Fachzeitschrift „Waste“ des Herausgebers MDPI veröffentlicht (Tinz et al., 2022).

## **2.6 AP 6 – Projektmanagement**

Im Rahmen des Kooperationsprojektes wurde der Projektverlauf in regelmäßigen Projekttreffen zwischen den Projektpartnern Kunststoff-Institut Lüdenscheid und der Technischen Hochschule Mittelhessen in einem Abstand von zwei bis vier Wochen besprochen, um Projektergebnisse in Form von Präsentationen, Protokollen und weiteren notwendigen Formaten wie beispielweise Excel-Tabellen zu dokumentieren und die Zielvorgaben gemäß der Meilensteinplanung des Projektantrages einzuhalten. Weitere Projekttreffen im vollständigen Kreis des Projektkonsortiums zusammen mit der Effizienz-Agentur NRW sowie der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti erfolgten in einem größeren Abstand von drei bis sechs Monaten, um einen Konsens über die Ergebnisse des jeweiligen

Projektstandes zu finden und die Verantwortlichkeit zur Bearbeitung der Aufgaben aus den folgenden Arbeitspaketen festzusetzen.

Aufgrund der fortlaufenden peer-review Verfahren zur Veröffentlichung der Projektergebnisse wurde ein Antrag auf eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um drei Monate bis zum 31. Dezember 2022 gestellt und von der DBU bewilligt.

## **3 Projektergebnisse**

### **3.1 Auswahl der Ökobilanzierungssoftware und Datenbanken**

Für die Durchführung einer Ökobilanzierung gibt es eine Vielzahl an Softwarelösungen und Datenbanken, welche zur Unterstützung herangezogen werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Anschaffungspreise und Kompatibilität zwischen den einzelnen Anwendungen musste jedoch zunächst festgelegt werden, welche Ökobilanzierungssoftware und Datenbank sich für das Forschungsprojekt SekÄqui am besten eignete. So wurde in Bezug auf den zu definierenden Standardprozess aus der Kunststoffbranche ein Vergleich der am Markt etablierten Ökobilanzierungssoftwares sowie eine Bewertungsmethode von Datenbanken über ein Punktesystem erstellt. Für die Bewertung wurden verschiedene Kriterien entwickelt, anhand welcher die einzelnen Lösungen quantitativ beurteilt werden konnten.

#### **3.1.1 Bewertung von Datenbanken**

Die Bewertung der Datenbanken erforderte eine differenzierende Betrachtung von Datensätzen in den zu bewerteten Stoffdatenbanken. Für die lebenszyklusorientierte Bewertung eines Produktes ist es notwendig, erhobene Daten zu den einzelnen Prozessen geeignet aufzubereiten (iPoint, 2016). Datenbanken für Ökobilanzen sind hierbei insofern hilfreich, da diese es ermöglichen, Daten von Prozesse zu erfassen, über welche ansonsten keine eigenen Daten vorliegen. Wird zum Beispiel ausschließlich die Herstellung eines Produktes im eigenen Unternehmen untersucht, so sind die Vorstufen des Materials oder des Stroms beispielsweise nicht zwangsläufig bekannt. Die Datenbanken ermöglichen es, diese Vorstufen dennoch durch Durchschnittsdaten in die Untersuchung mit einzubeziehen. Ferner ist bei Datenbanken die Art der Datensätze von Relevanz. Diese können entweder auf Einzelprozessebene (Unit) oder in aggregierter Form (Result) hinterlegt sein. Unit-Datensätze beziehen sich immer auf einen einzelnen Prozessschritt, beispielsweise den direkt vorgelagerten Schritt zur Bereitstellung eines Rohmaterials, während Result-Datensätze alle vorgelagerten Schritte in einem einzelnen Datensatz zusammenfassen. Eine Aufschlüsselung eines Result-Datensatzes ist nicht mehr möglich, jedoch bietet dieser einen Anwendungsvorteil gegenüber einer ansonsten Vielzahl an einzeln abzubildenden Unit-Datensätzen (iPoint, 2016).

Die Datenbanken Ecoinvent und GaBi sind mit über 18.000 bzw. über 14.000 Datensätzen die wohl bekanntesten und größten Datenbanken für Ökobilanzen. Die Ecoinvent-Association stellt einen hohen wissenschaftlichen Anspruch an ihre Datensätze. Die Lizenzkosten belaufen sich auf circa 3.800 € pro Jahr (Ecoinvent Association, 2020). Sphera, die Entwickler hinter der GaBi-Datenbank, legen dagegen erhöhten Wert auf die Nähe der Daten zur Industrie. Hierdurch sind die Datensätze verstärkt auf einzelne Projekte zugeschnitten, wodurch sie weniger transparent und universell sind als die Datensätze aus Ecoinvent (Sphera, 2021). Dennoch sind diese akkurat, da beide Datenbanken unabhängig geprüft werden. Das Preismodell der GaBi-Datenbank ist modular zusammengestellt, so können einzelne Teile der Datenbank zu den Basisdaten hinzugekauft werden. Die Basisdaten allein belaufen sich jedoch bereits auf rund 5.000 €.

Über diese Datenbanken hinaus gibt es eine Vielzahl an kleineren Anbietern, welche kostenfreie Datensätze zur Verfügung stellen. Teilweise handelt es sich hierbei um quelloffene Projekte oder aber Projekte politischer Einrichtungen. Hierunter zählen die „European Life Cycle Database“ (ELCD) der Europäischen Kommission, das „Globale Emissions-Modell Integrierter Systeme“ (GEMIS), „Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme“ (ProBas), die „PlasticsEurope Database“, „New Energy Externalities Development for Sustainability“ (NEEDS) und „Ökobaudat“. So zeigt der Vergleich an Datenbanken aus Tabelle 1, dass neben Ecoinvent und GaBi auch die Datenbank PlasticsEurope, welche sich auf Kunststoff spezialisiert hat, interessant sein könnte. Die Datenbank ist aus einer Kooperation verschiedener Plastikhersteller entstanden, umfasst aktuell allerdings lediglich 52 Datensätze (Association of Plastic Manufacturers, 2021).

Tabelle 1: Vergleich von Datenbanken für Ökobilanzen

Name mit Hyperlink	Entwickler	Lizenz	Beschreibung	Datensätze Kunststoff / Datensätze gesamt
<a href="#">Ecoinvent</a>	Ecoinvent-Association	3.800 € / Jahr	Not-for-profit, unabhängig geprüft, universell, hoher wissenschaftlicher Anspruch	k.A. / 18.000
<a href="#">GaBi</a>	Sphera	modular	unabhängig geprüft, auf einzelne Projekte zugeschnitten, geringere Transparenz, aber Daten nahe an der Industrie	106 / 14.023
<a href="#">ELCD</a>	Europäische Kommission	kostenfrei	2018 abgebrochen. Projekt als "GLAD" weiter zur Sammlung von Datensätzen verschiedener Datenbanken (kostenpflichtig)	k.A / < 1.000
<a href="#">GEMIS</a>	International Institute for Sustainability Analysis and Strategy	kostenfrei	Basiert auf einem Netzwerk aus verschiedenen Wissenschaftlern und Partnern mit dem Prinzip des transdisziplinären Arbeitens, Datenbank noch relativ klein	k.A
<a href="#">ProBas</a>	Umweltbundesamt und IINAS	kostenfrei	Bereiche Energie, Materialien & Produkte, Transport, Entsorgung und sonstige Dienstleistungen	k.A
<a href="#">Plastics Europe Database</a>	PlasticsEurope, Association of Plastic Manufacturers	kostenfrei	Zusammenschluss aus mehreren Plastikherstellern, eigene Datenbank aus anderen heraus entstanden. Leider kaum Informationen öffentlich zugänglich	52
<a href="#">NEEDS</a>	New Energy Externalities Development for Sustainability	kostenfrei	Fokus auf Strom- und Transportdaten	k.A
<a href="#">Ökobaudat</a>	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat	kostenfrei	Ausschließlich für die Ökobilanzierung von Gebäuden	k.A / 800

Die Datenbanken NEEDS und Ökobaudat sind für das Projekt „SekÄqui“ von keiner Relevanz, da ersteres sich auf Strom- und Transportdaten spezialisiert, während zweiteres ausschließlich für die Ökobilanzierung von Gebäuden geeignet ist. Die Datenbanken GEMIS

und ProBas sind aus einer Kooperation des „International Institute for Sustainability Analysis and Strategy“ (IINAS) und dem Umweltbundesamt entstanden (Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat, 2021). IINAS ist ein Netzwerk verschiedener Wissenschaftler und Industriepartner mit dem transdisziplinären Arbeiten als oberstes Prinzip. Während GEMIS ausschließlich in englischer Sprache verfügbar ist, ist ProBas im Grunde eine deutsche Übersetzung (International Institute for Sustainability Analysis and Strategy, 2021). Die Datenbanken geben Einblick in die Bereiche Energie, Materialien und Produkte, Transport, Entsorgung, sowie sonstige Dienstleistungen. Die ELCD-Datenbank der Europäischen Kommission wurde 2018 abgebrochen und ist daher weniger relevant (European Commission, 2018).

Zur allgemeinen Bewertung der Datenbanken mittels einer Nutzwertanalyse in Tabelle 2 wurden folgende Kriterien herangezogen: Preis, Datenumfang, Relevanz der Daten für das Projekt sowie der Bekanntheitsgrad. Die Kriterien wurden innerhalb einer Skala von 1 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte der bestmöglichen Bewertung entsprach. Zusätzlich wurden die einzelnen Kriterien gewichtet. Da dem Projekt ein hohes Budget für Software und Datenbanken zugeordnet wurde, ist dem Kriterium Preis lediglich eine Gewichtung von 10 % zugeordnet worden. Der Datenumfang war mit einer Gewichtung von 20 % durchaus relevanter, jedoch nicht so wichtig wie die Relevanz der in der jeweiligen Datenbank enthaltenen Datensätze selbst. Die Relevanz der Daten wurde mit 50 % gewichtet, da dies das oberste Kriterium darstellte, denn umfangreiche Daten aus beispielsweise branchenfernen Materialien sind für die Bearbeitung des Forschungsprojektes nicht weiter nützlich. Ferner wurde noch der Bekanntheitsgrad mit in die Bewertung mit 20 % einbezogen.

Tabelle 2: Nutzwertanalyse zur Bewertung von Datenbanken

	<b>Preis</b>	<b>Daten- umfang</b>	<b>Relevanz der Daten</b>	<b>Bekannt- heitsgrad</b>	<b>Gesamt- bewertung</b>
<b>Gewichtung</b>	<b>10 %</b>	<b>20 %</b>	<b>50 %</b>	<b>20 %</b>	<b>100 %</b>
Ecoinvent	4	5	5	5	4,9
GaBi	2	5	5	5	4,7
ELCD	5	2	2	3	2,5
GEMIS	5	1	2	4	2,5
ProBas	5	1	2	4	2,5
Plastics Europe	5	1	5	2	3,6
NEEDS	5	1	1	2	1,6
Ökobaudat	5	2	1	2	1,8

Unter besonderer Beachtung des Kriteriums „Relevanz der Daten“ ergaben sich die Datenbanken Ecoinvent, GaBi und PlasticsEurope als die besten Optionen. Hinsichtlich der GaBi Datenbank und ihrer Erweiterungsmodule wurde eine weitere Untersuchung angestellt. Als besonders relevant ergaben sich die Erweiterungen „Plastics“, „End of Life“, „Manufacturing“, „Electronics“ und „Bioplastics“ zu einem Gesamtpreis von 14.325 €.

### 3.1.2 Auswahl der Softwarelösung

Zur Auswahl der geeignetsten Softwarelösung wurde auf eine veröffentlichte Liste von dem bayerischen Landesamt für Umwelt zurückgegriffen, welche die verbreitetsten Softwareanwendungen alle Themen rund um Umweltmanagement und betrieblichen Umweltschutz auflistet (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2016). Eine Vorauswahl an

relevanten Einträgen dieser Liste in Bezug auf die zuvor dargestellten Datenbanken wird in Tabelle 3 aufgeführt.

Im Folgenden wird darüber hinaus ein Fokus auf kompatible Softwarelösungen mit den Datenbanken Ecoinvent und GaBi gelegt, da diese die umfangreichsten Datenbanken sind. Aufgrund der geringen Anzahl an Datensätzen sollte die Datenbank PlasticsEurope stattdessen nur eine unterstützende Funktion einnehmen.

Tabelle 3: Auflistung aller relevanter Softwareanwendungen  
Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), 2016, S. 2-6

Name	Anbieter	Erläuterung
ecocockpit	Effizienz-Agentur NRW	Informations- und Steuerungssystem für alle Komponenten des nachhaltigen Wirtschaftens. Auch die Erstellung automatisierter Berichte (Umwelterklärung, Nachhaltigkeitsbericht, Klimabilanz, E-Controlling usw.) aus den erhobenen Daten ist möglich.
FridaCarb	DFGE – Institute for Energy – Ecology – Economy	Ermittlung des unternehmensspezifischen sowie von produktspezifischen CO <sub>2</sub> -Fußabdrücken. Der PCF wird nach internationalen Standards berechnet.
iSystain	Systar Pty Ltd	Die cloudbasierte Software-Plattform bietet verschiedene Lösungen zum betrieblichen Umwelt- und Ressourcenmanagement an. Unter anderen kann dabei die Software „Carbon Management and Energy Efficiency“ erworben werden. Sie unterstützt das CO <sub>2</sub> - und Energiemanagement im Unternehmen und erstellt produktspezifische CO <sub>2</sub> -Fußabdrücke. Die „Environmental Monitoring and Discharge Permit Management“ Software verwaltet die Luft-, Wasser-, Boden- und Lärmauswirkungen eines Unternehmens.
Sima Pro	ESU-services	Berechnung der Umwelleistung von Produkten und Dienstleistungen über einzelne Lebenszyklusphasen mit einer tabellarischen Dateneingabe.
GaBi Software	Sphera	Life Cycle Assessment (LCA)-Software für Ökobilanzen und Ökobilanz-Datenbanken für nachhaltige Produkte.
Umberto LCA+	iPoint-systems	Die (LCA)-Software unterstützt Unternehmen bei der Ökobilanzierung (LCA), Berechnung des Carbon Footprint (CO <sub>2</sub> -Fußabdruck), Prozessoptimierung, Ökoeffizienz sowie beim Energiemanagement.

Unter der Berücksichtigung, dass die Technische Hochschule Mittelhessen bereits über Lizenzen von Umberto LCA+ verfügt und das ecocockpit von dem Projektpartner Effizienz-Agentur NRW betrieben wird, wurde Umberto LCA+ in dem Forschungsprojekt „SekÄqui“ ausgewählt, um professionelle Ökobilanzen mit der Wirkungskategorie Klimawandel zu erstellen. Sowohl GaBi als auch Ecoinvent können direkt in Umberto LCA+ integriert werden. Das lizenzfreie ecocockpit der Effizienz-Agentur NRW wurde zusätzlich ausgewählt, um in Schulungen am Kunststoff-Institut Lüdenscheid den Teilnehmern eine benutzerfreundliche Umgebung zu präsentieren, welche einen direkten Einstieg in die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung bietet.

### 3.1.3 Grundlagen zur ausgewählten Software

Sowohl mit Umberto LCA+ als auch mit dem ecocockpit kann der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Produktes berechnet werden. Unterschiede treten jedoch bei den verfügbaren Datensätzen sowie bei der grundsätzlichen Vorgehensweise für die Erstellung eines PCF auf. Als lizenzfreie Software kann das ecocockpit nicht auf die lizenzpflichtigen Stoffdatenbanken Ecoinvent sowie GaBi zugreifen. Stattdessen werden öffentlich zugängliche Datensätze aus Förderprogrammen wie der „Energieeffizienz in der Wirtschaft“ (EEW) des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle oder Datenbanken wie der bereits aufgeführten Stoffdatenbank GEMIS verwendet.

Als Grundlage zur Dateneingabe folgt das ecocockpit der Einteilung des Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol). Das GHG Protocol ist eine private, transnationale Standardreihe zur Bilanzierung von Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebensweg (*Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*, 2011). Das erste Protokoll der „Corporate Carbon Footprint“ aus dem Jahre 2001 enthielt erste Leitlinien zur Erfassung von Treibhausgasen auf Unternehmensebene. Diese wurden in drei Bereiche (Scopes) unterteilt, denen Emissionen zugeordnet werden können.

**Scope 1** umfasst alle direkten Treibhausgasemissionen, die unter der Kontrolle des Unternehmens stehen. Hinzu kommen Fahrten mit firmeneigenen Fahrzeugen und die interne Verbrennung von Energieträgern.

**Scope 2** deckt indirekten Emissionen ab, die durch die Verwendung von Energie wie beispielweise Strom, Dampf, Wärme oder Kälte entstehen.

**Scope 3** umfasst sämtliche sonstigen indirekten Emissionsquellen, die nicht der direkten Unternehmenskontrolle unterliegen, wie zum Beispiel Roh-, Hilfs-, und Betriebsstoffe, sowie externe Dienstleister, Geschäftsreisen mit Bahn, Zug oder Flugzeug und den Wasserverbrauch.

Im Gegensatz hierzu erfolgt die Dateneingabe in Umberto LCA+ durch die Modellierung einzelner Prozessmodule, deren Prozessinputs- und -outputs durch die integrierten Datenbanken um bereits vorhandene Datensätze erweitert werden können. Beide Softwarelösungen folgen der Normfamilie DIN EN ISO 14.000 ff zum Umweltmanagement und Aufstellen einer Ökobilanz, welche die Umweltauswirkungen eines Systems anhand dessen Stoffströme auf eine Wirkungskategorie untersucht. Eine Ökobilanz umfasst nach DIN EN ISO 14040 vier Phasen, welche den Rahmen der Ökobilanz bilden (European Committee for Standardization, 2020a).

Die erste Phase einer Ökobilanz umfasst die Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens, welche zudem über die funktionelle Einheit den quantitativen Nutzen eines Produktes beschreibt. Über die funktionelle Einheit wird der Nutzen des Produktes vergleichbar, so dass das Ergebnis einer Ökobilanz in ein Verhältnis zu einem anderen Produkt gesetzt werden kann, welches denselben Nutzen erfüllt. Weiter werden zeitliche und räumliche Systemgrenzen sowie Abschneidekriterien definiert, um über die relevanten Stoffströme eine Sachbilanz aus allen Prozessinputs und -outputs zu erfassen. In der Wirkungsabschätzung wird die erfasste Sachbilanz auf eine Wirkungskategorie bezogen, so dass beispielsweise eine CO<sub>2</sub>-Bilanz eine spezielle Form einer allgemeinen Ökobilanz darstellt, indem die Wirkungskategorie Klimawandel angewendet wird. Als Ergebnis wird das „Global Warming Potential“ (GWP) in Bezug auf die zu bilanzierende funktionelle Einheit als CO<sub>2</sub>-Äquivalente angegeben. Die Auswertung der Ergebnisse steht hierbei stets in Wechselwirkung mit jeder vorherigen Phase.



### 3.2 Entwicklung des Standardprozesses

Damit innerhalb des Projektes SekÄqui der PCF eines Standardproduktes aus der Kunststoffbranche berechnet werden konnte, galt es zunächst einen Standardprozess zu definieren, welcher alle erforderlichen Prozesse zur Herstellung dieses Bauteils abbildet. Zudem sollten im weiteren Verlauf Primärrohstoffe anteilig durch Rezyklat ersetzt werden können. Basierend auf der Expertise des Kunststoff-Instituts Lüdenscheid wurde hierzu als Produktionsverfahren das Spritzgießen gewählt, wodurch die Probenkörper im Technikum des Kunststoff-Instituts an den hauseigenen Maschinen hergestellt werden konnten. Für die Transformation linearer Produktionsketten in eine Kreislaufwirtschaft kann zudem das zunächst neuwertige Kunststoffgranulat schrittweise durch Sekundärrohstoffe wie dem Mahlgut des Projektpartners Kunststoffherzeugnisse Occhipinti ersetzt werden. Als Probenkörper für den Standardprozess wurde, wie in Abbildung 1 dargestellt, ein Zugstabprofil gemäß DIN EN ISO 527-2 Typ 1A verwendet (European Committee for Standardization, 2012), um über einen Zugversuch neben der Herstellung der Rohstoffe und der Fertigung des Produktes auch beispielhaft die ökologischen Belastungen einer Nutzungsphase zusammen mit der Entsorgung des Materialstromes zu modellieren.

Wegen der am Kunststoff-Institut bereits vorhandenen Werkzeugform mit zwei Kavitäten über eine Z-Kaltkanalanbindung, gingen aus einem Anguss zwei Zugstäbe in einer festgelegten Zykluszeit von 60 Sekunden hervor, sodass innerhalb einer Stunde 120 Zugstäbe produziert werden konnten. Die verarbeitete Menge an Kunststoff in einem Zyklus in Form des Schussgewichtes verteilte sich aufgrund der normgerechten Geometrie zu gleichen Teilen auf jeweils beide Zugstäbe sowie dem Angussteil, so dass 33 % des Schussgewichtes als „post industrial waste“ aus dem Spritzgießprozess hervorgingen.

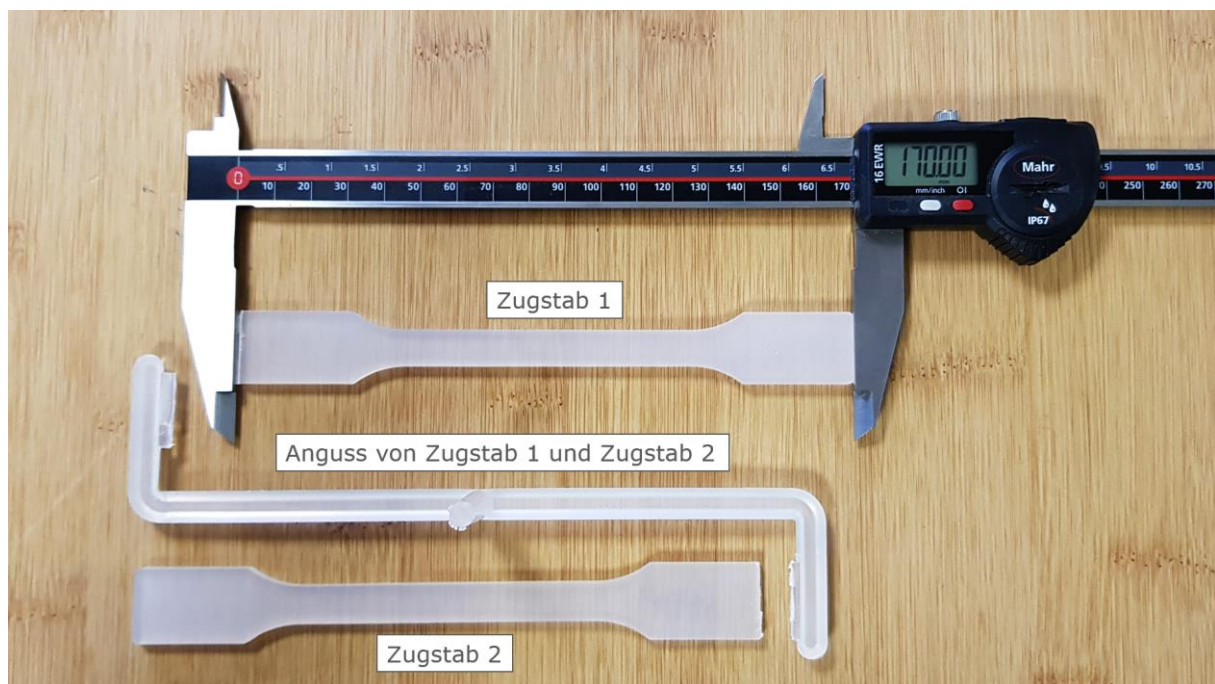


Abbildung 1: Zugstäbe als Standardprodukt des Spritzgießprozesses mit Anguss

Der sortenreine Abfallstrom wurde im folgenden Verlauf des Projektes SekÄqui mechanisch recycelt und der Produktion als Mahlgut wieder zugeführt. Vor diesem Hintergrund wurden die technischen Kunststoffe ABS (Novodur P2MC), PA66GF30 (Zytel 70G30 HSL NC010), PC (Makrolon 2405) und POM (Hostaform C9021) zur Bearbeitung in dem Standardprozess ausgewählt, da das produzierte Mahlgut am Werk der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti zu über 90 % aus diesen Kunststoffsorten besteht. Somit konnte die Gefahr einer Verunreinigung der Stoffströme durch sortenfremde Kunststoffsorten reduziert werden.

Die Verarbeitung der technischen Kunststoffe in dem Spritzgießprozess erfolgte gemäß den Vorgaben des jeweiligen Kunststoffes (Altair Engineering, 2022), welche in der folgenden Tabelle 4 aufgeführt werden.

Tabelle 4: Versuchsplan für neuwertiges Kunststoffgranulat

Materialbezeichnung	Werkzeugwandtemperatur	Masstemperatur	Fließfrontgeschwindigkeit	Versuchsbezeichnung
<b>POM Hostaform C9021</b>	90 °C	205 °C	100 mm/s	VE1
			200 mm/s	VE2
			300 mm/s	VE3
<b>ABS Novodur P2MC</b>	60 °C	250 °C	100 mm/s	VE4
			200 mm/s	VE5
			300 mm/s	VE6
<b>PC Makrolon 2405</b>	80 °C	280 °C	100 mm/s	VE7
			200 mm/s	VE8
			300 mm/s	VE9
<b>PA66 GF30 Zytel 70G30 HSL NC010</b>	80 °C	290 °C	100 mm/s	VE10
			200 mm/s	VE11
			300 mm/s	VE12

Als Einstellgröße auf den Spritzgussprozess wurde zusätzlich die Fließfrontgeschwindigkeit in drei Stufen von 100 mm/s auf 300 mm/s erhöht, um deren Einfluss auf die Energieeffizienz des Produktionsprozesses zu untersuchen. Die Kunststoffschmelze ist ein strukturviskoses Fluid, deren Viskosität sich bei zunehmender Schergeschwindigkeit verringert. Durch das Fließverhalten der Kunststoffschmelze in der Werkzeugform erhöht sich mit ansteigender Fließfrontgeschwindigkeit ebenfalls die Schergeschwindigkeit von der Werkzeugwand zur Mitte des Bauteils, sodass aufgrund der geringeren Arbeit zur Formgebung ein abnehmender Energiebedarf der Spritzgussmaschine bei einer zunehmenden Fließfrontgeschwindigkeit angenommen wurde.

### 3.2.1 Energieeffizienz eingesetzter Spritzgussmaschinen

Zur Optimierung der Energieeffizienz des zuvor definierten Standardprozesses wurde der Energiebedarf einer vollelektrischen 3-Platten-Kniehebelmaschine mit der Bezeichnung Sumitomo Demag IntElect 130/520-250 D30 (Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery, 2022) sowie einer vollhydraulischen 2-Platten-Spritzgießmaschine Krauss Maffei CX 130/380 D30 (KraussMaffei Group, 2022) für eine Produktionszeit von einer Stunde einschließlich der jeweils angeschlossenen Peripherie gemäß Euromap 60.2 (VDMA, 2013) gemessen. Diese Maschinen wurden für einen Vergleich ausgewählt, da beide Maschinen über die gleiche Schließkraft von 1.300 kN sowie einen Schneckendurchmesser von 30 mm verfügen. Der wesentliche Unterschied der Spritzgussmaschinen liegt in der Erzeugung der Schließkraft, welche bei der hydraulischen Maschine von Krauss Maffei über eine Hydraulikpumpe mit Hydraulikzylinder erfolgt. Die elektrische Spritzgießmaschine des Herstellers Sumitomo Demag drückt die Werkzeughälften stattdessen über einen Kniehebel zusammen, welcher durch einen Elektromotor bewegt wird. Die Ergebnisse des gemessenen Energiebedarfs pro Kilogramm an verarbeitetem Kunststoff der Spritzgießmaschinen werden zusammen mit dem Energiebedarf mit einer ZwickRoell Prüfmaschine Z010 und Z020 (ZwickRoell, 2022) für die nachfolgenden Zugversuche Tabelle 5 gegenübergestellt, welche in der folgenden CO<sub>2</sub>-Bilanzierung als Nutzungsphase im Produktlebenszyklus des Zugstabes definiert wurde.

Tabelle 5: spezifischer Energieverbrauch bei der Produktion und Nutzungsphase

Material- bezeichnung	Versuch- bezeichnung	Sumitomo	KraussMaffei	ZwickRoell
<b>POM Hostaform C9021</b>	VE1	1,26 kWh / kg	2,45 kWh / kg	
	VE2	1,22 kWh / kg	2,41 kWh / kg	0,54 kWh / kg
	VE3	1,25 kWh / kg	2,35 kWh / kg	
<b>ABS Novodur P2MC</b>	VE4	1,68 kWh / kg	2,96 kWh / kg	
	VE5	1,67 kWh / kg	2,97 kWh / kg	0,27 kWh / kg
	VE6	1,64 kWh / kg	3,03 kWh / kg	
<b>PC Makrolon 2405</b>	VE7	1,76 kWh / kg	2,81 kWh / kg	
	VE8	1,74 kWh / kg	2,80 kWh / kg	0,60 kWh / kg
	VE9	1,74 kWh / kg	2,76 kWh / kg	
<b>PA66 GF30 Zytel 70G30 HSL NC010</b>	VE10	1,63 kWh / kg	2,82 kWh / kg	
	VE11	1,62 kWh / kg	2,67 kWh / kg	0,46 kWh / kg
	VE12	1,63 kWh / kg	2,79 kWh / kg	

Entgegen den Erwartungen zeigen die Messdaten zum Stromverbrauch in Tabelle 5 weder bei der elektrischen noch der hydraulischen Spritzgießmaschine einen signifikanten Einfluss der Fließfrontgeschwindigkeit auf den Energieverbrauch. Dagegen wird über alle Versuchsreihen hinweg nahezu eine Halbierung des Energiebedarfs durch den Einsatz der Sumitomo Demag IntElect 130/520-250 D30 erreicht, so dass alle fortführenden Versuche mit Rezyklateinsatz auf dieser rein elektrisch arbeitenden Spritzgießmaschine durchgeführt wurden. Des Weiteren wird deutlich, dass der spezifische Energiebedarf für die Durchführung der Zugversuche mit den Prüfmaschinen von ZwickRoell nochmals geringer als bei dem Spritzgießen des Bauteils ausfällt. Dies spiegelt sich ebenfalls in der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung des Zugversuches mit den Systemgrenzen „cradle to grave“ in Tabelle 6 wider, indem für die Rohstoffherstellung sowie die Entsorgung des Zugstabes nach dem Zugversuch in einer kommunalen Müllverbrennungsanlage Datensätze aus den Stoffdatenbanken GaBi SP 40 2020 sowie Ecoinvent 3.8 verwendet wurden.

Um den Einfluss von Anfahrverlusten auf den Spritzgießprozess zu reduzieren, wurde der PCF in Tabelle 6 für den quantitativen Nutzen von 1.000 Zugversuchen als funktionelle Einheit mit einem Zugstab pro Versuch berechnet. Die Analyse der einzelnen Produktlebenszyklusphasen zeigt, dass die Phasen der Rohstoffgewinnung zusammen mit der Entsorgung für 84 % bis 87 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Äquivalente des PCF verantwortlich sind. Da ein mechanisches Recycling des Materialstromes diese Lebenszyklusphasen adressiert, entsprechen deren indirekten Emissionen dem Potential zur Einsparung von Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Rezyklat. Die Auswirkung der Energieeffizienz bei der Produktion zeigt sich jedoch erst in einem Vergleich mit Tabelle 7, welche den PCF von 1.000 Zugstäben über eine CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von ebenfalls 1.000 Zugversuchen unter denselben Systemgrenzen des Produktsystems festhält.

Tabelle 6: PCF von 1.000 Zugstäben der Sumitomo Demag IntElect 130/520-250 D30

	Summe über alle Lebenszyklusphasen		Rohstoff-gewinnung		Produktion Sumitomo		Nutzung		Entsorgung	
	kg CO <sub>2</sub> e		kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%
<b>ABS</b>	93,70		46,64	50	13,89	15	1,50	1	31,67	34
<b>PA66GF30</b>	165,14		112,06	68	17,73	11	3,37	2	31,99	19
<b>PC</b>	140,41		71,10	51	17,07	12	3,93	2	48,31	35
<b>POM</b>	132,61		69,26	52	13,51	10	3,91	3	45,93	35

Tabelle 7: PCF von 1.000 Zugstäben der Krauss Maffei CX 130/380 D30

	Summe über alle Lebenszyklusphasen		Rohstoff-gewinnung		Produktion Krauss-Maffei		Nutzung		Entsorgung	
	kg CO <sub>2</sub> e		kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%
<b>ABS</b>	104,76		46,64	45	24,95	24	1,50	1	31,67	30
<b>PA66GF30</b>	177,49		112,06	63	30,08	17	3,37	2	31,99	18
<b>PC</b>	151,51		71,10	47	27,18	18	3,93	3	48,31	32
<b>POM</b>	145,21		69,26	48	26,11	18	3,91	3	45,93	31

Wie Tabelle 7 zeigt, erhöht sich der Anteil der Produktion am PCF der Zugstäbe durch den Einsatz der Krauss Maffei CX 130/380 D30 gegenüber der Sumitomo Demag IntElect 130/520-250 D30 deutlich, so dass bei dem Kunststoff PA66GF30 die Belastung der Produktion nahezu der Entsorgungsphase entspricht. Die enthaltenen Glasfasern führen bei dem Kunststoff PA66GF30 zu einer geringeren Emission von Treibhausgasen bei der kommunalen Verbrennung. Zugleich zeigt dieser Kunststoff auch die höchsten Belastungen aller untersuchten Kunststoffe in der Rohstoffgewinnung, so dass sich daraus dennoch der höchste PCF aller untersuchten technischen Kunststoffsorten ergibt. Für den Kunststoff ABS wurden im Gegensatz dazu die geringsten Belastungen gemäß dem Treibhauspotential in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten berechnet.

### 3.2.2 Auswirkungen des Rezyklats auf den Stromverbrauch

Nach dem energieoptimierten Einfahren des Standardprozesses zur Produktion und CO<sub>2</sub>-Bilanzierung eines Kunststoffbauteils, wurde in diesen Prozess das Recycling von „post industrial waste“ über eine Verwendung von Kunststoffmahlgut der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti implementiert. Für eine Steigerung der Ressourceneffizienz wurde der Anteil des Rezyklats in dem Zugstab innerhalb zwei weiterer Versuchsreihen stufenweise erhöht. Durch die gleichmäßige Gewichtsverteilung des Schussgewichtes auf die beiden Zugstäbe sowie den Anguss konnte in der Versuchsreihe VR mit einem Rezyklatanteil von 33,3 % der Materialstrom des Rezyklats selbst aus dem Spritzgießprozess einschließlich dem mechanischen Recycling der Angussteile generiert werden. Dies ermöglicht die Anwendung unterschiedlicher Allokationsverfahren für ein Recycling im offenen Kreislauf, welche in Kapitel 3.4 vertiefend beschrieben werden. In der Versuchsreihe RE wurden stattdessen auf die Verwendung von neuwertigem Granulat (N) vollständig verzichtet, um die Auswirkungen des Einsatzes von 100 % Rezyklat (R) auf den Verarbeitungsprozess sowie die Produkteigenschaften zu untersuchen. Für einen direkten Vergleich mit den Ergebnissen aus der ersten Versuchsreihe VE wurden alle Spritzgießparameter aus der Verarbeitung von Neuware für den Einsatz von Rezyklat übernommen. Zudem wurde der spezifische Energiebedarf der Spritzgießmaschine erfasst und in Tabelle 8 festgehalten.

Tabelle 8: Einfluss von Neuware (N) und Rezyklat (R) auf den Energieverbrauch

Material- bezeichnung	Werkzeug- wand- temperatur	Masse- temperatur	Fließfront- geschwindigkeit	Versuchs- reihe	Energie- verbrauch
<b>POM (66,6 % N + 33,3 % R)</b>	90 °C	205 °C	100 mm/s	VR1	1,16 kWh/kg
			200 mm/s	VR2	1,16 kWh/kg
			300 mm/s	VR3	1,14 kWh/kg
<b>ABS (66,6 % N + 33,3 % R)</b>	60 °C	250 °C	100 mm/s	VR4	1,57 kWh/kg
			200 mm/s	VR5	1,58 kWh/kg
			300 mm/s	VR6	1,57 kWh/kg
<b>PC (66,6 % N + 33,3 % R)</b>	80 °C	280 °C	100 mm/s	VR7	1,57 kWh/kg
			200 mm/s	VR8	1,89 kWh/kg
			300 mm/s	VR9	1,54 kWh/kg
<b>PA66 GF30 (66,6 % N + 33,3 % R)</b>	80 °C	290 °C	100 mm/s	VR10	1,57 kWh/kg
			200 mm/s	VR11	1,57 kWh/kg
			300 mm/s	VR12	1,58 kWh/kg
<b>POM 100 % R (Mahlgut)</b>	90 °C	205 °C	100 mm/s	RE1	1,15 kWh/kg
			200 mm/s	RE2	1,14 kWh/kg
			300 mm/s	RE3	1,11 kWh/kg
<b>ABS 100 % R (Mahlgut)</b>	60 °C	250 °C	100 mm/s	RE4	1,48 kWh/kg
			200 mm/s	RE5	1,48 kWh/kg
			300 mm/s	RE6	1,45 kWh/kg
<b>PC 100 % R (Mahlgut)</b>	80 °C	280 °C	100 mm/s	RE7	1,54 kWh/kg
			200 mm/s	RE8	1,53 kWh/kg
			300 mm/s	RE9	1,53 kWh/kg
<b>PA66 GF30 100 % R (Mahlgut)</b>	80 °C	290 °C	100 mm/s	RE10	1,61 kWh/kg
			200 mm/s	RE11	1,59 kWh/kg
			300 mm/s	RE12	1,57 kWh/kg

Entgegen den Erwartungen zeigt der gemessene spezifische Energiebedarf der Spritzgießmaschine Sumitomo Demag IntElect 130/520-250 D30 in Tabelle 8 keine signifikante Abhängigkeit von der eingestellten Fließfrontgeschwindigkeit. Ausschließlich von Versuchsreihe RE10 bis RE12 lässt sich eine geringe Abnahme des spezifischen Energiebedarfs um etwa 2,5 % erkennen. Dagegen führt der Einsatz des Mahlgutes in beiden Versuchsreihen VR und RE zu einer geringfügigen Verbesserung der Energieeffizienz beim Spritzgießen der Zugstäbe gegenüber der Versuchsreihe VR aus Neuware, wobei eine weitere Steigerung des Anteils an Rezyklat von 33,3 % auf 100 % zu keiner bedeutenden Veränderung der Messergebnisse führt. Die Abnahme des Energiebedarfs beim Spritzgießen könnte die Folge einer geringeren Viskosität der Kunststoffschmelze sein, welche durch eine Verkürzung der Polymerkettenlänge bei dem mechanischen Recycling hervorgerufen wurde. So könnte die Kettenlänge durch Scherkräfte beim Mahlen der Kunststoffe oder auch selbst durch das Spritzgießen bei hohen Temperaturen geschädigt worden sein.

### 3.2.3 Vergleich der Zugfestigkeit von Neuware und Rezyklat

Eine Abnahme der Polymerkettenlänge wirkt sich auch auf die makroskopischen Eigenschaften des Kunststoffes aus, so dass mit dem Einsatz von Rezyklat geprüft werden muss, ob das hergestellte Produkt die für dessen Einsatz erforderlichen Anforderungen noch erfüllt. Daher wurde im Folgenden mit Hilfe der produzierten Zugstäbe die Auswirkung des Einsatzes von Rezyklat auf die Produktqualität über eine Veränderung der Zugfestigkeit der technischen Kunststoffe untersucht. Hierzu wurden aus den Versuchsreihen VR1 bis VR12 mit 100 % Neuware sowie für RE1 bis RE12 bestehend aus 100 % Rezyklat jeweils 10 Zugversuche durchgeführt und das gemittelte Ergebnis in Abbildung 2 gegenübergestellt. Aufgrund der gefertigten Probenkörper gemäß DIN EN ISO 527-2 konnte eine Auswertung der Zugversuche nach DIN EN ISO 527-1 erfolgen.

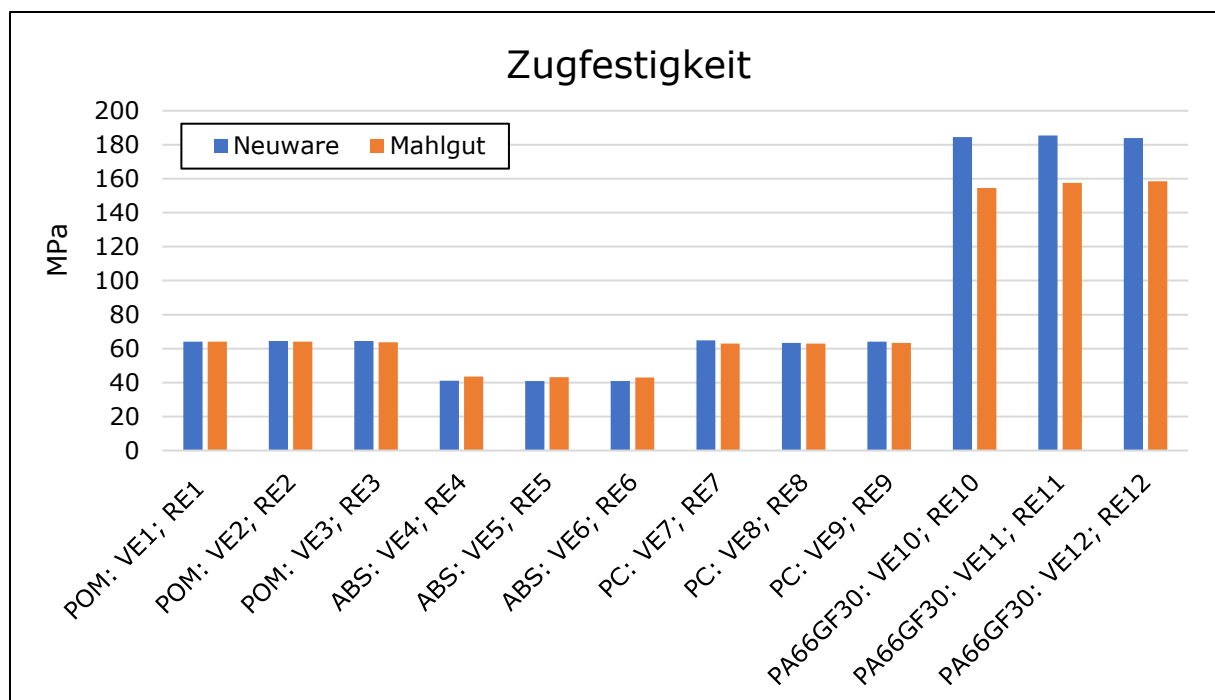


Abbildung 2: Zugfestigkeit der Primär- und Sekundärrohstoffe

Die aufgeführten Ergebnisse in Abbildung 2 belegen, dass die eingestellte Fließfrontgeschwindigkeit in dem Bereich von 100 mm/s bis 300 mm/s keinen Einfluss auf die Zugfestigkeit des verarbeiteten Kunststoffes hatte. Der direkte Vergleich des neuwertigen Kunststoffes mit dem Mahlgut der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti zeigt, dass das einmalige mechanische Recycling bei den Kunststoffen POM, ABS und PC zu keiner unmittelbaren Abnahme der Zugfestigkeit führt. Somit wurde belegt, dass die Auswirkungen einer abnehmenden Polymerkettenlänge erst nach mehreren Verarbeitungs- und Recyclingprozessen deutlich werden. Dagegen wirkt sich eine Verkürzung der Glasfasern in dem Mahlgut aus PA66GF30 unmittelbar auf dessen Zugfestigkeit aus, so dass entsprechend den Produktanforderungen Rezyklat nur anteilig durch Neuware ersetzt werden kann. Dies verdeutlicht ein Vergleich der Versuchsreihen VE10 bis VE12 mit den Ergebnissen aus RE10 bis RE12 in Abbildung 2, da bereits durch einen Produktlebenszyklus die Zugfestigkeit des technischen Kunststoffes PA66GF30 um 15 % von 185 MPa auf 157 MPa reduziert wurde.

### 3.3 Mechanisches Recycling in der Kunststoffbranche

Technische Kunststoffe sind aufgrund ihrer besonderen mechanischen, chemischen und optischen Eigenschaften vielseitig einsetzbar. Daher steigt die Nachfrage nach Kunststoffen einschließlich der damit verbundenen Belastungen für unsere Umwelt exponentiell (Braun et al., 2021). Damit dieser wichtige Rohstoff jedoch auch in Zukunft genutzt werden kann, ist es notwendig, die ökologischen Auswirkungen seiner Herstellung und Verwendung zu minimieren. Zu diesem Zweck ist es unerlässlich, das Recycling von Kunststoffabfällen zu erhöhen, sodass durch die Verwendung von Rezyklat bei der Herstellung von Produkten Ressourcen geschont, Abfälle reduziert und das Treibhauspotential verringert werden können. Somit unterstützt das mechanische Recycling von Industrieabfällen die Klimaneutralitätsziele der Europäischen Union sowie das Pariser Klimaabkommen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, um den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf unter zwei Grad Celsius zu begrenzen (Plastics Europe, 2021). Im Jahr 2019 wurden in Deutschland bereits 1,9 Millionen Tonnen Rezyklat für Kunststoffprodukte verarbeitet. Das entspricht einem Anteil von 13,7 %, der sich nahezu gleichmäßig auf Rezyklate aus „post industrial“ und „post consumer“ Abfällen verteilt (Conversio Market & Strategy GmbH, 2020). Aufgrund der nach wie vor geringen Anteile an genutztem Rezyklat, bezogen auf die Gesamtmenge an verarbeiteten Kunststoff, besteht in diesem Handlungsfeld noch ein großes Verbesserungspotential (Geyer et al., 2017). Vor allem da das mechanische Recycling als die effizienteste Methode des Recyclings in Bezug auf Zeit, wirtschaftliche Kosten, CO<sub>2</sub>-Bilanz und Umweltauswirkungen im Allgemeinen angesehen wird (Schyns & Shaver, 2021). Somit kann das mechanische Recycling von sortenreinem Stoffströmen aus „post industrial waste“ einen wertvollen Beitrag für eine effizientere Ressourcennutzung und Verringerung der Treibhausgasemissionen leisten.

Das Vorgehen beim Recycling selbst beschreibt einen Prozess zur Wiederaufbereitung von Abfällen zu einem neuen Produkt, wobei die verschiedenen Arten von Recyclingverfahren für Kunststoffe gemäß DIN EN ISO 15270 (International Organization for Standardization, 2008) in vier Stufen eingeteilt werden können. Die erste Stufe wird als primäres Recycling definiert, welche das mechanische Recycling von „post industrial waste“ in Form von reinen Polymerströmen umfasst und per Definition die Vorgehensweise in dem Projekt „SekÄqui“ darstellt. In Anlehnung an diese Norm kann das mechanische Recycling auch in der nächsten Stufe des sekundären Recyclings eingesetzt werden, welche die Verarbeitung von „post consumer waste“ in einem offenen Recyclingkreislauf beschreibt. Das mechanische Recycling gebrauchter Kunststoffteile in dieser Stufe am Ende ihrer Nutzungsphase birgt jedoch das Risiko eines „Downcyclings“ des Materialflusses zu einem Produkt geringerer Qualität. Zudem erhöhen das Sortieren und Reinigen des Materialstromes vor dem Mahlen der Kunststoffe den Recyclingaufwand und die Exposition gegenüber UV-Licht während der Nutzung des Produktes könnte die chemische Struktur der enthaltenen Kunststoffe beschädigen (Archodoulaki et al., 2007). Darüber hinaus führen hohe Temperaturen und Scherkräfte beim Mahlen, Extrudieren oder Spritzgießen zu einer Abnahme der durchschnittlichen Polymerkettenlänge sowie zu einer Verringerung der mechanischen Eigenschaften (Oblak et al., 2015). Nach einer endlichen Anzahl von primären und sekundären Recyclingschritten führt dies zu einer Einschränkung der Prozessstabilität, sodass nur das chemische Recycling auf der Stufe des tertiären Recyclings den Materialfluss regenerieren kann (Vollmer et al., 2020). Hierzu werden beispielweise durch Pyrolyse die ursprünglichen Monomere zurückgewonnen, um durch eine erneute Polymerisation neuwertige Polymere zu erhalten. Das chemische Recycling kann beliebig oft eingesetzt werden, bis dies aus wirtschaftlichen oder ökologischen Gründen nicht weiter sinnvoll ist. Daraufhin wird das Material schließlich in der letzten Stufe des quartären Recyclings zur energetischen Verwertung überwiegend in einer Müllverbrennungsanlage entsorgt (Shamsuyeva & Endres, 2021).

Aus der Perspektive der Klassifizierung von Recyclingverfahren ist hervorzuheben, dass das mechanische Recycling einige Vorteile gegenüber dem chemischen Recycling sowie der energetischen Verwertung aufweist. So erfordert die Zerkleinerung von Kunststoffteilen zu Mahlgut nur ein Minimum an Arbeitsschritten und die chemische Struktur der Polymere bleibt während dieses Prozesses nahezu intakt. Darüber hinaus wird die Energie, welche bereits in die Herstellung des Kunststoffs geflossen ist, im Kunststoffmahlgut anteilig chemisch gespeichert (Jeswani et al., 2021). So zeigt eine Studie aus dem Jahr 2021, dass die Verwendung von Mahlgut aus ABS beim Spritzgießen die Produktkosten um 28,1 % und den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck um 29,3 % im Vergleich zu einer Produktion mit Neuware reduzieren kann (Tanti et al., 2021).

Angesichts der Vielzahl an möglichen Recyclingverfahren und der oft unvollständigen Charakterisierung des Rezyklats als Mahlgut, Granulat oder Compound wird die Übertragung von Forschungsergebnissen in eine Stoffdatenbank erschwert. Insbesondere wenn ein Qualitätsfaktor als Korrektur bei der Berechnung des Carbon Footprints für die allgemeine Annahme eines Downcyclings beim Recycling in einem offenen Kreislauf hinzugefügt wird (European Commission, 2018), obwohl dies, wie die Ergebnisse der Zugprüfungen in Abbildung 2 belegen, nicht generell angenommen werden sollte (Geyer et al., 2016). Somit konzentriert sich diese Arbeit im Folgenden auf die Berechnung des Product Carbon Footprint nach ISO 14067 (European Committee for Standardization, 2018) für Mahlgut der weit verbreiteten technischen Kunststoffen ABS, PA66GF30, PC und POM aus dem energieeffizienten mechanischen Recycling von „post industrial waste“.

### 3.3.1 Prozessmodule der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti

Zur Berechnung des PCF in der Ökobilanzierungssoftware Umberto LCA+ ist es erforderlich, das zu bilanzierende Produktsystem über Prozessmodule zu simulieren, um aus den einzelnen Prozessinputs und -outputs den Materialstrom bezogen auf eine funktionelle Einheit zu berechnen. Für die Entwicklung von Prozessmodulen wurde der mechanische Recyclingprozess am Werk der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti in die vier Teilprozesse "Kunststoffteile transportieren", "Kunststoffteile sortieren", "Kunststoffteilen mahlen" und "Mahlgut trennen und verpacken" unterteilt. Diese Teilprozesse werden in Abbildung 3 hervorgehoben. Aus dem erfassten Materialstrom der abgebildeten Prozessmodule wurde eine Sachbilanz gebildet, deren Positionen mit der Wirkungskategorie Klimawandel bewertet wurden. Die Ergebnisse konnten daraufhin als Life Cycle Impact Assessment (LCIA) aus Umberto LCA+ exportiert werden.



Abbildung 3: Teilprozesse zum mechanischen Recycling von Kunststoffteilen

Der erste Teilprozess „Kunststoffteile transportieren“ umfasst den Transport von sortenreinen Kunststoffteilen als Fracht mit einer durchschnittlichen Masse von 5 t in einem LKW über eine Entfernung von 25 km zum Werkstor der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti sowie den internen Transport per Hubwagen vom Wareneingangslager zu einer Hebebühne der Produktionslinie. Dieser Teilprozess wird durch das folgende Prozessmodul in Abbildung



4 dargestellt, welches die beschriebenen Energie- und Materialflüsse in Form von Prozessinputs und -outputs erfasst.

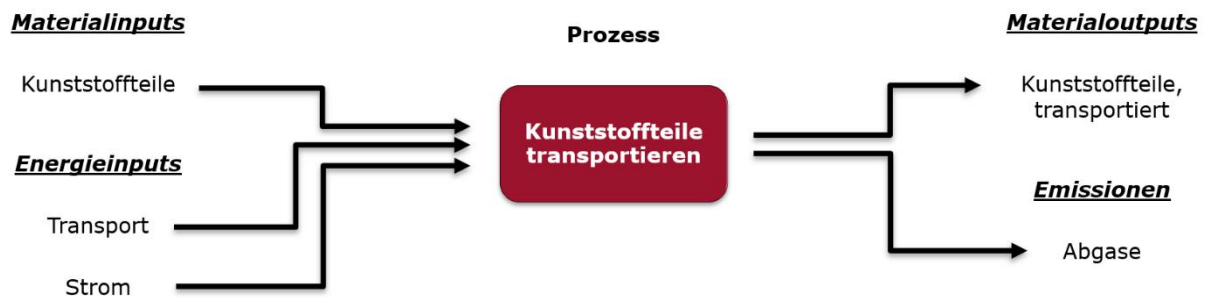


Abbildung 4: In- und Outputs des Prozessmoduls "Kunststoffteile transportieren"

Im nächsten Schritt, welcher in Abbildung 5 aufgeführt wird, wurden die transportierten Kunststoffteile über ein Fließband zur Kunststoffmühle geführt und dabei auf Verunreinigungen geprüft. Auf diese Weise wurden Fremdmaterialien oder sogar beschriftete Kunststoffteile aufgrund deren Farbe aussortiert, sodass im Anschluss nur ein sortenreiner Materialstrom vermahlen wurde. Im Durchschnitt wurden 0,1 % der transportierten Kunststoffteile aussortiert, so dass diese Teile nicht zu Mahlgut recycelt wurden. Stattdessen wurde der Ausschuss an Kunststoffteilen als Kunststoffabfall in einer kommunalen Müllverbrennungsanlage entsorgt.



Abbildung 5: In- und Outputs des Prozessmoduls "Kunststoffteile sortieren"

Der dritte Teilprozess beschreibt den Hauptprozess des werkstofflichen Recyclings durch die großtechnische Zerkleinerung der nun transportierten und sortierten Kunststoffteile mittels Rotor- und Statormessern in einer Mahlmühle. Nach der Verarbeitung von ca. 100 t Kunststoffabfällen müssen fünf Rotormesser mit einem Gewicht von je 5,5 kg sowie zwei Statormesser von je 7,3 kg nachgeschliffen werden. Dieser Vorgang kann etwa 10-mal wiederholt werden, bevor ein neuer Satz Rotor- und Statormesser eingebaut werden muss. In Abbildung 6 wird die Abnutzung der Messer zusammen mit den anderen Prozessinputs und -outputs zum Mahlen der Kunststoffe dargestellt.

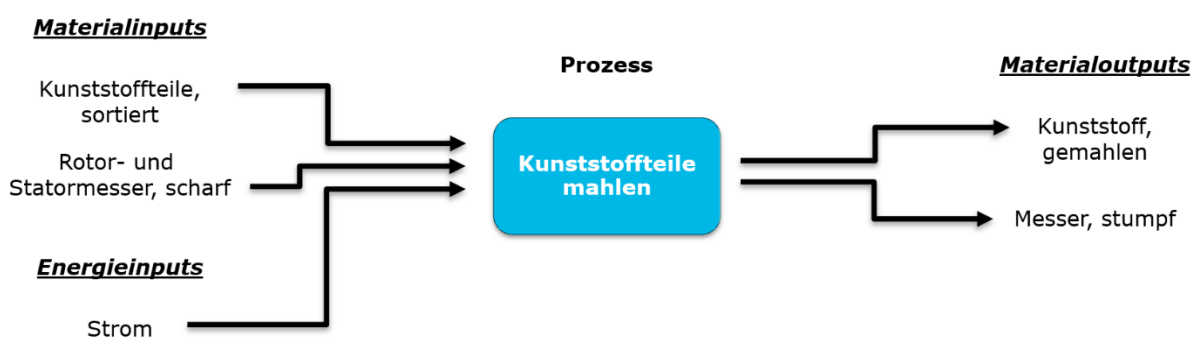


Abbildung 6: In- und Outputs des Prozessmoduls "Kunststoffteile mahlen"

Bei der Zerkleinerung der sortierten Kunststoffteile fallen in etwa 4 % Kunststoffstaub an, welcher mit Hilfe eines Fördergebläses in einem Fliehkraftzyklon von dem Mahlgut getrennt wird. Zusammen mit den zuvor aussortierten Kunststoffteilen muss dieser Kunststoffstaub in einer kommunalen Müllverbrennungsanlage entsorgt werden. Das Mahlgut wurde dagegen in einen sogenannten Oktabin aus Karton einschließlich einer feinen PE-Folie verpackt, welcher eine Masse von 1 t Mahlgut fasst. Die erhobenen Daten zum letzten Teilprozesses werden in Abbildung 7 in einem Prozessmodul zusammengefasst.



Abbildung 7: In- und Outputs des Prozessmoduls "Mahlgut trennen und verpacken"

Die aufgeführten Prozessmodule aus Abbildung 4 bis Abbildung 7 wurden in Umberto LCA+ modelliert, um den mechanischen Recyclingprozess am Werk des Projektpartners Occhipinti abzubilden. Zur anschließenden Berechnung des PCF von Mahlgut der technischen Kunststoffe ABS, PA66GF30, PC und POM, wurden die Prozessinputs und Outputs mit „result“-Datensätzen aus der Datenbank Ecoinvent 3.8 auf die Systemgrenzen „cradle to gate“ erweitert. Diese werden wie folgend in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Datensätze zur Berechnung des PCF von Mahlgut

Datensatz	Region	Datenbank
market for transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton	Europa	Ecoinvent 3.8
steel production, electric, chromium steel 18/8	Europa	Ecoinvent 3.8
market for scrap steel	Europa ohne Schweiz	Ecoinvent 3.8
market for folding boxboard carton	Europa	Ecoinvent 3.8
packaging film production, low density polyethylene	Europa	Ecoinvent 3.8
market for waste plastic, mixture	Deutschland	Ecoinvent 3.8
market for transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton	Europa	Ecoinvent 3.8

Der Stromverbrauch des gesamten Recyclingprozesses wurde für eine Produktionszeit von eine Stunde im Dauerbetrieb gemessen, um den Einfluss von Anlaufverlusten zu Beginn des Mahlprozesses aus der Datenerfassung zu eliminieren. Zusätzlich wurde die Gesamtmenge des gemahlten Kunststoffs gewogen, um den spezifischen Stromverbrauch für das mechanische Recycling jeder Kunststoffsorte separat zu berechnen. Der spezifische Energiebedarf der Mahlmühle am Werk Kunststoffherzeugnisse Occhipinti wird zusammen mit dem berechneten PCF des Kunststoffmahlguts in Tabelle 10 aufgeführt und entspricht den Erwartungen gemäß den Ergebnissen aus anderen Studien. Basierend auf den Daten des lokalen Stromversorgers "Stadtwerke Lüdenscheid" wurden die Auswirkungen des Stromverbrauchs auf 203 g CO<sub>2</sub>e/kWh quantifiziert. Eine Allokation von Wärme und Strom auf nachfolgende Produktsysteme über der energetischen

Verwertung des Materialstromes in einer Müllverbrennungsanlage wurde dabei nicht berücksichtigt.

Tabelle 10: Spezifischer Energiebedarf und Product Carbon Footprint je 1 kg Mahlgut

Kunststoffsorte	Spezifischer Energiebedarf	Product Carbon Footprint
ABS Novodur P2MC	0,172 MJ / kg	146 g CO <sub>2</sub> e / kg
PA66 GF30 Zytel 70G30 HSL NC010	0,278 MJ / kg	152 g CO <sub>2</sub> e / kg
PC Makrolon 2405	0,169 MJ / kg	146 g CO <sub>2</sub> e / kg
POM Hostaform C9021	0,098 MJ / kg	142 g CO <sub>2</sub> e / kg

Verglichen mit Sekundärrohstoffen aus anderen Recyclingverfahren verfügt das betrachtete Kunststoffmahlgut über einen sehr niedrigen PCF, da bereits ein sortenreiner Materialstrom vor Beginn des Recyclingprozesses vorlag, so dass keine Zugabe von Additiven sowie weitere stromintensive Prozesse wie das Extrudieren des Mahlgutes für eine Compoundierung erforderlich waren. Aufgrund des einfachen Recyclingprozesses kann das Treibhauspotential Mahlgut gegenüber Datensätzen aus Ecoinvent 3.8 und GaBi SP40 2020 für neuwertiges Granulat der entsprechenden Kunststoffsorten um bis zu 95 % reduziert werden. Zugleich birgt die Substitution von Neuware mit Mahlgut die Gefahr einer erhöhten Ausschussquote durch gegebenenfalls einer geringeren Prozessstabilität oder Produktqualität. Die Trennung des Kunststoffstaubes von dem Mahlgut wirkt dieser Problematik entgegen. Allerdings belegen die nachfolgenden Sensitivitätsanalysen, dass die Verbrennung des Kunststoffstaubes für etwa zwei Drittel des gesamten PCF verantwortlich ist, so dass sich aufgrund des geringen verbleibenden Anteils des Energieverbrauchs am PCF der starke Anstieg des spezifischen Energiebedarfs von der Kunststoffsorte POM zu PA66GF30 nur leicht deutlich wird.

### 3.3.2 Sensitivitätsanalyse für Entsorgung und Energie

Über die Sensitivitätsanalysen zu den Kunststoffsorten ABS, PA66GF30, PC und POM wurde der Einfluss der ausgewählten Datensätze auf die entsprechenden Prozessinputs und -outputs bestimmt, um somit den berechneten PCF des Kunststoffmahlgutes zu validieren. Des Weiteren wurden hierdurch Optimierungspotentiale für die Haupttreiber des PCF identifiziert.

Neben der Entsorgung des Kunststoffabfalls in der Müllverbrennungsanlage wird wie folgt dargestellt, dass sich der PCF des Mahlgutes maßgeblich aus der Nutzung des Verpackungskartons sowie zu etwa 10 % aus dem Stromverbrauch der Mahlmühle zusammensetzt. Hierbei liegt die einmalige Verwendung des Kartons durch den Kunden jedoch außerhalb der Kontrolle des Herstellers und ist zur Risikoprävention gegenüber Verunreinigungen der sortenreinen Stoffströme beim mechanischen Recycling erforderlich.

In der ersten Sensitivitätsanalyse wurde daher der Strom des lokalen Stromversorgers der Stadtwerke Lüdenscheid durch Strom aus erneuerbaren Quellen ersetzt. Hierzu wurde der Datensatz "Market for electricity, medium voltage, renewable energy products" aus der Datenbank Ecoinvent 3.8 verwendet. Die zweite Analyse verfolgte anstatt der Entsorgung des Plastikabfalls als Plastikmischung durch das Sammeln des Kunststoffstaubes aus unterschiedlichen Produktionslinien einer sortenreinen Entsorgung des jeweiligen Kunststoffs in einer Müllverbrennungsanlage durch sortenspezifische Datensätze aus der Datenbank GaBi SP40 2020. Eine Ausnahme bildete nur der Kunststoff POM, da für diesen Kunststoff kein Datensatz zur sortenreinen Verbrennung in den Datenbanken vorlag. In

einer dritten Sensitivitätsanalyse wurde schließlich das Optimierungspotential zur Verringerung des PCF untersucht. Hierzu wurden sowohl der Datensatz für Strom als auch die Datensätze zur Entsorgung der sortenreinen Kunststoffe angewendet. Die Verwendung der jeweiligen Datensätze in der Sensitivitätsanalyse 1 bis 3 wird in Tabelle 11 verdeutlicht.

Tabelle 11: Datensätze in den Sensitivitätsanalysen 1 bis 3

		<b>Datensatz</b>	<b>Region</b>	<b>Datenbank</b>
Sensitivitätsanalyse 3	Sensitivitäts-analyse 1	market for electricity, medium voltage, renewable energy products	Schweiz	Ecoinvent 3.8
	Sensitivitäts-analyse 2	acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) in waste incineration plant	Deutschland	GaBi SP40 2020 professional database
		polyamide (PA) 6.6 GF30 in waste incineration plant	Europa	GaBi SP40 2020 professional database
		polycarbonate (PC) in waste incineration plant	Europa	GaBi SP40 2020 professional database

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen werden für den Kunststoff ABS in Bezug zur Ist-Situation in Tabelle 12 als Life Cycle Impact Assessment (LCIA) aufgeführt, indem die einzelnen Positionen der aufgenommenen Sachbilanz auf die Wirkungskategorie des Klimawandels bewertet und in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ausgedrückt werden.

Tabelle 12: Life Cycle Impact Assessment von 1 kg Mahlgut aus ABS

CO <sub>2</sub> e in g	<b>Stahl</b>	<b>Transport</b>	<b>Strom</b>	<b>Karton</b>	<b>Staub</b>	<b>Summe</b>
Ist-Zustand	0,20	5,40	9,79	34,88	95,95	<b>146,21</b>
Sensitivitäts-analyse 1)	0,20	5,40	0,52	34,88	95,95	<b>136,95</b>
Sensitivitäts-analyse 2)	0,20	5,40	9,79	34,88	86,05	<b>136,31</b>
Sensitivitäts-analyse 3)	0,20	5,40	0,52	34,88	86,05	<b>127,05</b>

Wie zuvor aufgeführt, belegen nun die bewerteten Stoff- und Energieströme in Tabelle 12 den dominierenden Einfluss der Verbrennung des Kunststoffstaubes auf den PCF des Mahlguts. Aber auch die einmalige Verwendung des Oktabin aus Karton hat mit etwa 24 % einen hohen Anteil am PCF. Das berechnete Treibhauspotential der Sachbilanz bezogen auf 1 kg Mahlgut ABS wird für die jeweiligen Analysen zusammen mit dem Ist-Zustand in einer 3D-Auftragung in Abbildung 8 grafisch dargestellt. Die einzelnen Beiträge zum Treibhauspotential von ABS zeigen, dass die Auswirkungen des Transports sowie der Verbrauch des Kartons über alle Analysen hinweg konstant bleiben. Die Summe aller Beträge, welche dem PCF entspricht, nimmt dagegen vom Ist-Zustand des Produktionsprozesses bis zur Sensitivitätsanalyse 3 kontinuierlich ab. So kann die Umweltbelastung bei der Herstellung von Mahlgut aus ABS durch den Einsatz von Strom aus regenerativen Energiequellen um etwa 6 % und durch die Verbrennung von sortiertem Kunststoffstaub um etwa 7 % reduziert werden.

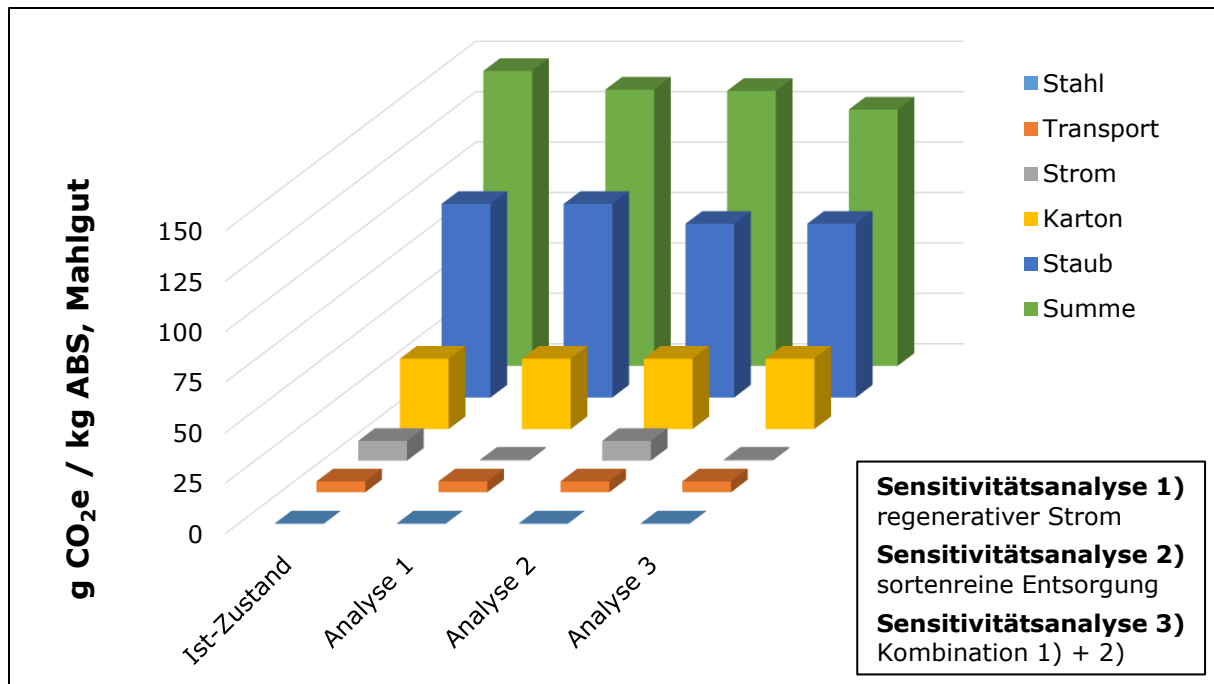


Abbildung 8: Treibhauspotential in CO<sub>2</sub>-Äquivalente von 1 kg Mahlgut aus ABS

Die Auswirkungen des Austauschs von Datensätzen bei der Berechnung des PCF von Polyamid 6.6 GF30 (PA66GF30) werden in Tabelle 13 für die Sensitivitätsanalysen 1 bis 3 mit dem aufgenommenen Ist-Zustand verglichen. Wie zuvor sind die einzelnen Komponenten der Sachbilanz mit ihrem Treibhauspotential angegeben.

Tabelle 13: Life Cycle Impact Assessment von 1 kg Mahlgut aus PA66GF30

CO <sub>2</sub> e in g	Stahl	Transport	Strom	Karton	Staub	Summe
Ist-Zustand	0,20	5,40	15,87	34,88	95,95	152,30
Sensitivitätsanalyse 1)	0,20	5,40	0,85	34,88	95,95	137,28
Sensitivitätsanalyse 2)	0,20	5,40	15,87	34,88	66,59	122,94
Sensitivitätsanalyse 3)	0,20	5,40	0,85	34,88	66,59	107,92

Die Ergebnisse für den Kunststoff PA66GF30 in Tabelle 13 zeigen in jedem einzelnen Schritt der Sensitivitätsanalysen 1 bis 3 ein noch größeres Optimierungspotential als für den Kunststoff ABS. Dies wird durch die 3D-Auftragung in Abbildung 9 über die Summe aller bewerteten Inputs in Grün dargestellt. Kunststoffteile aus Polyamid haben eine hohe Festigkeit, welche durch die Zugabe von Glasfasern noch weiter verstärkt wird. Dies führt zu einem geringen Mahlvolumen pro Stunde und einem hohen Energieverbrauch der Kunststoffmühle, was auch der spezifische Energiebedarf in Tabelle 10 belegt. Damit hat dieser Kunststofftyp unter allen bewerteten Kunststoffen das höchste Reduktionspotential durch den Einsatz regenerativer Energien.

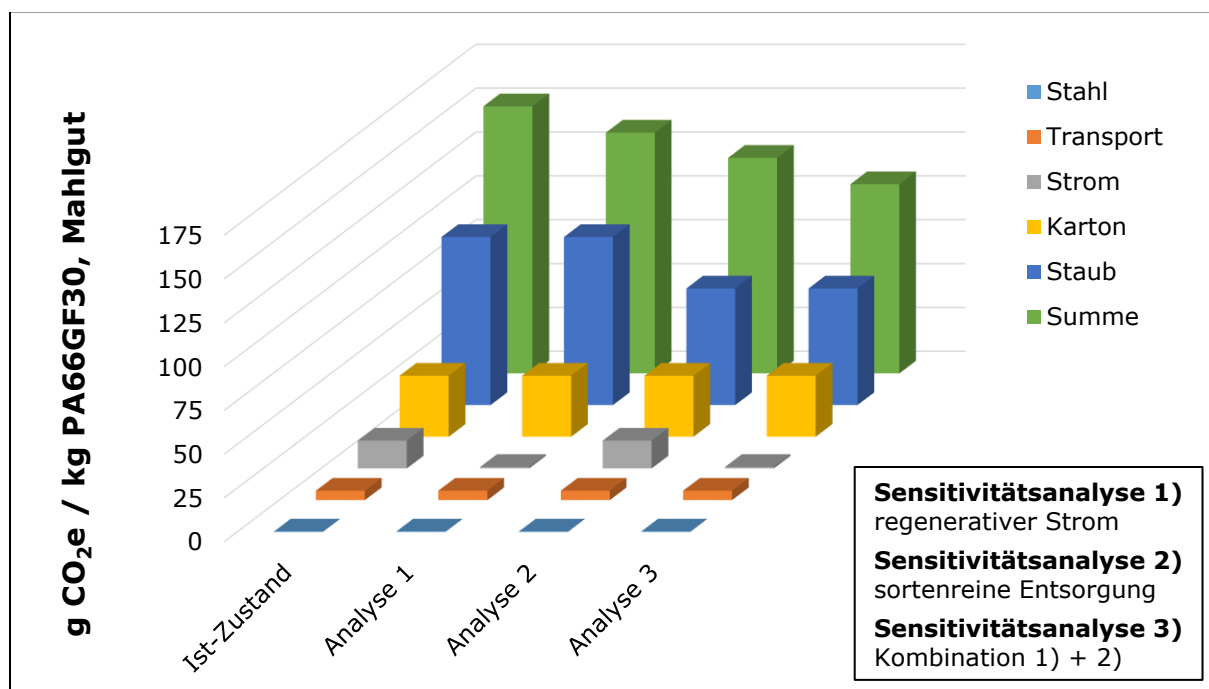


Abbildung 9: Treibhauspotential in CO<sub>2</sub>-Äquivalente von 1 kg Mahlgut aus PA66GF30

Aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Faser-Kunststoff-Verbundes sorgt der erhöhte Glasfaseranteil auch für einen geringeren Betrag an direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung des Kunststoffstaubs, da im Gegensatz zu Glasfasern die Polymerketten des Kunststoffs auf organischen Kohlenstoffbindungen basieren. Durch die geringeren Emissionen bei der Entsorgung von PA66GF30 unter dem im Ist-Zustand angesetzten Kunststoffmix, konnte der PCF durch die sortenreine Entsorgung um weitere 19 % in Sensitivitätsanalyse 2 gesenkt werden. Sensitivitätsanalyse 3 kombiniert die beiden vorherigen Ansätze zum größten Optimierungspotential von 29 %.

Wie zuvor wurde auch für Polycarbonat (PC) der Einfluss der einzelnen Prozessinputs auf den PCF von 1 kg Mahlgut berechnet. Die Ergebnisse sind zusammen mit den Sensitivitätsanalysen 1 bis 3 in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Life Cycle Impact Assessment von 1 kg Mahlgut aus PC

CO <sub>2</sub> e in g	Stahl	Transport	Strom	Karton	Staub	Summe
Ist-Zustand	0,20	5,40	9,60	34,88	95,95	146,02
Sensitivitäts-analyse 1)	0,20	5,40	0,51	34,88	95,95	136,94
Sensitivitäts-analyse 2)	0,20	5,40	9,60	34,88	112,16	162,23
Sensitivitäts-analyse 3)	0,20	5,40	0,51	34,88	112,16	153,15

Entgegen allen anderen untersuchten Kunststoffsorten zeigt PC durch die sortenreine Entsorgung in der Sensitivitätsanalyse 2 den höchsten PCF aller betrachteten Fälle. Dies hebt Abbildung 10 hervor.

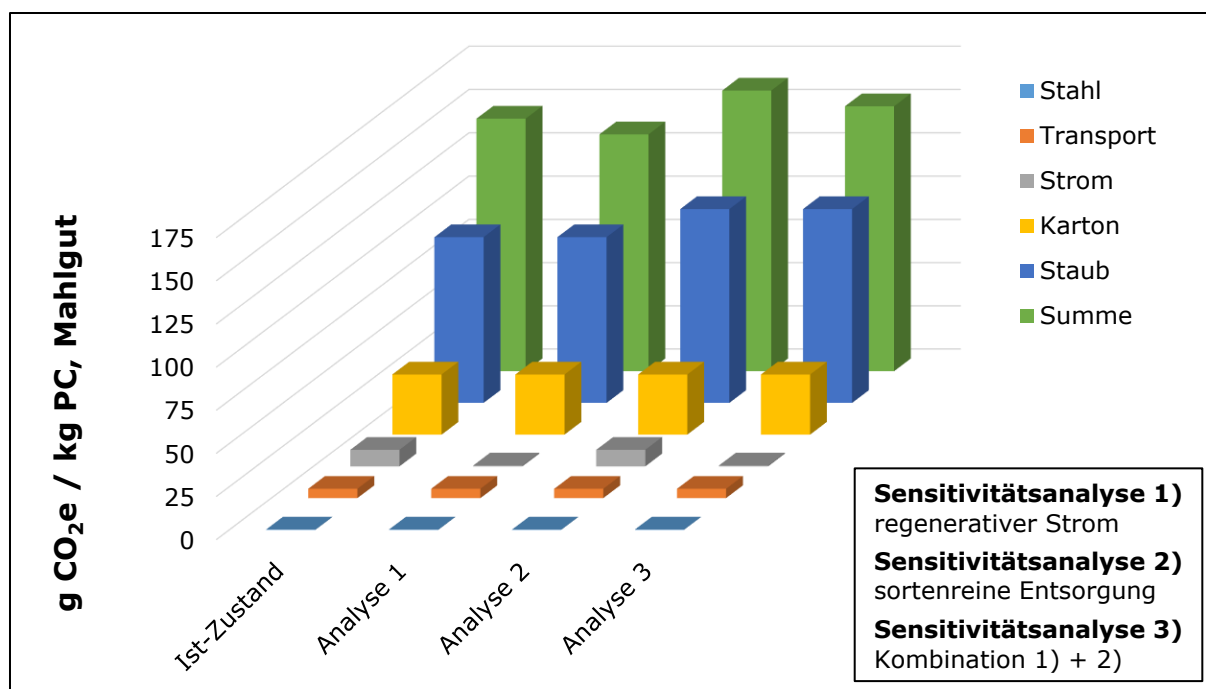


Abbildung 10: Treibhauspotential in CO<sub>2</sub>-Äquivalente von 1 kg Mahlgut aus PC

Aufgrund der stöchiometrischen Zusammensetzung von PC entstehen bei seiner Verbrennung höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen als das durchschnittliche Treibhauspotential von Abgasen aus der Verbrennung von unsortiertem Kunststoffabfall in einer kommunalen Müllverbrennungsanlage. Der PCF steigt in der Sensitivitätsanalyse 2 noch stärker an, als er durch den Einsatz regenerativer Energien in der Sensitivitätsanalyse 1 gesenkt werden kann, so dass selbst bei einer Kombination beider Datensätze in der Sensitivitätsanalyse 3 der PCF um 5 % gegenüber dem Ist-Zustand erhöht wird.

Da in den Materialdatenbanken kein Datensatz für die sortenreine Entsorgung von Polyoxymethylen (POM) zur Verfügung steht, wird konnte ausschließlich in Sensitivitätsanalyse 1 nur der Wechsel des lokalen Stromversorgers auf regenerative Energien untersucht werden. Der Vergleich mit den Ergebnissen des Ist-Zustandes für den Produktionsprozess von Mahlgut ist in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 15: Life Cycle Impact Assessment von 1 kg Mahlgut aus POM

CO <sub>2</sub> e in g	Stahl	Transport	Strom	Karton	Staub	Summe
Ist-Zustand	0,20	5,40	5,59	34,88	95,95	142,02
Sensitivitäts-analyse 1)	0,20	5,40	0,30	34,88	95,95	136,73

Ein Vergleich der Sensitivitätsanalyse 1 mit dem Ist-Zustand zeigt, dass die Umstellung auf Ökostrom nur eine geringe Auswirkung von knapp -4 % auf den gesamten PCF hat, für die Vermahlung von POM, wie in Tabelle 10 dargestellt, der mit Abstand geringste spezifische Energiebedarf vorliegt.

Die Sensitivitätsanalysen 1 bis 3 haben gezeigt, wie stark der berechnete PCF für die Kunststoffe ABS, PA66GF30, PC und POM von den Datensätzen für Strom sowie für die Art der Abfallentsorgung abhängt. Dies spiegelt die Gültigkeit der Ergebnisse für die Verwendung in anderen Ökobilanzen und das Potential zur Verringerung des PCF wider. Die Berechnung des PCF nach dem Ist-Zustand folgte dabei den Ansätzen einer

„consequential LCA“, bei der die Auswirkungen von Entscheidungen im Produktsystem, wie z.B. die Sammlung von Staub aus verschiedenen Kunststoffsorten in einem Sack, in der Sachbilanz als Kunststoffmix zur Entsorgung erfasst wurden. Die Sensitivitätsanalyse 2 hingegen entspricht der ausschließlichen Bewertung des reinen Stoffstroms im Sinne einer „attributonal LCA“. Diesbezüglich wird in Tabelle 16 eine Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen im Vergleich zum Ist-Zustand des Recyclingprozesses dargestellt.

Tabelle 16: Vergleich des Product Carbon Footprint mit Optimierungspotential

CO <sub>2</sub> e in g	ABS	PA66GF30	PC	POM
<b>Ist-Zustand</b>	<b>146</b>	<b>152</b>	<b>146</b>	<b>142</b>
<b>Sensitivitätsanalyse 1)</b> regenerative Energie	137 (-6 %)	137 (-10 %)	137 (-6 %)	137 (-4 %)
<b>Sensitivitätsanalyse 2)</b> Sortenreine Entsorgung	136 (-7 %)	123 (-19 %)	162 (+11 %)	-
<b>Sensitivitätsanalyse 3)</b> Energie + Entsorgung	127 (-13 %)	108 (-29 %)	153 (+5 %)	-

Sensitivitätsanalyse 1 in Tabelle 16 zeigt eine Reduktion des PCF für alle betrachteten Kunststoffsorten, wobei die Reduktion mit dem spezifischen Energiebedarf aus Tabelle 10 zunimmt. Hierbei gilt jedoch hervorzuheben, dass der im Ist-Zustand eingesetzte Strom bereits ein geringes Treibhauspotential hat, so dass die Optimierung des aufgenommenen Recyclingprozesses durch den Einsatz regenerativer Energien gegebenenfalls geringer ausfällt als bei anderen Herstellern des entsprechenden Mahlgutes.

Auf der Grundlage der Ergebnisse für PC in Tabelle 16 wird empfohlen, bei der Verwendung des berechneten PCF eine Sicherheitsaufschlag von 11 % anzuwenden. Denn die Bilanzierung einer sortenreinen Entsorgung in Sensitivitätsanalyse 2, welche für einen Recyclingprozess anderer Hersteller gegebenenfalls zutreffender ist, würde das Treibhauspotential um den entsprechenden Betrag erhöhen. Aufgrund der unvollständigen Datenlage zu dem Kunststoff POM in Bezug auf die sortenreine Entsorgung wird ebenfalls vorgeschlagen, die für den Kunststoff PC ermittelte Sicherheitsmarge von 11 % auch für den Kunststoff POM zu übernehmen. Die Kunststoffe ABS und PA66GF30 zeigen in Sensitivitätsanalyse 2 stattdessen ein Optimierungspotential, indem die sortenreine Entsorgung auf den Ist-Zustand angewendet wird. Damit wird ein Sicherheitszuschlag für die Anwendung des berechneten PCF dieser Kunststofftypen nicht erforderlich.

Als Haupttreiber für den PCF aller untersuchten Kunststoffe wurde die Verbrennung von Kunststoffstaub identifiziert, der im Teilprozess des Mahlens von Kunststoffteilen anfällt. Der Messerverschleiß hingegen trägt weniger als 1 % zum PCF des Mahlgutes bei. Aus ökologischer Sicht könnte es daher sinnvoll sein, die Messer der Mühle häufiger nachzuschleifen, wenn dadurch die Menge an Kunststoffstaub deutlich reduziert werden könnte. Insgesamt zeigen bereits die Ergebnisse für Mahlgut des Ist-Zustandes eine Reduktion des Treibhauspotentials um mindestens 95 % gegenüber neuwertigem Granulat nach den Datensätzen von Ecoinvent 3.8 und GaBi SP40 2020 der untersuchten Kunststoffsorten.

### 3.3.3 Einsparpotential durch den Einsatz von Kunststoffmahlgut

Die Ergebnisse aus der Analyse des mechanischen Recyclingprozesses können in einer makroskopischen Betrachtung auf die verarbeitete Menge an Rezyklat aus „post industrial waste“ in Deutschland pro Jahr von rund 1 Mio. Tonnen übertragen werden, um das



Einsparpotential von indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Kunststoffmahlgut abzuschätzen.

Für einen Näherungswert von etwa 3 kg CO<sub>2</sub>e/kg als minimales Treibhauspotential für den Einsatz von neuwertigem Granulat der technischen Kunststoffe ABS, PA66GF30, PC oder POM sowie 0,15 kg CO<sub>2</sub>e/kg Mahlgut zeigt Gleichung (1), dass sich bereits durch den derzeitigen Einsatz von Rezyklat eine Einsparung von etwa 2,85 Mio. Tonnen indirekter CO<sub>2</sub>-Emissionen ergibt.

$$(3 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} - 0,15 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}) \cdot 10^9 \text{ kg} = 2,85 \cdot 10^6 \text{ t CO}_2\text{e} \quad (1)$$

Wie Gleichung (2) weiter aufführt, würde sich aus einer Skalierung des Anteils von 6,5 % der im Jahr 2019 verarbeiteten Rezyklate aus postindustriellen Abfällen auf 20 % ein Einsparpotential aus der Substitution von Granulat durch Mahlgut von etwa 8,77 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>e ergeben.

$$2,85 \cdot 10^6 \text{ t CO}_2\text{e} \cdot \frac{20 \%}{6,5 \%} = 8,77 \cdot 10^6 \text{ t CO}_2\text{e} \quad (2)$$

In diesem Zusammenhang gilt es jedoch die Anforderungen der Produktqualität zu erfüllen. Dies wird bei einem Massenanteil von bis zu 20 % an Rezyklat im Allgemeinen im Spritzgießverfahren erfüllt. Somit kann das mechanische Recycling von „post industrial waste“ einen wichtigen Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen auf maximal 118 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>e laut Bundesklimaschutzgesetz im Jahr 2030 leisten (KSG, 2019).

Der im Projekt „SekÄqui“ berechnete PCF für Mahlgut der technischen Kunststoffe ABS, PA66GF30, PC und POM kann durch die Darstellung des Life Cycle Impact Assessment für jede aufgeführte Position individuell angepasst werden, indem beispielsweise eine spezifische Bewertung des aufgeführten Strombedarfs angewendet wird. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen 1 bis 3 weitere Möglichkeiten zur Optimierung des Herstellungsprozesses auf, um den PCF des Mahlgutes von PA66GF30 um bis zu 29 % zu reduzieren. Als Ausblick auf weitere Studien sollte jedoch die Bildung von Kunststoffstaub in Abhängigkeit von der Schärfe der Messer in der Mühle untersucht werden, da der Kunststoffstaub bei weitem als Haupttreiber für den PCF des Mahlguts identifiziert wurde.

### 3.3.4 Inline-Recycling von Angüssen und Ausschuss

Neben dem großtechnischen Vermahlen von Kunststoffteilen zu Mahlgut über Recyclingbetriebe können Angüsse und Ausschussteile betriebsintern über eine eigene Schneidmühle in geringem Umfang selbst zu Mahlgut verarbeitet werden. Bei dieser Form des Inline-Recyclings unterstützt die Schneidmühle beispielsweise den Spritzgießprozess durch eine erhöhte Ressourcennutzung. Ein direkter Vergleich zu dem Mahlgut der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti ist allerdings nur begrenzt möglich, da der ebenfalls anfallende Staubanteil in dem Mahlgut der Beistellmühle nicht entfernt wird und somit die Prozesssicherheit reduziert und zugleich die Ausschussquote erhöht. Daher wurde auf eine gegenüberstellende Berechnung des Treibhauspotentials von Mahlgut aus dem Inline-Recyclingprozess verzichtet. Zur Einordnung des Verfahrens wurde stattdessen ein Vergleich der Durchsatzleistung zusammen mit dem spezifischen Energieverbrauch in Tabelle 17 aufgeführt. Hierzu wurden Angüsse und Zugstäbe der Kunststoffe ABS, POM, PC und PA66GF30 in beiden Mühlen unter Vollast vermahlen und deren Energieverbrauch gemessen. Dabei wurde die Durchsatzleistung der Kunststoffherzeugnisse Occhipinti aus den letzten 10 Aufträgen der betrachteten Kunststoffsorten berechnet, um den Einfluss der Bauteilgeometrie auszugleichen. Im Gegensatz hierzu wurde die Zeit und das Gewicht der

gemahlene Angüsse und Zugstäbe separat erfasst, um hierdurch die jeweilige Durchsatzleistung der Schneidmühle „Goliath Plus“ des Herstellers digicolor GmbH zu berechnen.

Tabelle 17: Durchsatzleistung und spezifischer Energieverbrauch

<b>Schneidmühle Goliath Plus</b>	<b>ABS</b>		<b>POM</b>		<b>PC</b>		<b>PA66GF30</b>	
	Anguss	Zugstab	Anguss	Zugstab	Anguss	Zugstab	Anguss	Zugstab
Durchsatzleistung (kg/h)	7,69	8,52	16,28	15,55	11,78	9,11	11,64	13,06
spezifischer Energieverbrauch (MJ/kg)	0,199	0,207	0,104	0,120	0,264	0,338	0,131	0,132
<b>Kunststoff- erzeugnisse Occhipinti</b>	<b>ABS</b>		<b>POM</b>		<b>PC</b>		<b>PA66GF30</b>	
Durchsatzleistung (kg/h)	463		530		513		464	
spezifischer Energieverbrauch (MJ/kg)	0,172		0,098		0,169		0,278	

Je nach Kunststoffsorte ist die Durchsatzleistung sowie der spezifische Energieverbrauch stark unterschiedlich. Dabei stehen die Ergebnisse von ABS, POM und PC die in Übereinstimmung mit anderen Studien, welche die optimierte Energieeffizienz großer Kunststoffmühlen mit einem hohen Mahlvolumen pro Stunde aufzeigen (Shuaib & Mativenga, 2016). Somit können die Kunststoffteile sowohl schneller als auch mit weniger Energie von spezialisierten Recyclingbetrieben zu Mahlgut verarbeitet werden. Ausschließlich für die mit Glasfasern verstärkte Kunststoffsorte PA66GF30 zeigt sich ein entgegengesetztes Ergebnis, sodass in weiteren Untersuchungen die Auswirkungen des Glasfaseranteils auf das mechanische Recycling der reinen Polymere systematisch analysiert werden sollte.

### 3.4 Allokationsverfahren beim Recycling im offenen Kreislauf

Das werkstoffliche Recycling in einer offenen Kreislaufwirtschaft ermöglicht die Verwendung desselben Materials in mehreren Produktsystemen und führt auf diese Weise zu weniger Abfall sowie einen geringeren Bedarf an neuen Rohstoffen. Aufgrund der erhöhten Effizienz in der Nutzung an begrenzten Ressourcen verbessert sich die Nachhaltigkeit ganzer Lieferketten durch den Einsatz von Rezyklaten in der Produktion. Übertragen auf die Kunststoffbranche prognostiziert eine globale Studie daher einen Anstieg der werkstofflichen Recyclingrate von 9 % im Jahr 2015 auf 44 % bis 2050 für alle jemals hergestellten Kunststoffe (Geyer et al., 2017). Mit der Verwendung von Rezyklaten tritt jedoch auch eine Multifunktionalität des Materialstromes auf der Ebene der durchlaufenen Produktsysteme auf, so dass die ökologischen Belastungen in den jeweiligen Lebenszyklusphasen der Rohstoffgewinnung, des Recyclings sowie der Entsorgung auf die betroffenen Produkte in Form von Allokationsverfahren zugeordnet werden müssen (Ekvall & Finnveden, 2001). Darüber hinaus stellt der Recyclingprozess selbst einen multifunktionalen Prozess dar, welcher über die Wiederverwertung von Abfall gegebenenfalls mehrere nützliche Produkte erzeugt. Die Allokation der Belastungen auf

---

Prozessebene ist in diesem Fall nach DIN EN ISO 14044 in der folgenden Reihenfolge zu behandeln (European Committee for Standardization, 2020b):

1. Eine Allokation sollte durch Aufteilung der multifunktionalen Prozessmodule in mehrere Teilprozesse oder durch eine Systemerweiterung vermieden werden.
2. Falls eine Allokation nicht vermieden werden kann, sollten die Belastungen des multifunktionalen Prozesses auf der Grundlage von physikalischen Beziehungen unter den hervorgehenden Produkten aufgeteilt werden.
3. Wenn physische Beziehungen als Grundlage für die Allokation nicht definiert werden können, sollten andere Beziehungen, wie z. B. der ökonomische Wert der Produkte herangezogen werden.

Auf die Herausforderung aus der Multifunktionalität des Materialstromes, welcher über verschiedene Recyclingverfahren eine Kaskade von Produktsystemen durchläuft, können die Ansätze zur Lösung der Multifunktionalität auf Prozessebene jedoch nicht wirksam angewendet werden (Ekvall & Finnveden, 2001). So würde eine Systemerweiterung eine vollständige Analyse aller durchlaufenen Produktionssysteme darstellen, so dass zu dem Zeitpunkt der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung auch alle Informationen über die noch zukünftigen Verarbeitungsschritte des Materials bekannt sein müssten. Zudem müsste die funktionelle Einheit alle Funktionen eines jeden einzelnen Produktes umfassen, welches das verwendete Material in dem gesamten Produktlebenszyklus erfüllt hat. Da diese Bedingung im Allgemeinen nicht erfüllt werden kann, wurden durch die 100:0, 50:50 und 0:100-Regel Allokationsverfahren entwickelt, um die Belastungen und Gutschriften durch das Recycling auf die betroffenen Produktsysteme zu verteilen.

Die 100:0-Regel, auch als cut-off Ansatz bekannt, stellt eine beliebte Allokationsmethode dar, welche die Umweltauswirkungen der Gewinnung und Verarbeitung von neuwertigem Rohstoff dem primären Produktsystem zuordnet (Nicholson, 2009). Das nachfolgende Produktsystem trägt stattdessen die Umweltauswirkungen von Sammlung, Transport und Recycling (Frischknecht, 2010). Die Umweltauswirkungen werden durch den cut-off Ansatz gut beschrieben, wenn das Angebot an recyceltem Material dessen Nachfrage übersteigt, da durch dessen Anwendung für gewöhnlich Anreize zur Verarbeitung von Rezyklate gesetzt werden (Schrijvers et al., 2016a). Dies ist der Fall, wenn die Belastungen aus der Rohstoffproduktion die Belastungen aus dem Recycling einschließlich der Entsorgung des Materialstromes übersteigen.

Im Gegensatz hierzu profitieren bei der 50:50 Regel alle betroffenen Produktsysteme in gleichem Umfang von der erhöhten Ressourceneffizienz des Recyclings, indem Gutschriften und Belastungen in gleichem Maße verteilt werden. So erhalten bei der 50:50-Regel alle Produktsysteme zu gleichen Teilen die zusätzlichen Belastungen aus dem Recyclingprozess sowie Gutschriften aus den vermiedenen Abfällen und dem verringerten Bedarf an Rohstoffen (Klöpffer, 1996). Die 50:50-Regel wird in der Regel verwendet, wenn ausreichende Informationen für die untersuchten Produktsysteme vorliegen. Zugleich stellt diese Methode einen Kompromiss dar, der angewendet werden kann, wenn nicht bekannt ist, ob der Einsatz von Rezyklaten bevorzugt werden sollte oder nicht (Schrijvers et al., 2016b). Die Anwendung der 50:50-Regel erzeugt kein Marktungleichgewicht zwischen Neuware und Rezyklat, jedoch setzt dies voraus, dass es sowohl ein Angebot als auch eine Nachfrage nach Rezyklaten gibt, um den Recyclingprozess überhaupt zu ermöglichen (Nicholson, 2009).

Bei der 0:100-Regel, oder auch end-of-life Ansatz genannt, kann sich ein Produktsystem über die Herstellung von Rezyklaten von dem eigenen Bedarf an neuwertigen Rohstoffen entlasten (Frischknecht, 2010). Dies gilt allerdings nur unter der Bedingung, dass die

Rezyklate eine vergleichbare Qualität wie neuwertige Materialien besitzen, so dass diese in der Produktionsphase nachfolgender Produktsysteme ersetzt werden (Schrijvers et al., 2016b). Da die zukünftige Verarbeitung der Rezyklate zum Zeitpunkt des Recyclings jedoch nicht garantiert werden kann, wird dieser Bilanzierungsansatz nur selten verwendet. Für den besonderen Fall eines Mangels an Sekundärrohstoffen könnte die 0:100-Regel dazu genutzt werden, um die Verarbeitung von Rezyklaten zu belasten und zugleich die Förderung von neuen Rohstoffen zu begünstigen (Schrijvers et al., 2016a). Aus der Anwendung dieses Allokationsverfahrens geht daher kein Vorteil für die Nutzung von Rezyklat in der Produktion hervor und hemmt die Transformation linearer Produktionsketten in eine offene Kreislaufwirtschaft.

Der Einfluss des Allokationsverfahrens auf den PCF von Produkten, welche anteilig aus Rezyklat hergestellt wurden, ist anhand der produzierten Zugstäbe gemäß Versuchsreihe VR untersucht worden. Hierzu wurden zwei Produktsysteme definiert, in denen zur besseren Vergleichbarkeit beide den bereits aufgenommenen Standardprozess zur Produktion eines Zugstabes zunächst aus reinem neuwertigem Granulat sowie nachfolgend aus 33 % Mahlgut und 66 % Neuware mittel Spritzgießen umsetzten. Als Systemgrenzen wurden alle Produktlebenszyklusphasen gemäß „cradle to grave“ für das jeweilige Produktsystem betrachtet. Um die Auswirkungen von Anfahrverlusten aus dem Fertigungsprozess auf die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Produkte zu reduzieren, wurde die funktionelle Einheit auf 1.000 Zugversuche der gemäß DIN 527 definierten Zugstäben des Typs 1A definiert.

Die Lebenszyklusphasen der Zugstäbe aus den Produktsystemen A und B werden zusammen mit den Systemgrenzen für die 100:0 Regel in Abbildung 11 dargestellt. Die Angüsse aus der Produktionsphase verlassen in diesem Allokationsverfahren belastungsfrei die Systemgrenze von Produktsystem A und ersetzen als Mahlgut nach einem Transport und Recyclingprozess den Bedarf an neuwertigen Rohstoff in Produktsystem B. Dafür übernimmt Produktsystem B vollständig die Belastungen des Recyclings sowie der Entsorgung des gesamten Materialstromes aus genutzten Zugstäben und Angüssen.

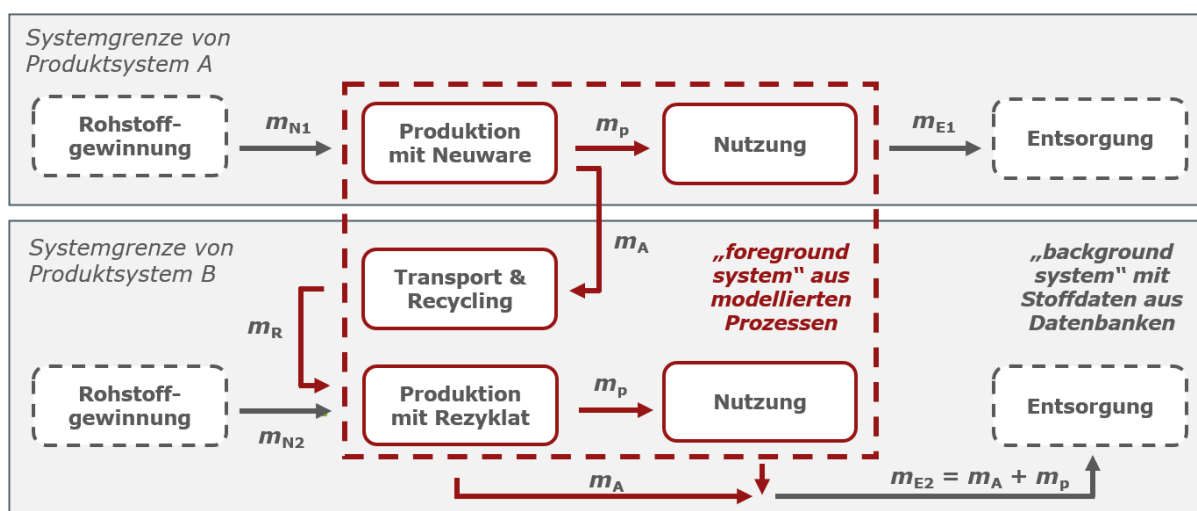


Abbildung 11: Materialfluss bei Anwendung der 100:0 Regel

Des Weiteren werden in Abbildung 11 das „background system“ mit Datensätzen aus den Datenbanken Ecoinvent 3.8 und GaBi SP40 2020 in Grau und das „foreground system“ aus den selbst erhobenen Daten für das Spritzgießen als Produktionsphase sowie den Zugversuch als Nutzungsphase zusammen mit dem Transport und Recyclingprozess in Rot dargestellt. Da sich die zu bilanzierende Masse des Materialstromes aufgrund der

unterschiedlichen Dichte der Kunststoffsorten ABS, PA66GF30, PC und POM voneinander unterscheidet, wurden folgende Variablen eingeführt.

- $m_N$  = Masse an neuwertigem Rohmaterial
- $m_P$  = Masse des Zugstabes nach dessen Produktion
- $m_A$  = Masse der Angüsse als Produktionsabfälle
- $m_E$  = Masse der genutzten Zugstäbe nach dem Zugversuch
- $m_R$  = Masse des Rezyklats in Form von Mahlgut nach dem Recyclingprozess

Die Herstellung eines Standardteils mit gleicher Form und gleichem Volumen erforderte eine Anpassung des Schussgewichts an den zu verarbeitenden Kunststofftyp. Wie bereits zuvor beschrieben, ergab sich aus der Definition des Normteils nach ISO 527-2 Typ 1A ein Massenverhältnis von 1:3 zwischen Anguss und Schussgewicht. Wird der geringe Verlust an Mahlgut durch den aussortierten Kunststoffstaub des Mahlprozesses vernachlässigt, so kann das in Abbildung 11 aufgeführte System sich selbst mit dem notwendigen Rezyklat für Produktsystem B versorgen. Damit liegen alle benötigten Informationen in jeder Lebenszyklusphase des Materialstromes vor, um auch die Anwendung der 50:50 Regel zu ermöglichen. Die Auswirkungen der 50:50 Regel auf die zuvor erstellten Produktsysteme A und B in Form von Gutschriften und Belastungen werden durch Abbildung 12 verdeutlicht.

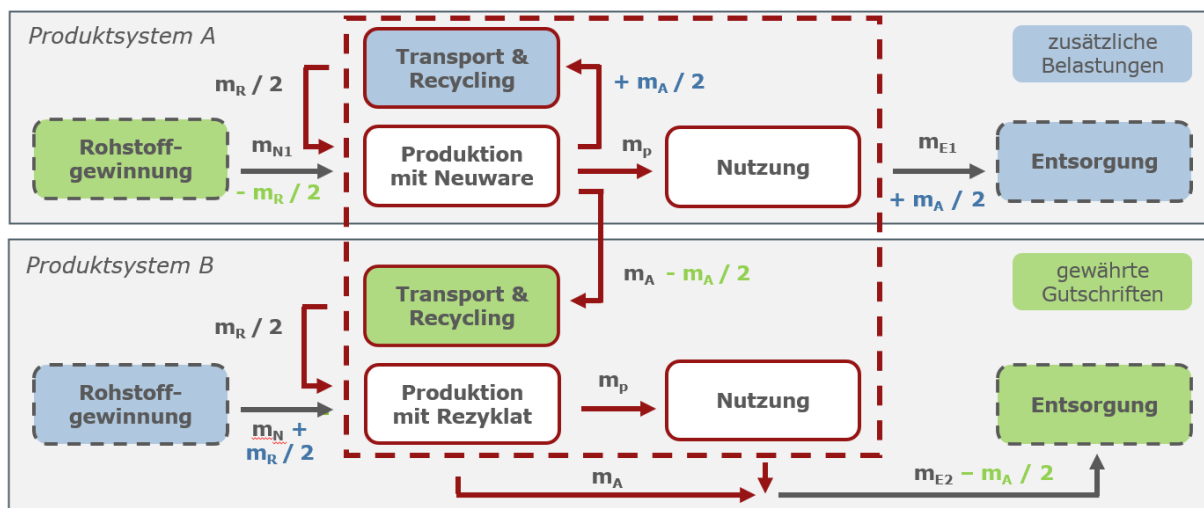


Abbildung 12: Materialfluss bei Anwendung der 50:50 Regel

Im Vergleich zu dem vorherigen cut-off Ansatz führt die Substitution von Neuware durch Mahlgut bei der 50:50 Regel zu den in Grün dargestellten Gutschriften für die Rohstoffgewinnung in Produktsystem A sowie zu einer Entlastung für das Recycling und der Entsorgung des Materialstromes in Produktsystem B. Entsprechend erhält Produktsystem B, wie in Blau dargestellt, zusätzliche Belastungen für die Rohstoffgewinnung und Produktsystem A muss sich an dem Recycling und der Entsorgung des Materialstromes beteiligen. Durch die Anwendung der 50:50-Methode ist der zu bilanzierende Stoffstrom in den Lebenszyklusphasen der Rohstoffgewinnung, des Recyclings sowie der Entsorgung in beiden Produktsystemen aufgrund der angesetzten Gutschriften und Belastungen identisch.

Zur Modellierung der 0:100 Regel wurde das Recycling von Angüssen durch Produktsystem A dazu genutzt, um sich von dem Bedarf an neuwertigem Granulat für die eigene Produktion an Zugstäben zu entlasten. Zugleich zeigt Abbildung 13 die daraus folgenden Belastungen für Produktsystem B in Form eines erhöhten Bedarfs an neuwertigem

Rohstoff, da das hier eingesetzte Mahlgut in der Produktionsphase gemäß dem Aufwand zur Herstellung von neuwertigem Granulat zu bewerten ist.

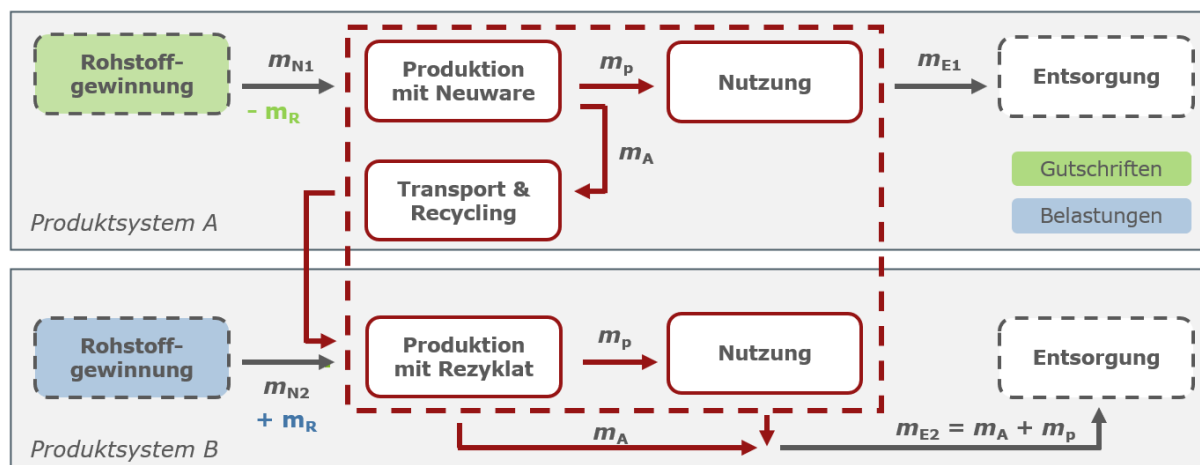


Abbildung 13: Materialfluss bei Anwendung der 0:100 Regel

Wie bereits zuvor werden in Abbildung 13 die zusätzlichen Belastungen und erlaubten Gutschriften aus der Anwendung der 0:100 Regel im Vergleich zu dem Stoffstrom aus der 100:0 Regel in den Farben Blau bzw. Grün hervorgehoben. Darüber hinaus haben sich die Systemgrenzen verschoben, so dass der Transport- und Recyclingprozess nun vollständig innerhalb der Systemgrenze von Produktsystem A liegt. Im Folgenden wird das Treibhauspotential für die einzelnen Lebenszyklusphasen der Rohstoffgewinnung, Produktion, Nutzung und Entsorgung für die Produktsysteme A und B anhand des jeweils angewendeten Allokationsverfahrens dargestellt.

Tabelle 18: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen von System A bei 100:0

	Summe über alle Lebenszyklusphasen	Rohstoffgewinnung		Produktion mit Neuware		Nutzung		Entsorgung	
		kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%
	kg CO <sub>2</sub> e	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%
<b>ABS</b>	71,63	46,65	65,1	3,31	4,6	0,54	0,8	21,12	29,5
<b>PA66GF30</b>	139,06	112,03	80,6	4,50	3,2	1,22	0,9	21,32	15,3
<b>PC</b>	109,26	71,12	65,1	4,51	4,1	1,42	1,3	32,22	29,5
<b>POM</b>	105,49	69,85	66,2	3,34	3,2	1,42	1,4	30,88	29,3

Tabelle 19: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen von System B bei 100:0

	Summe über alle Lebenszyklusphasen	Rohstoffgewinnung		Produktion mit Mahlgut		Nutzung		Entsorgung	
		kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%
	kg CO <sub>2</sub> e	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%
<b>ABS</b>	67,37	31,83	47,3	3,31	4,9	0,54	0,8	31,69	47,0
<b>PA66GF30</b>	113,36	75,67	66,8	4,50	4,0	1,22	1,1	31,98	28,2
<b>PC</b>	102,70	48,45	47,2	4,51	4,4	1,42	1,4	48,33	47,1
<b>POM</b>	98,57	47,49	48,2	3,34	3,4	1,42	1,4	46,32	47,0

Der in Tabelle 18 und Tabelle 19 umgesetzte cut-off Ansatz führt zu einer größeren Masse für die Entsorgung des Materialstromes aus genutzten Zugstäben und Angüssen aus der Produktion in Produktsystem B bei einem gleichzeitig geringeren Bedarf an neuwertigem

Rohstoff im Vergleich zu Produktsystem A. Somit stehen den Belastungen aus dem mechanischen Recycling und der kommunalen Verbrennung des Materials direkt den Einsparungen für den geringeren Einsatz neuer Rohstoffe gegenüber. Dies erweist sich als Vorteil für Produktsystem B, so dass aufgrund der hohen Belastungen bei der Rohstoffgewinnung der Einsatz von Rezyklat den PCF der Zugstäbe in Produktsystem B gegenüber den Zugstäben aus Neuware in Produktsystem A verringert. Hierbei gilt zu beachten, dass der Transport und Recyclingprozess wurde zur Anwendung der 100:0 Regel in die Lebenszyklusphase der Rohstoffgewinnung von System A integriert wurde. Zudem zeigt die Darstellung der einzelnen Lebenszyklen, dass die Rohstoffproduktion zusammen mit der Entsorgung die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Zugstabes dominiert. Im Gegensatz dazu wirkt sich der Zugversuch als definierte Nutzungsphase aufgrund der geringen Menge an benötigten Strom kaum auf den PCF aus. Selbst das Spritzgießen der Zugstäbe verursacht im Vergleich zu den berechneten Belastungen aus der Rohstoffproduktion oder der energetischen Verwertung nur eine geringe CO<sub>2</sub>-Belastung von 3,2 bis 4,9 %.

Neben dem variierenden Schussgewicht für die Produktion eines Zugstabes aus den verschiedenen Kunststoffen führen auch die unterschiedlich hohen Belastungen bei der Rohstoffherstellung des jeweiligen Kunststoffs zu der signifikanten Zunahme des PCF von ABS zu PA66GF30. Allerdings zeigt der Kunststoff PA66GF30 in diesem Allokationsverfahren auch die größte Abnahme des PCF zwischen den Produktsystemen A und B von 26 kg CO<sub>2</sub>e, da das Treibhauspotential bei der Herstellung von PA66GF30 gegenüber der Entsorgung des gleichen Materialgewichts in einer Müllverbrennungsanlage stark überwiegt. Durch die Anwendung eines Allokationsverfahrens werden in der gesamten Betrachtung beider Systeme jedoch keine Emissionen eliminiert oder zusätzlich hinzugefügt, so dass der Mittelwert der Treibhauspotentiale in Produktsystem A und B denen in Tabelle 20 für die 50:50 Regel entspricht.

Tabelle 20: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen beider Systeme bei 50:50

	Summe über alle Lebenszyklusphasen	Rohstoffgewinnung		Produktion		Nutzung		Entsorgung	
		kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%
<b>ABS</b>	69,50	39,24	56,5	3,31	4,8	0,54	0,8	26,40	38,0
<b>PA66GF30</b>	126,21	93,85	74,4	4,50	3,6	1,22	1,0	26,65	21,1
<b>PC</b>	105,98	59,78	56,4	4,51	4,3	1,42	1,3	40,27	38,0
<b>POM</b>	102,03	58,67	57,5	3,34	3,3	1,42	1,4	38,60	37,8

Tabelle 20 listet die gleichmäßige Belastung der Produktsysteme A und B durch die Verrechnung von Gutschriften und Belastungen mittels der 50:50 Regel auf. Hierdurch zeigt sich, dass die prozentuale Verteilung der ökologischen Belastungen in den einzelnen Lebenszyklusphasen im Gegensatz zur 100:0 Regel keinen Einfluss auf den berechneten PCF über den gesamten Lebenszyklus aufweist. Stattdessen profitieren beide Systeme von dem Einsatz des Rezyklats in auch nur einem der beiden Produktsysteme, falls die Vorteile der eingesparten Rohstoffe und deren Entsorgung die Umweltbelastung durch den Transport- und Recyclingprozess überwiegen.

Die Ergebnisse durch die Anwendung der 0:100 Regel werden in Tabelle 21 und Tabelle 22 dargestellt. Die Lebenszyklusphasen der Rohstoffgewinnung und Entsorgung dominieren wie zuvor den PCF, wobei das Treibhauspotential in beiden Phasen für Produktsystem B maßgeblich höher ist als bei Produktsystem A. Denn die Entlastung von Produktsystem A sowie die zusätzliche Belastung von Produktsystem B führt bei der 0:100 Regel unabhängig von der betrachteten Kunststoffsorte zu den größten Unterschieden in dem berechneten PCF der beiden Produktsysteme.

Tabelle 21: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen von System A bei 0:100

Summe über alle Lebenszyklusphasen	Rohstoff-gewinnung		Produktion mit Neuware		Nutzung		Entsorgung			
	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%		
<b>ABS</b>	56,79		31,1	54,8	3,31	5,8	0,54	1,0	21,84	38,5
<b>PA66GF30</b>	102,70		74,68	72,7	4,50	4,4	1,22	1,2	22,30	21,7
<b>PC</b>	86,39		47,41	54,9	4,51	5,2	1,42	1,6	33,05	38,3
<b>POM</b>	83,13		46,57	56,0	3,34	4,0	1,42	1,7	31,8	38,3

Tabelle 22: Treibhauspotential der Lebenszyklusphasen von System B bei 0:100

Summe über alle Lebenszyklusphasen	Rohstoff-gewinnung		Produktion mit Mahlgut		Nutzung		Entsorgung			
	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%	kg CO <sub>2</sub> e	%		
<b>ABS</b>	82,19		46,65	56,8	3,31	4,0	0,54	0,7	31,69	38,6
<b>PA66GF30</b>	149,72		112,03	74,8	4,50	3,0	1,22	0,8	31,98	21,4
<b>PC</b>	125,37		71,12	56,7	4,51	3,6	1,42	1,1	48,33	38,6
<b>POM</b>	120,93		69,85	57,8	3,34	2,8	1,42	1,2	46,32	38,3

Tabelle 22 zeigt, dass die Belastung des nachfolgenden Systems zu einem massiven Anstieg des PCF führt, obwohl Produktsystem A bei der 0:100 den vollständigen Transport und Recyclingprozess in der Lebenszyklusphase der Entsorgung integriert. Die starke Entlastung von Produktsystem A wird oft als ungerecht bezeichnet, da zudem System B für die Verwendung von Rezyklat in der Produktion bestraft wird. Somit begünstigt dieser Ansatz die Verwendung von neuwertigen Rohstoffen und hemmt den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft mit einer nachhaltigeren Nutzung von begrenzten Ressourcen.

Wie in Kapitel 3.3. dargestellt wurde, verfügt das mechanische Recycling von Angüssen mit etwa 0,2 kg CO<sub>2</sub>e pro 1 kg Mahlgut über ein stark reduziertes Treibhauspotential im Vergleich zur Gewinnung von neuem Kunststoffgranulat. Damit trägt der Transport und Recyclingprozess des mechanischen Recyclings im Werk der „Kunststoffherzeugnisse Occhipinti“ in den definierten Produktsystemen A und B nur etwa 1 % zu dem gesamten PCF der betrachteten 1.000 Zugversuche bei. Die Zuordnung der Belastungen des Recyclingprozesses zum primären oder sekundären Produktsystem sollte daher nur einen geringen Einfluss auf den PCF des jeweiligen Systems haben. Dennoch ergeben sich aufgrund der Gutschriften und Belastungen für die Phasen der Rohstoffproduktion und Entsorgung je nach angewendetem Allokationsverfahren starke Unterschiede in dem berechneten PCF. Daher hat die Wahl der Allokationsstrategie einen größeren Einfluss auf den PCF als der mechanische Recyclingprozess selbst. Dies wird in Tabelle 23 für die untersuchten Allokationsverfahren anhand der Zugversuche für die Kunststoffe ABS, PA66GF30, PC und POM hervorgehoben. So tritt der größte Unterschied zwischen dem PCF der Produktsysteme A und B bei der 0:100 Regel für jede untersuchte Kunststoffsorte auf, da die geringen Auswirkungen des Recyclingprozesses den PCF von Produktsystem A kaum erhöhen. Im Gegensatz dazu geht aus Produktsystem B der höchsten PCF hervor, da beim end-of-life Ansatz alle Belastungen für die Rohstoffherstellung und Entsorgung des Materialflusses aus Zugstab und Anguss auf das Folgesystem übertragen werden. Die Ergebnisse der 50-50-Regel zeigen, dass durch die Anrechnung von Gutschriften und Belastungen in beiden Systemen zu einem identischen PCF führt. Dies entspricht auch dem



durchschnittlichen PCF in den Systemen A und B der 100:0 und 0:100 Regel, da in beiden Produktsystemen das gleiche Produkt hergestellt wurde.

Tabelle 23: Vergleich des Product Carbon Footprint in Abhängigkeit der Allokation

kg CO <sub>2</sub> e System	<b>100:0 Regel / cut-off Ansatz</b>		<b>50:50 Regel</b>		<b>0:100 Regel / end-of-life Ansatz</b>	
	A	B	A	B	A	B
<b>ABS</b>	71,6	67,4	69,5	69,5	56,8	82,2
<b>PA66GF30</b>	139,1	113,4	126,2	126,2	102,7	149,7
<b>PC</b>	109,3	102,7	106,0	106,0	86,4	125,4
<b>POM</b>	105,5	98,6	102,0	102,0	83,1	120,9

Die Ergebnisse des cut-off Ansatzes belegen, dass für alle untersuchten Kunststoffe der berechnete PCF aus Produktsystem B verringert wurde. So ist trotz dem zugeordneten Recyclingprozess zu System B der Vorteil aus dem reduzierten Bedarf an Neuware höher als der vermiedene Aufwand zur Entsorgung der Angüsse in Produktsystem A. Im Gegensatz zur 0:100 Regel profitieren damit beide Systeme von dem integrierten Recyclingprozess, da die recycelbaren Angüsse in System A nicht bilanziert werden und System B den Bedarf an Neuware durch Rezyklat substituiert. Der direkte Vergleich der Ergebnisse aus den beiden Produktsystemen A und B in Tabelle 23 verdeutlicht den Einfluss des Allokationsverfahrens auf den PCF, so dass ausgehend von der 50:50 Methode der PCF bereits um 15 % zur 0:100 Regel variiert, obwohl das mechanische Recycling selbst nur etwa zu 1 % zum PCF beiträgt. Dies verdeutlicht die Auswirkungen von Gutschriften und Belastungen auf die Lebenszyklusphasen der Rohstoffgewinnung, des Recyclings und der Entsorgung auf den zu bilanzierenden Materialfluss.

## 4 Fazit und Ausblick

Das übergeordnete Ziel einer Schulung von kleinen und mittleren Unternehmen zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung am Kunststoffinstitut wurde innerhalb der Projektlaufzeit erreicht. Die dargestellten Ergebnisse und Herausforderungen, welche sich auch aus der Integration von Rezyklaten in der Produktion auf die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung ergeben, wurden in einem Handlungsleitfaden verarbeitet. Dieser bildet die Basis für die nun am Kunststoff-Institut angebotenen Schulung „CO<sub>2</sub>-Bilanzierung für Kunststoffverarbeiter“, welche neben der erforderlichen Theorie über das normgerechte Vorgehen zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung auch eine entsprechende Umsetzung mit dem ecocockpit der Effizienz-Agentur NRW vermittelt. Der eingeführte Standardprozess anhand des Fertigungsverfahrens des Spritzgießens lässt sich hierbei auf andere Fertigungsverfahren übertragen, so dass die Schulungsteilnehmer auch firmeninterne Prozesse und Produkte anhand des gezeigten Vorgehens selbstständig bilanzieren können.

Darüber hinaus konnten im Projekt „SekÄqui“ CO<sub>2</sub>-Äquivalente von Sekundärrohstoffen aus „post industrial waste“ in Form von Mahlgut für die technischen Kunststoffe Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), Polyamid 6.6 mit 30 % Glasfaseranteil (PA66GF30), Polycarbonat (PC) und Polyoxymethylen (POM) aus dem Werk des Projektpartners Kunststoffherzeugnisse Occhipinti berechnet werden. Die über Sensitivitätsanalysen validierten Ergebnisse belegen hierbei eine Reduktion des Treibhauspotentials von Mahlgut gegenüber Neuware von mindestens 95 %. Anhand der Zugfestigkeit der Rezyklate wurde gezeigt, dass das mechanische Recycling ausschließlich bei dem mit Glasfasern verstärkten Kunststoff PA66GF30 zu einer Abnahme der Zugfestigkeit von 15 % führte. Die reinen Polymere aus ABS, PC und POM zeigten dagegen keine Veränderung gegenüber dem Primärrohstoff, sodass eine Substitution von neuwertigem Granulat durch Mahlgut auch

unter der Berücksichtigung von Qualitätsanforderungen möglich ist. Aufgrund der vergleichbaren Eigenschaften gegenüber Neuware zeigten sich bei der Verarbeitung von Rezyklat auch keine signifikanten Unterschiede in den dem Anstieg des Rezyklatanteils von 33 % auf 100 %. Ausschließlich bei dem Rezyklat aus PA66GF30 wurde eine geringe Abnahme von etwa 2,5 % des Energiebedarfs der Spritzgießmaschine Sumitomo Demag IntElect 130/520-250 D30 bei einer Zunahme der eingestellten Fließfrontgeschwindigkeit von 100 auf 300 mm/s beobachtet. Zusammen mit der geringeren Zugfestigkeit des Mahlguts aus PA66GF30 könnte dies die Folge aus einer Abnahme der Glasfaserlänge durch das Vermahlen der Kunststoffteile bei dem mechanischen Recycling sein. Demnach wird gemäß Literatur eine anteilige Substitution von Neuware durch Mahlgut von maximal 20 % angestrebt. Über eine Projektion auf die verarbeitete Kunststoffmenge in Deutschland wurde gezeigt, dass sich aus der Substitution von Granulat durch Mahlgut ein Einsparpotential von etwa 8,77 Mio. Tonnen CO<sub>2e</sub> ergibt, so dass das mechanische Recycling von Produktionsabfällen einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der maximalen Treibhausgasemissionen von 118 Mio. Tonnen CO<sub>2e</sub> laut dem Bundesklimaschutzgesetz im Jahr 2030 leisten kann. Zur Transformation linearer Produktionsketten in eine Kreislaufwirtschaft wurde der Einfluss von Allokationsverfahren, welche durch die Multifunktionalität des Materialstromes bei einem Recycling in einer offenen Kreislaufwirtschaft erforderlich werden, anhand der Bilanzierung der durchgeführten Zugversuche bestimmt. So wurde gezeigt, dass die Anrechnung von Gutschriften und Belastungen entsprechend der 100:0, 50:50 oder 0:100 Regel den PCF stärker bestimmen als die Belastung durch den mechanischen Recyclingprozess selbst.

Die Projektergebnisse zur Berechnung des Treibhauspotentials von Mahlgut wurden als Artikel mit dem Titel „Carbon Footprint of Mechanical Recycling of Post-Industrial Plastic Waste: Study of ABS, PA66GF30, PC and POM Regrinds“ in dem wissenschaftlichen Journal „Waste“ von MDPI veröffentlicht und stehen als „open access“ als Download zur Verfügung. Eine weitere Veröffentlichung über die Auswirkungen des Allokationsverfahrens auf den PCF beim Recycling im offenen Kreislauf durchläuft zurzeit den peer-review Prozess in der Fachzeitschrift „Resources, Conservation & Recycling Advances“ des Herausgeber Elsevier.

Als Ausblick für zukünftige Untersuchungen ergeben sich aus den dargestellten Ergebnissen weitere Ansätze zur Optimierung des PCF von Kunststoffmahlgut und dem sich daraus folgendes Potential zur Reduktion von Treibhausgasemissionen auf der makroskopischen Ebene der gesamten Kunststoffbranche. So wurde gezeigt, dass der PCF des Mahlguts zu zwei Dritteln durch die Verbrennung des anfallenden Kunststoffstaubes aus dem Mahlprozess bestimmt wird. Degen ist der Verschleiß der Messer bislang gemäß einer Abschneideregulierung von 1 % des kumulierten Stoffstromes der Sachbilanz ökologisch zu vernachlässigen. Demnach sollte ein häufigeres Nachschleifen der Messer in Abhängigkeit auf den anfallenden Kunststoffstaub untersucht werden, um hierdurch sowohl eine ökonomische als auch ökologische Verbesserung des mechanischen Recyclingprozesses zu erreichen, da der vermiedene Anteil an Kunststoffstaub stattdessen als Mahlgut verkauft und verarbeitet werden könnte. Des Weiteren ist die Veränderung der Polymerketten nach dem Durchlaufen mehrerer Recyclingprozesse zu untersuchen, um eine Abnahme der Qualität des Rezyklats anhand messbarer Kenngrößen wie die dargestellte Zugfestigkeit zu identifizieren. Mit Blick auf die makroskopische Ebene der gesamten Kunststoffbranche könnte somit eine Abschätzung getroffen werden, bis zu welchem Verhältnis aus Neuware zu Rezyklat bislang bestehende Ansprüche an die ursprüngliche Produktqualität trotz eingesetztem Rezyklat erfüllt werden können. Für diesen Fall müssten die ökologischen Belastungen des Materialflusses durch eine erweiterte Kaskade an nachfolgenden Produktsystemen über die Anwendung eines entsprechenden Allokationsverfahrens verursachungsgerecht verteilt werden, um die Auswirkungen auf den PCF in der abgebildeten Kreislaufwirtschaft zu erfassen.

---

## Literaturverzeichnis

- Altair Engineering. (2022). *CAMPUS®: a material information system for the plastics industry*. [www.campusplastics.com](http://www.campusplastics.com)
- Archodoulaki, V.-M., Lüftl, S., Koch, T. & Seidler, S. (2007). Property changes in polyoxymethylene (POM) resulting from processing, ageing and recycling. *Polymer Degradation and Stability*, 92(12), 2181–2189. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.02.024>
- Association of Plastic Manufacturers (Hrsg.). (2021). *Plastics Europe Public LCI Database*. <https://plasticseurope.lca-data.com/ILCD/index.xhtml?stock=default>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.). (2016). *Software für Umweltmanagement und betrieblichen Umweltschutz: Eine "offene Link-Liste"*. [https://www.umweltpakt.bayern.de/download/pdf/software\\_umweltmanagement\\_2016.pdf](https://www.umweltpakt.bayern.de/download/pdf/software_umweltmanagement_2016.pdf)
- Braun, N., Wilts, H., Zeher, C., Loth, J. & Tesch, M. (2021). *Kunststoff: Auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft*. [https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2021/3662\\_Kunststoff\\_Kreislauf\\_2021\\_WEB.pdf](https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2021/3662_Kunststoff_Kreislauf_2021_WEB.pdf)
- Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (Hrsg.). (2021). *Datenbanken*. <https://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat/daten/db1.html#bereich1>
- Conversio Market & Strategy GmbH (Hrsg.). (2020). *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019*. [https://www.conversio-gmbh.com/res/News\\_Media/2020/Kurzfassung\\_Stoffstrombild\\_2019.pdf](https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf)
- CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz (2017). [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBI&start=//\\*%5b@attr\\_id=%27bgbl117s0802.pdf%27%5d#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl117s0802.pdf%27%5D\\_\\_1670574680982](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//*%5b@attr_id=%27bgbl117s0802.pdf%27%5d#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl117s0802.pdf%27%5D__1670574680982)
- Bundes-Klimaschutzgesetz (2019). <https://www.bmuv.de/gesetz/bundes-klimaschutzgesetz>
- Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (2021). [https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Lieferketten/gesetzentwurf.pdf;jsessionid=9A2D4B6624C26E8941F869DA4DE71926.1\\_cid381?\\_\\_blob=publicationonFile&v=2](https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Lieferketten/gesetzentwurf.pdf;jsessionid=9A2D4B6624C26E8941F869DA4DE71926.1_cid381?__blob=publicationonFile&v=2)
- Ecoinvent Association (Hrsg.). (2020). *About ecoinvent*. <https://www.ecoinvent.org/about/about.html>
- Ekvall, T. & Finnveden, G. (2001). Allocation in ISO 14041—a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 9(3), 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(00\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(00)00052-4)
- European Commission (Hrsg.). (2018). *ELCD Discontinuation*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>
- European Commission. (2018). *PEFCR Guidance document: Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules [Version 6.3]*. [https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR\\_guidance\\_v6.3.pdf](https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf)
- European Committee for Standardization (2012). *Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics (DIN EN ISO 527-2:2012)*. Brussels.
- European Committee for Standardization (2018). *Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification (DIN EN ISO 14067)*. Brussels.

- 
- European Committee for Standardization (2020a). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020)* (DIN EN ISO 14040). Brussels.
- European Committee for Standardization (2020b). *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020)* (DIN EN ISO 14044). Brussels.
- Fecke, M., Fluchs, S., Rieth, I., John, L. & Wilts, H. (2022). *CIRCULAR ECONOMY IN DER GRUNDSTOFF- INDUSTRIE: POTENZIALE UND NOTWENDIGE RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EINE ERFOLG- REICHE TRANSFORMATION: Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy*. [https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse\\_IN4climate.NRW/2021/in4climatenrw-diskussionspapier-circular-economy-sekundaerrohstoffe-grundstoffindustrie\\_01.pdf](https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2021/in4climatenrw-diskussionspapier-circular-economy-sekundaerrohstoffe-grundstoffindustrie_01.pdf)
- Frischknecht, R. (2010). LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(7), 666–671. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0201-6>
- Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Geyer, R., Kuczenski, B., Zink, T. & Henderson, A. (2016). Common Misconceptions about Recycling. *Journal of Industrial Ecology*, 20(5), 1010–1017. <https://doi.org/10.1111/jiec.12355>
- International Institute for Sustainability Analysis and Strategy (Hrsg.). (2021). *GEMIS download*. <http://iinas.org/gemis-download.html>
- International Organization for Standardization (2008). *Plastics - Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste (ISO 15270)*. Geneva.
- iPoint (Hrsg.). (2016). *Erfolgsfaktor für Ökobilanzen (Life Cycle Assessment, LCA): Daten, Daten und nochmals Daten*. <https://www.ipoint-systems.com/blog/erfolgsfaktoren-fur-okobilanzen-life-cycle-assessment-lca-daten-daten-und-nochmals-daten/>
- Jeswani, H., Krüger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S. & Azapagic, A. (2021). Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. *The Science of the total environment*, 769, 144483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>
- Klöpffer, W. (1996). Allocation rule for open-loop recycling in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(1), 27–31. <https://doi.org/10.1007/BF02978629>
- KraussMaffei Group. (2022). *Spritzgießmaschine CX-Baureihe (350 - 4.200 kN): Flexibler Generalist mit kompaktem Design*. <https://www.kraussmaffei.com/de/unsere-produkte/cx-baureihe-500-4-200-kn>
- Nicholson (2009). End-of-life LCA allocation methods: open loop recycling impacts on robustness of material selection decision. Sustainable Systems and Technology, 2009. *ISSST '09 IEEE International Symposium*.
- Oblak, P., Gonzalez-Gutierrez, J., Zupančič, B., Aulova, A. & Emri, I. (2015). Processability and mechanical properties of extensively recycled high density polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 114, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.012>
-

- 
- Plastics Europe (Hrsg.). (2021). *Plastics - the Facts 2021: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. [https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021\\_250122.pdf](https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021_250122.pdf)
- Product life cycle accounting and reporting standard*. (2011). *Greenhouse gas protocol*. World Resources Institute. [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard\\_041613.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf)
- Schrijvers, D. L., Loubet, P. & Sonnemann, G. (2016a). Critical review of guidelines against a systematic framework with regard to consistency on allocation procedures for recycling in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 994–1008. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1069-x>
- Schrijvers, D. L., Loubet, P. & Sonnemann, G. (2016b). Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 976–993. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1063-3>
- Schyns, Z. O. G. & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*, 42(3), 2000415. <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>
- Shamsuyeva, M. & Endres, H.-J. (2021). Plastics in the context of the circular economy and sustainable plastics recycling: Comprehensive review on research development, standardization and market. *Composites Part C: Open Access*, 6, 100168. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100168>
- Shuaib, N. A. & Mativenga, P. T. (2016). Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. *Journal of Cleaner Production*, 120, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.070>
- Sphera (Hrsg.). (2021). *GaBi LCA Datenbanken*. <https://www.gabi-software.com/deutsch/datenbanken/gabi-datenbanken/>
- Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery. (2022). *IntElect: Maximale Effizienz – Höchste Präzision*. <https://www.sumitomo-shi-demag.eu/de/produkte/intelect>
- Tanti, K., Rochman, A. & Refalo, P. (2021). Analysing the Sustainability of Cascade Recycling in Plastic Manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1196(1), 12021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1196/1/012021>
- Tinz, J., Ancos, T. de & Rohn, H. (2022). Carbon Footprint of Mechanical Recycling of Post-Industrial Plastic Waste: Study of ABS, PA66GF30, PC and POM Regrinds. *Waste*, 1(1), 127–139. <https://doi.org/10.3390/waste1010010>
- VDMA. (2013). *EUROMAP 60.2: Injection Moulding Machines Determination of Product Related Energy Consumption*. [https://www.euromap.org/media/recommendations/60/2013/EU\\_60.2\\_Jan\\_2013.pdf](https://www.euromap.org/media/recommendations/60/2013/EU_60.2_Jan_2013.pdf)
- Vollmer, I., Jenks, M. J. F., Roelands, M. C. P., White, R. J., van Harmelen, T., Wild, P. de, van der Laan, G. P., Meirer, F., Keurentjes, J. T. F. & Weckhuysen, B. M. (2020). Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(36), 15402–15423. <https://doi.org/10.1002/anie.201915651>
- ZwickRoell. (2022). *ZwickRoell: Ihr Partner in der Werkstoffprüfung*. <https://www.zwickroell.com/de/>
-