

# Ökobilanz und gesellschaftliche Analyse zur Ermittlung des Potenzials von dezentralisiertem Kunststoffrecycling in Biel

## Bachelor-Thesis



Clément Schüpbach

02.08.2022

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW

Hochschule für Life Sciences

Institut für Ecopreneurship

Auftraggeber  
Gildas Höllmüller, ENGA GmbH

Betreuer (ENGA GmbH)  
Gildas Höllmüller

Betreuer (FHNW)  
Prof. Dr. Christoph Hugli

Expertin  
Dr. Sandra Müller

Vertraulichkeitsstatus  
Nicht vertraulich

#### Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen, Internet-Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit - einschliesslich Tabellen, Karten und Abbildungen - die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Biel, 2. August 2022

---

Ort, Datum



---

Unterschrift

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Beteiligten, die mich bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit unterstützt, motiviert und begleitet haben, herzlich bedanken.

Ein großes Dankeschön geht an Gildas Höllmüller, der es mir ermöglicht hat, diese Arbeit bei ENGA zu schreiben. Er hat mich von Anfang bis Ende unterstützt und mir die Freiheit gegeben, meine Arbeit so zu gestalten, wie es für mich stimmig war.

Ich möchte mich auch bei Christoph Hugi bedanken, der mich bei dieser Arbeit begleitet und mir sein volles Vertrauen geschenkt hat. Die Freiheiten, die mir sowohl von Seiten der FHNW als auch von Seiten der ENGA gegeben wurden, ermöglichten es mir, mich in diesem Projekt zu entfalten.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Freunden und Familie bedanken für die Unterstützung, die Motivation und das Entgegenlesen meiner Arbeit.

Schliesslich möchte ich mich auch bei allen Personen bedanken, die mir wertvolle Informationen für die Ökobilanz und für die Umfrage zur Verfügung gestellt haben.

## Zusammenfassung

Die ENGA GmbH hat sich als Ziel gesetzt, ein dezentrales Kunststoffrecycling in der Bieler Innenstadt umzusetzen. Dieser innovative Ansatz soll einen weiteren Weg aufzeigen, wie Kunststoffe recycelt werden können und einen Beitrag zur Schliessung der Kunststoffkreisläufe leisten. In dieser Arbeit wurde das Potential von dezentralem Recycling anhand einer ökologischen und einer gesellschaftlichen Analyse untersucht. Die ökologische Untersuchung, soll einerseits aufzeigen, welchen ökologischen Nutzen das dezentrale Recycling gegenüber dem zentralen Recycling hat. Andererseits soll die Komplementarität der beiden Systeme aufgeklärt werden. Um den ökologischen Nutzen und die Komplementarität der beiden Systeme zu ermitteln, wurden eine Lebenszyklusanalyse und eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Auf gesellschaftlicher Ebene wurde die Machbarkeit eines lokalen Kunststoffrecyclings untersucht. Dazu wurde eine Umfrage am Gemüsemarkt in Biel und eine Literaturrecherche zum Entsorgungsverhalten der Gesellschaft vorgenommen.

Die ökologische Analyse zeigt, dass das dezentrale Recycling, 4,5-Mal weniger Energie für das Recycling und 52-Mal weniger Energie für den Transport verbraucht als zentrales Recycling. Die auf diesen Zahlen basierende Ökobilanz resultiert in einer 7-Mal grösseren Umweltbelastung für das zentrale Recycling. Dabei fallen im zentralen Prozess 38% der UBP (Umweltbelastungspunkte) auf den Transport und die restlichen 62% auf den Energieverbrauch. Durch die Dezentralisierung des Kunststoffrecyclings können die Umweltauswirkungen des Transports um 40 % und diese des Energieverbrauchs der Aufbereitungsprozesse um 80 % gesenkt werden. Dies ist auf die kurzen Transportwege, den weniger automatisierten Prozessen und auf die Eliminierung von überflüssigen Prozessen (Pressen, Sortieren und Extrudieren) im dezentralen Recycling zurückzuführen. Aus dem Vergleich mit primärem Polypropylen wurde aufgezeigt, dass das zentrale und dezentrale Recycling von Kunststoffen aus ökologischer Sicht sinnvoller ist als die Produktion von neuem Kunststoff. Die Produktion von primärem Polypropylen weist eine Umweltbelastung auf, welche 6-Mal höher als das zentrale Recycling und 44-Mal höher als das dezentrale Recycling ist.

Die Komplexität der Herausforderungen im Zusammenhang mit Kunststoffabfällen weist darauf hin, dass mehrere Ansätze erforderlich sind. Sowohl beim zentralen als auch beim dezentralen Recycling ist die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren entscheidend, um die Recyclingbranche voranzubringen. Mithilfe der Nutzwertanalyse konnte der Mehrwert eines kombinierten zentralen und dezentralen Kunststoffrecyclingsystems aufgezeigt werden. Diese Komplementarität hängt jedoch von der Bereitschaft der Akteure ab, diese Herausforderungen gemeinsam zu bewältigen.

Die gesellschaftliche Analyse dieser Arbeit konnte verschiedene Faktoren ermitteln, welche das Entsorgungsverhalten der Konsumenten:innen direkt beeinflussen. Eine transparente Kommunikation scheint eines der effektivsten und wichtigsten Mittel zu sein, um die Beteiligung der Konsumenten:innen am lokalen Recycling zu fördern. In der Regel gilt, je mehr Informationen die Konsumenten:innen bekommen, desto involvierter werden sie. Dies kann zum Beispiel durch regelmässige Sensibilisierungsmassnahmen und einer klaren Kennzeichnung der Behälter erreicht werden. Ein weiterer Faktor ist die Bequemlichkeit des Sammelsystems. Haushalte mit Zugang zu Sammelsystemen sortieren tendenziell mehr Kunststoffabfälle als Haushalte ohne ein

solches System. Demzufolge ist es essenziell, dass ein strukturiertes Sammelsystem eingeführt wird, welches so wenig Aufwand wie möglich verlangt. Dies kann zum Beispiel mit einem zur Verfügung gestellten Sammelstation, mit Nudges, mit transparenter Information, mit Anleitungen zu den verschiedenen Kunststoffsorten und durch das Schaffen von Anreizen erreicht werden. Die Bequemlichkeit des Sammelsystems ist beim dezentralen Kunststoffrecycling umso wichtiger, da die Trennung der Kunststoffe bereits mit einem höheren Aufwand verbunden ist. Die wichtigste Erkenntnis aus der Umfrage ist, dass informierte Personen bereit sind, zusätzliche Bemühungen zu unternehmen, wenn sie von den Auswirkungen ihres Handelns überzeugt sind. Dementsprechend ist es für die Konsumenten:innen wichtig, regelmässig über die Auswirkungen des Kunststoffrecyclings informiert zu werden.

Als nächster Schritt für die Kunststoffsammlung in Haushalten, kann es sinnvoll sein, ein Pilotprojekt in Mehrfamilienhäusern zu starten. Mit einer zur Verfügung gestellten Entsorgungsstation kann das separate Sammeln der Plastiksorten in diesen Haushalten vereinfacht werden. Auf dieser Grundlage kann eine Abschätzung der Bereitschaft der Gesellschaft gemessen werden und das Verhalten der Beteiligten über eine längere Zeit untersucht werden. In einem solchen Projekt können auch Nudges (Änderungen im Umfeld) getestet werden, wie zum Beispiel das Aussehen und die Platzierung der Sammelstation.

Im betrachteten zentralen Prozess, werden nur drei Kunststoffsorten in der Schweiz recycelt (PP, HDPE, LDPE). Die restlichen Kunststoffe werden entweder in Deutschland und Österreich recycelt oder im Zementwerk energetisch verwertet. Diese Kunststoffsorten werden auch von der ENGA stofflich verwertet werden. Um aber den ökologischen Nutzen zu maximieren, kann sich die ENGA auf Sorten fokussieren, die noch nicht in der Schweiz recycelt werden, wie zum Beispiel PET-Verpackungen. Jedoch muss der Absatzmarkt sowie die chemischen und mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Kunststoffsorten auch in Erwägung gezogen werden.

Insgesamt stehen das zentrale und das dezentrale Kunststoffrecycling vor den gleichen ökologischen Herausforderungen. Ein ökologischer Nutzen wird dann erreicht werden, wenn Neuwaren durch Sekundärmaterialien substituiert werden können. So können die Produktion von Kunststoffen und die dabei entstandenen Emissionen reduziert werden. Um dies zu erreichen, müsste in der Entwicklungsphase der Kunststoffprodukte eine einheitliche Zusammensetzung und ein spezifisches Sortieren berücksichtigt werden. Dies würde das Mischen von verschiedenen Kunststoffen beim Recyclingprozess vermeiden und die Produktion von breit anwendbaren Rezyklaten ermöglichen. Jedoch werden bessere Technologien und Prozessoptimierungen nicht genug sein, um langfristig eine nachhaltige Industrie zu schaffen. Nebst dem sind gesetzliche Richtlinien und eine Senkung des Konsums unumgebar.

Abschliessend ist zu betonen, dass es sich bei diesem Pilotprojekt um ein innovatives Projekt handelt, dessen erfolgreiche Umsetzung von verschiedenen Schlüsselfaktoren abhängt. Die Machbarkeit dieses Projekts muss bewiesen werden, die Erwünschtheit der Konsumenten ist weiter zu ermitteln und die finanzielle Rentabilität des Projekts muss sichergestellt werden. Diese Untersuchung hat jedoch die ökologischen Vorteile des dezentralen Recyclings sowie die Komplementarität der beiden Systeme bewiesen. Auf gesellschaftlicher Ebene konnte der Wunsch der Umfrageteilnehmer, das dezentrale Recycling zu unterstützen, aufgezeigt werden.

## Summary

ENGA GmbH has set itself the goal of implementing decentralised plastic recycling in the city of Biel. This innovative approach intends to show another way in which plastics can be recycled and contribute to closing the loops. This work examined the potential of decentralised recycling based on an ecological and social analysis. On the one hand, the ecological analysis should show the ecological benefits of decentralised recycling compared to centralised recycling. On the other hand, the complementarity of the two systems should be clarified. A life cycle analysis and a utility value analysis were carried out to determine the ecological benefits and the complementarity of the two systems. On a societal level, the feasibility of local plastic recycling was investigated. For this purpose, a survey at the vegetable market in Biel and a literature research on the disposal behaviour of society was conducted.

The ecological analysis shows that decentralised recycling uses 4.5 times less energy for recycling and 52 times less energy for transport than the centralised recycling process. Based on these numbers, the life cycle assessment results in an environmental impact that is 7 times greater for centralised recycling. In the centralised process, 38% of the UBP (environmental impact points) are attributable to transport and the remaining 62% to energy consumption. By decentralising plastics recycling, the environmental impact of transport and energy consumption of recycling processes can be reduced by 40% and 80%, respectively. This is due to the short transport distances, the less automated processes, and the elimination of excessive processes (pressing, sorting, and extruding) in decentralised recycling. The comparison with primary polypropylene showed that the centralised and decentralised recycling of plastics makes more sense from an ecological point of view than the production of new plastic. The output of primary polypropylene has an environmental impact that is 6 times higher than centralised recycling and 44 times higher than decentralised recycling.

The complexity of the challenges related to plastic waste indicates that multiple approaches are needed. For both centralised and decentralised recycling, cooperation between the different actors is crucial to move the recycling sector forward. With the help of the utility analysis, the added value of a combined centralised and decentralised plastic recycling system could be demonstrated. However, this complementarity depends on the willingness of the actors to tackle these challenges together.

The social analysis of this thesis identified several factors that directly influence the disposal behaviour of consumers. Transparent communication seems to be one of the most influential and important means to promote consumer participation in local recycling. As a rule, the more information consumers receive, the more involved they become. This can be achieved, for example, through regular awareness-raising measures and clear labelling of the containers. Another factor is the convenience of the collection system. Households with access to collection systems tend to sort more plastic waste than households without such a system. Consequently, it is essential that a structured collection system is introduced that requires as little effort as possible. This can be achieved, for example, with a provided collection system, with nudges, through transparent information, with instructions on the different types of plastic, and by creating incentives. It is particularly important in the decentralised plastic recycling system as it requires more effort from the individuals compared to the centralised system in place today. The most

important finding from the survey results is that informed people are willing to make extra efforts if they are convinced of the impact of their actions. Accordingly, consumers need to be regularly informed about the effects of plastic recycling.

As the next step for household plastic collection, starting a pilot project in apartment buildings may be useful. With a disposal station provided, the separate collection of the plastic types in these households can be simplified. On this basis, an assessment of society's willingness can be measured, and the behaviour of those involved can be studied over an extended period of time. In such a project, nudges (changes in the environment) can also be tested, such as the appearance and placement of the collection station.

In today's centralised recycling system, only three types of plastics are recycled in Switzerland (PP, HDPE, LDPE). The remaining plastics are recycled in Germany or Austria or recovered as energy in the cement plant. These types of plastics will probably also be recycled by ENGA. However, to maximise the ecological benefit, ENGA can focus on varieties not yet recycled in Switzerland, such as PET packaging. However, the sales market and the mechanical and chemical properties of the different types of plastic must also be considered.

However, centralised and decentralised plastics recycling face the same ecological challenges. The highest ecological benefit can only be achieved when secondary materials can substitute virgin materials. This way, the production of plastics and the resulting emissions can be reduced. To achieve this, uniform composition and specific sorting would have to be considered in the development phase of plastic products. This would avoid mixing different plastics in the recycling process and enable the production of widely applicable recycling products. However, better technologies and process optimisation will not be enough to create a sustainable industry in the long run. Besides, legal guidelines and a reduction in consumption are inevitable.

Finally, it should be emphasised that this pilot project is innovative and successful implementation depends on several key factors. The feasibility of this project needs to be proven, consumer desirability needs to be further established, and the project's financial viability needs to be ensured. However, this survey has proven the environmental benefits of decentralised recycling and the complementarity of the two systems. On a societal level, the desire of the survey participants to support decentralised recycling could be demonstrated.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	x
Tabellenverzeichnis.....	xi
1	Einleitung ..... 1
1.1	Motivation ..... 1
1.2	Hintergrund ..... 3
1.3	Ziel der Arbeit und Forschungsfragen ..... 4
2	Vorgehen und Methodik..... 6
2.1	Datenherkunft ..... 6
2.2	Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung..... 7
2.3	Vorgehen bei der Ökobilanzierung ..... 8
2.4	Betrachtete Prozesse und Rahmenbedingungen ..... 8
2.4.1	Zentrales Kunststoffrecycling..... 8
2.4.2	Dezentralisiertes Kunststoffrecycling – Precious Plastic Projekt der ENGA..... 9
2.4.3	Systemgrenzen und Annahmen ..... 10
2.4.4	Vergleichsbasis «die funktionelle Einheit»..... 11
2.5	Nutzwertanalyse zur Bestimmung der Komplementarität der Systeme..... 13
2.6	Gesellschaftliche Analyse..... 14
2.6.1	Vorgehen bei der Umfrage ..... 14
2.6.2	Literaturrecherche zum Recyclingverhalten der Bevölkerung ..... 16
3	Ergebnisse und Diskussion ..... 17
3.1	Ökobilanzierung..... 17
3.1.1	Reale Daten und Benchmarks..... 17
3.1.2	Umweltbelastung des zentralen und dezentralen Recyclingprozesses..... 19
3.1.3	Umweltbelastung der Weiterverarbeitung..... 22
3.1.4	Vergleich der Umweltbelastung mit Primärkunststoff ..... 23
3.2	Ergebnisse zur Komplementarität des zentralen und dezentralen Recyclings..... 24
3.3	Ergebnisse der Umfrage..... 26
3.4	Ergebnisse der Literatur zum Recyclingverhalten der Gesellschaft ..... 31
3.5	Diskussion zur Beteiligung der Gesellschaft am lokalen Kunststoffrecycling ..... 32
4	Schlussfolgerung und Zusammenfassungen..... 34
5	Arbeitsprozess und persönliche Erkenntnisse..... 37
6	Literaturverzeichnis..... 39
7	Glossar ..... 46

A	Umfrage Gemüsemarkt Biel .....	47
A.1	Deutsche Umfragestatistik.....	47
A.2	Französische Umfragestatistik.....	51
A.3	Poster für Märkt .....	55
A.4	Stand für die Umfrage.....	56
B	Ökobilanzierung.....	57
B.1	Stofffluss zentrales Kunststoffrecycling .....	57
B.2	Stofffluss dezentrales Kunststoffrecycling .....	58
B.3	Datenherkunft für LCA.....	59
B.4	Übersicht der UBP und der verschiedenen Wirkungskategorien.....	62
B.5	Protokoll des Besuches der Sortec Aarberg AG mit Herr Roger Garo .....	64

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der angewendeten Methoden und der erwarteten Outputs .....	6
Abbildung 2: Methode der ökologischen Knappheit: Sachbilanzergebnis, Charakterisierung und Gewichtung (BAFU, 2018) .....	7
Abbildung 3: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14040 (BAFU, 2021).....	8
Abbildung 4: vereinfachter Stofffluss des zentralen Kunststoffrecyclings .....	9
Abbildung 5: vereinfachter Stofffluss des dezentralen Kunststoffrecyclings .....	10
Abbildung 6: funktionelle Einheit: 1 kg Polypropylen, Pellets (links) und Flakes (rechts) (InnoPlastics AG, n.d.; Santini, 2020) .....	12
Abbildung 7: funktionelle Einheit: PP Kunststoffschale für Stuhl (Vitra International AG, n.d.)	12
Abbildung 8: funktionelle Einheit: Kunststoffplatte mit Anwendungsbeispiel (links) (SAS minimum, n.d.) .....	12
Abbildung 9: Vergleich des Energieverbrauches für das Recycling von 1 kg Polypropylen .....	18
Abbildung 10: Vergleich des Energieverbrauches [kWh] für den Transport von 1 kg Polypropylen .....	19
Abbildung 11: Einzelergebnisse des Vergleichs von 1 kg PP .....	20
Abbildung 12: Aufteilung der Umweltbelastung auf den Energieverbrauch und den Transport..	21
Abbildung 13: Einzelergebnisse des Vergleichs der Kunststoffschale.....	22
Abbildung 14: Einzelergebnisse des Vergleichs der Kunststoffplatte .....	22
Abbildung 15: Einzelergebnisse des Vergleichs mit Neu-Polypropylen .....	23
Abbildung 16: Abbildung des zentralen und dezentralen Recyclingkreislaufes .....	26
Abbildung 17: Übersicht der Abfalltrennungen der befragten Personen .....	27
Abbildung 18: Wichtigkeit einer sauberen Trennung der Abfälle .....	28
Abbildung 19: Bedürfnis für mehr Transparenz der Recyclingindustrie .....	29
Abbildung 20: Wahrnehmung von Kunststoff als Material .....	29
Abbildung 21: Voraussetzungen, welche zur sauberen Trennung der Abfälle motivieren.....	30

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: UBP der zentralen und dezentralen Recyclingprozessen für 1 Kg PP (auf 2 Dezimalstellen gerundet).....	21
Tabelle 2: Ergebnisse der Nutzwertanalyse zur Komplementarität der betrachteten Systeme.	24
Tabelle 3: Faktoren mit direktem Zusammenhang mit dem Entsorgungsverhalten der Konsumenten:innen.....	32

# 1 Einleitung

Die Einleitung ist in verschiedene Unterkapitel aufgeteilt. Zuerst wird in Kapitel 1.1 die Motivation dieser Arbeit erläutert. Danach folgt im Unterkapitel 1.2 der Hintergrund, welcher zum Verständnis dieser Arbeit hilft und auf die verschiedenen Kernthemen dieser Arbeit eingeht. Darin wird auf die Kreislaufwirtschaft als Begriff und auf den Kunststoffkonsum und die Entsorgung eingegangen, gefolgt von einer kurzen Einführung in das zentrale und dezentrale Plastikrecycling. Im Kapitel 1.3 werden das Ziel der Arbeit und die Fragestellungen ausgeführt.

## 1.1 Motivation

Der Einsatz von Kunststoffen ist in unserer Gesellschaft nicht mehr wegzudenken: die Zahnbürste und Zahnpasta am Morgen, der Sitz oder das Fenster des Autos auf dem Weg zur Arbeit, die Tastatur bei der Arbeit oder die Verpackungsfolie über unserem Gemüse im Supermarkt. Wie diese Beispiele zeigen, finden Kunststoffe, aufgrund ihrer diversen Materialeigenschaften, sehr vielfältige Anwendungen in unserem Alltag. Während sie in technischen Anwendungen oft Gewicht einsparen und damit den Kraftstoffverbrauch senken, gibt es viele Alltagsgegenstände aus Kunststoff, deren Einsatz im Hinblick auf den gesamten Lebenszyklus jedoch hinterfragt werden sollte. Wenn zum Beispiel die Funktion, das Gewicht oder die Haltbarkeit durch die Verwendung von Kunststoffen verbessert wurde, ist ihr Einsatz durch den positiven Einfluss auf den gesamten Lebenszyklus oft vorteilhaft. Überwiegen bei der Verwendung jedoch die negativen Folgen, sollten bereits in der Entwurfsphase Alternativen in Betracht gezogen werden. Trotz zahllosen Innovationen, die durch Kunststoffe ermöglicht wurden und auch in Zukunft realisiert werden, ist ein nachhaltigerer Umgang mit diesem wertvollen Material unerlässlich (Rudolph et al., 2020).

In der Schweiz allein werden pro Jahr etwa eine Million Tonnen Kunststoffe verbraucht. Das entspricht 125 kg Kunststoff pro Kopf, wovon 45 kg auf Verpackungen entfallen (Bundesamt für Umwelt, 2021; Swiss Recycling, n.d.). Der Schweizer Kunststoffkonsum ist damit mehr als dreimal so hoch wie der europäische Durchschnitt (SwissInfo SWI, 2018). Rund 4/5 des in der Schweiz verbrauchten Kunststoffs landet im Abfall. Davon werden 80% in Kehrichtverbrennungsanlagen und 6% in Zementwerken behandelt und energetisch verwertet. Der Anteil an Kunststoffen, welcher recycelt wird, entspricht weniger als 10% des gesamten Kunststoffabfalls. Anders gesagt besteht bei Kunststoffen ein grosses Potenzial für eine nachhaltige Schliessung der Stoffkreisläufe (Bundesamt für Umwelt, 2021). Aktuell ist die globale Kunststoffindustrie weitgehend linear. Kunststoffe werden hergestellt, verwendet und meist ohne Wiederverwendung entsorgt. Da dieser lineare Stofffluss eine ständige Neuproduktion erfordert, wächst die Abhängigkeit von Erdöl als Rohstoff und die daraus resultierende Verschmutzung des Planeten. Um die Emissionen zu verringern und gleichzeitig die Nachfrage zu befriedigen, müssen weltweit Anstrengungen unternommen werden, um die lineare Wirtschaft in eine Kreislaufwirtschaft umzuwandeln (G Schyns et al., 2021). Das heisst, sich von der derzeitigen linearen "Nehmen-Herstellen-Nutzen-Entsorgen"-Wirtschaft zu einer regenerativen Wirtschaft hin zu entwickeln (Hahladakis and Iacovidou, 2019). Dabei bedeutet regenerativ, die Wiederherstellung und Erneuerung von Energie- und Materialquellen unter Berücksichtigung der künftigen Bedürfnisse von Gesellschaft und Natur (Morsetto, 2020).

Die Kunststoffindustrie in eine Kreislaufwirtschaft zu wandeln, bringt viele Schwierigkeiten mit sich. Eine der grössten Herausforderungen beim Recyceln von Kunststoffen liegt im Verhältnis der Kosten zum Nutzen. Das PET Recycling hat als Vorreiter dieser Industrie mit Abstand das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis verglichen zur Wiederverwertung von anderen Kunststofftypen. Bei der Sammlung und stofflichen Verwertung von Kunststoffen aus Haushalten in der Schweiz konnte in zahlreichen Studien, ein ökologischer Mehrwert bestätigt werden (IWSB & EBP, 2017). Jedoch stehen einem verhältnismässig geringen ökologischen Nutzen hohe Zusatzkosten gegenüber. Das Verhältnis von Kosten und Nutzen von separaten Sammlungen von Kunststoffabfällen ist im Vergleich zum PET-Recycling-System bei etwa einem Drittel der Effizienz (Dinkel et al., 2017). Die wesentliche Herausforderung bei der Wiederverwertung der Kunststoffabfälle aus Haushalten ist die Trennung der einzelnen Kunststoffsorten. Denn nur eine sortenreine Trennung ermöglicht eine hochwertige Nutzung von gemischten Kunststoffabfällen (Knappe et al., 2021). Nebst den Herausforderungen in der Wiederverwertung sind die Möglichkeiten des Ersetzens von Neuwaren mit dem gewonnenen Sekundärmaterial limitiert. Bei der ökologischen Bewertung spielt das eine wichtige Rolle, denn das Kunststoffrecycling ist für die Umwelt vor allem dann vorteilhaft, wenn das gewonnene Sekundärmaterial Neuware ersetzen kann und so CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kunststoff-Produktion vermieden werden (Klotz et al., 2022).

In den aktuellen Abfallsystemen landet der Kunststoff im besten Fall im Zementwerk oder in einer Kehrichtverbrennungsanlage. Dieser wird als Kohleersatz genutzt oder die entstehende Wärme kann direkt zum Heizen, zur Dampf- oder Stromerzeugung verwendet werden (Rudolph et al., 2020). Wichtig zu vermerken ist, dass im Zementwerk rund  $\frac{3}{4}$  des Brennerts genutzt werden kann und in der Kehrichtverbrennungsanlage das nur etwa  $\frac{1}{4}$  sind. Der Rest gelangt als Abwärme in die Umwelt (Knappe et al., 2021). Neben der besseren Ausnutzung des Brennerts ersetzt laut InnoRecycling der Einsatz von einem Kilogramm Kunststoff im Zementwerk 1,2 bis 1,5 Kilogramm Stein- oder Braunkohle. Global wird aber weiterhin der Grossteil der Kunststoffabfälle in Deponien abgelagert oder im Freien verbrannt. Sowohl bei diesen Szenarien als auch bei der Verbrennung in der Kehrichtverbrennungsanlage und im Zementwerk kommt es zu unerwünschten Emissionen. Zudem wird bei diesen Prozessen der materielle Wert der Kunststoffe zerstört (Hahladakis and Iacovidou, 2019).

Angesichts dieser Herausforderungen gewinnen neue Ansätze zur Wiederverwertung immer mehr an Wichtigkeit. Einige Studien und Initiativen weisen darauf hin, dass der Ansatz eines dezentralen Open Source Kunststoffrecycling eine Möglichkeit darstellt, das Problem des Kunststoffabfalls anzugehen und die Entwicklung der Kreislaufwirtschaft zu unterstützen. Dezentrales Kunststoffrecycling ist ein lokales und nichtindustrielles-Recycling von Kunststoffabfällen (Santander et al., 2020).

Ein möglicher Ansatz des dezentralen Kunststoffrecyclings wird in dieser Thesis mittels einer ökologischen und gesellschaftlichen Analyse genauer untersucht. Der ökologische Mehrwert von dezentralem Kunststoffrecycling wurde in der Schweiz noch nicht erforscht und ist global nur von einer sehr begrenzten Anzahl Studien untersucht worden, wie zum Beispiel Kreiger et al. (2014), Santander et al. (2020), Joshi et al. (2019) und Zhong and Pearce (2018). Zusätzlich zu den, in diesen Studien, untersuchten Modellen wird in dieser Arbeit das zentrale und dezentrale Kunststoffrecycling mithilfe von bestehenden Unternehmen verglichen und die Akzeptanz in der Gesellschaft untersucht. Die Kombination dieser beiden Analysen soll ein grundlegendes Wissen zur Beurteilung des Potenzials und der ökologischen Wirksamkeit eines dezentralisierten

Kunststoffrecyclingsystems in der Schweiz liefern. Diese Thesis ist in Zusammenarbeit mit der ENGA GmbH entstanden, die das dezentrale Kunststoffrecycling in der Schweizer Kleinstadt Biel umsetzen wird. Die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit dienen neben den allgemeinen Erkenntnissen zum dezentralen Recycling als Entscheidungsgrundlage für die Durchführung eines Pilotprojekts mit Haushaltskunststoffen.

## 1.2 Hintergrund

Um strukturelle Veränderungen für den Aufbau einer nachhaltigeren Wirtschaft vorzunehmen, ist ein einheitlicher Rahmen erforderlich. Zu diesem Zweck wurde das Model der Kreislaufwirtschaft eingeführt (z.B. Ellen MacArthur Foundation, 2013). Für diese Bachelorthesis werden dazu, einige Hintergrundinformationen zur Kreislaufwirtschaft gegeben, um einen ganzheitlichen Ansatz für das Plastikmüllproblem zu erläutern.

Im Laufe ihrer Entwicklung hat sich unsere industrielle Wirtschaft kaum von einem fundamentalen Merkmal entfernt, das sich in den frühen Tagen der Industrialisierung herausgebildet hat: ein lineares Modell des Ressourcenverbrauchs, das dem Muster "take-make-dispose" folgt. Unternehmen gewinnen Materialien, verwenden sie zur Herstellung von Gütern und verkaufen Produkte an Konsumenten:innen, die es dann wegwerfen, wenn es seinen Zweck erfüllt hat. Dieses Muster stösst zunehmend an ökologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Grenzen. Eine hohe Ressourcennachfrage führt zu höheren Ressourcenpreisen und Versorgungsunterbrechungen, was Unternehmen, die dem linearen System folgen, in Zeiten verschärften Wettbewerbs Risiken aussetzt. Aus ökologischer Sicht, verbraucht die Menschheit im linearen System mehr als die Ökosysteme nachhaltig bereitstellen können und verringert somit die natürlichen Ressourcen der Erde (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Um diese ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Risiken zu minimieren und um im Rhythmus der Ökosysteme zu leben, wurde das Konzept der Kreislaufwirtschaft vorgeschlagen (z.B. Ellen MacArthur Foundation, 2013; Zhong and Pearce, 2018). Das Konzept hat sowohl unter Wissenschaftler:innen als auch unter Anwender:innen stark an Bedeutung gewonnen und wird immer mehr diskutiert und erforscht. Was eine Kreislaufwirtschaft beinhaltet und welche Kriterien bei dessen Anwendung relevant sind, ist aber nicht immer klar (Kirchherr et al., 2017). Eine Kreislaufwirtschaft ist ein industrielles System, das von seiner Absicht und seinem Design her restaurativ oder regenerativ ist. Sie ersetzt das "End-of-Life"-Konzept durch Wiederherstellung, verlagert sich auf die Nutzung erneuerbarer Energien und vermeidet die Verwendung giftiger Chemikalien, die die Wiederverwendung beeinträchtigen. Zudem zielt sie auf die Beseitigung von Abfällen durch die überlegene Gestaltung von Materialien, Produkten, Systemen und – in diesem Rahmen – Geschäftsmodellen ab (siehe z.B. Ellen MacArthur Foundation, 2013). Zusätzlich zum zirkulären Fluss von Materialien, Ressourcen und Energie über mehrere Phasen, nutzt eine Kreislaufwirtschaft Materialsymbiosen zwischen verschiedenen Unternehmen und Produktionsprozessen (Jacobsen, 2006; Yuan et al., 2006). Dieser Ansatz ist damit sowohl für Gesellschaft, Umwelt und Wirtschaft von Vorteil, da er die Nutzung der natürlichen Umwelt als Abfaldeponie und die Verwendung neuer Materialien für wirtschaftliche Aktivitäten reduziert. Anders gesagt werden Umweltbelastungen, Kosten und wertvolle Ressourcen eingespart bei demselben Output (Andersen, 2007).

Die Kreislaufwirtschaft ist für ein Land wie die Schweiz, aufgrund des sehr beschränkten Ressourcenvorkommens besonders vorteilhaft. Die Schweiz verfügt ausser über Humankapital,

Wasser und Kies/Stein kaum über eigene natürliche Ressourcen. Ausserdem verfügt die Schweiz über die nötige Innovationsstärke, um einen nachhaltigen Ressourcenumgang voranzutreiben und eine Vorreiterrolle einzunehmen. Jedoch ist die Kreislaufwirtschaft in den meisten Industrien noch nicht im grossen Stile vertreten (Stucki and Wörter, 2021). Auch die Kunststoffindustrie ist noch weit davon entfernt, eine zirkuläre Wirtschaft zu verfolgen. Um eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren, müssen zuerst verschiedene Hürden überwunden werden. Sowohl auf technologischer, betrieblicher, wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und regulatorischer Ebene besteht dringender Handlungsbedarf (Siltaloppi and Jähi, 2021).

Obschon in der Schweiz, das Recycling von gemischten Kunststoffen aus Haushalten, im Vergleich zu anderen Materialien neu ist, gibt es bereits eine Reihe bestehender Kunststoffrecyclinginitiativen (Güttinger, 2017). Nebst einiger vielversprechenden Start-ups, welche in das industrielle Recycling von Kunststoff-Abfällen investieren, gibt es verschiedene regionale Sammelprojekte, welche in den letzten Jahren mit zentralen Recyclingunternehmen ein Teil des Kunststoffes wiederverwerten (Güttinger, 2017; Jaberg, 2021). Das Wiederverwerten in zentralen Recyclingunternehmen ist heute die beste Lösung zum Recyceln von Kunststoffen aus Haushalten. Jedoch ist auch dieses Verfahren mit signifikanten ökologischen Auswirkungen verbunden. Signifikante Umweltbelastungen bewirken die Sammlung und der Transport von Kunststoffen mit relativ geringer Dichte und dessen energieintensive Reinigung, Trennung und Wiederverwertung (Zhong and Pearce, 2018). Ein weiterer Aspekt, dem sowohl auf ökologischer als auch auf wirtschaftlicher Ebene weniger Bedeutung beigemessen wird, sind die lokalen Gegebenheiten. Die Verwirklichung der Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffindustrie ist ein globales Ziel mit regionalen Unterschieden. Es gibt keinen allgemeingültigen Ansatz für seine Umsetzung. Jede Region und jedes System benötigen Ansätze, die auf dessen Bedürfnisse angepasst sind (Hahladakis and Iacovidou, 2019). In Anbetracht dieser Herausforderungen bietet das dezentralisierte Recycling einen interessanten, zusätzlichen Lösungsansatz. Der Transport wird um ein vielfaches reduziert und die regionalen Bedürfnisse können berücksichtigt werden (Hahladakis and Iacovidou, 2019; Zhong and Pearce, 2018). Die Trennung und Reinigung der Kunststoffe bleiben aber als grosse Herausforderungen erhalten und zusätzlich muss auch eine entsprechende regionale Nachfrage vorhanden sein.

### **1.3 Ziel der Arbeit und Forschungsfragen**

Ziel dieser Arbeit ist es, die Umweltauswirkungen des dezentralen Kunststoffrecyclings zu analysieren. Darauf aufbauend soll untersucht werden, ob und wie das dezentrale Recycling das zentrale Recycling bei der Schliessung von Kreisläufen ergänzen kann. Zudem wird untersucht, ob die Konsumenten:innen bereit sind, in einem solchen System ihren Beitrag zum Kunststoffrecycling zu leisten. Zur Bearbeitung dieser Themen wurden die folgenden Fragestellungen formuliert:

1. Welchen ökologischen Nutzen hat ein dezentralisiertes Recycling von Kunststoffen gegenüber dem zentralen Recycling?
2. Kann das dezentrale Recycling von Kunststoffen in der Schweiz als komplementärer Ansatz zum zentralen Recycling zur Anwendung kommen?
3. Ist die lokale Bevölkerung bereit, ihren Kunststoffabfall in die verschiedenen Sorten zu trennen?
4. Wie kann die Bevölkerung dazu motiviert werden, ihren Kunststoffabfall in die verschiedenen Sorten zu trennen?

Um den ökologischen Nutzen des dezentralen Recyclings zu analysieren, wird die Methode der Life Cycle Analyse angewendet. Diese erlaubt eine Quantifizierung der Umweltbelastungen aller einbezogenen Prozesse. Die gesellschaftliche Analyse wird anhand einer Umfrage und einer Literaturrecherche erfolgen. Die mit dieser Arbeit getroffenen Aussagen basieren auf den Daten der ENGA, des zentralen Plastikrecycling in Biel und den Aussagen von Bieler Einwohnern:innen. Deshalb sind sie nicht allgemeingültig und können nicht zwingend auf die Schweiz übertragen werden.

## 2 Vorgehen und Methodik

Um den Nutzen des dezentralen, lokalen Kunststoffrecycling zu bestimmen, wird sowohl eine Umweltbelastungsanalyse als auch eine gesellschaftliche Analyse durchgeführt. Diese Analysen sollen das Treffen von Aussagen in Bezug auf den ökologischen Nutzen und der sozialen Machbarkeit erlauben.

Es ist inzwischen allgemein anerkannt, dass die Lebenszyklusanalyse (LCA) oder Ökobilanz, eine umfassende und informative Methode zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen ist. Zusätzlich zur Lebenszyklusanalyse wurde eine Nutzwertanalyse zur Bestimmung der Komplementarität des zentralen und dezentralen Recyclings durchgeführt. Als Methode zur Analyse der sozialen Machbarkeit wurde eine persönliche Umfrage auf dem Gemüsemarkt in Biel zusammen mit einer Literaturrecherche angewendet. In *Abbildung 1* ist eine Übersicht der angewendeten Methoden und der erwarteten Outputs dargestellt. Die strukturelle Darstellung der notwendigen Inputs für die gesellschaftliche Analyse und für die Lebenszyklusanalyse ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung, aller im Prozess beteiligten Schritte, bis hin zum finalen Output. In diesem Kapitel werden die verwendete Methode, das Vorgehen, sowie die verwendeten Daten und die getroffenen Annahmen beschrieben.

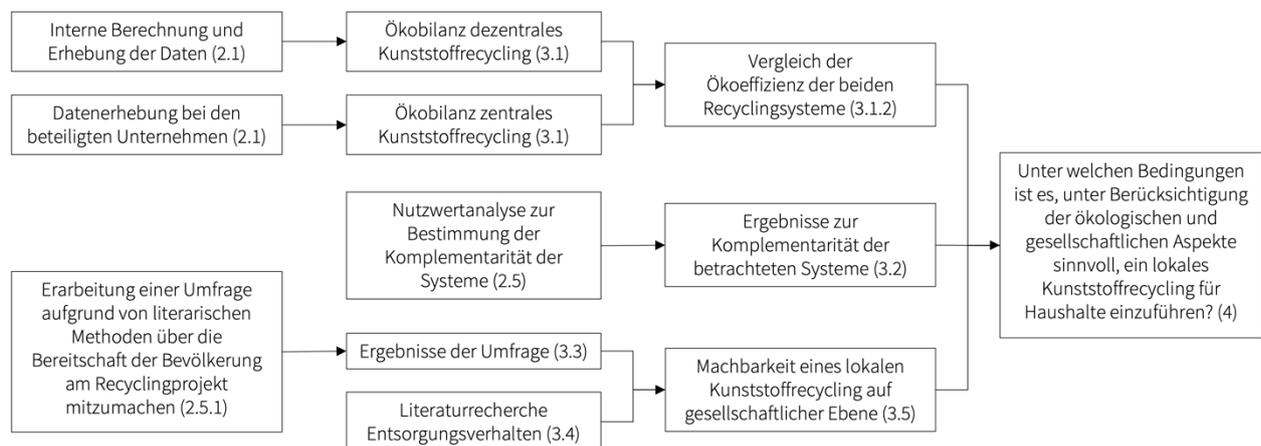


Abbildung 1: Übersicht der angewendeten Methoden und der erwarteten Outputs

### 2.1 Datenherkunft

Die Daten für die Life Cycle Analyse des zentralen Kunststoffrecyclings wurden bei den im Prozess beteiligten Unternehmen eingeholt. Dazu gehören die Stadt Biel, die Sortec Aarberg AG, die Innoplastics AG im Thurgau und die Locker Recycling GmbH in Lustenau AT. Alle Daten und Informationen wurden über Telefonate und E-Mails ausgetauscht. Einzig die Sortec Aarberg AG wurde vor Ort besucht, um sich mit dem Initiator der Sammelsäcke, Roger Garo auszutauschen und den Betrieb zu besichtigen (siehe Anhang B.5 für das Protokoll des Besuches). Für fehlende Daten und zum Vergleichen der erhobenen Daten wurde auf Benchmark-Daten aus aktueller Literatur zurückgegriffen. Zur Analyse des dezentralen Recyclingprozesses wurden die Daten aufgrund der schon funktionierenden und der geplanten Maschinen der ENGA GmbH erhoben und berechnet. Für die Berechnung der noch nicht existierenden Maschinen, wurde wie beim zentralen Prozess auf Benchmark-Daten aus der Literatur zurückgegriffen. Zusätzlich zur Life Cycle Analyse, wurde die Komplementarität der beiden Systeme mittels einer Nutzwertanalyse untersucht. Die gesellschaftliche Analyse basiert hauptsächlich auf den Resultaten der Umfrage, welche am Gemüsemarkt in Biel durchgeführt

wurde. Die Resultate der Umfrage wurden mit Literatur zum Entsorgungsverhalten ergänzt. Eine umfassende Beschreibung der verwendeten Daten ist im Anhang B.3 *Datenherkunft für LCA* zu finden.

## 2.2 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung gilt als die umfassendste Methode, um ökologische Fragestellungen zu beantworten, weil sie eine Vielzahl von Umweltauswirkungen über die gesamte Prozesskette berücksichtigt. Um die Ökobilanzierung des zentralen und dezentralen Recyclingsystems zu erstellen, wurde das Programm Sima Pro verwendet, mit der Methode der ökologischen Knappheit (2013) – UBP 13. Die Methode UBP 13 wurde vom Bundesamt für Umwelt mitentwickelt. Sie geht von der Umweltsituation in der Schweiz aus und richtet sich bei der Bewertung nach der schweizerischen Umweltpolitik. In *Abbildung 2* ist das Grundschaema der Methode der ökologischen Knappheit mit den Schritten Sachbilanzergebnis, Charakterisierung und Gewichtung abgebildet. Dieses Grundschaema bildet die Grundlage für die Berechnung der Umweltbelastungspunkte (BAFU, 2021).

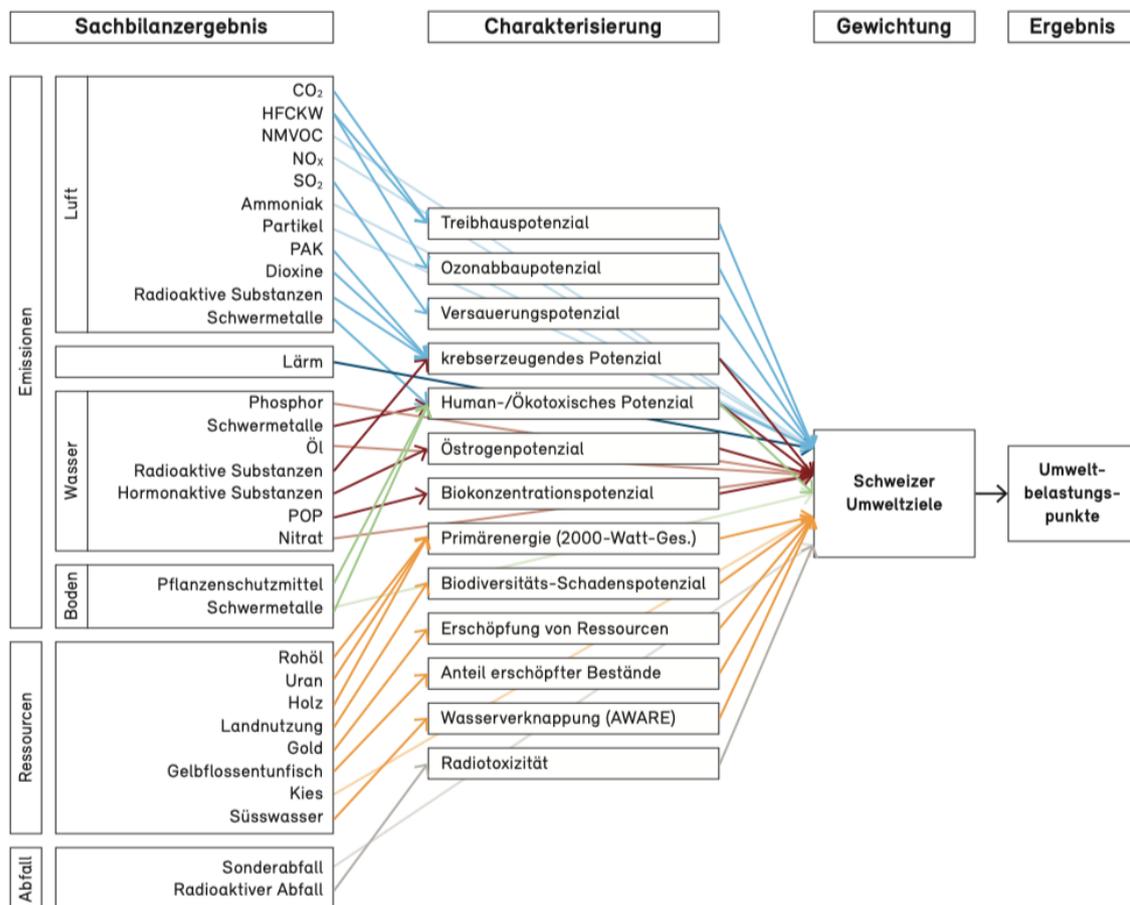


Abbildung 2: Methode der ökologischen Knappheit: Sachbilanzergebnis, Charakterisierung und Gewichtung (BAFU, 2018a)

Wie vom Bundesamt für Umwelt (2021) definiert, können die aus einer Ökobilanz gezogenen Ergebnisse eingesetzt werden:

- zur Erfassung der relevanten Auswirkungen
- als Entscheidungshilfe bei verschiedenen Varianten
- in der strategischen Planung zur Ermittlung von Optimierungspotentialen
- zur Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren
- zur Beurteilung von Massnahmen

Die Anwendung der Ökobilanzierung soll in dieser Studie, vor allem als Entscheidungsgrundlage dienen, ob ein dezentrales Recyclingsystem für Kunststoffabfälle aus Haushalten ökologisch sinnvoll ist.

## 2.3 Vorgehen bei der Ökobilanzierung

Nachdem die Fragestellung und die zu untersuchenden Systeme definiert sind, werden die Waren-, Stoff- und Energieflüsse sowie der Ressourcenbedarf erfasst. Anschliessend werden die Umweltauswirkungen mithilfe von gewählten Indikatoren, welche diese Wirkungen beschreiben, bestimmt. Die Interpretation und Bewertung der Umweltauswirkungen können dann sowohl als Entscheidungsgrundlage als auch als Kommunikationsmittel und Optimierungsgrundlage dienen. Wie *Abbildung 3* zeigt, ist die Ökobilanz kein linearer Prozess, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

Nach ISO 14040 umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte:

- Festlegen des Zielsystems und der Rahmenbedingungen
- Erfassen der relevanten Stoff- und Energieströme sowie den Ressourcenbedarf (Sachbilanz)
- Bestimmen der Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkbilanz)
- Interpretation der Umweltauswirkungen aufgrund der Zielsetzungen (Bewertung)
- Erarbeiten von Empfehlungen und geeigneten Massnahmen (Optimierung).

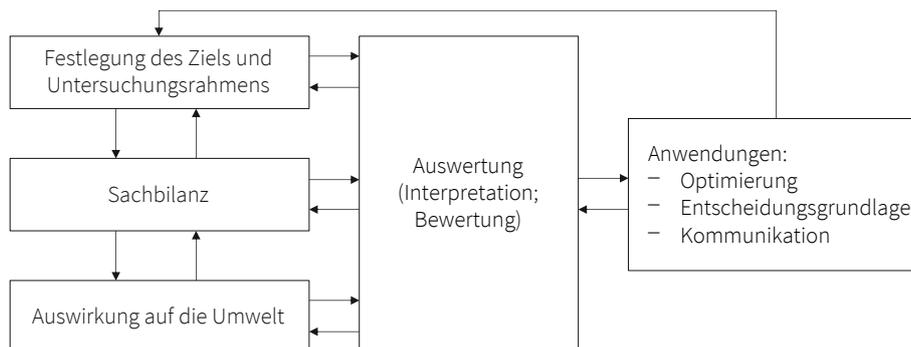


Abbildung 3: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14040 (BAFU, 2021)

## 2.4 Betrachtete Prozesse und Rahmenbedingungen

Die bei dieser Ökobilanz betrachteten Prozesse sind das zentrale und das dezentrale Kunststoffrecycling. Bei der Definition dieser Prozesse ist es wichtig, Randbedingungen und Systemgrenzen festzulegen. Nur so können die Resultate der Ökobilanz als aussagekräftige und nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage verwendet werden. Die Stoff- und Energieflüsse helfen, die Systemgrenzen grafisch darzustellen.

### 2.4.1 Zentrales Kunststoffrecycling

Der in dieser Arbeit verwendete Prozess fürs zentrale Kunststoffrecycling basiert auf den Daten des «Sammelsack-Projekts» in Biel. Dieses wurde im Jahr 2015 von Roger Garo der Sortec AG in Aarberg initiiert und gilt heute als eines der Vorreiterprojekte der Kunststoffrecyclingindustrie. Der erste Schritt, dieses Prozesses, ist das Sammeln der Kunststoffe in den beteiligten Bieler Haushalten. Die auf freiwilliger Basis gesammelten Kunststoffe werden dann monatlich von der Stadt Biel mit einem LKW bei den Haushalten abgeholt und nach Aarberg in die Sortec AG transportiert. Pro Monat fallen durchschnittlich etwa 10'000 kg Kunststoffabfälle an, welche in 2–

3 Lastwagenfahrten gesammelt und auf Aarberg geliefert werden. Im Normalfall erfolgen diese Sammlungen und Lieferungen der Kunststoffabfälle mit einem 27t Elektro-LKW. Die bei der Sammeltour zurückgelegte Fahrt kann aufgrund der Bedienung von Aussengemeinden und der unterschiedlichen Grösse der Kreise in Biel variieren. Die Distanz, welche jeden Monat zurückgelegt wird, beträgt mit der Lieferung auf Aarberg etwa 450 km. Bei der Sortec AG werden die Sammelsäcke in Ballen gepresst und zwischengelagert. Wenn 20 bis 24 Tonnen gemischter Kunststoff angefallen sind, werden sie mit einem Euro 5 24t Sattelschlepper über 243 km in die österreichische Sortieranlage der Loacker Recycling GmbH geliefert. Einmal sortiert, geht der wiederverwertbare Kunststoff (HDPE, LDPE und PP) zur InnoPlastics in Eschlikon (67 km), wo er dann zerkleinert, gewaschen und zu Granulat geschmolzen wird. Der restliche Kunststoff wird entweder an andere Recyclingunternehmen in Deutschland und Österreich ausgeliefert oder im Zementwerk als Kohlenersatz verwendet. Mit denen in der InnoPlastics recycelten Kunststoffen werden in Schweizer und europäischen Unternehmen neue Produkte hergestellt, wie zum Beispiel Kabelschutzrohre. Für diese Arbeit wurde für die Fertigung der Endprodukte von einem fiktiven Bieler Unternehmen ausgegangen. Damit konnte eine einheitliche Berechnungsbasis geschaffen werden, indem in beiden Prozessen der Kunststoff in Biel gesammelt und wiederverwendet wird. In *Abbildung 4* ist der Stofffluss vereinfacht visualisiert, mit dem Beispiel eines Kunststoffstuhls als Endprodukt. Siehe Anhang B.1 *Stofffluss zentrales Kunststoffrecycling* für den detaillierten Stofffluss.

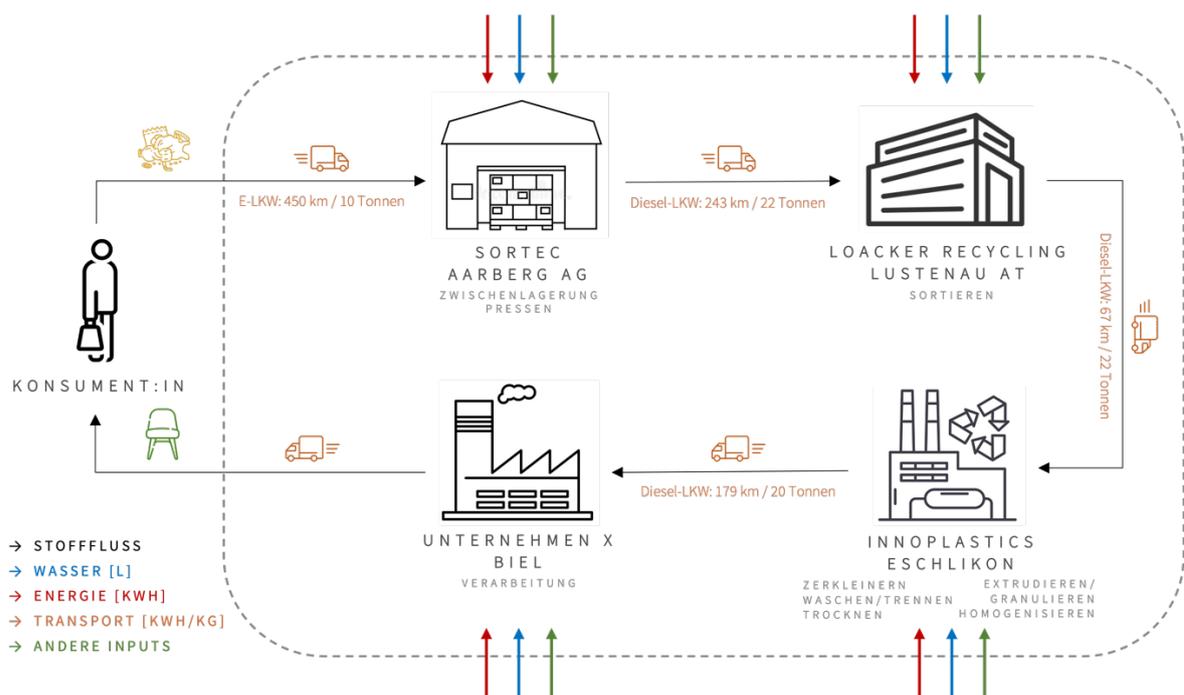


Abbildung 4: vereinfachter Stofffluss des zentralen Kunststoffrecyclings

## 2.4.2 Dezentralisiertes Kunststoffrecycling – Precious Plastic Projekt der ENGA

Das dezentralisierte Kunststoffrecycling wird in dieser Arbeit anhand des «Precious Plastic» Projekts der ENGA analysiert. Die ENGA ist ein Bieler Unternehmen, welches Anfang 2022 gegründet wurde. Im Unternehmen besteht die Absicht, Kreisläufe zu schliessen und innovative Materialien in die Produktion von kundenspezifischen Produkten einfließen zu lassen. Das bei dieser Arbeit betrachtete Projekt, ist das Etablieren eines lokalen Kunststoffrecyclings, basierend auf dem Open-Source Wissen von Precious Plastic. Das Projekt basiert auf dem Ansatz des dezentralisierten Kunststoffrecyclings und zielt darauf ab, einen alternativen Weg für das Recycling von Kunststoffen zu schaffen. Dabei stellt Precious Plastic die Werkzeuge, Plattformen

und Open-Source Wissen zur Verfügung, um Kunststoffabfälle vor Ort und weltweit zu recyceln. Das Ziel der ENGA ist es, die Kunststoffabfälle der Bevölkerung und von ausgewählten Industriepartner:innen um Biel lokal zu recyceln. In der ersten Phase des Projekts wird der grösste Teil der verwerteten Abfälle von Industriepartner:innen kommen, während die Sammlung von Haushaltskunststoffen als Pilotprojekt aufgebaut wird. Der für die Life Cycle Analyse verwendete Prozess basiert auf dem Recycling von Kunststoffabfällen aus Haushalten. Der Prozess fängt auch hier bei der Sammlung der Kunststoffabfälle in den beteiligten Haushalten an. Anders als beim zentralen Prozess werden die Kunststoffe schon in den Haushalten in die verschiedenen Sorten getrennt und in gemeinschaftlichen Sammelstellen entsorgt. Diese Sammelstellen werden mit einem Elektro-Cargobike geleert und zur ENGA transportiert. Die Kunststoffe werden dann auf ihre Reinheit geprüft, geschreddert und in die verlangte Form verarbeitet. In *Abbildung 5* ist der Stofffluss vereinfacht visualisiert, mit demselben Beispiel des Kunststoffstuhls als Endprodukt wie im zentralen Prozess. Siehe Anhang B.2 *Stofffluss dezentrales Kunststoffrecycling* für den detaillierten Stofffluss.

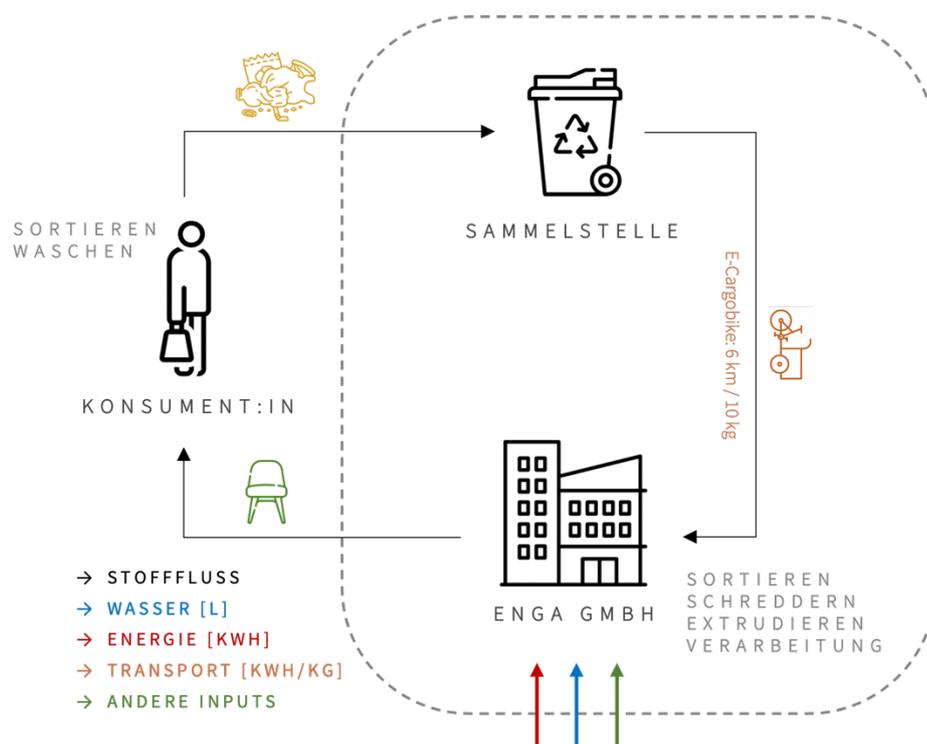


Abbildung 5: vereinfachter Stofffluss des dezentralen Kunststoffrecyclings

### 2.4.3 Systemgrenzen und Annahmen

Entsprechend dem Ansatz der Ökobilanzierung werden alle umweltrelevanten Prozesse möglichst über den gesamten Lebenszyklus erfasst und bewertet. Die vorliegende Arbeit berücksichtigt im Wesentlichen die folgenden Prozesse und Dienstleistungen:

- Energieverbrauch der verschiedenen Prozesse.
- Bedarf an Grund- und Hilfsstoffen sowie materiellen Ressourcen z.B. Wasser.
- Transporte, inkl. Art der Fahrzeuge, von der Sammelstelle bis zur Herstellung (exkl. Transport vom Hersteller zum Kunde).

Folgende Prozesse und Dienstleistungen wurden nicht berücksichtigt:

- Wasserverbrauch fürs Waschen der Kunststoffabfälle in den Haushalten.
- Zu ersetzende Aktivkohle für Luftfiltersysteme der Aufbereitungsanlagen.

- Bau der Aufbereitungsmaschinen und andere materielle Infrastruktur.
- Einsatz von Additiven im zentralen Extrusionsverfahren (spezifische Zusammensetzung nicht bekannt).

Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Produktionsbedingte Emissionen (z.B. VOC beim Einschmelzen des Kunststoffes) wurden aufgrund der Sensitivität der Mengen nicht berücksichtigt und es wurde davon ausgegangen, dass ähnliche Emissionen für beide Prozesse anfallen.
- Einsparung aufgrund des Kohlenersatzes in der Zementproduktion im zentralen Recyclingprozess wurde nicht berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass die Personen, welche für die ENGA Kunststoffe sammeln, die nicht benötigten Kunststoffarten weiterhin in den Sammelsack geben und so diese auch in einem Zementwerk thermisch verwertet werden.
- Für den Stromverbrauch wurden die durchschnittlichen Schweizer und österreichischen Strommix verwendet, welche in der Ecoinvent 3 Database verfügbar sind. Die Zusammensetzung der Strommix kann dementsprechend von der spezifischen Zusammensetzung der Strommix der betroffenen Regionen abweichen, ist aber für die entsprechenden Länder repräsentativ.
- Einfärben des Kunststoffes wurde nicht berücksichtigt, da im Prozess der ENGA keine Einfärbung verwendet wird und dementsprechend nicht ein verfärbtes Produkt mit einem nicht gefärbten Produkt verglichen werden kann.

#### 2.4.4 Vergleichsbasis «die funktionelle Einheit»

Die Bewertung eines Produkts oder Verfahrens muss immer im Vergleich zu Alternativen erfolgen, die den gleichen Nutzen bieten oder die gleiche Funktion erfüllen. Diese Vergleichsgrösse, wird als funktionelle Einheit bezeichnet. Aufgrund der Fragestellung werden in dieser Untersuchung verschiedene funktionelle Einheiten verwendet:

1. 1 Kg Polypropylen
2. Produktion einer recycelten Polypropylen-Kunststoffschale für Stuhl (1,9 kg)
3. Kunststoffplatte 1m x 1m x 10mm (Dichte: 0.91) = 9,1 kg

Die verschiedenen funktionellen Einheiten wurden ausgewählt, sodass die Prozesse mit unterschiedlichen Szenarien erklärt werden können. Dies mit dem Ziel, das Verständnis der Resultate zu verbessern und dem Leser eine Auswahl an greifbaren Beispielen zu geben.

Die erste funktionelle Einheit ist eine allgemeingültige Vergleichsbasis von 1 Kilogramm Polypropylen. Aufgrund der unterschiedlichen Endprodukte in beiden Prozessen, wurde ein möglichst ähnliches Rohmaterial verglichen, welches zum gleichen Zweck weiterverarbeitet werden kann. Im zentralen Prozess, verarbeitet die InnoPlastics Pellets (siehe *Abbildung 6*), welche geeignet sind für verschiedenste Anwendungen wie zum Beispiel das Spritzgiessen oder Pressen. Das am ehesten vergleichbare Material der ENGA sind feine Flakes (siehe *Abbildung 6*), welche ebenfalls als Rohmaterial für das Spritzgiessen oder Pressen verwendet werden können. Die Einheit von 1 Kilogramm Polypropylen ist der Rohstoff, welcher aus beiden Prozessen resultiert und daher auch die Grundlage der zwei weiteren funktionellen Einheiten. Auch in der Berechnung der Umweltbelastungen wird dieser Prozess als Grundlage verwendet und für die Kunststoffschale und die Kunststoffplatte als Basis weiterverwendet.



Abbildung 6: Funktionelle Einheit: 1 kg Polypropylen, Pellets (links) und Flakes (rechts) (InnoPlastics AG, n.d.; Santini, 2020)

Als zweite funktionelle Einheit wurde die Polypropylen-Kunststoffschale ausgewählt, aufgrund des Wunsches der ENGA, einen vom klassischen Vitra Model inspirierten Stuhl (siehe *Abbildung 7*) mit einer komplett recycelten Schale herzustellen. Die Kunststoffschale wird im dezentralen Recycling, vom Kunststoffabfall bis zum Stuhl komplett bei der ENGA gefertigt. Im zentralen Recycling wird sie mit den von der InnoPlastics recycelten Pellets von einem Spritzgussunternehmen in Biel gefertigt.



Abbildung 7: Funktionelle Einheit: PP Kunststoffschale für Stuhl (Vitra International AG, n.d.)

Als dritte funktionelle Einheit wurde die Kunststoffplatte ausgewählt. Sie ist das Hauptprodukt des Kunststoffrecyclings der ENGA, welches als Halbfabrikat für verschiedenste Zwecke weiterverarbeitet werden kann (siehe *Abbildung 8*). Der Recyclingprozess unterscheidet sich hier nur im letzten Produktionsschritt von dem der Kunststoffschale. Anstelle des Spritzgussverfahrens wird für die Kunststoffplatte ein Pressverfahren angewendet. Dieser findet wiederum im dezentralen Prozess bei der ENGA und im zentralen Prozess in einem Bieler Unternehmen statt.

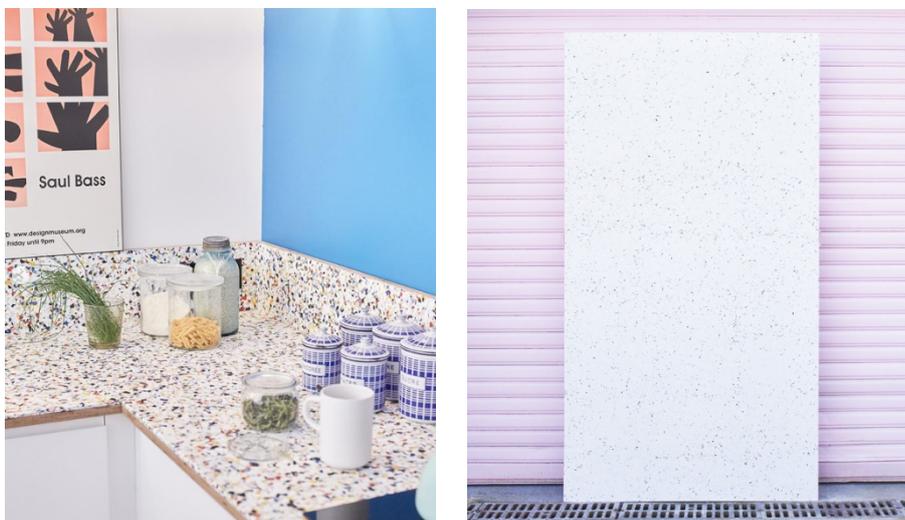


Abbildung 8: Funktionelle Einheit: Kunststoffplatte mit Anwendungsbeispiel (links) (SAS minimum, n.d.)

## 2.5 Nutzwertanalyse zur Bestimmung der Komplementarität der Systeme

Zur Bestimmung der Komplementarität des zentralen und dezentralen Recyclings wurde die Methode der Nutzwertanalyse ausgewählt. Diese ermöglicht eine rationale Bewertung von verschiedenen Alternativen. Ihr Ziel ist es, ein konkretes und verwendbares Ergebnis in Form eines Zahlenwerts wiederzugeben (BMI, 2020).

Bei der Aufstellung des Objektsystems wurden drei Szenarien bestimmt:

- Zentrales Recycling
- Dezentrales Recycling
- Kombination des zentralen und dezentralen Recyclings

Zur Beurteilung dieser drei Systeme wurden die wichtigsten Kriterien aus der Ökobilanz und der gesellschaftlichen Analyse entnommen:

- Energieeffizienz
- Kurze Transportwege
- Sensibilisierung der Gesellschaft
- Transparenz gegenüber den Konsumenten:innen
- Berücksichtigung der lokalen Bedürfnisse
- Bequemlichkeit des Recyclingsystems
- Recycelte Kunststoffmenge (Mengeneffizienz)
- Mehrwert für Kunststoffrecycling-Industrie

Diese Kriterien sind je nach Wichtigkeit unterschiedlich gewertet. Die zwei wichtigsten Kriterien aus der Ökobilanz sind die Energieeffizienz und die kurzen Transportwege und diese aus der gesellschaftlichen Analyse sind die Transparenz gegenüber den Konsumenten:innen und die Bequemlichkeit des Recyclingsystems. Diese wurden jeweils mit 15% gewichtet. Die restlichen Kriterien, welche ebenfalls aus den Erkenntnissen der ökologischen und gesellschaftlichen Analyse entnommen wurden, sind mit 10% gewichtet. Für jedes Kriterium werden die drei Szenarien in eine Rangordnung von 1 bis 3 eingeordnet. Dabei steht der Punktwert 3 für die beste Alternative und der Punktwert 1, für die schlechteste Alternative. Bei der Punkteverteilung ist davon ausgegangen worden, dass alle Standorte, welche ein zentrales Kunststoffsammlersystem haben, auch über ein dezentrales Recyclingsystem verfügen. Dadurch wurde eine vergleichbare Grundlage ermöglicht. Unter zentralem Kunststoffrecycling versteht man das Recycling auf kantonaler oder nationaler Ebene. Dezentrales Kunststoffrecycling hingegen ist das Recycling auf kommunaler Ebene.

Wichtig zu vermerken ist, dass die Bewertung der verschiedenen Varianten subjektiv ist. Die Festlegung der Gewichtungen und die Vergabe von Punkten sind keine exakt messbaren Vorgänge. Demzufolge können die Ergebnisse einer solchen Analyse bei einer Wiederholung anders ausfallen.

## 2.6 Gesellschaftliche Analyse

Zur Untersuchung der gesellschaftlichen Einstellung zum Kunststoffrecycling und einer potenziellen Teilnahme der Bieler Bevölkerung am lokalen Projekt der ENGA, wurde eine Umfrage und eine Literaturrecherche ausgewählt. Die Teilnahme der Bevölkerung am lokalen Recycling der ENGA ist eine Voraussetzung für den Erfolg des Projekts. Die gesellschaftliche Analyse soll als Grundstein für die Evaluation der sozialen Machbarkeit des Projekts dienen und Hinweise zur erfolgreichen Umsetzung des Projekts geben. Im Folgenden werden die Methoden und die angestrebten Ziele der Umfrage, sowie das Vorgehen bei der Literaturrecherche beschrieben.

### 2.6.1 Vorgehen bei der Umfrage

Ein wichtiger Ansatz für diese Arbeit war das Einholen von Meinungen der Bieler Bevölkerung bezüglich dem Kunststoffrecycling. Als Zielgruppe für diese Umfrage wurde zuerst die ganze Bieler Bevölkerung definiert. Die dafür ausgewählte Methode war, an potenziellen Sammelstandorten die Personen mithilfe eines Tablets zu befragen. Denn nur so kann die Meinung der Bieler Bevölkerung ohne Voreingenommenheit eingeholt werden. Obschon in einem ersten Zeitpunkt die breite Meinung aller Bieler Einwohner eingeholt werden wollte, wurde dann entschieden, dass die Meinung der ersten potenziellen Kunststoffsammler:innen wertvoller ist. Auf diese Weise konnte ermittelt werden, ob Personen, die bereits ein wenig mit dem Thema vertraut sind, am Projekt mitmachen würden. Damit konnte auch herausgefunden werden, ob es überhaupt eine Zielgruppe gibt, für das Sammeln und Trennen der Kunststoffabfälle. Um diese Zielgruppe zu finden, wurde der Gemüsemarkt in Biel ausgewählt, wo mit einem kleinen Stand die Umfrage durchgeführt wurde. Es wurde davon ausgegangen, dass der Gemüsemarkt der Ort mit den meisten für das Thema sensibilisierten Personen sein würde. Gildas Höllmüller und Linus Bart der ENGA waren ebenfalls anwesend, was ihnen ermöglichte einen ersten Kontakt mit dieser Zielgruppe zu etablieren. Zur Formulierung der Fragen wurde das «Handbook of Survey Methodology for the Social Sciences» verwendet (Gideon, 2012). Aus dieser Literatur wurden folgende Grundsätze und Methoden entnommen:

- Die Messbarkeit der angesprochenen Themen muss immer definiert werden. Zum Beispiel, wenn das Recyclingverhalten analysiert werden sollte, muss vorerst klar sein, wie dieses Verhalten gemessen werden kann.
- Umfrage in Kapitel (mit Titeln) unterteilen. Ist sowohl für den Fragenden als auch für die Befragten übersichtlicher. (Unterteilung in thematische Hauptpunkte, welche der Umfrage entnommen werden sollten).
- Umfrage muss einen roten Faden haben (logischer Ablauf).
- Wer sind die Teilnehmenden und welche Limitationen haben sie? Fragen dürfen nicht offensiv, zu schwierig oder für die Teilnehmenden sinnlos sein.
- Fragen müssen neutral gestellt werden und nicht auf eine spezifische Antwort hinweisen.
- Nie zwei Fragen in eine verpacken (Double-Barrelled Questions) Beispiel: “Sollten mehr Informationen und Sammelstationen angeboten werden?”
- Bei der Formulierung von Fragen mit Aussagecharakter sollten die folgenden Wörter vermieden werden: und, sowohl, als auch und zusätzlich.
- Keine “leading-” oder “loaded-questions” Bsp. “Sammeln Sie Ihre Abfälle richtig?” oder “Wie fühlt es sich an, Ihren Abfall nicht fachgerecht zu trennen?”
- Kurze, auf den Punkt gebrachte Fragen sind immer der richtige Weg (am bestens ist es Szenario-Fragen auszulassen).

Zweck dieser Umfrage war es, herauszufinden, welche Einstellung die Konsumenten:innen am Gemüsemarkt gegenüber einem lokalen Kunststoffrecycling hat. Die dabei resultierenden Ergebnisse sollten folgende Fragen beantworten:

- Was ist der Wissensstand dieser Gesellschaftsgruppe bezüglich Kunststoffrecycling?
- Gibt es Trends, welche Art von Leuten in ihrem Haushalt recyceln und welche nicht?
- Wie gross ist die Bereitschaft der Gesellschaft, beim Recycling einen Beitrag zu leisten?
- Welche Voraussetzungen braucht es, um das Mitmachen der Gesellschaft zu fördern? (Location der Sammelstellen, Trennungssystem für zu Hause, Online- oder Papier-Anleitungen etc.)
- Was für eine Haltung gegenüber dem Plastikrecycling herrscht auf dem «Märit» in Biel?
- Wird das Waschen und Trennen der Plastiksorten in der Gesellschaft als grosser Aufwand empfunden?
- Wünscht sich die Gesellschaft mehr Transparenz auf Seite der Recyclingunternehmen? (Wollen Sie wissen, was mit ihren Abfällen passiert?)
- Kann mehr Transparenz, das saubere Trennen der Plastikabfälle in der Gesellschaft fördern?

Um diese Fragen beantworten zu können, wurde eine Umfrageform mit verschiedenen Fragetypen erstellt. Die meisten Fragen wurden in Form von Multiple-Choice-Fragen mit Einfach- und Mehrfachantworten und einige mit Freitext gestellt. Vier Fragen wurden als Ja/Nein Fragen gestellt und eine Frage beinhaltete einen Schieberegler, welcher je nach Wichtigkeit der Aussagen geregelt werden konnte. Die Fragen wurden so gestellt, dass die Resultate vergleichbar sind. Jedoch wurden einige Freitext-Optionen gegeben, um auch das Aufbringen von personalisierten Ideen zu fördern. Die Umfrage wurde aufgrund der Bieler Zweisprachigkeit sowohl auf Deutsch als auch auf Französisch erstellt.

Der Fragebogen ist in vier Bereiche aufgeteilt. Der erste Abschnitt beinhaltet 3 demografische Fragen, und dient zur Verfolgung von allfälligen demografischen Trends. Anschliessend wurden im zweiten Bereich sechs Fragen und eine Folgefrage in Bezug auf das Entsorgungsverhalten gestellt. Im dritten Bereich wurde mit drei Fragen und einer Folgefrage auf das Kunststoffrecycling und etwas genauer auf das lokale, dezentralisierte Recycling eingegangen. Der letzte Teil ist die Danksagung und bietet den Teilnehmenden die Möglichkeit, ihre Kontaktdaten zu hinterlassen, um am Recycling-Projekt teilzunehmen. Dank dem Aufstellen eines Stands mit A0 Poster, verschiedenen Muster von recyceltem Kunststoffabfall, Fotos von potenziellen Produkten und Beispielen von Kunststoffabfällen, mussten die Passanten nicht offensiv angegangen werden. Die Passanten hielten bei Interesse bei uns an, was dazu führte, dass nur die Art von Personen die Umfrage ausgefüllt haben, welche auch am Thema interessiert sind. Dank des persönlichen Formats der Umfrage («face-to-face») konnten die Teilnehmenden bei Unsicherheiten unterstützt werden. Dies führte bei allen Befragten zum vollständigen Ausfüllen des Formulars und hat das Erheben von qualitativ hochwertigen Daten sichergestellt. Im Allgemeinen wurde mehr Wert auf die Qualität als auf die Quantität der Daten gelegt. Vier ungültige Testversuche, welche im Anhang aufgeführt sind, wurden in den Resultaten nicht berücksichtigt.

## 2.6.2 Literaturrecherche zum Recyclingverhalten der Bevölkerung

Zum Vergleich und zur Ergänzung der im Rahmen der Umfrage erhobenen Daten wurde eine Literaturrecherche zum Recyclingverhalten der Bevölkerung durchgeführt. Dazu wurde die Methode der narrativen Literaturrecherche ausgewählt. Diese Methode ermöglicht eine gründliche und kritische Bewertung der bisherigen Forschung zum Recyclingverhalten (Allen, 2017). Die verwendete Literatur konnte bestimmte Aussagen aus den Umfrageergebnissen bestätigen, vor allem aber weitere Aspekte hinzufügen, die mit der Umfrage nicht abgedeckt wurden. Aufgrund der limitierten Übertragbarkeit der Ergebnisse der Umfrage war es umso wichtiger, allgemeingültige Aspekte in Bezug auf das Recyclingverhalten der Gesellschaft einzubringen. Eine Reihe von Faktoren, welche diesbezüglich, zu berücksichtigen sind, wurden einerseits beschrieben und andererseits als Übersicht in *Tabelle 3* aufgelistet. Die Auflistung soll der ENGA einen Überblick über die wichtigsten Einflüsse geben, die für das Entsorgungsverhalten der Gesellschaft wichtig sind. Die markantesten Resultate der Umfrage wurden mit den Ergebnissen der Literatur verglichen und diskutiert.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der ökologischen und der gesellschaftlichen Analyse aufgezeigt und diskutiert. Im ersten Teil wird die Berechnungsgrundlage und die berechneten Ergebnisse aus den Ökobilanzen des zentralen und dezentralen Recyclingprozesses offengelegt, grafisch dargestellt und diskutiert. Der zweite Teil widmet sich den Resultaten der Umfrage und der Literaturrecherche. Die Ergebnisse aus der Umfrage werden beschrieben und diskutiert und mit der grafischen Darstellung der wichtigsten Ergebnisse unterstrichen.

#### 3.1 Ökobilanzierung

Für das bessere Verständnis der Ergebnisse werden in diesem Abschnitt zuerst die verwendeten Daten erklärt und der Unterschied zwischen den realen und den Benchmark Daten erläutert. Anschliessend wird die Umweltbelastung der Prozesse anhand der im *SimaPro* generierten Grafiken mit den für diese Thesis verwendeten Systemgrenzen und funktionellen Einheiten erklärt. Die Umweltbelastungspunkte (UBP), welche in verschiedene Wirkungskategorien aufgeteilt sind, wurden zur Übersicht in Tabellen aufgelistet. In Tabelle 1 sind die genauen Zahlen angegeben, welche in der Beschreibung auf ganze Zahlen gerundet wurden.

Die funktionelle Einheit von 1 Kilogramm Polypropylen wird als Grundlage für die zwei weiteren Einheiten eingehend erläutert. Die dabei getroffenen Aussagen und Erkenntnisse über die wichtigsten Wirkungskategorien sind auf die Kunststoffschale für den Stuhl und auf die Kunststoffplatte übertragbar. Dementsprechend werden für die letzteren funktionellen Einheiten nur die Unterschiede zur Basiseinheit erläutert. Zusätzlich zum Vergleich der funktionellen Einheiten, wird am Schluss dieses Kapitels, die Einheit von 1 Kilogramm Polypropylen mit primärem Polypropylen verglichen.

##### 3.1.1 Reale Daten und Benchmarks

Für die Berechnung der Umweltbelastung der beiden Prozesse wurden, wo möglich, Daten der beteiligten Unternehmen verwendet. Zur Überprüfung der verwendeten Daten und zur Kompensation der nicht erhaltenen Daten wurde auf Benchmark Daten zurückgegriffen. Die Energieverbräuche des dezentralen Prozesses basieren ausschliesslich auf berechneten und gemessenen Werten. Im zentralen Prozess hingegen wurden für das Pressen der Kunststoffabfälle und für den Wasserverbrauch bei der Sortierung Benchmark-Daten verwendet. Im dezentralen Prozess wurde für das Recycling von 1 kg Polypropylen Flakes einen Energieverbrauch von 0.188 kWh berechnet. Dieser setzt sich zusammen aus dem Energieverbrauch der Räumlichkeiten (0.003 kWh/kg) und dem Waschen (0.035 kWh/kg) und Schreddern (0.153 kWh/kg) der Kunststoffabfälle. Der Energieverbrauch für das Recycling von 1 kg Polypropylen Pellets im zentralen Prozess beträgt 0.883 kWh/kg und ist damit etwas mehr als 4,5-mal höher als im dezentralen Prozess (siehe Abbildung 9).

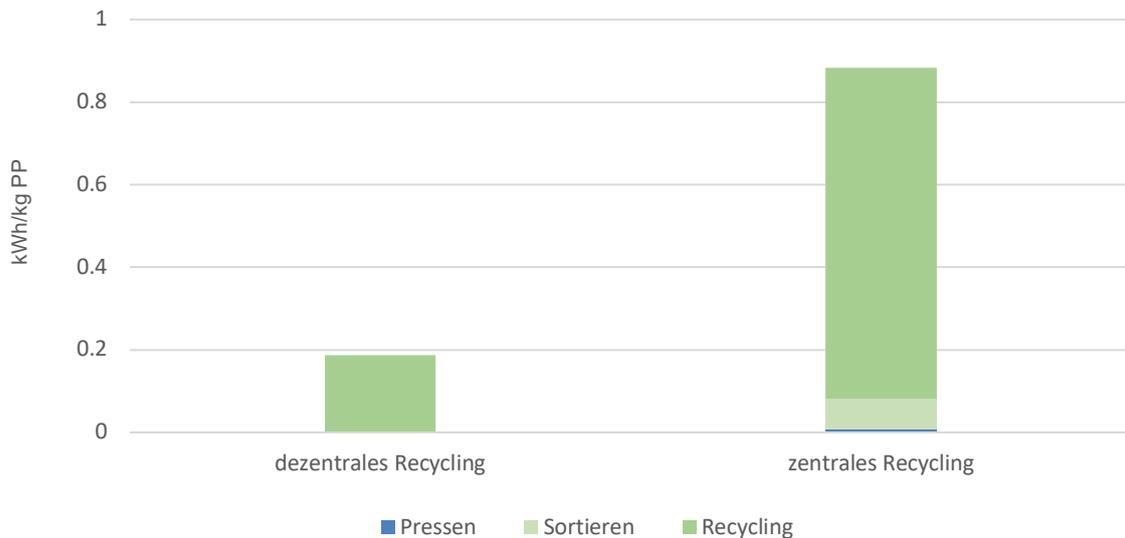


Abbildung 9: Vergleich des Energieverbrauches für das Recycling von 1 kg Polypropylen

Dies ist hauptsächlich auf den hohen Verbrauch des automatisierten Recyclingprozesses mit 0.8 kWh/kg zurückzuführen. Zusätzlich dazu fallen Prozesse an, welche im dezentralen Recycling nicht notwendig sind. Nämlich die Sortierung mit 0.075 kWh/kg und das Pressen mit 0.0075 kWh/kg. Ein weiterer Schritt, welcher für die Fertigung der Flakes im dezentralen Recycling nicht erforderlich ist, ist das Extrudieren des Kunststoffes, wie es im zentralen Recycling erfolgt. Das Extrudieren besteht darin, den erhitzten Kunststoff unter Druck kontinuierlich aus einer Formöffnung herauszupressen. Mit diesem Verfahren werden im zentralen Recycling die Pellets gefertigt, welche sich demzufolge von den Flakes des dezentralen Prozesses unterscheiden. Dieser zusätzliche Schritt im Fertigungsverfahren trägt ebenfalls zum höheren Energieverbrauch des zentralen Prozesses bei. Das Extrudieren ermöglicht im zentralen Prozess das Einfärben und Verbessern der mechanischen und chemischen Eigenschaften durch das Hinzufügen von Additiven. Je nach Anwendung der Rezyklate kann das ein Vorteil sein.

Die für den Transport verwendeten Daten basieren im zentralen Recycling auf den Distanzen zwischen den angegebenen Standorten und den erhaltenen Informationen zu den verwendeten Fahrzeugen. Anhand dieser Daten wurde ein im *SimaPro* hinterlegten Prozess ausgewählt. Im dezentralen Recycling wurde die Durchschnittsdistanz zwischen den Bieler Haushalten und der Werkstatt der ENGA ermittelt und anhand von Benchmark Daten, den Energieverbrauch des Cargo-Bikes berechnet. Um die logistischen Unterschiede der beiden Prozesse aufzuzeigen, wurde auf *Abbildung 10* der Energieverbrauch in kWh für den Transport von 1 kg Polypropylen verglichen. Im zentralen Recycling verbraucht der Transport 0.232 kWh/kg PP. Dabei fallen für die 450 km Transport mit dem E-LKW 0.086 kWh/kg PP an und für die Strecken von 480 km der Diesel-LKWs 0.146 kWh/kg PP an. Dieser ist im Vergleich zum dezentralen Energieverbrauch von 0.005 kWh/kg PP rund 52-Mal höher. Dies aufgrund der kürzeren Strecke von 6 km und der Benutzung eines Cargobikes im dezentralen Recycling. Ausführliche Informationen und Berechnungen zu diesen Daten sind im Anhang B.3 *Datenherkunft für LCA* erläutert.

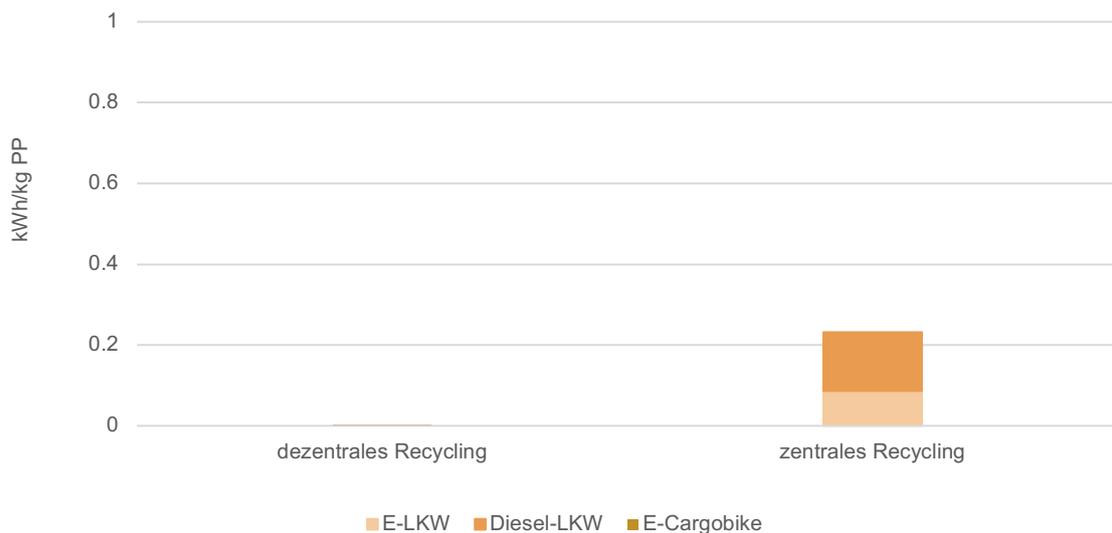


Abbildung 10: Vergleich des Energieverbrauches [kWh] für den Transport von 1 kg Polypropylen

Wie bereits erwähnt, wurde der Transport im zentralen Prozess anhand von *SimaPro*-Daten berechnet. Dieser deckt eine breite Kategorie von Euro 5 LKWs zwischen 16 und 32 Tonnen ab. Aufgrund dieser sehr breiten Definition wurde ein Vergleich mit Benchmark-Daten eines 23 Tonnen Nutzlast LKW vorgenommen (Webfleet, 2020). Die damit errechneten Resultate waren rund 40% tiefer mit einem Wert von 0.085 kWh/kg PP. Mit diesen Daten ist der Energieverbrauch des im zentralen Recycling anfallenden Transports, nur noch 38-Mal höher als der Transport im dezentralen Prozess. Dieser Vergleich zeigt die Abweichungen, welche entstehen können, je nachdem welche Daten verwendet werden. Wo der reale Wert liegt, lässt sich nur durch genaue Messungen bestimmen. Für die LCA wurden, aufgrund ihrer Vollständigkeit, die *SimaPro* Daten verwendet.

Obschon eine vergleichbare Berechnungsgrundlage geschaffen wurde, sind die Unsicherheiten in Bezug auf die Daten des zentralen Prozesses zu unterstreichen. Aufgrund der unsicheren Angaben, welche von den beteiligten Akteuren zur Verfügung gestellt wurden, ist eine gewisse Abweichung der realen Umweltauswirkungen zu erwarten.

### 3.1.2 Umweltbelastung des zentralen und dezentralen Recyclingprozesses

In *Abbildung 11* sind die Umweltauswirkungen der dezentralen und zentralen Verwertungsoptionen von 1 Kg Polypropylen dargestellt (siehe auch Tabelle 1 für genaue Werte). Dabei sind alle Prozesse, vom Kunststoffabfall der Konsumenten:innen bis zum fertigen Rohmaterial (Flakes und Pellets) berücksichtigt. Die Darstellung zeigt, dass das zentrale Recycling mit 276 UBP/kg PP eine 7-Mal höhere Umweltbelastung aufweist als das dezentrale Recycling mit 38 UBP/kg PP. Nachfolgend werden die wichtigsten Wirkungskategorien erläutert: Klimaerwärmung (dunkelgrün), Deponie von radioaktiven Abfällen (hellgrün), Luftschadstoffe und Feinstaub (orange), Energieressourcen (gelb) und Schwermetallemissionen in die Luft (dunkelblau).

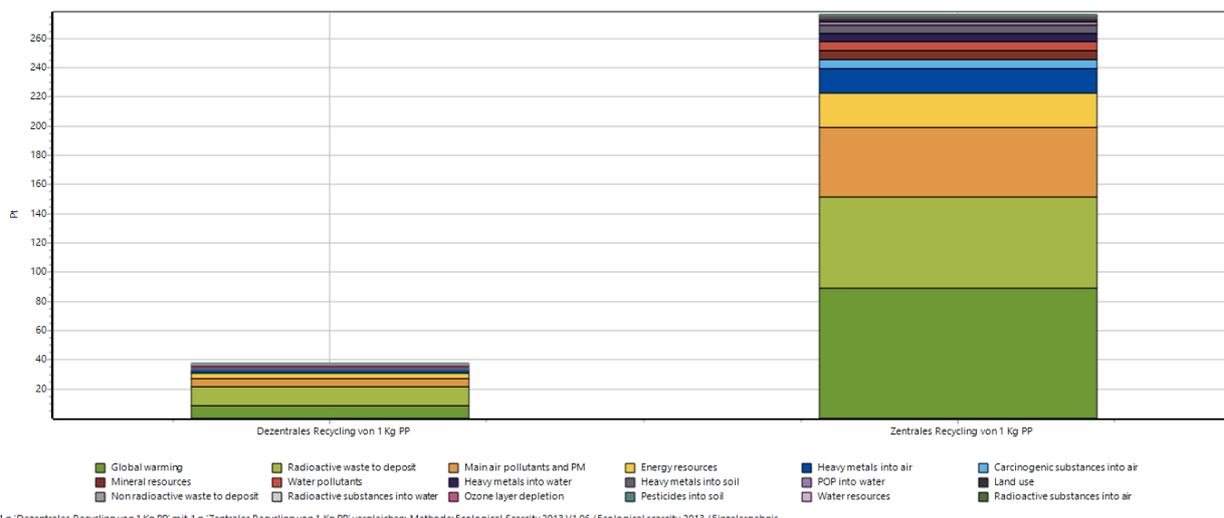


Abbildung 11: Einzelergebnisse des Vergleichs von 1 kg PP

Die grösste Wirkungskategorie, welche im zentralen Prozess über 30% und im dezentralen Prozess über 20% der totalen UBP ausmacht, ist die Klimaerwärmung («Global warming»). Im zentralen Recycling ist sie für 89 UBP/kg PP und im dezentralen Recycling für 9 UBP/kg PP verantwortlich. Im zentralen Prozess fallen etwas mehr als 60% dieser Wirkung auf den Energieverbrauch und rund 35% auf den Transport. Beim dezentralen Prozess ist die Klimaerwärmung ganz dem Energieverbrauch der Aufbereitungsprozesse zuzuschreiben. Dementsprechend ist der Unterschied zwischen beiden Prozessen auf den höheren Energieverbrauch und auch auf den langen Transport im zentralen Prozess zurückzuführen.

Die zweitgrösste Wirkungskategorie, welche im zentralen Prozess für mehr als 20% und im dezentralen für fast 35% der totalen UBP verantwortlich ist, ist die Deponie von radioaktiven Abfällen («Radioactive waste to deposit»). Dies ist in beiden Prozessen auf den Energieverbrauch und spezifischer auf den Schweizer Atomstrom zurückzuführen. Der kleinere Anteil im zentralen Prozess erklärt sich mit dem Sortierungsprozess, welche mit österreichischem Strommix versorgt ist und somit keine Atomenergie beinhaltet. Hier ist jedoch zu vermerken, dass der verwendete Schweizer Strommix, vom regionalen Strommix abweichen kann. Dies ist aber grundsätzlich eine Wirkungskategorie, welche mit dem Einsatz von erneuerbaren Energien ganz eliminiert werden kann. Auch Luftschadstoffe und Feinstaub («Main air pollutants and PM») fallen im zentralen Prozess gleichermassen beim Energieverbrauch und Transport an. Demzufolge kommt es zu einer ca. 8-Mal höheren Umweltbelastung als im dezentralen Prozess, mit 48 UBP/kg PP gegen 6 UBP/kg PP. Dies entspricht einem relativen Anteil von 17% und 15% der gesamten UBP. Die Energieressourcen («Energy resources») sind im zentralen Prozess mit 23 UBP/kg PP um ein Vielfaches höher als im dezentralen Prozess mit 4 UBP/kg PP. Dies liegt hauptsächlich am höheren Energieverbrauch und ebenfalls am Transport mit LKWs im zentralen Prozess. Der relative Anteil dieser Wirkungskategorie liegt im zentralen Recycling bei 10% und im dezentralen Recycling bei 8% der totalen UBP. Die Schwermetallemissionen in der Luft («heavy metals into air») haben aufgrund des Energieverbrauchs sowie dem Bremsen- und Reifenabriebs, insbesondere im zentralen Prozess, eine Umweltbelastung von 17 UBP/kg PP mit einem relativen Anteil von 7%. Im dezentralen Prozess sind es 3 UBP/kg PP mit einem relativen Anteil von 6% der gesamten UBP. Wie bei den meisten Wirkungskategorien ist dieser Unterschied dem deutlich höheren Energieverbrauch der Aufbereitungsprozesse und dem Transport im zentralen Recycling zuzuschreiben. Der Anteil der Umweltbelastungen, welcher auf den Transport und auf den Energieverbrauch des Recyclings entfällt, ist auf der nachfolgenden

Abbildung dargestellt. Der Wasserverbrauch wurde hier aufgrund seines marginalen Anteils vernachlässigt.

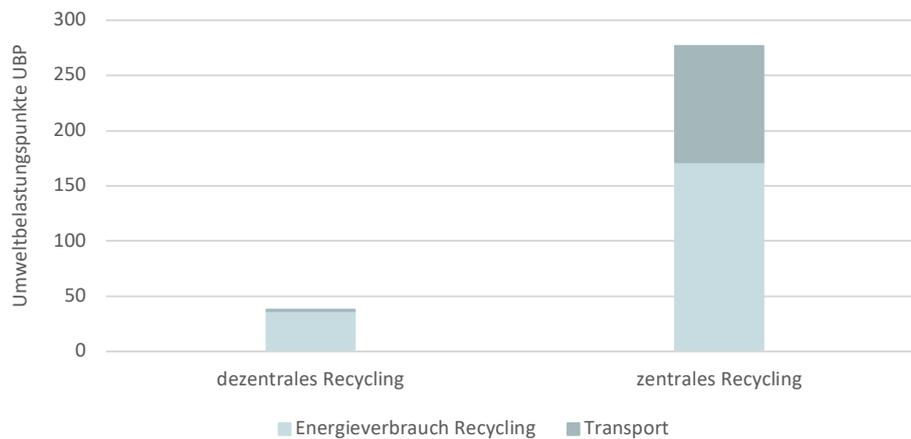


Abbildung 12: Aufteilung der Umweltbelastung auf den Energieverbrauch und den Transport

Die übrigen Wirkungskategorien haben mit einem relativen Anteil von etwa 10% in beiden Prozessen einen deutlich geringeren Beitrag zu den gesamten Umweltauswirkungen. Dennoch folgen sie dem Trend der 5 wichtigsten Wirkungskategorien. Hauptunterschied zwischen den beiden Verfahren ist der höhere Energieverbrauch und Transport in der zentralen Verwertung. In der nachstehenden *Tabelle 1* sind alle Wirkungskategorien noch einmal mit den genauen Umweltbelastungspunkten und dem entsprechenden relativen Anteil aufgeführt. In den Ergebnissen resultierten keine Lärmemissionen, trotz der Verwendung von Diesel-Fahrzeugen für den Transport im zentralen Prozess. Zur Überprüfung wurde einer der Prozesse mit einer Tonne Polypropylen berechnet, was aber keinen Einfluss auf die Lärmemissionen hatte. Warum der Transport keine Lärmemissionen verursacht, ist also unklar.

Tabelle 1: UBP der zentralen und dezentralen Recyclingprozessen für 1 Kg PP (auf 2 Dezimalstellen gerundet)

Wirkungskategorie	Einheit	Dezentrales Recycling	relativer Anteil	Zentrales Recycling	relativer Anteil
<b>Summe</b>	<b>UBP</b>	<b>37.55</b>	100.0%	<b>276.41</b>	100.0
Klimaerwärmung	UBP	8.74	23.3%	89.08	32.2%
Deponie von radioaktiven Abfälle	UBP	12.86	34.2%	62.51	22.6%
Luftschadstoffe und Feinstaub	UBP	5.66	15.1%	47.62	17.2%
Energieressourcen	UBP	3.69	9.8%	23.17	8.4%
Schwermetalle in die Luft	UBP	2.55	6.8%	16.73	6.1%
Krebserregende Stoffe in die Luft	UBP	0.78	2.1%	6.24	2.3%
Mineralische Rohstoffe	UBP	0.56	1.5%	6.20	2.2%
Wasserschadstoffe	UBP	0.53	1.4%	6.19	2.2%
Schwermetalle im Wasser	UBP	0.72	1.9%	5.77	2.1%
Schwermetalle in den Boden	UBP	0.69	1.8%	5.28	1.9%
POP im Wasser	UBP	0.06	0.2%	2.83	1.0%
Landnutzung	UBP	0.18	0.5%	2.28	0.8%
Deponie von nicht radioaktiven Abfällen	UBP	0.12	0.3%	0.94	0.3%
Radioaktive Stoffe im Wasser	UBP	0.14	0.4%	0.69	0.3%
Zerstörung der Ozonschicht	UBP	0.06	0.2%	0.39	0.1%
Pestizide in den Boden	UBP	0.07	0.2%	0.36	0.1%
Wasserressourcen	UBP	0.15	0.4%	0.12	0.0%

### 3.1.3 Umweltbelastung der Weiterverarbeitung

Die Umweltbelastung für die Produktion der recycelten Kunststoffschale und Kunststoffplatte, zeigen, wie zu erwarten war, keinen signifikanten Unterschied zur Umweltbelastung von 1 kg Polypropylen. Die einzigen Unterschiede liegen in der Weiterverarbeitung der Rezyklate und für den zentralen Prozess im Transport der Pellets nach Biel. Ansonsten sind die Prozesse in allen Funktionseinheiten bis auf die Menge an Polypropylen identisch. Die Umweltbelastung wird dementsprechend vorwiegend durch die Menge an Polypropylen beeinflusst. Für die Produktion der Kunststoffschale wird 1,9 kg PP aufgewendet und für die Kunststoffplatte 9,1 kg PP.

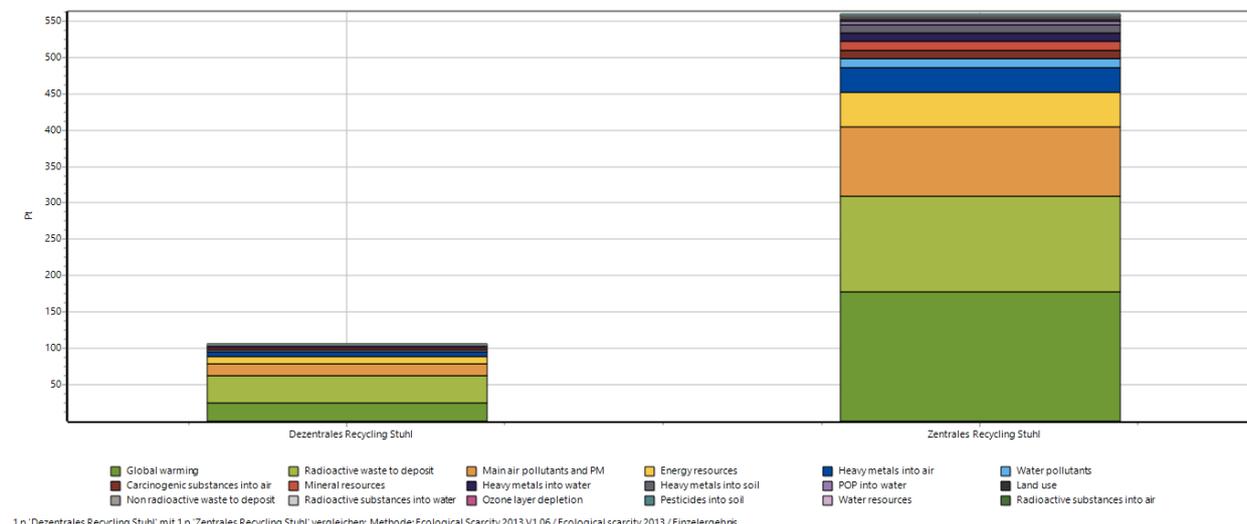


Abbildung 13: Einzelergebnisse des Vergleichs der Kunststoffschale

Die Umweltbelastung vom Polypropylen Abfall bis zur Kunststoffschale, liegt im dezentralen Recycling bei 107 UBP und beim zentralen Recycling bei 560 UBP. Somit ist die Umweltbelastung für die Herstellung einer Kunststoffschale, wie auf *Abbildung 13* zu sehen, im zentralen Prozess etwas mehr als 5-Mal höher als im dezentralen Prozess. Das Spritzgießen macht in beiden Prozessen 35 UBP aus. Demzufolge ist der relative Unterschied zwischen beiden Prozessen geringer als der Unterschied für 1 kg Polypropylen.

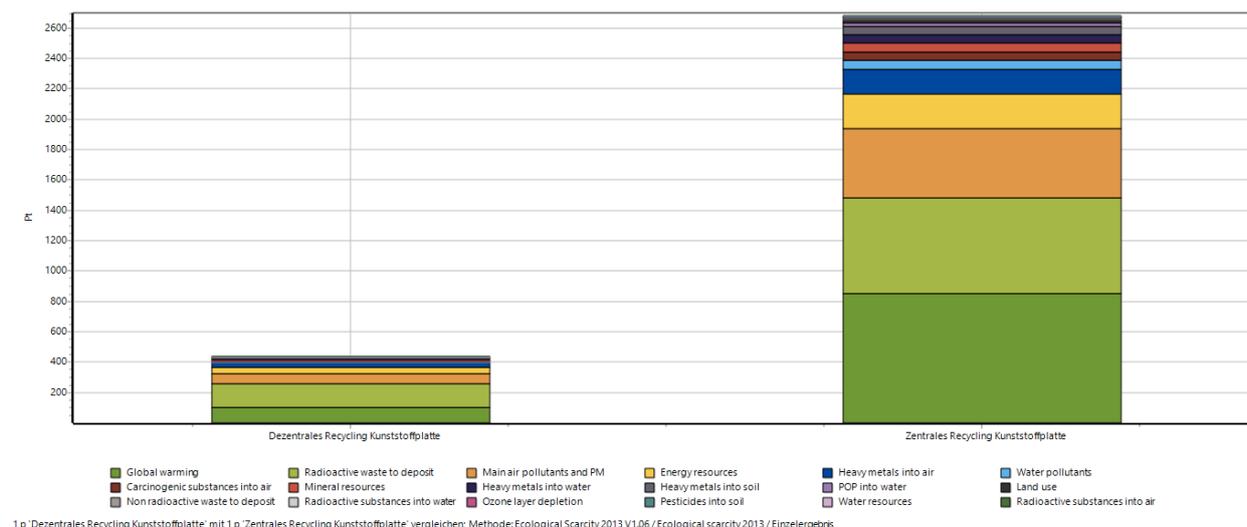


Abbildung 14: Einzelergebnisse des Vergleichs der Kunststoffplatte

Die Herstellung einer Kunststoffplatte ist bis auf die verarbeitete Menge identisch zur Herstellung der Kunststoffschale. Der Energieverbrauch für die Press- und Spritzgussmaschine ist pro kg

derselbe, da gleich viel Wärme zum Schmelzen des Polypropylens eingesetzt werden muss. Für den zentralen Prozess fallen 440 UBP und für den dezentralen Prozess 2'681 UBP an (siehe *Abbildung 14*). Basierend auf diesen Ergebnissen, ist die Umweltbelastung im zentralen Prozess 6-Mal höher als im dezentralen Prozess. Der absolute Unterschied zwischen beiden Prozessen ist höher als für die Kunststoffschale, aufgrund der grösseren Menge an Polypropylen, die recycelt und transportiert werden muss. Das Pressen macht in beiden Prozessen 168 UBP aus, was wiederum den geringeren relativen Unterschied zwischen dem zentralen und dezentralen Prozess erklärt im Vergleich zu für 1 kg Polypropylen.

### 3.1.4 Vergleich der Umweltbelastung mit Primärkunststoff

Um sowohl die ökologischen Vorteile des zentralen und des dezentralen Kunststoffrecyclings in Bezug zum Einsatz von primärem PP aufzuzeigen, wurde in der nachfolgenden Abbildung, die Umweltbelastung für die Produktion von 1 kg Neu-Polypropylen hinzugefügt. Die Umweltbelastung der Produktion von neuem Polypropylen beträgt 1'683 UBP/kg PP und ist somit 6-Mal höher als der zentral recycelte Kunststoff (276 UBP/kg PP) und 44-Mal höher als der dezentral recycelte Kunststoff (38 UBP/kg PP). Mit dieser ganzheitlichen Betrachtung der Umweltbelastungen wird deutlich, dass das Recycling von Kunststoffen aus ökologischer Sicht sinnvoller ist als die Produktion von neuem Kunststoff. Dieser Vergleich ist umso wichtiger, wenn berücksichtigt wird, dass sich die meisten Studien darauf konzentrieren, die Umweltauswirkungen des Kunststoffrecyclings mit anderen Verwertungsarten (KVA, Zementwerk) zu vergleichen (siehe z.B. Dinkel et al., 2017, 2012; Jean-Claude Würmli et al., 2022; Seyler et al., 2016).

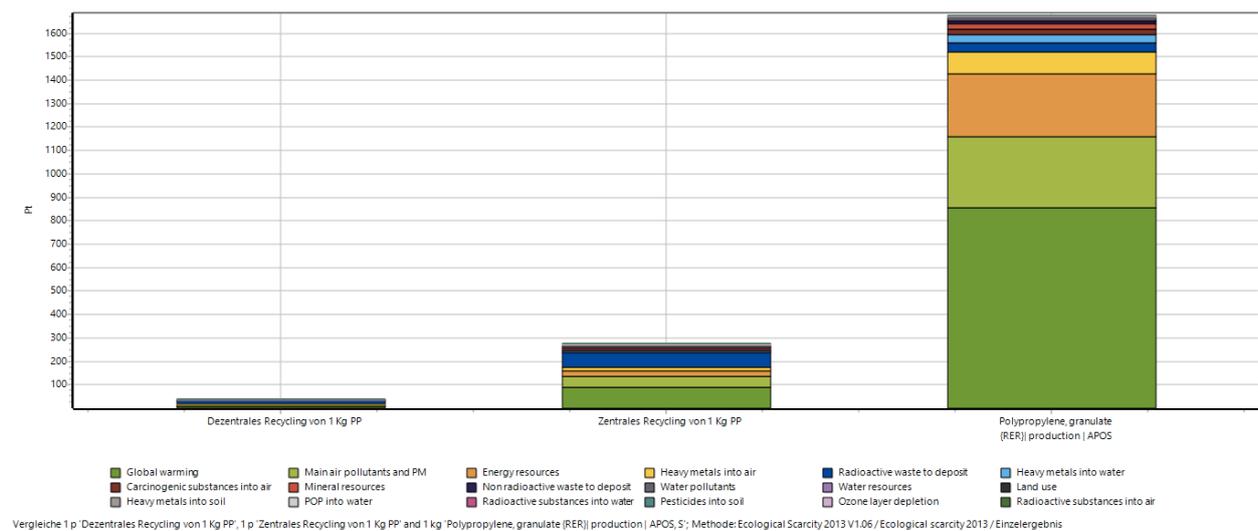


Abbildung 15: Einzelergebnisse des Vergleichs mit Neu-Polypropylen

### 3.2 Ergebnisse zur Komplementarität des zentralen und dezentralen Recyclings

Zur Bestimmung der Komplementarität des zentralen und dezentralen Kunststoffrecyclings wurde wie in 2.5 beschrieben eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Diese soll einen Hinweis dazu geben, ob eine Kombination der beiden Systeme, einen Mehrwert erbringen kann. Der Mehrwert wird mit den gesetzten Kriterien, welche aus der Ökobilanz und der gesellschaftlichen Analyse entnommen wurden, bestimmt.

Die Resultate aus *Tabelle 2* zeigen einen Mehrwert der Kombination der beiden Systeme mit 2.3 Punkten im Vergleich zu den Einzelsystemen, mit 2.1 Punkten für das dezentrale Recycling und 1.5 Punkten für das zentrale Recycling.

Tabelle 2: Ergebnisse der Nutzwertanalyse zur Komplementarität der betrachteten Systeme

Kriterien	Wichtung	Dezentrales Recycling		Zentrales Recycling		Kombination der beiden Systeme	
		Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet
Energieeffizienz	15%	2	0.3	1	0.15	3	0.45
Kurze Transportwege	15%	3	0.45	1	0.15	2	0.3
Sensibilisierung der Gesellschaft	10%	1	0.1	1	0.1	3	0.3
Transparenz gegenüber den Konsumenten:innen	15%	3	0.45	1	0.15	2	0.3
Berücksichtigung der lokalen Bedürfnisse	10%	3	0.3	1	0.1	2	0.2
Bequemlichkeit des Recyclingsystems	15%	2	0.15	3	0.45	1	0.3
Recycelte Kunststoffmenge (Mengeneffizienz)	10%	1	0.1	2	0.2	3	0.3
Mehrwert für Kunststoffrecycling-Industrie	10%	1	0.1	2	0.2	3	0.3
<b>Summe</b>	<b>100%</b>		<b>2.1</b>		<b>1.5</b>		<b>2.3</b>

Die einzelnen Kriterien und die den verschiedenen Szenarien zugewiesenen Punkten werden im Folgenden erläutert. Die drei Szenarien werden pro Kriterium von 1–3 eingestuft, wobei 3 die beste und 1 die schlechteste Variante ist.

#### Energieeffizienz

Wie auf *Abbildung 9* zu sehen ist, ist der Energieverbrauch pro kg recycelter Kunststoff höher im zentralen Recycling als im dezentralen Recycling. Somit schneidet das dezentrale Recycling besser ab als das zentrale Recycling. Werden hingegen die einzelnen Systeme mit der Kombination der beiden Systeme verglichen, schneidet die Kombination der beiden Systeme besser ab. Das liegt zum einen daran, dass bestimmte Kunststoffsorten lokal und energieeffizient recycelt werden, zum anderen daran, dass die nicht recycelbaren Kunststoffsorten im zentralen Prozess im Zementwerk recycelt werden können.

### Kurze Transportwege

Die Transportwege sind im Szenario des dezentralen Recyclings, wie in *Abbildung 10* dargestellt, am kürzesten. Somit schneidet das dezentrale Recycling am besten ab. Werden die zwei einzelnen Systeme mit der Kombination der beiden verglichen, schneidet auch hier das dezentrale Recycling am besten ab.

### Sensibilisierung der Gesellschaft

Die Sensibilisierung der Gesellschaft wird bei der Kombination der beiden Systeme am meisten gefördert. Je mehr Initiativen für das Kunststoffrecycling eingeführt werden, desto höher die Sensibilisierung der Gesellschaft. Das zentrale und das dezentrale Recycling wurden für dieses Kriterium gleich bewertet, da davon ausgegangen wird, dass ein Ansatz allein, die Gesellschaft nicht in hohem Masse sensibilisieren kann.

### Transparenz gegenüber den Konsumenten:innen

Die Transparenz wurde im dezentralen Recycling als höchste eingeschätzt. Einerseits aufgrund der geografischen Nähe zur Gesellschaft und andererseits aufgrund der Verfügbarkeit aller Daten in einem Unternehmen. Verglichen dazu, sind im zentralen Recycling die Daten auf alle beteiligten Unternehmen verteilt, was eine hohe Transparenz der Prozesse erschwert. Im kombinierten Szenario könnte die Transparenz des dezentralen Recyclings, die am zentralen Prozess beteiligten Unternehmen zu einer transparenteren Kommunikation motivieren.

### Berücksichtigung der lokalen Bedürfnisse

Die Berücksichtigung lokaler Bedürfnisse ist im dezentralen Recycling einfacher als im zentralen Recycling und schneidet somit am besten ab. Einerseits entsteht im dezentralen Recycling eine Nähe zur Gesellschaft, die im zentralen Recycling nicht möglich ist. Andererseits ermöglichen das dezentrale Recyceln und Produzieren der Fertigprodukte die Berücksichtigung der lokalen Absatzmärkte. Mit dem kombinierten Szenario entsteht die Möglichkeit, zu entscheiden, ob die lokalen Bedürfnisse berücksichtigt werden sollten. Im Gegensatz zum dezentralen Recycling können im zentralen Recycling nämlich Standardprodukten gefertigt werden, welche keine Berücksichtigung der lokalen Bedürfnisse verlangt.

### Bequemlichkeit des Recyclingsystems

Die Bequemlichkeit für die Konsumenten:innen ist im zentralen Recycling höher als im dezentralen Recycling. Die verschiedenen Kunststoffabfälle können im zentralen Prozess zusammen in einem Sack entsorgt werden. Im dezentralen Prozess hingegen müssen die Kunststoffsorten in den Haushalten getrennt werden, was die Bequemlichkeit verringert. Die Kombination der beiden Systeme wurde als das am wenigsten bequeme Szenario bewertet. Haushalte, die einige Sorten dezentral und andere zentral recyceln müssen, haben einen grösseren Aufwand bei der Sammlung ihrer Kunststoffabfälle.

### Recycelte Kunststoffmenge

Die Menge an Kunststoffabfällen, die recycelt werden kann, ist bei der Kombination der beiden Systeme am grössten. Bei der zentralen Verwertung kann mehr recycelt werden als bei der dezentralen Verwertung, da die industriellen Anlagen grösser sind. Somit ist die Kombination am besten bewertet, gefolgt vom zentralen System und zuletzt vom dezentralen System.

### Mehrwert für Kunststoffrecyclingindustrie

Je mehr Unternehmen sich am Recycling von Kunststoffen beteiligen, desto grösser ist der Mehrwert für die Kunststoffrecyclingindustrie. Somit ist die Kombination der beiden Systeme am besten bewertet. Allerdings ist hier zu vermerken, dass der Mehrwert für die Industrie nicht nur von der Anzahl, sondern viel mehr von der Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen

Unternehmen abhängt. Des Weiteren wurde der Mehrwert des zentralen Verfahrens aufgrund des bereits etablierten Recyclingsystems, höher eingeschätzt als der des dezentralen Verfahrens. Dennoch ist es wichtig anzumerken, dass das dezentrale Recycling aufgrund der nicht automatisierten Prozesse Arbeitsplätze schafft.

### 3.3 Ergebnisse der Umfrage

Wie bereits erwähnt (2.6.1), wurde eine Umfrage durchgeführt, die sich an die Passanten des Gemüsemarkts in Biel richtete. Ziel war es, einen ersten Kontakt mit interessierten Personen herzustellen. Dies mit der Motivation, ihren Wissensstand und ihre Beweggründe für das Recycling von Kunststoffen herauszufinden. Diese Personen wurden als potenzielle Erstsammler:innen von Kunststoffen für das dezentrale Pilotprojekt mit Haushalten identifiziert. Insgesamt haben 25 Personen an der zweisprachigen Umfrage teilgenommen. Aufgrund der persönlichen Befragung haben alle Teilnehmenden die ganze Umfrage vollständig abgeschlossen. Das persönliche Format ermöglichte, die Teilnehmenden beim Ausfüllen der Umfrage zu unterstützen und führte somit zu qualitativen und vollständigen Antworten. Die vollständige Umfrage ist im Anhang A.1 zu finden.



Abbildung 16: Abbildung des zentralen und dezentralen Recyclingkreislaufes

Die obenstehende Grafik wurde auf der ersten Seite der Umfrage verwendet, um das Pilotprojekt zu erklären. Dies ermöglichte den Befragten, sich dem Thema vertraut zu machen und die notwendigen Grundlagen für die Beantwortung der Fragen zu verstehen. Diese Grafik wurde mit dem Ziel erstellt, dezentrales und zentrales Recycling gegenüberzustellen und die Unterschiede grafisch darzustellen. Der kürzere Transportweg des dezentralen Recyclings und der allgemein kleinere Kreislauf werden mit dieser Grafik unterstrichen.

Die befragten Personen setzen sich zusammen aus 13 Männern und 12 Frauen. Davon waren die Mehrheit (10 Personen) in der Alterskategorie 50–65. Die restlichen Befragten waren zwischen 18–22 (4 Pers.), 23–35 (3 Pers.), 36–49 (4 Pers.) und 66 oder älter (4 Pers.). Obschon die Personengruppe zwischen 50-65 stärker vertreten war, konnten Personen aus fast allen Alterskategorien befragt werden. In der Alterskategorie von 17 und jünger konnten keine befragt werden. Zur Verfolgung von allfälligen demografischen Trends wurden zwei weitere Fragen in die Umfrage integriert. Gefragt wurde zum einen nach dem höchsten Schulabschluss, zum anderen danach, welche Person im Haushalt für die Abfalltrennung zuständig ist. Aufgrund der kleinen Anzahl und der Homogenität der Befragten konnten jedoch keine demographischen Trends beobachtet werden. Die Ergebnisse dieser beiden Fragen sind im Anhang A.1 beigelegt.

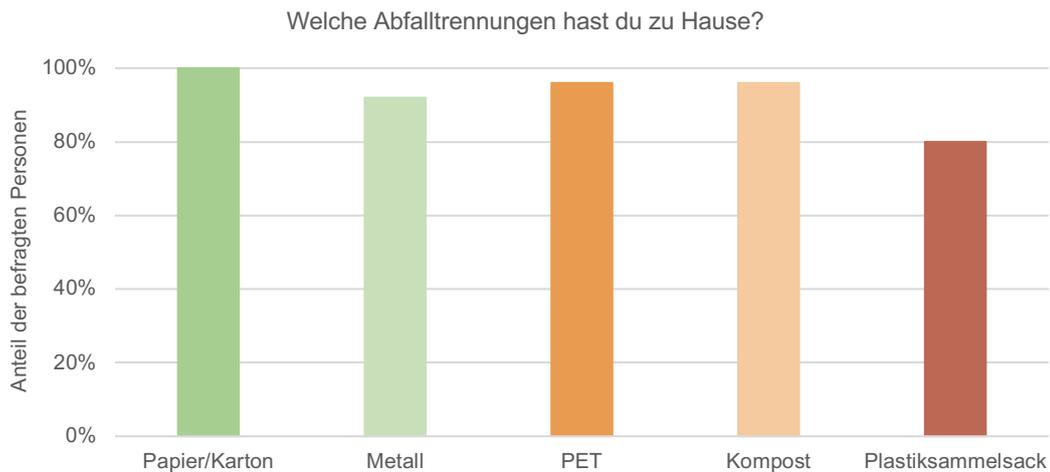


Abbildung 17: Übersicht der Abfalltrennungen der befragten Personen

Aus der Frage, welche Abfalltrennungen die Befragten in ihrem Haushalt haben, wurde klar, dass sich die befragten Personen schon mit der Abfalltrennung befassen (siehe *Abbildung 17*). Die Papier- und Kartonsammlung wird in allen Haushalten geführt. Das Metall wird in 92% der Haushalte gesammelt und die PET-Sammlung in 96% der Haushalte gesammelt. Auch der Kompost wird von 96% der Befragten geführt. Die tiefste Sammelquote zeigte sich beim Sammelsack mit 80% der Befragten, die das Kunststoffrecycling in ihrem Haushalt eingeführt haben. Obschon die Sammelquote tiefer als für die anderen Abfallarten liegt, sammeln 4 von 5 Personen bereits Kunststoffe für ein Projekt, welches erst im Juni 2021 eingeführt wurde. Andere Abfälle, welche auch erwähnt wurden, sind Glas, Batterien und CDs. Als Vergleich zu den angegebenen Zahlen, waren die Schweizer Sammelquoten für diese Abfälle im Jahr 2016 folgende: Glas (96%), PET (82%), Alu (90%) und Papier (81%) (BAFU, 2022). Zu vermerken ist jedoch, dass das Besitzen einer separaten Sammlung nicht zwingend bedeutet, dass alle Abfälle vollständig sauber getrennt werden.

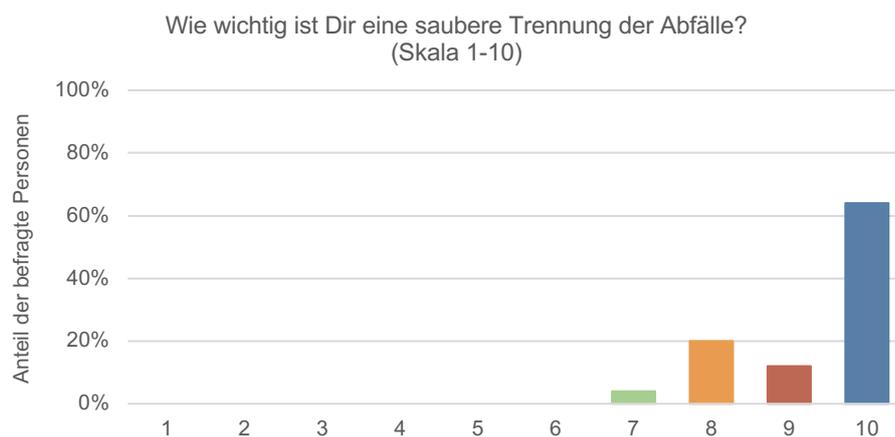


Abbildung 18: Wichtigkeit einer sauberen Trennung der Abfälle

Die Befragten konnten mit einem Schieberegler von 1–10 entscheiden, wie wichtig ihnen eine saubere Trennung der Abfälle ist. Wie auf *Abbildung 18* ersichtlich finden 64% der Befragten, dass eine saubere Trennung der Abfälle sehr wichtig ist, mit 10 von 10 Punkten. Die restlichen Teilnehmenden haben die Wichtigkeit einer sauberen Trennung mit 7 oder mehr Punkten bewertet. Die Antworten dieser Frage stimmen mit denen der vorherigen Frage überein. Die Befragten legen einen grossen Wert auf die separate Sammlung von Abfällen und sammeln ein Grossteil der anfallenden Abfallsorten. Mit der darauffolgenden Frage sollte überprüft werden, ob die angegebenen Überzeugungen mit den Handlungen übereinstimmen. Auf die Frage, wie gut die Abfälle getrennt werden, haben 40% der Befragten «Ich trenne alles was ich kann und gebe mir Mühe alles sauber (gewaschen & ohne Etiketten, Kleber etc.) zu entsorgen» angewählt. Die anderen 60% der Befragten haben die Antwort «Ich trenne alles, aber könnte es mit etwas mehr Aufwand sauberer entsorgen» angewählt. Auch diese Antworten stimmen mit den oberen zwei Fragen überein. Bei den zwei letzten Fragen stellt sich jedoch die Frage, ob die Antworten durch wechselseitige Erwartungen mitbestimmt wurden. Bei solchen Fragen kann es in vielen Fällen dazu kommen, dass sich die Befragten darüber Gedanken machen, auf welche Antworten die Fragen hinausgehen. Aus diesem Grund kann es sein, dass die Befragten dazu neigen Antworten zu geben, welche sie in dieser Situation für erwünscht halten (Mieg, 2005). Somit sind diese Antworten mit Vorsicht zu geniessen.

Die nächste Frage zielte darauf ab, herauszufinden, ob die Befragten mit der derzeitigen Abfalltrennung zufrieden sind oder ob sie gerne mehr machen würden. 60% der Befragten sind mit der aktuellen Abfalltrennung zufrieden und 40% würden gerne mehr machen. Die Personen, welche gerne mehr machen würden, haben ihre Antworten folgendermassen begründet:

- Ich hätte gerne eine saubere Trennung, aber was bräuchte es dafür?
- Es bräuchte mehr Informationen, um es richtigzumachen.
- Ich könnte es noch genauer machen.
- Ich könnte noch konsequenter sein.
- Es geht zu viel in die KVA.
- Ich wünsche mir weniger Etikettenkleber und Mischmaterial.
- Es gibt noch mehr Möglichkeiten, den Müll zu trennen.
- Ich kann mit etwas mehr Aufwand sauberer sortieren.
- Ich will wissen, was mit meinem recycelten Abfall geschieht.

Aus dieser Frage lassen sich zwei Erkenntnisse ableiten. Einerseits sind nicht genügend Informationen vorhanden und die Strukturen sind nicht ausreichend. Andererseits denken die Befragten, dass sie mit ein wenig mehr Aufwand den Abfall besser sortieren können. Wie schon von gewissen Teilnehmern:innen angesprochen, befasst sich die nächste Frage mit der Transparenz der Recyclingunternehmen (*Abbildung 19*).  $\frac{3}{4}$  der Befragten wünschen sich mehr Informationen darüber, was mit ihren Recyclingabfällen geschieht.

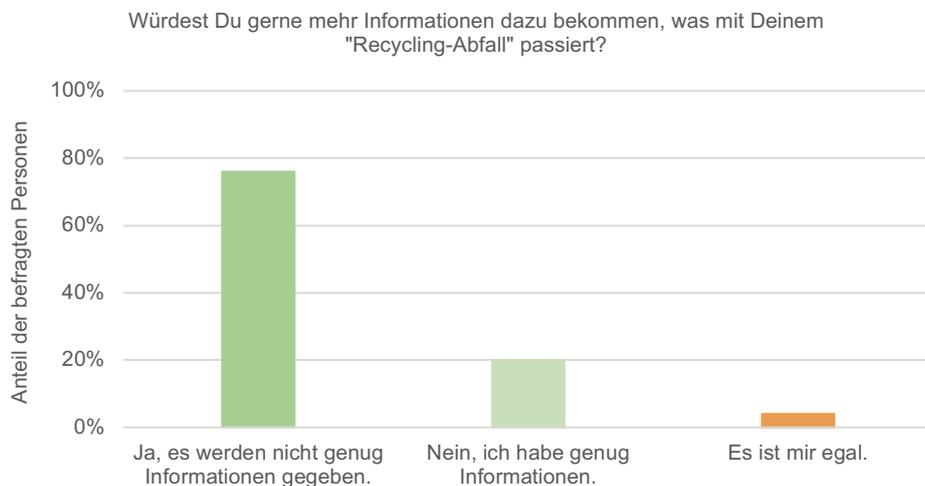


Abbildung 19: Bedürfnis für mehr Transparenz der Recyclingindustrie

Als Folgefrage für diejenigen, die sich mehr Informationen wünschen, wurde gefragt, ob mehr Transparenz eine zusätzliche Motivation für eine saubere Abfalltrennung ist. Darauf haben 89% mit «Ja» geantwortet, und 11% mit «Nein».

Nach den allgemeinen Fragen zur Abfalltrennung wurden, wie schon beschrieben, drei Fragen zu Kunststoffen und etwas spezifischer zum dezentralen Kunststoffrecycling gestellt. Als Erstes wurde gefragt, welche Aussagen zu Kunststoff für die Befragten zutreffen (*Abbildung 20*). Dass Kunststoff ein minderwertiges Material ist, wurde von 20% der Befragten angewählt. Im Gegensatz dazu, wurde von 52% der Befragten, Kunststoff als hochwertiges Material angesehen. Die Wiederverwendbarkeit von Kunststoffen wurde von 76% der Befragten als zutreffend empfunden und 8% sehen Kunststoff als wegwerfbar.

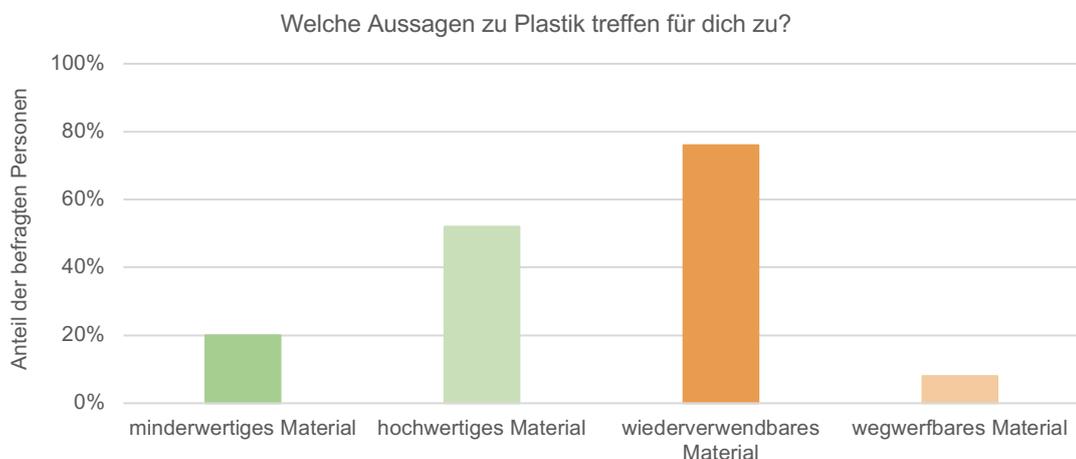


Abbildung 20: Wahrnehmung von Kunststoff als Material

Die grösste Voraussetzung für den Erfolg des dezentralen Recyclings ist, dass die Konsumenten:innen ihren Kunststoff in den verschiedenen Kunststoffsorten sammeln und ihn möglichst sauber abgeben. Demzufolge wurde gefragt, ob die Teilnehmenden bereit sind, diesen Mehraufwand zu betreiben, um das lokale Recycling zu fördern. Auf diese Frage haben sich 76% der Befragten, dazu bereit erklärt. Weitere 24% haben gesagt, sie würden es nur unter gewissen Voraussetzungen machen und niemand hat diesen Mehraufwand ganz ausgeschlossen. Bei dieser Frage ist auch wieder zu unterstreichen, dass die befragte Zielgruppe nicht die Allgemeinheit repräsentiert. Jedoch kann gesagt werden, dass diese Zielgruppe bereit ist, den vorausgesetzten Mehraufwand zu betätigen. Interessant ist auch, dass von 5 Personen, die ihren Kunststoff aktuell nicht mit dem Sammelsack sammeln, sich 4 bereit erklärt haben diesen Mehraufwand in einem dezentralen System zu tätigen. Einige Teilnehmer waren nicht nur bereit, den Kunststoff für das Projekt zu sammeln, sondern interessierten sich auch für die zukünftigen Recyclingprodukte von ENGA.

Die letzte Frage befasste sich mit den Voraussetzungen, welche die Befragten dazu motivieren würde, ihren Kunststoffabfall sorgfältiger zu trennen (Abbildung 21). Die erste Voraussetzung ist der Zugang zur Community, welcher das Teilnehmen an Events und Workshops impliziert. Diese Voraussetzung wurde von 20% der Teilnehmenden als motivierend angesehen. Eine grössere Anzahl der Befragten finden die Anleitung zur Identifikation (56%) und die transparente Kommunikation (64%) motivierend. Weitere Voraussetzungen, welche auch als motivierend angesehen wurden, sind das zur Verfügung gestellte Sammelsystem (56%) und die Abholung zu Hause (44%). Entgegen unserer Erwartung haben keine der Befragten die Gegenleistung (zum Beispiel eine Gratisführung der Produktion) als motivierende Voraussetzung ausgewählt. Eine weitere Voraussetzung, welche zusätzlich erwähnt wurde, ist die bessere Beschriftung der Kunststoffarten.

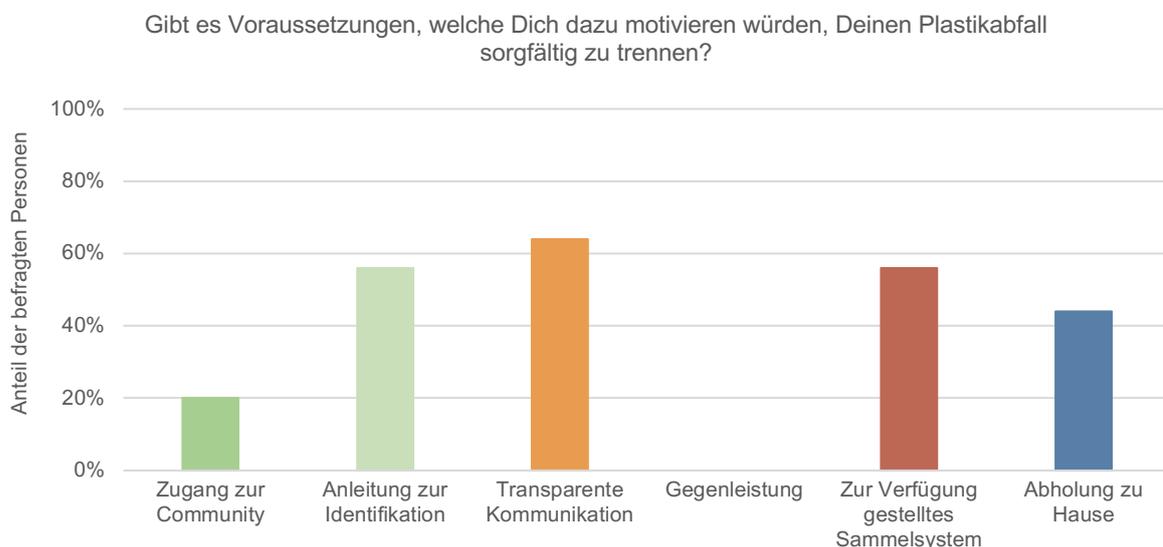


Abbildung 21: Voraussetzungen, welche zur sauberen Trennung der Abfälle motivieren

In der Danksagung der Umfrage, wurde ein Kontaktformular integriert, welches den Teilnehmenden ermöglichte, ihre E-Mail-Adresse zu hinterlegen. Dies mit dem Ziel, die interessierten Personen über das Vorgehen des Projekts informieren zu können. Es konnten 19 E-Mail-Adressen gesammelt werden.

### 3.4 Ergebnisse der Literatur zum Recyclingverhalten der Gesellschaft

Die Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe steht vor vielen Hürden. Eine davon, ist die Frage, wie gebrauchte Verpackungen und Materialien von Konsumenten:innen zurück in die Recyclinganlagen gebracht werden können, um sie wieder in die Lieferkette einzubringen. Die Konsumenten:innen haben dabei einen wichtigen Beitrag zu leisten. Ohne die Beteiligung der Konsumenten:innen wird es nicht genug Material geben, um eine effektive Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe voranzutreiben. Es gibt jedoch verschiedene Herausforderungen, um die Konsumenten:innen dazu zu bringen, ihre Kunststoffe zum Recycling abzugeben. Eine davon ist die Schwierigkeit, die Verhaltensweisen im grossen Umfang zu ändern. Studien zeigen aber, dass die Konsumenten:innen Hilfe benötigen, um von der Absicht zum Handeln zu gelangen. Eine Möglichkeit, dies anzugehen, ist das Nudging. Die Nudge-Theorie geht davon aus, dass durch Änderungen im Umfeld – oder Nudges – Menschen dazu gebracht werden können, bestimmte Entscheidungen zu treffen, ohne ihnen die Entscheidungsfreiheit zu nehmen (Ledsham, n.d.). Zum Beispiel auffällige und leicht zu bedienende Recycling-Behälter. Eine Studie hat gezeigt, dass Behälter mit speziellen Deckeln die Recyclingquote für Getränkeverpackungen um 34% erhöhen konnte (Duffy and Verges, 2009). Die getrennte Sammlung von Kunststoffen ist aber selbst für motivierte Personen oft eine Herausforderung. Eines der häufigsten Hindernisse für Konsumenten:innen ist die Unsicherheit darüber, welche Kunststoffe recycelt werden können. Dies führt häufig dazu, dass das Material in den falschen Abfallstrom gelangt und für die Wirtschaft verloren geht (Smithers, 2019). Dazu mischt sich ebenfalls das wachsende Misstrauen der Konsumenten:innen gegenüber dem Kunststoffrecyclingsystem. Denn immer mehr Konsumenten:innen trauen den Bemühungen der Unternehmen nicht mehr (Ledsham, n.d.).

In einer Studie von Miliute-Plepiene et al. (2016) über das Recyclingverhalten von Haushalten in Schweden und Litauen, wurden verschiedene Einflussfaktoren zur Motivation der Haushalte identifiziert. Der erste wichtige Faktor war die Bequemlichkeit des jeweiligen Abfallsammelsystems. Haushalte mit Zugang zu einem Abfallsammelsystem sortieren tendenziell mehr Verpackungsabfälle als Haushalte ohne ein solches System. Eine weitere Erkenntnis war, dass bessere Kommunikationsmittel und zusätzliche Informationen die Qualität der Sortierung von Verpackungsabfällen aus Haushalten verbessern kann. Zum Beispiel regelmässige Sensibilisierungsmassnahmen und eine klare Kennzeichnung der Behälter. Ebenfalls sollte der Fokus daraufgelegt werden, Vertrauen in das System aufzubauen. Dies geschieht zum Beispiel durch die Nutzung der Medien, um die Öffentlichkeit davon zu überzeugen, dass ihre sortierten Abfälle tatsächlich ordnungsgemäss verarbeitet werden. Ausserdem sollte kommuniziert werden, dass die Bemühungen auf Haushaltsebene einen echten Nutzen für die Umwelt und die Gesellschaft bringen. Es sollte auch hervorgehoben werden, dass Regeln und Vorschriften erforderlich sind, damit ein rechtlicher und institutioneller Rahmen für Recyclingsysteme geschaffen werden kann. Dies ermöglicht, die Verantwortung auf die verschiedenen Akteure zu verteilen (Miliute-Plepiene et al., 2016). Weitere Faktoren, welche das Recyclingverhalten beeinflussen, wurden von Downes et al. (2022) untersucht. Die Untersuchung stützte sich auf bestehende Studien, in denen die Faktoren ermittelt wurden, die in direktem Zusammenhang mit dem Recyclingverhalten stehen. Die untersuchten Faktoren wurden in verschiedene Ebenen unterteilt: Individuum, Haushalt, Gemeinschaft und Situation. In *Tabelle 3* sind die Faktoren aufgeführt, die in den meisten Studien als direkt korrelierend identifiziert wurden (Downes et al., 2022).

Tabelle 3: Faktoren mit direktem Zusammenhang mit dem Entsorgungsverhalten der Konsumenten:innen

Kategorie	Faktoren
Individuum	Alter Geschlecht Ausbildung Umweltbezogene Einstellung und Überzeugung Umweltbezogene Bedenken Einstellung und Überzeugung gegenüber dem Recycling Wahrgenommene Umweltauswirkungen des Recyclings Pflichtgefühl und Verantwortungsbewusstsein Persönliche / moralische Normen Derzeitige Recycling-Gewohnheiten Bereitschaft zum Recycling Fachwissen
Haushalt	Haushaltseinkommen Verfügbarer Ablageplatz
Gemeinschaft	Soziale Normen
Situation	Zugang / Verfügbarkeit von Entsorgungsstellen Bequemlichkeit Wahrgenommener Aufwand

### 3.5 Diskussion zur Beteiligung der Gesellschaft am lokalen Kunststoffrecycling

Aus den Umfrageergebnissen und der Literaturrecherche lassen sich verschiedene Faktoren ableiten, die die Beteiligung der Gesellschaft am dezentralen Recycling beeinflussen. Sowohl aus den Resultaten der Umfrage als auch in der Literatur nimmt die transparente Kommunikation einen grossen Stellenwert ein. Aus den Umfrageresultaten wurde klar, dass die Befragten mehr Informationen zur Verwertung ihrer Abfälle bekommen möchten. In der Literatur wurde ebenfalls unterstrichen, dass eine transparente Kommunikation die Qualität der Abfallsammlung positiv beeinflussen kann. Das Misstrauen der Konsumenten:innen gegenüber dem Recyclingsystem liegt vor allem auch am Informationsmangel seitens der Industrie. Eine Herausforderung, welche diesbezüglich im zentralen Recycling nicht zu unterschätzen ist, ist die Implikation verschiedener Unternehmen am Recyclingprozess (siehe *Abbildung 4*). Je mehr Unternehmen involviert sind, desto schwieriger ist es, den Konsumenten:innen gegenüber, transparent zu sein. Im Falle des dezentralen Recyclings der ENGA, finden alle Prozesse im selben Unternehmen statt. Dies erleichtert eine transparente Kommunikation mit den Konsumenten:innen, da dem Unternehmen alle Informationen zur Verfügung stehen. Darüber hinaus können sich die Konsumenten:innen durch die Ortsverbundenheit des Unternehmens stärker einbezogen fühlen. So kann beispielsweise das Vorhandensein von Produkten aus recyceltem Haushaltskunststoff in lokalen Einrichtungen die Absicht der Konsumenten:innen stärken, ihren Kunststoff zu recyceln. Jedoch benötigen Anwender:innen, wie im Artikel von Ledsham (n.d.) beschrieben, Hilfe, um von der Absicht zum Handeln zu gelangen. Um dies zu erreichen, ist ein einfaches und bequemes System, wie in Miliute-Plepiene et al. (2016) und Downes et al. (2022) beschrieben, von grosser Bedeutung. Das zeigen auch die Resultate der Umfrage. Über die Hälfte der Teilnehmenden sehen ein zur Verfügung gestelltes Sammelsystem, als zusätzliche Motivation, ihren Kunststoffabfall separat zu sammeln. Die Studie von Miliute-Plepiene et al. (2016) unterstreicht,

dass Haushalte mit einem Zugang zu Sammelstationen mehr recyceln als solche ohne Zugang. Ein weiterer Ansatz zur Beeinflussung des Entsorgungsverhaltens, welches im Artikel von Ledsham erwähnt wurde, ist das Nudging. Mit kleinen, auf den ersten Blick nicht sehr relevanten Details, können Konsument:innen dazu bewegt werden, ihren Abfall besser zu entsorgen. Ein Beispiel dazu wurde aus der Studie von Duffy and Verges (2009) entnommen, in welcher die Farbe des Behälterdeckels, die Sammelquote um 34% erhöhen konnte. Ein weiteres Beispiel aus der Studie von Miliute-Plepiene et al. (2016), welches auch in diese Richtung geht, ist das klare Kennzeichnen der Behälter.

All diese Faktoren, welche das Entsorgungsverhalten positiv beeinflussen können, stossen aber an verschiedene Herausforderungen. Eine der grössten Herausforderungen für die Konsument:innen, welche im Artikel von Smithers hervorgehoben wurde, ist die Unsicherheit darüber, welche Kunststoffe recycelt werden können. Dies wurde auch bestätigt von den 56% Befragten, die sich eine Anleitung zur Identifikation der Kunststoffsorten wünschen. Die Herausforderung des Sortierens der Kunststoffverpackungen in Haushalten, welche für das dezentrale Recycling essenziell ist, stellte sich in der Umfrage aber nicht als grosses Problem heraus. Dies ist wahrscheinlich auch auf die Zielgruppe, welche am Gemüsemarkt befragt wurde, zurückzuführen. Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 haben bestätigt, dass die Teilnehmenden schon mit dem Thema vertraut waren. Auch wenn es aus den Umfrageresultaten nicht herauszulesen war, kann davon ausgegangen werden, dass das dezentrale Recycling weniger bequem als das zentrale Recycling ist. Die Konsument:innen müssen die Kunststoffe zu Hause sortieren und haben demzufolge einen grösseren Aufwand, was laut Downes et al. (2022) ein wichtiger Einflussfaktor beim Entsorgen der Abfälle ist. Um ein einfaches und bequemes Sortiersystem für das dezentrale Recycling zu schaffen, kann unter anderem der von Ledsham (n.d.) beschriebene Einsatz von Nudges in Betracht gezogen werden.

Obwohl die Umfrageergebnisse des Gemüsemarkts nicht auf die gesamte Bieler Bevölkerung übertragbar sind, konnten wichtige Erkenntnisse aus der befragten Zielgruppe entnommen werden. Die Ergebnisse zeigten, dass Konsument:innen, die mit dem Thema vertraut sind, bereit sind, einen Mehraufwand zu betreiben. Darüber hinaus sagen sie sich bereit, diesen Aufwand ohne Gegenleistung zu betreiben. Vielversprechend ist auch, dass 76% der Befragten, Kunststoff als wiederverwendbares Material ansehen und 54% der Teilnehmenden diesen als hochwertig empfinden. Die durch diese persönliche Befragung angeregten Gespräche zeigten auch ein Interesse an den gefertigten Produkten des lokalen Recyclings. Dies ist ein wichtiger Aspekt, denn neben ihrem wichtigen Beitrag als Kunststoffsammler spielen die Konsument:innen auch eine wichtige Rolle bei der Sicherung des Absatzmarktes von Produkten aus recyceltem Kunststoff.

Allerdings gibt es aber auch Aspekte, die aufgrund der Homogenität und der geringen Anzahl der Befragten nicht mit den Umfrageresultaten analysiert werden konnten. Etwa demografische Faktoren wie das Alter, Geschlecht oder Ausbildung, können nur mit der Befragung einer grösseren und diverseren Zielgruppe verfolgt werden.

## 4 Schlussfolgerung und Zusammenfassungen

Diese Arbeit hatte zum Ziel, die Umweltauswirkung des dezentralen im Vergleich des zentralen Kunststoffrecyclings zu analysieren. Zudem sollte untersucht werden, inwiefern die Bieler Bevölkerung bereit ist bei einem dezentralen und zugleich zirkulären Recyclingsystem mitzumachen. Die durchgeführte Analyse mit Daten der ENGA GmbH, Sortec Aarberg AG, Innoplastics AG und Loacker Recycling GmbH sowie Daten aus der Literaturrecherche und Umfrage mit der Bieler Bevölkerung hat sich als vielversprechend erwiesen.

Mit einem 4,5-Mal kleineren Energieverbrauch fürs Recycling und einem 52-Mal kleineren Energieaufwand für den Transport ist das dezentrale Recycling energieeffizienter als das zentrale Recycling. Die auf diesen Zahlen basierende Ökobilanz resultiert in eine 7-Mal grösseren Umweltbelastung für das zentrale Recycling. Dabei fallen im zentralen Prozess 38% der UBP auf den Transport und die restlichen 62% auf den Energieverbrauch. Mit dem Einsatz von erneuerbaren Energien kann in beiden Prozessen die Umweltbelastung um ein Vielfaches reduziert oder für gewisse Kategorien, wie die Deponie von radioaktiven Abfällen, sogar ganz eliminiert werden. Im dezentralen Prozess werden die Umweltbelastungen aufgrund der deutlich kürzeren Transportwege um fast 40% reduziert. Die mit dem Energieverbrauch des Recyclings anfallende Umweltbelastung wird mit dem dezentralen Recycling um fast 80% reduziert. Dies ist auf die weniger automatisierten dezentralen Prozesse und auf die Eliminierung von überflüssigen Prozessen (Pressen, Sortieren und Extrudieren) im dezentralen Recycling zurückzuführen. Diese Ergebnisse, welche auf Basis der Einheit von 1 kg Polypropylen berechnet wurden, sind grösstenteils auf die Kunststoffschale (Stuhl) und auf die Kunststoffplatte übertragbar. Die Ökobilanz der beiden Fertigprodukte ist, wie zu erwarten war, proportional grösser aufgrund der grösseren Menge an verwendetem Material. Die Umweltbelastung der Kunststoffschale war im zentralen Prozess mehr als 5-Mal grösser und für die Kunststoffplatte 6-Mal grösser als im dezentralen Prozess. Aus dem Vergleich mit Primärkunststoff wurde aufgezeigt, dass das zentrale und dezentrale Recycling von Kunststoffen aus ökologischer Sicht sinnvoller ist als die Produktion von neuem Kunststoff. Die Umweltauswirkungen von primärem Polypropylen waren 6-mal grösser als bei zentralem Recycling und 44-mal grösser als bei dezentralem Recycling.

Die Komplexität der Herausforderungen im Zusammenhang mit Kunststoffabfällen weist darauf hin, dass mehrere Ansätze erforderlich sind. Sowohl beim zentralen als auch beim dezentralen Recycling ist die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren entscheidend, um die Recyclingbranche voranzubringen. Mithilfe der Nutzwertanalyse konnte der Mehrwert eines kombinierten zentralen und dezentralen Kunststoffrecyclingsystems aufgezeigt werden. Diese Komplementarität hängt jedoch von der Bereitschaft der Akteure ab, diese Herausforderungen gemeinsam zu bewältigen.

Aufgrund der gesellschaftlichen Analyse konnte weiter festgestellt werden, dass die Bieler Bevölkerung bereit ist, bei einem dezentralen Pilotprojekt mitzumachen. Zudem wurden unterschiedliche Faktoren identifiziert, welche die Bevölkerung dazu bringen kann, mehr und besser zu recyceln. Im folgenden Absatz werden nochmals die wichtigsten Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und Umfrageresultate zusammengefasst. Anhand der Umfrage und der Literaturrecherche konnten verschiedene Faktoren ermittelt werden, die das Entsorgungsverhalten der Konsumenten:innen direkt beeinflussen. Eine transparente Kommunikation scheint eines der effektivsten und wichtigsten Mittel zu sein, um die Beteiligung der Konsumenten:innen am lokalen Recycling zu fördern. In der Regel gilt, je mehr Informationen

die Konsumenten:innen bekommen, desto involvierter sind sie. Nebst der Kommunikation ist laut der Literaturrecherche die Bequemlichkeit des Sammelsystems ein wichtiger Faktor. Haushalte mit Zugang zu Sammelsystemen sortieren tendenziell mehr Verpackungsabfälle als Haushalte ohne ein solches System. Obwohl die Bequemlichkeit in den Umfrageresultaten nicht das wichtigste Argument war, kann aufgrund der Literaturrecherche davon ausgegangen werden, dass die Beteiligung der Bieler Bevölkerung stark von der Bequemlichkeit des Sammelsystems beeinflusst sein kann. Demzufolge ist es essenziell, dass ein strukturiertes Sammelsystem eingeführt wird, welches möglichst wenig Aufwand verlangt. Dies kann zum Beispiel mit einem zur Verfügung gestellten Sammelsystem, mit Nudges, mit transparenter Information, mit Anleitungen zu den verschiedenen Kunststoffsorten und durch das Schaffen von Anreizen erreicht werden. Die Bequemlichkeit des Sammelsystems ist beim dezentralen Kunststoffrecycling umso wichtiger, da die Trennung der Kunststoffe bereits mit einem höheren Aufwand verbunden ist. Die wichtigste Erkenntnis aus der Umfrage ist, dass informierte Personen bereit sind, zusätzliche Bemühungen zu unternehmen, wenn sie von den Auswirkungen ihres Handelns überzeugt sind. Dementsprechend ist es für die Konsumenten:innen wichtig, regelmässig über die Auswirkungen des Kunststoffrecyclings informiert zu werden.

Als nächster Schritt für die Kunststoffsammlung in Haushalten, könnte es sinnvoll sein, ein Pilotprojekt in Mehrfamilienhäusern zu starten. Mit einer zur Verfügung gestellten Entsorgungsstation kann das separate Sammeln der Plastiksorten in diesen Haushalten vereinfacht werden. Auf dieser Grundlage kann eine Abschätzung der Bereitschaft der Gesellschaft gemessen werden und das Verhalten der Beteiligten über eine längere Zeit untersucht werden. In einem solchen Projekt können auch Nudges getestet werden, wie etwa das Aussehen und die Platzierung der Sammelstation.

Im betrachteten zentralen Prozess, werden nur drei Kunststoffsorten in der Schweiz recycelt (PP, HDPE, LDPE). Die restlichen Kunststoffe werden entweder in Deutschland und Österreich recycelt oder im Zementwerk energetisch verwertet. Diese Kunststoffsorten werden voraussichtlich auch in der ENGA stofflich verwertet werden. Um den ökologischen Nutzen zu maximieren, kann sich die ENGA auf Sorten fokussieren, die noch nicht in der Schweiz recycelt werden, wie zum Beispiel PET-Verpackungen. Jedoch muss der Absatzmarkt sowie die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Kunststoffsorten auch in Erwägung gezogen werden.

Hier sollte darauf hingewiesen werden, dass ein ökologischer Nutzen vor allem dann erreicht wird, wenn Neuwaren durch Sekundärmaterialien substituiert werden können. Denn nur so können die Produktion von Kunststoffen und die dabei entstandenen Emissionen reduziert werden. Um dies zu erreichen, wird vorausgesetzt, dass in der Entwicklungsphase der Kunststoffprodukte eine einheitliche Zusammensetzung und ein spezifisches Sortieren berücksichtigt werden. Dies würde das Mischen von verschiedenen Kunststoffen beim Recyclingprozess vermeiden und die Produktion von breit anwendbaren Rezyklaten ermöglichen. Nebst dem sind gesetzliche Richtlinien und eine Senkung des Konsums unumgebar, um die Industrie nachhaltiger zu gestalten. Das Zusammenspiel von gesetzlichen Richtlinien und Konsum ist ein Anhaltspunkt für weiterführende Studien.

Abschliessend ist zu betonen, dass es sich bei diesem Pilotprojekt um ein innovatives Projekt handelt, dessen erfolgreiche Umsetzung von verschiedenen Schlüsselfaktoren abhängt. Die

Machbarkeit dieses Projekts muss bewiesen werden, die Erwünschtheit der Konsumenten ist weiter zu ermitteln und die finanzielle Rentabilität des Projekts muss sichergestellt werden. Diese Untersuchung hat jedoch die ökologischen Vorteile des dezentralen Recyclings sowie die Komplementarität der beiden Systeme und den Wunsch der Umfrageteilnehmer, das dezentrale Recycling zu unterstützen, aufgezeigt.

## 5 Arbeitsprozess und persönliche Erkenntnisse

Das Schreiben einer Bachelorarbeit ist für viele oft mit Ungewissheit und Unsicherheiten verbunden. Was will ich machen? Was kann ich daraus ziehen? Ist das Thema meiner Arbeit verbunden mit meinem zukünftigen Job? Mit diesen Fragen und noch vielen mehr wird der Vorbereitungsprozess der Bachelorarbeit überflutet.

Für meine Bachelorarbeit habe ich entschieden, ein Projekt zu machen, mit einem engen Freund, Gildas, welcher zum gleichen Zeitpunkt sein Unternehmen, die ENGA GmbH, gegründet hat. Aufgrund unserer guten Freundschaft hiess es: «Du weisst, was ich machen will mit meinem Unternehmen und kannst das Thema auswählen, welches dir am meisten Spass macht. Denn je mehr Freude du an deiner Arbeit hast, desto wertvoller die Outcomes für das Unternehmen.» Und ich dachte mir: Wenn nur etwas mehr Unternehmen in diese Richtung denken würden.

So, nun bin ich in einem Prozess, wo ich nicht viel weiss. Das Einzige, was ich weiss, ist dass ich ein Projekt machen will, mit welchem die Nachhaltigkeit von Kunststoffen vorangetrieben wird. Ja, die Auswahl ist gross! Mein erster Gedanke ist, das Entwickeln eines Harzes für Kunststoffe mit Naturfasern. Tönt nach einer Herausforderung, aber das sollte ich hinbekommen. Ich nehme Kontakt auf mit einem Dozenten des Kunststoffinstituts an der FHNW in Brugg. Wir besprechen mein Vorhaben und ich besuche ihn vor Ort. Nach einigen Gesprächen merke ich, dass meine Idee etwas zu ambitioniert ist und dass ich über chemische und technische Kenntnisse verfügen sollte, die ich nicht habe. Nach all diesen Bemühungen befinde ich mich wieder am Startpunkt. Wie geht es weiter? Zum Glück kommt Gildas mit einem neuen Input. Er hat eine Open-Source Plattform gefunden für lokales Kunststoffrecycling, Precious Plastic. Ich vertiefe mich ein wenig in diese Plattform und bin sofort auch davon überzeugt. Ziemlich schnell wird klar, dass sich dieses Projekt eines lokalen Kunststoffrecyclings entwickeln wird und dass ich meinen Beitrag dazu leisten kann. Nach vielem Hin und Her entscheide ich mich, eine Lebenszyklusanalyse zu machen, um das zukünftige lokale Kunststoffrecycling der ENGA und das schon bestehende zentrale Recycling zu vergleichen. Langsam wird es spannend und der Druck, ein passendes Thema für meine Arbeit zu finden, löst sich auf. Von hier an heisst es: lesen, lesen und weiterlesen. Ich vertiefe mich in die Materie und entdecke viele neue Aspekte, welche mir nicht bekannt waren. Gleichzeitig habe ich das Glück immer wieder mit Gildas austauschen zu können und meine Erkenntnisse und Ideen weiterzuentwickeln. Das Austauschen hilft mir sehr und bringt mich viel schneller und gezielter voran. Dieser Austausch muss ich unbedingt für weitere Projekte mit auf den Weg nehmen.

Als die Ziele festgelegt waren und klar war, dass ich eine ökologische und gesellschaftliche Analyse machen werden, konnte ich anfangen, die Daten einzuholen. Auf Seite der gesellschaftlichen Analyse funktioniert das relativ reibungslos. Ich organisierte einen Stand auf dem Gemüsemarkt, wo ich mit Gildas und Linus (einem weiteren Gesellschafter des Unternehmens & guten Freund) eine Umfrage durchführe. Bis anhin hatte ich immer Online-Umfragen gemacht, bei welchen die Aussagekraft für mich immer ein wenig fragwürdig war. Bei einer «face-to-face» Umfrage ist ein direktes Feedback möglich und die Einstellung und Motivation der Befragenden macht sich sofort bemerkbar. Auch sehr lehrreich und wertvoll sind die Diskussionen, welche sich bei der Umfrage entwickeln.

Auf Seite der ökologischen Analyse ist die Datenerhebung etwas aufwendiger und komplizierter. Obschon für die Daten des dezentralen Prozesses die Berechnungen und Recherchen gut und

einfach vorankommen, ist das Erhalten von Informationen aus dem dezentralen Prozess um einiges schwieriger. Schon die Grundlage macht es nicht einfach, da vier verschiedene Parteien kontaktiert werden müssen, um an alle Informationen zu kommen. Es fängt gut an, die ersten zwei Kontaktpersonen sind sehr hilfreich und geben mir, ohne zu zögern, die Daten, welche ich angefragt habe. Roger Garo, der Sortec AG schlägt sogar einen Besuch in der Recyclinghalle vor, vorauf ich sofort zustimme. Die Besichtigung des Werks ist sehr spannend und Roger zeigt uns (mir und dem ENGA-Team) anhand seiner Erklärungen, wie fest er in der Wiederverwertung von Abfällen engagiert ist. Nicht nur scheint er sich gut mit den technischen Aspekten auszukennen, sondern bringt sowohl ökonomische, soziale und ökologische Aspekte zusammen, wie es nur wenige können. Auch diese inspirierende Begegnung zeigt, dass der Austausch äusserst wertvoll ist und zur Anregung eigener Ideen führt. Bei den weiteren zwei Unternehmen ist es deutlich schwieriger. Das eine Unternehmen benötigt, aufgrund ihrer Auslastung, viel Zeit, um mir einige Antworten zu liefern und die erhaltenen Antworten sind nicht vollständig. Dementsprechend kommt es zu einem Hin und Her, um zum Schluss eher oberflächliche Antworten zu bekommen. Beim letzten Unternehmen heisst es einfach, dass sie nicht erlaubt sind Informationen herauszugeben. Was jetzt? Ich mache mich auf die Suche nach Benchmark Daten und muss mich mit Daten aus Studien zufriedenstellen. Schon bemerkenswert, dass die Kunststoffrecyclingindustrie nicht offener und transparenter ihre Daten gegen aussen zeigt. Denn um das Kunststoffproblem in der Schweiz und global angehen zu können, ist ein offenes Zusammenarbeiten effizienter als das aktuell vertrauliche und intransparente Handeln von einigen Unternehmen. Genau mit dieser Optik geht Precious Plastic dem Kunststoffrecycling nach und versucht, ein globales Zusammenarbeiten zu fördern, um die lokalen Herausforderungen zu bewältigen. Um diesen Herausforderungen im grossen Masse nachgehen zu können, braucht es aber auch in der Industrie ein Umdenken.

## 6 Literaturverzeichnis

- Allen, M., 2017. The SAGE Encyclopedia of Communication Research Methods, The SAGE Encyclopedia of Communication Research Methods. <https://doi.org/10.4135/9781483381411>
- Andersen, M.S., 2007. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustain. Sci.* 2, 133–140. <https://doi.org/10.1007/S11625-006-0013-6/TABLES/1>
- BAFU, 2022. Abfall und Rohstoffe: Das Wichtigste in Kürze [WWW Document]. URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/inkuerze.html> (accessed 7.26.22).
- BAFU, 2021. Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit – Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz 260.
- BAFU, 2018a. Methode der ökologischen Knappheit [WWW Document]. URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaftskonsum/fachinformationen/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen/methode-der-oekologischen-knappheit.html> (accessed 7.27.22).
- BAFU, 2018b. 4 Phasen einer Ökobilanz [WWW Document]. [bafu.admin.ch](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaftskonsum/fachinformationen/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen/4-phasen-einer-oekobilanz.html). URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaftskonsum/fachinformationen/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen/4-phasen-einer-oekobilanz.html> (accessed 8.2.22).
- BMI, 2020. Organisationshandbuch - Qualitative Bewertungsmethoden [WWW Document]. Prioritätenanalyse. URL [https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6\\_MethodenTechniken/65\\_Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/652\\_Qualitative/qualitative-node.html](https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6_MethodenTechniken/65_Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/652_Qualitative/qualitative-node.html) (accessed 8.1.22).
- Bundesamt für Umwelt, 2021. Kunststoffe [WWW Document]. URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/kunststoffe.html> (accessed 3.14.22).
- Cambridge Dictionary, n.d. EXTRUSION | meaning in the Cambridge English Dictionary [WWW Document]. URL <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/extrusion> (accessed 8.2.22).
- Chemie.de, n.d. Spritzgießen [WWW Document]. URL <https://www.chemie.de/lexikon/Spritzgießen.html> (accessed 8.2.22).
- Dinkel, F., Kägi, T., Bunge, R., Pohl, T., Stäubli, A., 2017. Kurzbericht KuRVe (Kunststoff Recycling und Verwertung) 25.
- Dinkel, F., Stettler, C., Miranda, R., 2012. Ökologischer Nutzen des PE-Folien-Recyclings Schweiz (Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe). Bundesamt für Umwelt 1–101.
- Downes, J., Curtis, J., Smith, L., 2022. What can an interdisciplinary , systematic review reveal about the influences on recycling behaviour? 1–38.
- Duffy, S., Verges, M., 2009. It Matters a Hole Lot Perceptual Affordances of Waste Containers Influence Recycling Compliance. *Environ. Behav.* 41, 741–749. <https://doi.org/10.1177/0013916508323737>
- Ellen MacArthur Foundation, 2013. Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition, Ellen MacArthur Foundation.
- FHNW, 2020. Systemgrenzen und Modellierung von Systemen - Wirtschaftsinformatik reloaded [WWW Document]. CAS Cybersecurity und Inf. Risk Manag. URL <https://www.fhnw.ch/plattformen/iwi/2020/06/17/homeoffice-und-onlinekonferenzen-4-9-2-3-2-7/> (accessed 8.2.22).

- G Schyns, Zoé O, Shaver, Michael P, G Schyns, Z O, Shaver, M P, 2021. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromol. Rapid Commun.* 42, 2000415. <https://doi.org/10.1002/MARC.202000415>
- Gideon, L., 2012. Handbook of Survey Methodology for the Social Sciences ||.
- Günther, E., n.d. Sekundärstoff • Definition | Gabler Wirtschaftslexikon [WWW Document]. SpringerGabler. URL <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/sekundaerstoff-44617> (accessed 8.2.22a).
- Günther, E., n.d. Primärstoff • Definition | Gabler Wirtschaftslexikon [WWW Document]. SpringerGabler. URL <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/primaerstoff-44259> (accessed 8.2.22b).
- Güttinger, E., 2017. Plastic Recycling Initiatives in Switzerland 1–75.
- Hahladakis, J.N., Iacovidou, E., 2019. An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling. *J. Hazard. Mater.* 380, 120887. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.120887>
- Hopmann, C., Michaeli, W., 2017. Einführung in die Kunststoffverarbeitung. InnoPlastics AG, n.d. InnoPlastics AG - Regranulate [WWW Document]. URL <https://www.innoplastics.ch/home-de.html> (accessed 7.27.22).
- IWSB & EBP, 2017. Kunststoffrecycling: 12 Thesen zu Ökologie, Ökonomie und Ökoeffizienz. Bern / Olten: cemsuisse / VKRS.
- Jaberg, S., 2021. Eine Kanadierin erfindet in der Schweiz das Plastikrecycling neu. SWI swissinfo.ch.
- Jacobsen, N.B., 2006. Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *J. Ind. Ecol.* 10, 239–255. <https://doi.org/10.1162/108819806775545411>
- Jean-Claude Würmli, A., Verfasser Thomas Kägi, P., Dinkel, F., 2022. Ökologischer Nutzen des PET-Recyclings in der Schweiz Ökologischer Vergleich von PET-Selektivsammlung mit der Verwertung in einer KVA CH im 2020.
- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.09.005>
- Klotz, M., Haupt, M., Hellweg, S., 2022. Limited utilization options for secondary plastics may restrict their circularity. *Waste Manag.* 141, 251–270. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2022.01.002>
- Knappe, F., Reinhardt, J., Kauertz, B., Oetjen-dehne, R., Buschow, N., Ritthoff, M., Wilts, H., Lehmann, M., 2021. Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes.
- Ledsham, N., n.d. Engaging Consumers to Reduce and Recycle [WWW Document]. Sustain. Inst. by ERM. URL <https://www.sustainability.com/thinking/engaging-consumers-to-reduce-and-recycle/> (accessed 7.24.22).
- Mieg, H.A., 2005. Experteninterviews in den Umwelt- und Planungswissenschaften. Eine Einführung und Anleitung, Institute of Human-Environment Systems.
- Miliute-Plepiene, J., Hage, O., Plepys, A., Reipas, A., 2016. What motivates households recycling behaviour in recycling schemes of different maturity? Lessons from Lithuania and Sweden. *Resour. Conserv. Recycl.* 113, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.008>

- Mobilitätsschule, n.d. Leistung, Energie und Verbrauch – Mobilitätsschule – nachhaltig mobil [WWW Document]. URL <https://nachhaltigmobil.schule/leistung-energie-verbrauch/> (accessed 7.23.22).
- Morseletto, P., 2020. Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy. *J. Ind. Ecol.* 24, 763–773. <https://doi.org/10.1111/JIEC.12987>
- MyStromer AG, n.d. Fact sheet 1–23.
- Opensource.com, n.d. What is open source? | Opensource.com [WWW Document]. URL <https://opensource.com/resources/what-open-source> (accessed 8.2.22).
- Polymehr GmbH, 2015. Produktinformationen. *ABI Tech.* 36. <https://doi.org/10.1515/abitech-2016-0053>
- Precious Plastic, 2022. Build a Shredder Machine – Academy [WWW Document]. URL <https://community.preciousplastic.com/academy/build/shredder> (accessed 7.14.22).
- Rudolph, N., Kiesel, R., Aumnate, C., 2020. Understanding Plastics Recycling. Economic, Ecological, and Technical Profit Aspects of Plastic Waste Handling, Understanding Plastics Recycling.
- Santander, P., Cruz Sanchez, F.A., Boudaoud, H., Camargo, M., 2020. Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach. *Resour. Conserv. Recycl.* 154, 104531. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104531>
- Santini, K., 2020. Addressing the challenge of injection molding regrind - Recycling Today [WWW Document]. *Recycl. Today*. URL <https://www.recyclingtoday.com/article/addressing-the-challenge-of-injection-molding-regrind/> (accessed 7.27.22).
- SAS minimum, n.d. Portfolio | Le Pavé | Matériau d'écoconstruction [WWW Document]. URL <https://www.sasminimum.com/en/portfolio-en/#tabs%7C0> (accessed 7.27.22).
- Seyler, C., Sommerhalder, M., Wolfensberger, M., 2016. Bericht Module 3 + 4 Verwertung Kunststoffabfälle Schweiz im Auftrag des Runden Tisches Kunststoff unter der Leitung des BAFU mit Stellungnahmen der Mitglieder des Projektausschusses Runder Tisch Kunststoff. Bundesamt für Umwelt.
- Sitaloppi, J., Jähi, M., 2021. Toward a sustainable plastics value chain: Core conundrums and emerging solution mechanisms for a systemic transition. *J. Clean. Prod.* 315, 128113. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128113>
- Smithers, R., 2019. Dizzying array of recycling symbols “is confusing consumers” [WWW Document]. *Guard.* URL <https://www.theguardian.com/environment/2018/jul/30/dizzying-array-of-recycling-symbols-is-confusing-consumers> (accessed 7.24.22).
- Stucki, T., Wörter, M., 2021. Statusbericht der Schweizer Kreislaufwirtschaft – Erste repräsentative Studie zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft auf Unternehmensebene. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt und Circular Economy Switzerland. Berner Fachhochschule Wirtscha.
- Swiss Recycling, n.d. Sammlung von verschiedenen Kunststoffarten - Swiss Recycling [WWW Document]. URL <https://www.swissrecycling.ch/de/wertstoffe-wissen/wertstoffe/kunststoff> (accessed 5.19.22).
- SwissInfo SWI, 2018. Plastik in der Schweiz: Top beim Verbrauch, Flop beim Recycling [WWW Document]. URL [https://www.swissinfo.ch/ger/ressourcen\\_plastik-in-der-schweiz--top-beim-verbrauch--flop-beim-recycling/44085230](https://www.swissinfo.ch/ger/ressourcen_plastik-in-der-schweiz--top-beim-verbrauch--flop-beim-recycling/44085230) (accessed 3.13.22).
- United Nations, 1997. Glossary of environmental statistics.

- Vitra International AG, n.d. Eames Plastic Side Chair DSW | Offizieller Vitra Online Shop [WWW Document]. URL <https://www.vitra.com/de-li/living/product/details/eames-plastic-side-chair-dsw> (accessed 7.27.22).
- Volvo Schweiz, 2019. Ökologisches und leises 26-Tonnen-Elektro-Wertstoff-Sammelfahrzeug (EWS).
- Weber, J., n.d. Benchmark • Definition | Gabler Wirtschaftslexikon [WWW Document]. SpringerGabler. URL <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/benchmark-28542> (accessed 8.2.22).
- Webfleet, 2020. Dieserverbrauch von LKW im Vergleich [WWW Document]. URL [https://www.webfleet.com/de\\_de/webfleet/blog/so-viel-kraftstoff-verbrauchen-lkw/](https://www.webfleet.com/de_de/webfleet/blog/so-viel-kraftstoff-verbrauchen-lkw/) (accessed 7.23.22).
- Yuan, Z., Bi, J., Moriguchi, Y., 2006. The circular economy: A new development strategy in China. *J. Ind. Ecol.* 10, 4–8. <https://doi.org/10.1162/108819806775545321>
- Zhong, S., Pearce, J.M., 2018. Tightening the loop on the circular economy: Coupled distributed recycling and manufacturing with recyclebot and RepRap 3-D printing. *Resour. Conserv. Recycl.* 128, 48–58. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.09.023>
- Allen, M., 2017. *The SAGE Encyclopedia of Communication Research Methods*, The SAGE Encyclopedia of Communication Research Methods. <https://doi.org/10.4135/9781483381411>
- Andersen, M.S., 2007. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustain. Sci.* 2, 133–140. <https://doi.org/10.1007/S11625-006-0013-6/TABLES/1>
- BAFU, 2022. Abfall und Rohstoffe: Das Wichtigste in Kürze [WWW Document]. URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/inkuerze.html> (accessed 7.26.22).
- BAFU, 2021. Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit – Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz 260.
- BAFU, 2018a. Methode der ökologischen Knappheit [WWW Document]. URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/fachinformationen/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen/methode-der-oekologischen-knappheit.html> (accessed 7.27.22).
- BAFU, 2018b. 4 Phasen einer Ökobilanz [WWW Document]. [bafu.admin.ch](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/fachinformationen/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen/4-phasen-einer-oekobilanz.html). URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/fachinformationen/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen/4-phasen-einer-oekobilanz.html> (accessed 8.2.22).
- BMI, 2020. Organisationshandbuch - Qualitative Bewertungsmethoden [WWW Document]. Prioritätenanalyse. URL [https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6\\_MethodenTechniken/65\\_Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/652\\_Qualitative/qualitative-node.html](https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6_MethodenTechniken/65_Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/652_Qualitative/qualitative-node.html) (accessed 8.1.22).
- Bundesamt für Umwelt, 2021. Kunststoffe [WWW Document]. URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/kunststoffe.html> (accessed 3.14.22).
- Cambridge Dictionary, n.d. EXTRUSION | meaning in the Cambridge English Dictionary [WWW Document]. URL <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/extrusion> (accessed 8.2.22).
- Chemie.de, n.d. Spritzgießen [WWW Document]. URL <https://www.chemie.de/lexikon/Spritzgießen.html> (accessed 8.2.22).
- Dinkel, F., Kägi, T., Bunge, R., Pohl, T., Stäubli, A., 2017. Kurzbericht KuRVe (Kunststoff Recycling und Verwertung) 25.

- Dinkel, F., Stettler, C., Miranda, R., 2012. Ökologischer Nutzen des PE-Folien-Recyclings Schweiz (Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe). Bundesamt für Umwelt 1–101.
- Downes, J., Curtis, J., Smith, L., 2022. What can an interdisciplinary , systematic review reveal about the influences on recycling behaviour? 1–38.
- Duffy, S., Verges, M., 2009. It Matters a Hole Lot Perceptual Affordances of Waste Containers Influence Recycling Compliance. *Environ. Behav.* 41, 741–749.  
<https://doi.org/10.1177/0013916508323737>
- Ellen MacArthur Foundation, 2013. Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition, Ellen MacArthur Foundation.
- FHNW, 2020. Systemgrenzen und Modellierung von Systemen - Wirtschaftsinformatik reloaded [WWW Document]. CAS Cybersecurity und Inf. Risk Manag. URL <https://www.fhnw.ch/plattformen/iwi/2020/06/17/homeoffice-und-onlinekonferenzen-4-9-2-3-2-7/> (accessed 8.2.22).
- G Schyns, Zoé O, Shaver, Michael P, G Schyns, Z O, Shaver, M P, 2021. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromol. Rapid Commun.* 42, 2000415.  
<https://doi.org/10.1002/MARC.202000415>
- Gideon, L., 2012. Handbook of Survey Methodology for the Social Sciences ||.
- Günther, E., n.d. Sekundärstoff • Definition | Gabler Wirtschaftslexikon [WWW Document]. SpringerGabler. URL <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/sekundaerstoff-44617> (accessed 8.2.22a).
- Günther, E., n.d. Primärstoff • Definition | Gabler Wirtschaftslexikon [WWW Document]. SpringerGabler. URL <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/primaerstoff-44259> (accessed 8.2.22b).
- Güttinger, E., 2017. Plastic Recycling Initiatives in Switzerland 1–75.
- Hahladakis, J.N., Iacovidou, E., 2019. An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling. *J. Hazard. Mater.* 380, 120887. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.120887>
- Hopmann, C., Michaeli, W., 2017. Einführung in die Kunststoffverarbeitung. InnoPlastics AG, n.d. InnoPlastics AG - Regranulate [WWW Document]. URL <https://www.innoplastics.ch/home-de.html> (accessed 7.27.22).
- IWSB & EBP, 2017. Kunststoffrecycling: 12 Thesen zu Ökologie, Ökonomie und Ökoeffizienz. Bern / Olten: cemsuisse / VKRS.
- Jaberg, S., 2021. Eine Kanadierin erfindet in der Schweiz das Plastikrecycling neu. SWI swissinfo.ch.
- Jacobsen, N.B., 2006. Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *J. Ind. Ecol.* 10, 239–255.  
<https://doi.org/10.1162/108819806775545411>
- Jean-Claude Würmli, A., Verfasser Thomas Kägi, P., Dinkel, F., 2022. Ökologischer Nutzen des PET-Recycling in der Schweiz Ökologischer Vergleich von PET-Selektivsammlung mit der Verwertung in einer KVA CH im 2020.
- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 127, 221–232.  
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.09.005>
- Klotz, M., Haupt, M., Hellweg, S., 2022. Limited utilization options for secondary plastics may restrict their circularity. *Waste Manag.* 141, 251–270.  
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2022.01.002>

- Knappe, F., Reinhardt, J., Kauertz, B., Oetjen-dehne, R., Buschow, N., Ritthoff, M., Wilts, H., Lehmann, M., 2021. Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes.
- Ledsham, N., n.d. Engaging Consumers to Reduce and Recycle [WWW Document]. Sustain. Inst. by ERM. URL <https://www.sustainability.com/thinking/engaging-consumers-to-reduce-and-recycle/> (accessed 7.24.22).
- Mieg, H.A., 2005. Experteninterviews in den Umwelt- und Planungswissenschaften. Eine Einführung und Anleitung, Institute of Human-Environment Systems.
- Miliute-Plepiene, J., Hage, O., Plepys, A., Reipas, A., 2016. What motivates households recycling behaviour in recycling schemes of different maturity? Lessons from Lithuania and Sweden. *Resour. Conserv. Recycl.* 113, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.008>
- Mobilitätsschule, n.d. Leistung, Energie und Verbrauch – Mobilitätsschule – nachhaltig mobil [WWW Document]. URL <https://nachhaltigmobil.schule/leistung-energie-verbrauch/> (accessed 7.23.22).
- Morseletto, P., 2020. Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy. *J. Ind. Ecol.* 24, 763–773. <https://doi.org/10.1111/JIEC.12987>
- MyStromer AG, n.d. Fact sheet 1–23.
- Opensource.com, n.d. What is open source? | Opensource.com [WWW Document]. URL <https://opensource.com/resources/what-open-source> (accessed 8.2.22).
- Polymehr GmbH, 2015. Produktinformationen. *ABI Tech.* 36. <https://doi.org/10.1515/abitech-2016-0053>
- Precious Plastic, 2022. Build a Shredder Machine – Academy [WWW Document]. URL <https://community.preciousplastic.com/academy/build/shredder> (accessed 7.14.22).
- Rudolph, N., Kiesel, R., Aumnate, C., 2020. Understanding Plastics Recycling. Economic, Ecological, and Technical Profit Aspects of Plastic Waste Handling, *Understanding Plastics Recycling*.
- Santander, P., Cruz Sanchez, F.A., Boudaoud, H., Camargo, M., 2020. Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach. *Resour. Conserv. Recycl.* 154, 104531. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104531>
- Santini, K., 2020. Addressing the challenge of injection molding regrind - *Recycling Today* [WWW Document]. *Recycl. Today*. URL <https://www.recyclingtoday.com/article/addressing-the-challenge-of-injection-molding-regrind/> (accessed 7.27.22).
- SAS minimum, n.d. Portfolio | Le Pavé | Matériau d'écoconstruction [WWW Document]. URL <https://www.sasminimum.com/en/portfolio-en/#tabs%7C0> (accessed 7.27.22).
- Seyler, C., Sommerhalder, M., Wolfensberger, M., 2016. Bericht Module 3 + 4 Verwertung Kunststoffabfälle Schweiz im Auftrag des Runden Tisches Kunststoff unter der Leitung des BAFU mit Stellungnahmen der Mitglieder des Projektausschusses Runder Tisch Kunststoff. Bundesamt für Umwelt.
- Siltaloppi, J., Jähi, M., 2021. Toward a sustainable plastics value chain: Core conundrums and emerging solution mechanisms for a systemic transition. *J. Clean. Prod.* 315, 128113. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128113>
- Smithers, R., 2019. Dizzying array of recycling symbols “is confusing consumers” [WWW Document]. *Guard.* URL <https://www.theguardian.com/environment/2018/jul/30/dizzying-array-of-recycling-symbols-is-confusing-consumers> (accessed 7.24.22).

- Stucki, T., Wörter, M., 2021. Statusbericht der Schweizer Kreislaufwirtschaft – Erste repräsentative Studie zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft auf Unternehmensebene. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt und Circular Economy Switzerland. Berner Fachhochschule Wirtscha.
- Swiss Recycling, n.d. Sammlung von verschiedenen Kunststoffarten - Swiss Recycling [WWW Document]. URL <https://www.swissrecycling.ch/de/wertstoffe-wissen/wertstoffe/kunststoff> (accessed 5.19.22).
- SwissInfo SWI, 2018. Plastik in der Schweiz: Top beim Verbrauch, Flop beim Recycling [WWW Document]. URL [https://www.swissinfo.ch/ger/ressourcen\\_plastik-in-der-schweiz--top-beim-verbrauch--flop-beim-recycling/44085230](https://www.swissinfo.ch/ger/ressourcen_plastik-in-der-schweiz--top-beim-verbrauch--flop-beim-recycling/44085230) (accessed 3.13.22).
- United Nations, 1997. Glossary of environmental statistics.
- Vitra International AG, n.d. Eames Plastic Side Chair DSW | Offizieller Vitra Online Shop [WWW Document]. URL <https://www.vitra.com/de-li/living/product/details/eames-plastic-side-chair-dsw> (accessed 7.27.22).
- Volvo Schweiz, 2019. Ökologisches und leises 26-Tonnen-Elektro-Wertstoff-Sammelfahrzeug (EWS).
- Weber, J., n.d. Benchmark • Definition | Gabler Wirtschaftslexikon [WWW Document]. SpringerGabler. URL <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/benchmark-28542> (accessed 8.2.22).
- Webfleet, 2020. Dieserverbrauch von LKW im Vergleich [WWW Document]. URL [https://www.webfleet.com/de\\_de/webfleet/blog/so-viel-kraftstoff-verbrauchen-lkw/](https://www.webfleet.com/de_de/webfleet/blog/so-viel-kraftstoff-verbrauchen-lkw/) (accessed 7.23.22).
- Yuan, Z., Bi, J., Moriguchi, Y., 2006. The circular economy: A new development strategy in China. *J. Ind. Ecol.* 10, 4–8. <https://doi.org/10.1162/108819806775545321>
- Zhong, S., Pearce, J.M., 2018. Tightening the loop on the circular economy: Coupled distributed recycling and manufacturing with recyclebot and RepRap 3-D printing. *Resour. Conserv. Recycl.* 128, 48–58. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.09.023>

## 7 Glossar

Begriff	Beschreibung	Quelle
Rezyklat / Sekundärkunststoff / Sekundärmaterial	Sekundärrohstoff, Wertstoff; Werk-, Hilfs- oder Betriebsstoff, der durch Aufbereitungsvorgänge aus stofflichen Rückständen von Produktion oder Konsum gewonnen wird.	Gabler Wirtschaftslexikon (Günther, n.d.)
Primärkunststoff / Primärstoff	Primärrohstoff; Werk-, Hilfs- oder Betriebsstoff, der nicht aus stofflichen Rückständen, sondern aus natürlichen Ressourcen oder Vorprodukten gewonnen wird.	Gabler Wirtschaftslexikon (Günther, n.d.)
Sachbilanz	Die Sachbilanz macht quantitative Aussagen über den Rohstoffverbrauch und den Ausstoss von Schadstoffen in die Umwelt entlang des gesamten Lebenszyklus.	4 Phasen einer Ökobilanz (BAFU, 2018b)
Humankapital	Produktives Vermögen, das in Arbeit, Fähigkeiten und Wissen verkörpert ist.	Glossary of environmental statistics (United Nations, 1997)
Natürliche Ressourcen	Natürliche Güter (Rohstoffe), die in der Natur vorkommen und für die wirtschaftliche Produktion oder den Verbrauch genutzt werden können.	Glossary of environmental statistics (United Nations, 1997)
Nudges	Die Nudge-Theorie geht davon aus, dass durch Änderungen im Umfeld – oder Nudges – Menschen dazu gebracht werden können, bestimmte Entscheidungen zu treffen, ohne ihnen die Entscheidungsfreiheit zu nehmen.	(Ledsham, n.d.)
Open-Source	Der Begriff "Open Source" bezieht sich auf etwas, das von Menschen verändert und weitergegeben werden kann, weil sein Design öffentlich zugänglich ist.	What is open source? (Opensource.com, n.d.)
Benchmark	Vergleichswert, der in einem Benchmarking-Prozess (Benchmarking) gewonnen wird. Benchmarks regen zum gegenseitigen Lernen an und besitzen gegenüber reinen Zielwerten zumeist Akzeptanzvorteile.	Gabler Wirtschaftslexikon (Weber, n.d.)
Systemgrenzen	Die Systemgrenze zeigt die Grenze zwischen dem betrachteten System und dem Systemumfeld auf.	(FHNW, 2020)
Spritzgussverfahren	Urformverfahren, das hauptsächlich in der Kunststoffverarbeitung eingesetzt wird. Mit diesem Verfahren lassen sich wirtschaftlich verwendbare Formteile in großer Stückzahl herstellen.	Lexikon (Chemie.de, n.d.)
Pressenverfahren	Formpressen ist ein Herstellungsverfahren für Kunststoffe, das in der Regel für grössere, wenig detaillierte Bauteile verwendet wird.	(Hopmann and Michaeli, 2017)
Extrusion	Der Vorgang, bei dem etwas durch Pressen oder Herausdrücken geformt wird, insbesondere durch eine kleine Öffnung.	(Cambridge Dictionary, n.d.)
Wirkungskategorien	Eine Wirkungskategorie fasst die Umweltwirkung der einzelnen Stoffe zusammen zu einem Umweltthema wie z.B. Klimaerwärmung.	4 Phasen einer Ökobilanz (BAFU, 2018b)

# Anhang

## A Umfrage Gemüsemarkt Biel

### A.1 Deutsche Umfragestatistik

#### 19867 Dezentrales Kunststoffrecycling in Biel: Untersuchung der Bereitschaft der Bevölkerung am Projekt mitzumachen

Die Teilnehmer können nicht teilnehmen.

23.06.2022 16:19:47

#### Legende

##### Frage: Mit welchem Geschlecht identifizierst Du dich?

	ANZAHL	PROZENT	
weiblich (1)	10	37.04%	
männlich (2)	15	55.56%	
nicht binär (4)	2	7.41%	
weiss nicht (5)	0	0.00%	
(6) abc	0	0.00%	
.			
GESAMT	27		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	1.78		
N = 36   n = 28   SYS-MISSING = 8			

##### Frage: Zu welcher der nachfolgenden Alterskategorien gehörst Du?

	ANZAHL	PROZENT	
17 oder jünger (1)	0	0.00%	
18-22 (2)	5	18.52%	
23-35 (3)	3	11.11%	
36-49 (4)	5	18.52%	
50-65 (5)	10	37.04%	
66 oder älter (6)	4	14.81%	
.			
GESAMT	27		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	4.19		
N = 36   n = 28   SYS-MISSING = 8			

##### Frage: Was ist Dein höchster Schulabschluss?

	ANZAHL	PROZENT	
Oberstufe (1)	5	18.52%	
Matur oder gleichwertiger Abschluss (2)	7	25.93%	
Studium ohne Abschluss (3)	1	3.70%	
Bachelor-Abschluss (4)	8	29.63%	
Master-Abschluss (5)	5	18.52%	
Doktor-Grad (6)	1	3.70%	
.			
GESAMT	27		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	3.15		

N = 36 | n = 28 | SYS-MISSING = 8

**Frage: Welche Abfalltrennungen hast Du zu Hause?**

	ANZAHL	PROZENT	
Papier/Karton	23	85.19%	
Metal	20	74.07%	
PET	22	81.48%	
Kompost	22	81.48%	
Plastiksammelsack	17	62.96%	

N = 36 | n = 27 | SYS-MISSING = 9

**Frage: Wer in Deinem Haushalt ist vor allem für die Abfalltrennung verantwortlich?**

	ANZAHL	PROZENT	
Ich (1)	12	48.00%	
Falls diese Person nicht du bist, dann gib bitte das Geschlecht und Alter der verantwortlichen Person ein (2) <b>[abc]</b>	0	0.00%	
Nicht bestimmt, es machen alle mit (4)	13	52.00%	
GESAMT	25		
ungültig (fehlend)	2		
Mittelwert	2.56		

N = 36 | n = 27 | SYS-MISSING = 9

**Frage: Wie wichtig ist Dir eine saubere Trennung der Abfälle?**

ANTWORTOPTION	ANZAHL	PROZENT	
10	15	55,6	
9	2	7,4	
8	6	22,2	
7	1	3,7	
5	1	3,7	
4	1	3,7	
0	1	3,7	
Mittelwert	8,593		

**Frage: Wie gut trennst du deine Abfälle?**

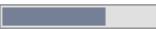
	ANZAHL	PROZENT	
Ich trenne alles was ich kann und gebe mir mühe alles sauber (gewaschen & ohne Etiketten, Kleber etc.) zu entsorgen (1)	11	42.31%	
Ich trenne alles aber könnte es mit etwas mehr Aufwand sauberer entsorgen (2)	14	53.85%	
Ich trenne das was praktisch ist und den Rest nicht (3)	1	3.85%	
Ich trenne nur das Wenigste aber würde gerne mehr machen (4)	0	0.00%	
Ich trenne nur das Wenigste (5)	0	0.00%	
GESAMT	26		
ungültig (fehlend)	1		

Mittelwert

1.62

N = 36 | n = 27 | SYS-MISSING = 9

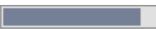
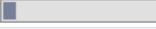
**Frage: Bist Du zufrieden mit Deiner Abfalltrennung oder würdest Du gerne mehr machen? Bitte begründe Deine Antwort.**

	ANZAHL	PROZENT	
Ja, ich bin zufrieden. (1)	18	69.23%	
Nein, ... (3) <b>abc</b>	8	30.77%	
.			
GESAMT	26		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	1.62		
N = 36   n = 27   SYS-MISSING = 9			

**Frage: Würdest Du gerne mehr Informationen dazu bekommen, was mit Deinem "Recycling-Abfall" passiert?**

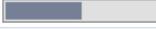
	ANZAHL	PROZENT	
Ja, es werden nicht genug Informationen gegeben. (1)	20	74.07%	
Es ist mir egal. (2)	2	7.41%	
Nein, ich habe genug Informationen. (3)	5	18.52%	
.			
GESAMT	27		
ungültig (fehlend)	0		
Mittelwert	1.44		
N = 36   n = 27   SYS-MISSING = 9			

**Frage: Angenommen du wüsstest genau wohin dein Plastikabfall geht und was damit unternommen wird. Wäre das eine zusätzliche Motivation, den Abfall sorgfältiger zu trennen?**

	ANZAHL	PROZENT	
Ja (1)	18	90.00%	
Nein (2)	2	10.00%	
.			
GESAMT	20		
ungültig (fehlend)	0		
Mittelwert	1.10		
N = 36   n = 20   SYS-MISSING = 16			

**Frage: Welche Aussagen zu Plastik treffen für dich zu?**

*Plastik ist ein...*

	ANZAHL	PROZENT	
minderwertiges Material	4	14.81%	
hochwertiges Material	14	51.85%	
wiederverwendbares Material	18	66.67%	
wegwerfbares Material	0	0.00%	
.			
N = 36   n = 27   SYS-MISSING = 9			

**Frage: Eine der grossen Herausforderungen beim Plastikrecycling ist das Trennen**

und Waschen der verschiedenen Plastiksarten. Wenn das nicht sauber gemacht wird, ist es unmöglich, die gleiche Plastikqualität wieder herzustellen. Das Recyclingprojekt der ENGA funktioniert nur unter einer Voraussetzung: Die Konsumenten müssen ihren Plastik in den verschiedenen Sorten sortiert und idealerweise gewaschen abgeben. Würdest Du diesen Aufwand betreiben, um das lokale Plastikrecycling zu fördern?

	ANZAHL	PROZENT	
Ja (1)	19	73.08%	
Nein (2)	0	0.00%	
Unter gewissen Voraussetzungen (3)	7	26.92%	
GESAMT	26		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	1.54		
N = 36   n = 27   SYS-MISSING = 9			

**Frage: Gibt es Voraussetzungen, welche Dich dazu motivieren würden, Deinen Plastikabfall sorgfältig zu trennen?**

*Wähle eine oder mehrere Antworten*

	ANZAHL	PROZENT	
Zugang zur Community	5	18.52%	
Anleitung zur Identifikation der Plastiksarten	12	44.44%	
Eine transparente Kommunikation (was passiert mit meinem Plastikabfall?)	15	55.56%	
Erhalten einer Gegenleistung	0	0.00%	
Ein zur Verfügung gestelltes Sammelsystem für zu Hause (mit z.B. Säcken oder Boxen)	14	51.85%	
Das Abholen des Plastiks bei mir zu Hause	11	45.83%	
N = 36   n = 27   SYS-MISSING = 9			

**Frage: Was für eine Gegenleistung würdest Du Dir wünschen?**

*Wähle eine oder mehrere Antworten*

	ANZAHL	PROZENT	
Erhalten eines Artikels meiner Wahl aus dem recycelten Plastik	0	0.00%	
Die Möglichkeit an Events teilzunehmen	0	0.00%	
Gratisführung der Produktion	0	0.00%	
Zugang zu Workshops rund ums Plastikrecycling	0	0.00%	
N = 36   n = 0   SYS-MISSING = 36			

## A.2 Französische Umfragestatistik

### 20587 Recyclage décentralisé de plastiques à Bienne : enquête sur la volonté de la population de participer au projet

Die Teilnehmer können nicht teilnehmen.

24.07.2022 20:31:49

#### Legende

#### Frage: Quel est ton sexe ou genre sexuel actuel?

	ANZAHL	PROZENT	
feminin (1)	4	100.00%	
masculin (2)	0	0.00%	
non-binaire (4)	0	0.00%	
je ne sais pas (5)	0	0.00%	
(6) abc	0	0.00%	
GESAMT	4		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	1.00		
N = 10   n = 5   SYS-MISSING = 5			

#### Frage: À quelle catégorie d'âge appartiens-tu ?

	ANZAHL	PROZENT	
17 ans ou moins (1)	0	0.00%	
18-22 ans (2)	0	0.00%	
23-35 ans (3)	3	75.00%	
36-49 ans (4)	0	0.00%	
50-65 ans (5)	1	25.00%	
66 ans ou plus (6)	0	0.00%	
GESAMT	4		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	3.50		
N = 10   n = 5   SYS-MISSING = 5			

#### Frage: Quel est ton plus haut niveau de scolarité ?

	ANZAHL	PROZENT	
Secondaire (1)	0	0.00%	
Maturité ou diplôme équivalent (2)	0	0.00%	
Études sans diplôme (3)	0	0.00%	
Diplôme de bachelor (4)	2	50.00%	
Diplôme de master (5)	2	50.00%	
Diplôme de docteur (6)	0	0.00%	
GESAMT	4		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	4.50		

N = 10 | n = 5 | SYS-MISSING = 5

**Frage: Quels types de tri de déchets as-tu chez toi?**

	ANZAHL	PROZENT	
Papier / carton	4	80.00%	
Metal	4	80.00%	
PET	4	80.00%	
compost	4	80.00%	
Sac de collecte de plastique	4	80.00%	

N = 10 | n = 5 | SYS-MISSING = 5

**Frage: Qui, dans ton ménage, est principalement responsable du tri des déchets ?**

	ANZAHL	PROZENT	
Moi (1)	0	0.00%	
Si cette personne n'est pas toi, indique s'il te plaît le sexe et l'âge de la personne responsable. (2) <b>abc</b>	0	0.00%	
Pas déterminé, tout le monde participe (4)	4	100.00%	
GESAMT	4		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	4.00		

N = 10 | n = 5 | SYS-MISSING = 5

**Frage: <span lang="DE-CH">Quelle importance accordes-tu à un tri propre des déchets ?</span>**

ANTWORTOPTION	ANZAHL	PROZENT	
10	2	40,0	
9	1	20,0	
7	1	20,0	
0	1	20,0	
Mittelwert	7,200		

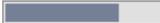
**Frage: Comment tries-tu tes déchets?**

	ANZAHL	PROZENT	
Je trie tout ce que je peux et je m'efforce de tout jeter proprement (lavé et sans étiquettes, colle, etc.). (1)	2	50.00%	
Je trie tout mais je pourrais faire un tri plus propre avec un peu plus d'effort (2)	2	50.00%	
Je trie ce qui est pratique mais pas le reste (3)	0	0.00%	
Je ne trie que le minimum mais j'aimerais en faire plus (4)	0	0.00%	
Je ne trie que le minimum (5)	0	0.00%	
GESAMT	4		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	1.50		

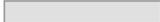
N = 10 | n = 5 | SYS-MISSING = 5

**Frage: Es-tu satisfait de ton tri des déchets ou aimerais-tu en faire plus ? Merci de**

**justifier ta réponse en cas de non-satisfaction.**

	ANZAHL	PROZENT	
Oui, je suis satisfait. (1)	1	25.00%	
Non, ... (3) abc	3	75.00%	
GESAMT	4		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	2.50		
N = 10   n = 5   SYS-MISSING = 5			

**Frage: Aimerais-tu recevoir plus d'informations sur ce qui se passe avec tes "déchets recyclés" ?**

	ANZAHL	PROZENT	
Oui, je ne reçois pas assez d'informations (1)	3	75.00%	
Ça m'est égal (2)	1	25.00%	
Non, j'ai assez d'informations (3)	0	0.00%	
GESAMT	4		
ungültig (fehlend)	1		
Mittelwert	1.25		
N = 10   n = 5   SYS-MISSING = 5			

**Frage: Supposons que tu saches exactement où vont tes déchets plastiques et ce que l'on en fait. Cela serait-il une motivation supplémentaire pour trier plus soigneusement tes déchets ?**

	ANZAHL	PROZENT	
Oui (1)	2	66.67%	
Non (2)	1	33.33%	
GESAMT	3		
ungültig (fehlend)	0		
Mittelwert	1.33		
N = 10   n = 3   SYS-MISSING = 7			

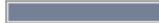
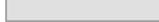
**Frage: Quelles sont les affirmations relatives au plastique qui s'appliquent selon toi ?**

*Le plastique est un...*

	ANZAHL	PROZENT	
matériel de qualité inférieure	2	50.00%	
matériel de haute qualité	2	50.00%	
matériel réutilisable	4	100.00%	
matériel jetable	2	50.00%	
N = 10   n = 4   SYS-MISSING = 6			

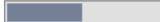
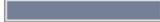
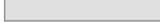
**Frage: L'un des grands défis du recyclage du plastique est la séparation et le lavage des différents types de plastique. Si cela n'est pas fait proprement, il est impossible de reproduire la même qualité de plastique. Le projet de recyclage de l'ENGA ne fonctionne qu'à une condition : les consommateurs doivent rapporter**

**leur plastique trié dans les différentes sortes et, idéalement, lavé. Est-ce que tu ferais cet effort pour promouvoir le recyclage local du plastique ?**

	ANZAHL	PROZENT	
Oui (1)	4	100.00%	
Non (2)	0	0.00%	
Sous certaines conditions (3)	0	0.00%	
GESAMT	4		
ungültig (fehlend)	0		
Mittelwert	1.00		
N = 10   n = 4   SYS-MISSING = 6			

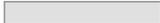
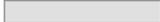
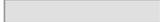
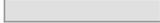
**Frage: Y a-t-il des conditions qui te motiveraient à trier soigneusement tes déchets plastiques ?**

*Choisis une ou plusieurs réponses*

	ANZAHL	PROZENT	
Accès à la communauté	2	50.00%	
Guide pour l'identification des types de plastique	2	50.00%	
Une communication transparente (que deviennent mes déchets plastiques ?)	4	100.00%	
Obtention d'une contrepartie	0	0.00%	
Un système de collecte mis à disposition pour la maison (p. ex. sacs ou boîtes)	1	25.00%	
La collecte du plastique à mon domicile	1	25.00%	
N = 10   n = 4   SYS-MISSING = 6			

**Frage: Quel genre de contrepartie souhaiterais-tu ?**

*Choisis une ou plusieurs réponses*

	ANZAHL	PROZENT	
Obtenir un article de mon choix en plastique recyclé	0	0.00%	
La possibilité de participer à des événements	0	0.00%	
Visite guidée gratuite de la production	0	0.00%	
Accès à des ateliers sur le recyclage du plastique	0	0.00%	
N = 10   n = 0   SYS-MISSING = 10			

### A.3 Poster für Märit

The diagram illustrates a circular recycling process. It starts with 'PRODUKTION' (Production) at the bottom, where plastic bottles are made. These go to 'KONSUMENT' (Consumer) on the right. From the consumer, bottles are taken to a 'SAMMELSTELLE' (Collection point) at the top right. From there, they are transported to 'ZWISCHENLAGERUNG AARBERG' (Intermediate storage) at the top left. The bottles then go to 'SORTIERANLAGE ÖSTERREICH' (Sorting plant Austria) on the left, and finally to 'INNORECYCLING THURGAU' (InnoRecycling Thurgau) at the bottom left. From there, the recycled plastic is sent back to 'PRODUKTION' (Production) at the bottom. The central part of the diagram features 'ENGA GMBH' with a large recycling symbol. A QR code labeled 'SCAN ME!' is located at the bottom right.

**n|w** Fachhochschule Nordwestschweiz  
Hochschule für Life Sciences

**ENGA** GmbH

PRECIOUS PLASTIC

IN BIEL  
GEBRAUCHT  
GESAMMELT  
REZYKLIERT UND  
WIEDERVERWENDET

ZWISCHENLAGERUNG  
AARBERG

SAMMELSTELLE

INNORECYCLING  
THURGAU

ENGA GMBH

KONSUMENT

SORTIERANLAGE  
ÖSTERREICH

INNORECYCLING  
THURGAU

PRODUKTION

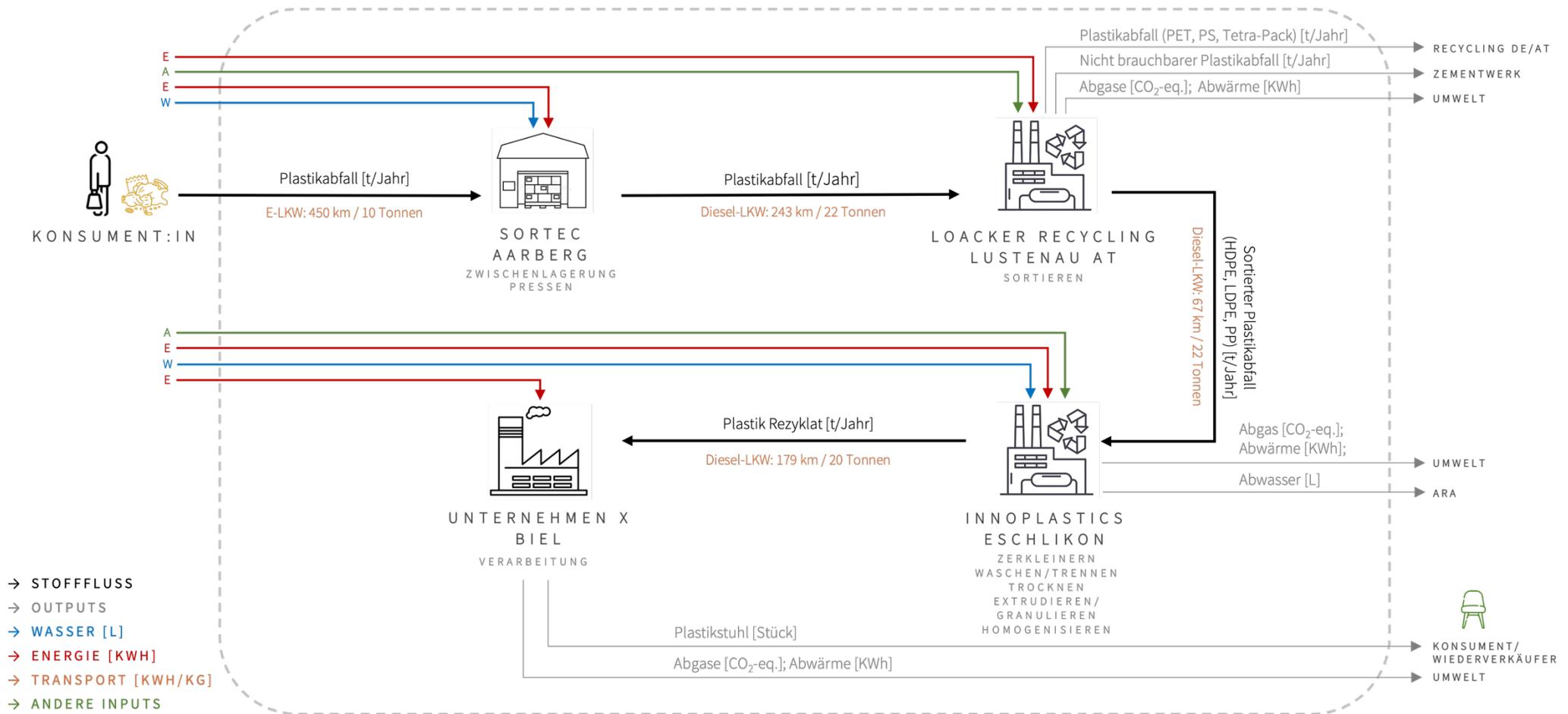
SCAN ME!

A.4 Stand für die Umfrage

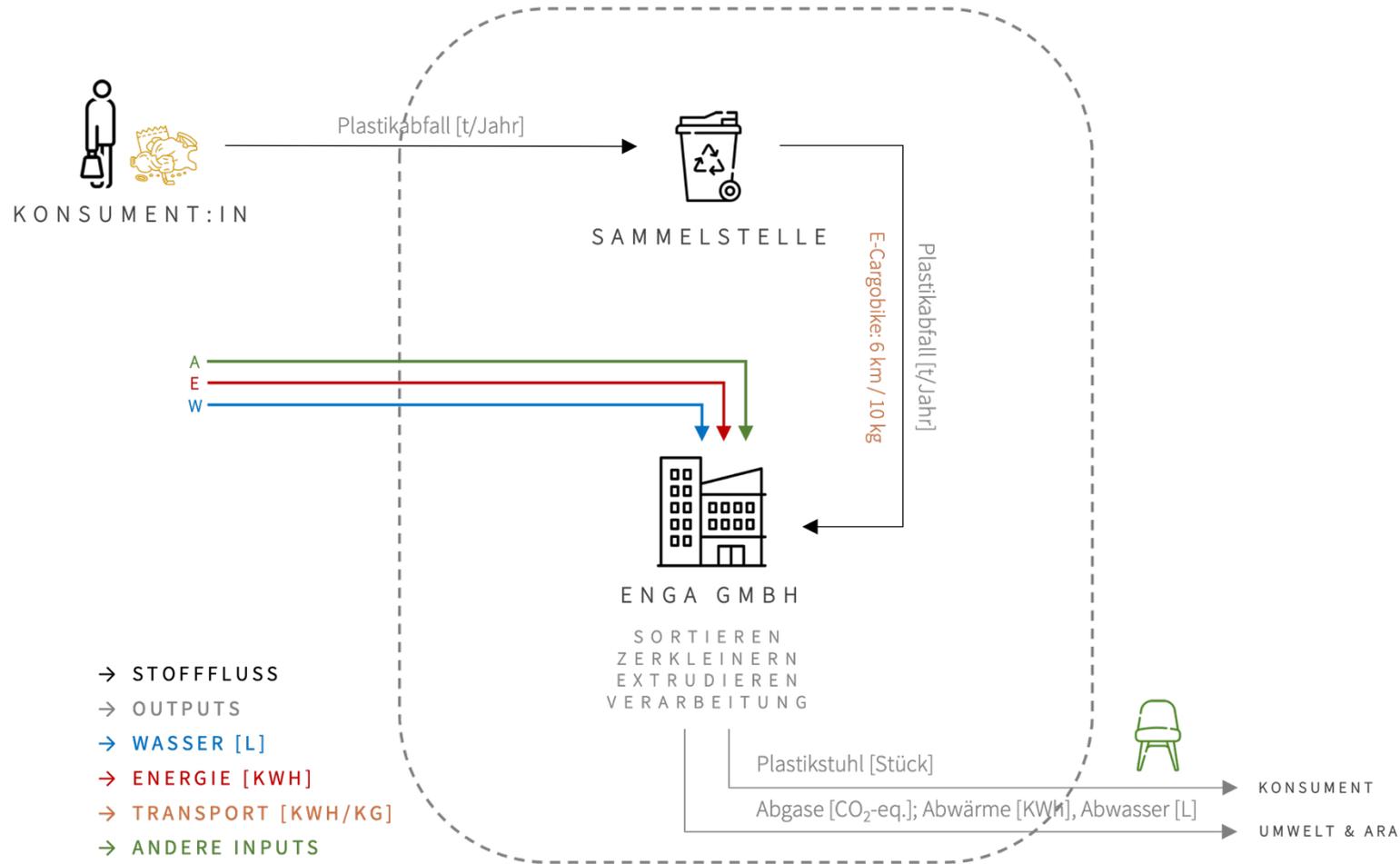


# B Ökobilanzierung

## B.1 Stofffluss zentrales Kunststoffrecycling



## B.2 Stofffluss dezentrales Kunststoffrecycling



### B.3 Datenherkunft für LCA

#### Daten für zentraler Recyclingprozess

Beschreibung	Wert	Bemerkungen / Berechnungen	Herkunft
Energieverbrauch Pressen	7.5 kWh/t Kst	CH-Strommix	Bericht Module 3 + 4 Verwertung Kunststoffabfälle Schweiz (Seyler et al., 2016)
Energieverbrauch Sortieren (1)	70 kWh/t Kst	CH-Strommix	InnoPlastics AG, Herr Markus Tonner
Energieverbrauch Sortieren (2)	75 kWh/t Kst	CH-Strommix	Bericht Module 3 + 4 Verwertung Kunststoffabfälle Schweiz (Seyler et al., 2016)
Energieverbrauch Sortieren (3)	80 kWh/t Kst	CH-Strommix	Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes (Knappe et al., 2021)
Energieverbrauch Recycling (1)	800 kWh/t Pellets	AT-Strommix	InnoPlastics AG, Herr Markus Tonner
Energieverbrauch Recycling (2)	1000 kWh/t Pellets	AT-Strommix	Bericht Module 3 + 4 Verwertung Kunststoffabfälle Schweiz (Seyler et al., 2016)
Wasserverbrauch Sortieren	500 L/t Kst	60% Grundwasser 40% Oberflächenwasser	Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes (Knappe et al., 2021)
Transport: Sammeltour & Biel – Aarberg	0.085 kWh/Kg	E-LKW (GG: 27t; NL: 10,7t) 190 kWh / 100 km	Stadt Biel, Herr Fausel (Volvo Schweiz, 2019)
Transport: Aarberg – Lustenau AT	5'346 tkm → 0.243 tkm/kg	$\text{tkm/kg} = \frac{5'346 \text{ tkm}}{22'000 \text{ kg}}$ LKW (Euro 5; Nutzlast: 24t) Annahme: 22t Ladung	Sortec Aarberg AG, Herr Roger Garo & Google Maps
Transport: Lustenau AT – Eschlikon	1'474 tkm → 0.067 tkm/kg	$\text{tkm/kg} = \frac{1'474 \text{ tkm}}{22'000 \text{ kg}}$ LKW (Euro 5; Nutzlast: 24t) Annahme: 22t Ladung	InnoPlastics AG, Frau Anja Raaber & Google Maps
Transport: Eschlikon – Biel	3'400 tkm → 0.17 tkm/kg	$\text{tkm/kg} = \frac{3'400 \text{ tkm}}{20'000 \text{ kg}}$ LKW (Euro 5; Nutzlast: 24t) Annahme: 20t Ladung	Schätzung & Google Maps

## Daten für dezentraler Recyclingprozess

Beschreibung	Wert	Bemerkungen / Berechnungen	Herkunft
Energieverbrauch Shredder (feine Flakes)	0.152 kWh/kg Kst	$\frac{\text{Durchschnittsleistung [kW]}}{\text{Materialmenge pro Stunde } \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>– Annahme: Durchschnittsleistung von 75%</li> <li>– Materialmenge pro Stunde variiert je nach Grösse der Flakes</li> </ul>	«Build a shredder machine» (Precious Plastic, 2022) & Messungen am Shredder
Energieverbrauch Waschanlage	0.033 kWh/kg	$\frac{\text{Wasserpumpe [kW]} + \text{Motor [kW]}}{\text{Materialmenge pro Stunde } \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]}$ Einstufige Kreiselpumpe Jetpumpe 250W 2100 L/h 3,5 Bar	Schätzungen aufgrund von technischen Daten
Wasserverbrauch Waschanlage	1.6 L/kg	$\frac{\text{Behälter [L]}}{\text{Betriebszeit bis Wechsel [h]}}$ $\text{Materialmenge pro Stunde } \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$ <ul style="list-style-type: none"> <li>– Geschlossener Wasserkreislauf mit Filter</li> <li>– Wasserwechsel nach 10h Betriebszeit</li> </ul>	Schätzungen aufgrund von technischen Daten
Energieverbrauch Spritzgiessen der Kunststoffschale für Stuhl	0.188 kWh/Stuhl	$\Delta T [K] * \text{Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]} * \text{Gewicht der Schale [kg]}$ Annahme: 30% Verluste	Technisches Datenblatt PP (Polymehr GmbH, 2015)
Energieverbrauch Einschmelzen der Kunststoffplatte	0.902 kWh/Platte	$\Delta T [K] * \text{Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]} * \text{Gewicht der Kunststoffplatte [kg]}$ Annahme: 30% Verluste	Technisches Datenblatt PP (Polymehr GmbH, 2015)
Transport: Durchschnittliche Strecke für Abholung in Biel	0.0045 kWh/kg	$\frac{\text{Energieverbrauch [kWh]}}{\text{Ladung pro Anhänger [kg]}}$ Transport mit E-Cargobike	(MyStromer AG, n.d.)

## Allgemein verwendete Daten

Beschreibung	Wert	Herkunft
Gewicht Kunststoffschale für Stuhl	1.9 kg	Gewogen von originalem Vitra Stuhl (siehe Abbildung 7)
Masse für Kunststoffplatte	1m x 1m x 10mm (Dichte: 0.91) = 9.1 kg	Daten der ENGA GmbH
Dichte von Polypropylen	0.91 kg/dm <sup>3</sup>	Technisches Datenblatt PP (Polymehr GmbH, 2015)

## Daten für den Vergleich des Energieverbrauches beim Transport

Beschreibung	Wert	Bemerkungen / Berechnungen	Herkunft
Dieserverbrauch: Transport der LKWs mit Verbrennungsmotor (zentral) (1)	0.015 L/kg PP	$\frac{\text{Dieselverbrauch} \left[ \frac{\text{L}}{\text{tkm}} \right]}{1000} * \text{Strecke [km]}$ 1 Liter Diesel = 0.83 kg <i>SimaPro</i> Wert: 0.037 kg Diesel/tkm	Der Dieserverbrauch in kg/tkm wurde vom verwendeten <i>SimaPro</i> Prozess entnommen.
Energieverbrauch: Transport der LKWs mit Verbrennungsmotor (zentral) (1)	0.148 kWh/kg PP	$\text{Dieselverbrauch} \left[ \frac{\text{L}}{\text{kg PP}} \right] * 9.8 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{L Diesel}} \right]$	Heizwert von Diesel: (Mobilitätsschule, n.d.)
Dieserverbrauch: Transport der LKWs mit Verbrennungsmotor (zentral) (2)	0.0087 L/kg PP	$\frac{\text{Dieselverbrauch} \left[ \frac{\text{L}}{100\text{km}} \right]}{100} * \text{Weg [km/kg]}$	Benchmark-Vergleich (Webfleet, 2020)
Energieverbrauch: Transport der LKWs mit Verbrennungsmotor (zentral) (2)	0.085 kWh/kg PP	$\text{Dieselverbrauch} \left[ \frac{\text{L}}{\text{kg PP}} \right] * 9.8 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{L Diesel}} \right]$	Heizwert von Diesel: (Mobilitätsschule, n.d.)

## B.4 Übersicht der UBP und der verschiedenen Wirkungskategorien

UBP für funktionelle Einheit: Kunststoffschale für Stuhl

Wirkungskategorie	Einheit	Dezentrales Recycling	relativer Anteil	Zentrales Recycling	relativer Anteil
<b>Summe</b>	<b>UBP</b>	<b>90.44</b>	100.0%	<b>543.25</b>	100.0%
Klimaerwärmung	UBP	21.27	23.5%	174.14	32.1%
Deponie von radioaktiven Abfälle	UBP	31.32	34.6%	125.51	23.1%
Luftschadstoffe und Feinstaub	UBP	13.39	14.8%	92.93	17.1%
Energieressourcen	UBP	8.97	9.9%	45.92	8.5%
Schwermetalle in die Luft	UBP	5.86	6.5%	32.56	6.0%
Krebserregende Stoffe in die Luft	UBP	1.23	1.4%	12.05	2.2%
Mineralische Rohstoffe	UBP	1.34	1.5%	11.83	2.2%
Wasserschadstoffe	UBP	1.87	2.1%	11.74	2.2%
Schwermetalle im Wasser	UBP	1.71	1.9%	11.29	2.1%
Schwermetalle in den Boden	UBP	1.62	1.8%	10.39	1.9%
POP im Wasser	UBP	0.15	0.2%	5.42	1.0%
Landnutzung	UBP	0.44	0.5%	4.44	0.8%
Deponie von nicht radioaktiven Abfällen	UBP	0.30	0.3%	1.85	0.3%
Radioaktive Stoffe im Wasser	UBP	0.35	0.4%	1.40	0.3%
Zerstörung der Ozonschicht	UBP	0.14	0.2%	0.77	0.1%
Pestizide in den Boden	UBP	0.17	0.2%	0.74	0.1%
Wasserressourcen	UBP	0.31	0.3%	0.27	0.0%

UBP für funktionelle Einheit: Kunststoffplatte

Wirkungskategorie	Einheit	Dezentrales Recycling	relativer Anteil	Zentrales Recycling	relativer Anteil
<b>Summe</b>	<b>UBP</b>	<b>290.61</b>	100.0%	<b>2531.91</b>	100.0%
Klimaerwärmung	UBP	67.18	23.1%	816.90	32.3%
Deponie von radioaktiven Abfälle	UBP	98.72	34.0%	575.72	22.7%
Luftschadstoffe und Feinstaub	UBP	44.41	15.3%	435.38	17.2%
Energieressourcen	UBP	28.33	9.7%	212.71	8.4%
Schwermetalle in die Luft	UBP	20.14	6.9%	152.35	6.0%
Krebserregende Stoffe in die Luft	UBP	4.29	1.5%	56.92	2.2%
Mineralische Rohstoffe	UBP	4.32	1.5%	55.68	2.2%
Wasserschadstoffe	UBP	6.00	2.1%	54.80	2.2%
Schwermetalle im Wasser	UBP	5.66	1.9%	52.83	2.1%
Schwermetalle in den Boden	UBP	5.36	1.8%	48.65	1.9%
POP im Wasser	UBP	0.49	0.2%	25.84	1.0%
Landnutzung	UBP	1.40	0.5%	20.92	0.8%
Deponie von nicht radioaktiven Abfällen	UBP	0.97	0.3%	8.67	0.3%
Radioaktive Stoffe im Wasser	UBP	1.10	0.4%	6.40	0.3%
Zerstörung der Ozonschicht	UBP	0.44	0.2%	3.58	0.1%
Pestizide in den Boden	UBP	0.54	0.2%	3.42	0.1%
Wasserressourcen	UBP	1.27	0.4%	1.16	0.0%

UBP für den Transport pro kg PP

Wirkungskategorie	Einheit	Transport pro kg PP dezentral	Transport pro kg PP zentral
<b>Summe</b>	<b>UBP</b>	<b>1.03</b>	<b>105.04</b>
Global warming	UBP	0.22	40.48
Main air pollutants and PM	UBP	0.14	23.49
Heavy metals into air	UBP	0.13	8.21
Radioactive waste to deposit	UBP	0.32	6.35
Energy resources	UBP	0.09	6.12
Water pollutants	UBP	0.01	4.26
Mineral resources	UBP	0.02	3.82
Heavy metals into water	UBP	0.02	2.78
Heavy metals into soil	UBP	0.03	2.67
Carcinogenic substances into air	UBP	0.02	2.57
POP into water	UBP	0.00	2.52
Land use	UBP	0.00	1.32
Non radioactive waste to deposit	UBP	0.00	0.41
Ozone layer depletion	UBP	0.00	0.13
Radioactive substances into water	UBP	0.00	0.07

## B.5 Protokoll des Besuches der Sortec Aarberg AG mit Herr Roger Garo

Für LCA relevante Informationen:

- Kunststoff geht direkt von der Sortec auf Österreich (Prozessbeschreibung)
- Speditionsunternehmen liefert den Kunststoffabfall nach Österreich mit Euro 5 24t Sattelschlepper (LCA)

Allgemeine Informationen

- Sammelsack wurde von Roger Garo der Sortec AG injiziert (Zentraler Prozess)
- Als er das Projekt des Sammelsacks injiziert hat, sagten ihm alle, dass es nicht ökonomisch ist. Er hat an den ökologischen Zweck dieses Projekts geglaubt und daran gearbeitet, bis es zu einem ökonomisch rentablen Geschäft wurde.
- Schön zu sehen, dass es Leute gibt in der Recyclingindustrie, die einen ganzheitlichen Ansatz verfolgen und über die ökonomischen Aspekte hinausdenken und langfristig dafür belohnt werden.
- CO<sub>2</sub> ist gebunden, solange es im Kunststoff ist, und wird in die Atmosphäre gegeben, wenn es verbrannt wird.
- Wichtig, dass der Kunststoff ins Zementwerk geht und nicht in die KVA, da einen grösseren Anteil der Wärme genutzt wird.
- Ökobilanz: Recycling verursacht halb so viel Emissionen als Verwendung von Neu-Kunststoff
- Preis des Rezyklat wird vom Preis des Neu-Kunststoffs reguliert. Das heisst, die Wirtschaftlichkeit des Kunststoffrecycling hängt stark vom Marktpreis des Neu-Kunststoff ab.
- Selbst wenn es recycelbar ist, bestimmt der Markt, ob es nutzbar ist oder nicht.
- In der Schweiz rentiert sich das Bauen einer Sortieranlage wie diese in Österreich aufgrund der Kunststoffabfallmengen nicht.
- Es gibt gewisse Hersteller, welche bei der Produktion von Kunststoffobjekten die gleichen Gussteile brauchen für unterschiedliche Kunststoffe. Dies resultiert dann in Produkten, die mit dem falschen Recyclinglogo angeschrieben sind.