

2017

Gemischte Sammlung von
Kunststoffen aus Haushalten

Monitoring der Pilotphase des KUH-Bag Systems



Auftraggeber

Amt für Umwelt (AfU) Kanton Thurgau

Abteilung Abfall und Boden

8500 Frauenfeld

Mit finanzieller Unterstützung der Abfallzweckverbände KVA TG und ZAB.

Begleitgruppe

Martin Eugster, Niklaus Maurer (AfU TG)

Peter Steiner, Lorenz Lipp (KVA TG)

Claudio Bianculli, Urs Corradini, Martin Stäheli (ZAB)

Auftragnehmer

Empa - Materials Science & Technology

Abteilung Technologie und Gesellschaft

Lerchenfeldstrasse 5

9014 St. Gallen

Autoren

Michael Gasser, Heinz Böni, Patrick Wäger

Zitiervorschlag

Gasser, Michael; Böni, Heinz; Wäger, Patrick, 2017. Gemischte Sammlung von Kunststoffen aus Haushalten – Monitoring der Pilotphase des KUH-Bag Systems.

<https://www.dora.lib4ri.ch/empa/islandora/object/empa:15032>

Zusammenfassung

Im Schweizer Siedlungsabfall fallen jährlich rund 175'000 t Kunststoffe an. Das entspricht 22% der Gesamtmenge der Schweizer Kunststoffabfälle, welche bisher noch wenig stofflich verwertet (rezykliert) werden. Wie Systeme im Ausland zeigen, ist eine gemischte Sammlung von Kunststoffen aus Haushalten grundsätzlich für ein Recycling möglich.

Könnte eine hochwertige Verwertung solcher Kunststoffabfälle sichergestellt werden, würde dadurch ein wichtiger Beitrag zur Ressourcenschonung geleistet. Ökobilanzen zeigen, dass gemischte Kunststoffsammlungen einen Beitrag zur Reduktion der Umweltbelastung, insbesondere zur Reduktion von CO₂-Emissionen, leisten können.

Die Einführung von gemischten Kunststoffsammlungen könnte Auswirkungen auf die Verwertung der restlichen Siedlungsabfälle sowie bestehender Separatsammelsysteme haben. Kunststoffe sind volumenmässig ein bedeutender Anteil der Siedlungsabfälle. Somit tragen sie in der heutigen volumenbasierten Gebührenstruktur (Gebührensäcke) einen überproportionalen Teil zu den KVA-Gebühren bei, der bei einer Auskopplung wegfallen würde. Eine gemischte Sammlung soll etablierte Separatsammelsysteme wie das der PET-Getränkeflaschen nicht konkurrieren sondern ergänzen, womit der bestehende Umweltnutzen und der teilweise geschlossene Kreislauf dieser Sammlung weiterbestehen kann.

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von gemischten Kunststoffsammlungen lanciert. Eine Erfassung und Prüfung dieser Sammlungen ist notwendig, um eine hochwertige Verarbeitung und damit einen Umweltnutzen zu garantieren und um deren Auswirkungen auf die bestehenden Abfallverwertungswege abzuschätzen, zu beurteilen und falls notwendig abzufedern.

Ziel dieser Arbeit war es, das KUH¹-Bag System als Beispiel einer gemischten Kunststoffsammlung aus Haushalten und während einer zweijährigen Pilotphase (Oktober 2015 – September 2017) mengen- und qualitätsmässig zu erfassen und zu beurteilen. Das KUH-Bag System wurde von den Abfallzweckverbänden ZAB Bazenheid und KVA TG in ihren jeweiligen Einzugsgebieten in Zusammenarbeit mit dem Amt für Umwelt, Kanton Thurgau, gestartet. Es eignet sich gut dafür, nicht nur die Verarbeitung, sondern auch dessen Auswirkungen auf etablierte Entsorgungswege zu betrachten.

In einem ersten Arbeitsschritt wurden die für die Überprüfung nötigen Grundlagen (Recyclingquote und Qualität von Recyclingkunststoffen) erarbeitet und darauf basierend wurde ein Monitoringsystem entwickelt. In einem zweiten Arbeitsschritt wurde das Monitoringsystem während der Pilotphase angewandt und die daraus gesammelten Daten aufbereitet. Das Sammelmateriale wurde sowohl mit einem artikel- wie einem materialbasierten Ansatz verarbeitet, womit beide Ansätze verglichen werden konnten². Im dritten Arbeitsschritt wurden das Monitoringsystem und des KUH-Bag Systems kritisch analysiert sowie Möglichkeiten und Grenzen zu deren Weiterentwicklung aufgezeigt. Im vierten Arbeitsschritt wurden mögliche weitreichendere Auswirkungen und der Beitrag von gemischten Kunststoffsammlungen auf das Schweizer Entsorgungssystem abgeschätzt.

¹ KUH: Kunststoffe aus Haushalten.

² Im artikelbasierten Ansatz werden zuerst ganze Artikel in verschiedene Fraktionen (z.B. HPDE-Flaschen) sortiert und erst später zerkleinert und gereinigt. Im materialbasierte Ansatz wird das Sammelmateriale zuerst zerkleinert und gereinigt, und in späteren Schritten in verschiedene Wertstoffgruppen (PE, PP, etc.) sortiert.

Als Grundlage zur Beurteilung der Ressourceneffizienz der Entsorgung von Abfällen dienen Quoten. In der Vorbereitung zur Entwicklung des Monitoringsystems wurden heute gebräuchliche Sammel- und Recyclingquoten und deren Systemgrenzen untersucht. Die Berechnungsmethoden von Quoten sind aus verschiedenen Gründen oft schwierig nachvollziehbar. Oft sind *intermediäre* Quoten, die nicht alle Verluste der Behandlung berücksichtigen, gebräuchlich. Für gemischte Kunststoffsammlungen wurde deshalb die *technische Recyclingquote (tRQ)* eingeführt, die entsprechend der Zielrecyclingquote von 70% eine *endgültige* Quote ist. So werden alle Verluste bis und mit einer Endbehandlung der Abfälle berücksichtigt und nur Material der Recyclingquote zugerechnet, welches als Kunststoffregranulat, Zellstoff oder Rohmetall anfällt. Als theoretische Grösse wird zudem das *technische Recyclingpotenzial (tRP)* eingeführt, welches ein Mass für die unter optimalen Bedingungen technisch erreichbare Recyclingquote ist.

Das Monitoringsystem umfasst neben Informationen zur Berechnung der technischen Recyclingquote die Sammelmenge, die Zusammensetzung des Sammelgutes auf Artikel- (Getränkekartons³, Folien, Flaschen usw.) und Materialebene (PE, PP, Zellstoff etc.), die Qualität der Recyclingkunststoffe, die Verbringung von Behandlungsresten und den Export von teilbehandelten Fraktionen in Schwellen- und Entwicklungsländern. Die Zusammensetzung der gemischten Kunststoffe wird mit einer händischen Artikelanalyse bestimmt. Informationen zur Verarbeitung werden mit einem Nachweissystem, welches die Abfälle über Erst- und alle Folgeempfänger bis zu einer Endbehandlung verfolgt, erhoben. Die Verarbeitung beim Erstempfänger wird zusätzlich mit einem Batchversuch überwacht oder falls nicht möglich, mit einer detaillierten Prozessmodellierung plausibilisiert.

Insgesamt wurden in der zweijährigen Pilotphase 752 t Material gesammelt, wobei bis Abschluss der Pilotphase 641 t verarbeitet waren, während eine Restmenge von 111 t noch an Lager stand (Tabelle 1). Im ersten Jahr wurden 250 t, im zweiten Jahr 502 t gesammelt. Die Sammelquote im zweiten Jahr lag bei ungefähr 5.6% der im Einzugsgebiet anfallenden Kunststoffe aus Haushalten, oder rund 10% der als langfristig sammelbar erachteten Menge.

Das Sammelmateriale besteht durchschnittlich aus 94.4% erwünschten *Zielartikeln* und 5.6% unerwünschten *Nichtzielartikeln*. Hauptbestandteil der Zielartikel sind Schalen, Becher und andere formfeste Kunststoffe (35%) sowie grosse Folien (24%), während andere Artikelgruppen in geringeren Anteilen anfallen. Zu den Nichtzielartikeln sind auch die unerwünschten aber wertstoffhaltigen Fraktionen PET-Getränkeflaschen mit 0.8% und Metalle mit 0.6% zu zählen. Das Sammelmateriale zeigt zwischen Sommer und Winter, Bring- und Holsammlung, sowie urbanen und ruralen Einzugsgebieten gewisse Unterschiede in der Zusammensetzung. Die Sammelqualität ist aber durchwegs hoch. Der niedrige Anteil Nichtzielartikel zeigt, dass die Nutzer den KUH-Bag nicht als günstigen Kehrichtsack, sondern ergänzend zu bestehenden Separatsammlungen nutzen. Auf Materialebene besteht das Sammelmateriale zu 77% aus *Wertstoffen* und 23% aus *Fehlstoffen*. Die Hauptwertstoffe des Sammelmateriales sind hierbei PE (29%), PP (23%) und PET (16%, v.a. Nicht-Getränkeflaschen Qualität). Bei den Fehlstoffen sind rund 17% auf Flüssigkeiten und Anhaftungen (z.B. Etiketten) und 6% auf feste Fremdstoffe zurückzuführen.

In der Verarbeitung lag die durchschnittliche tRQ bei 47% stand (Tabelle 1). Bei einem Wertstoffanteil von 77% wurden somit 61% der im Sammelmateriale enthaltenen Wertstoffe zurückgewonnen. Die Ver-

³ Werden im KUH-Bag mitgesammelt und der Papierindustrie zum Recycling zugeführt.

arbeitung im artikelbasierten Ansatz erreichte je nach aufgewendetem Sortieraufwand eine tRQ zwischen 37% und 49%. Im materialbasierten Ansatz wurde relativ konstant eine tRQ von 55% erreicht. Ein Vergleich der anfallenden Rezyklate zeigt, dass die beiden Ansätze unterschiedliche Mengen verschiedener Rezyklate und Qualitäten generieren. Eine höhere tRQ sollte deshalb nicht als einziges Kriterium für die Bewertung von verschiedenen Recyclingketten verwendet werden. Mit steigender tRQ wird ein höherer Anteil des Materials als PO-Mischkunststoff (PE+PP) zurückgewonnen, der aufgrund schlechterer Materialeigenschaften in weniger Anwendungsgebieten genutzt werden kann. In der artikelbasierten Verarbeitung geht von allen Wertstoffen ein gewisser Anteil verloren, im materialbasierten Ansatz ist dieser Verlust auf PET (v.a. Nicht-Getränkeflaschen Qualität) konzentriert.

Tabelle 1: Mengenübersicht KUH-Bag Pilotversuch

Menge	Gewicht	Bemerkung
Sammelmenge	752 t	
+ Verarbeitete Menge	641 t	100%
- stofflich genutzt (Rezyklate)	298 t	47% technische Recyclingquote
- energetisch genutzt	297 t	46%
- anderweitig entsorgt (Flüssigkeiten)	45t	7%
+ Zwischenlager	111 t	Verarbeitung Okt/Nov 2017

In der Verarbeitung fielen 46% des verarbeiteten Materials als Behandlungsreste zur energetischen Verwertung an, und die restlichen 7% gelangten entweder als Flüssigkeit in eine Abwasserreinigungsanlage oder durch Extrusion oder Trocknungsprozesse in die Atmosphäre. Insbesondere zu Beginn des Pilotprojektes wurde ein bedeutender Teil der Behandlungsreste aufgrund vorherrschender Rahmenbedingungen in der KVA Weinfelden verbrannt. Eine Verwertung in Zementwerken oder anderen energetischen Verwertungsverfahren wurde erst später möglich und dann auch genutzt.

Die Erfahrungen aus dem Betrieb des Monitoringsystems zeigen, dass die entwickelten Grundlagen und das Nachweissystem erlauben, einen guten Überblick über die ausgelösten Materialströme zu bekommen. Der Fokus auf die Verarbeitung beim Erstempfänger ist sinnvoll, wenn eine hoher tRQ sichergestellt werden will, da Wertstoffverluste grösstenteils in der Erstverarbeitung anfallen oder aus der Zusammensetzung der Output-Fractionen erkannt werden können. Schwieriger zu überprüfen ist der Export von teilbehandelten Fraktionen, der insbesondere bei Folgeempfängern auftreten kann. Der Materialfluss kann somit nicht lückenlos nachgewiesen werden. Um diese Lücke zu füllen, müsste die Nachweispflicht Teil von Abnehmerverträgen werden.

Während dem Monitoring wurden trotz diesen Lücken keine Hinweise gefunden, dass Material aus dem KUH-Bag in Schwellen- und Entwicklungsländer exportiert wurde. Zusätzlich haben die Zweckverbände bereits beim Aufbau des KUH-Bag Systems vorausschauend auf die Exportproblematik reagiert und mit einer Rückführungspflicht von Behandlungsresten aus dem Ausland im Mengenausgleich ein Modell gefunden, mit dem auch bei kleinen Mengen die Materialverantwortung übernommen werden kann. Hierbei werden mehr Behandlungsreste aus der Verarbeitung von gemischten Kunststoffen aus verschiedener Herkunft in die Schweiz zurückgeführt als durch einen Export von KUH-Bag Material im Ausland anfällt.

Die in der Verarbeitung erreichten technischen Recyclingquoten sind noch von der geforderten Zielrecyclingquote des BafU von 70% entfernt. Es ist heute noch nicht möglich, dieses Ziel mit bestehenden Recyclingketten zu erreichen. Aufgrund der Wertstoffanteile kann das Ziel aber grundsätzlich erreicht werden. Die technischen Recyclingpotenziale von 65% (artikelbasiert) und 75% (materialbasiert) sind ein Hinweis darauf, dass das Erreichen der Zielquote langfristig herausfordernd bleibt und das festgelegte Ziel gute Anreize schafft.

Während der Pilotphase konnte der Anteil stofflich verwerteter Materialien (tRQ) erhöht werden. Dies hat zu einem steigenden Umweltnutzen während der Pilotphase geführt. Die Möglichkeit, Behandlungsreste ab Beginn 2017 statt einer KVA auch Zementwerken oder anderen thermischen Verwertungsverfahren zuzuführen, hat zu zusätzlichem Umweltnutzen geführt. Somit wurden beim Abschluss der Pilotphase die heutigen Möglichkeiten weitgehend genutzt. Mittel- und langfristig sind weitere Verbesserungen möglich. In der Sammlung ist könnten die Fixkosten über eine Erhöhung der Sammelmengen breiter verteilt werden, wodurch in eine bessere Sammelinfrastruktur oder eine verbesserte Verarbeitung investiert werden kann. In der Verarbeitung könnte mit zusätzlichen Prozessschritten sowie der Festlegung von Mindestverarbeitungsvorschriften die tRQ weiter erhöht werden.

Es wurden keine Hinweise während der Pilotphase gefunden, dass gemischte Sammlungen wie der KUH-Bag bedeutende negative Auswirkungen auf bestehende Verwertungssysteme haben. Es wäre aber wichtig, mit vertieften und längerfristigen Studien die Wechselwirkungen zu beobachten. Gemischte Sammlungen konkurrieren mit den Selektivsammlungen von Detailhändlern um gewisse Materialien, schaffen aber auch alternative Entsorgungsangebote, die andere Bevölkerungsgruppen ansprechen könnten. Die Separatsammlung von PET-Getränkeflaschen wird durch den KUH-Bag nicht direkt gefährdet, da die im KUH-Bag enthaltenen Mengen PET-Getränkeflaschen (4 t im zweiten Jahr) keinen bedeutenden Anteil der im Einzugsgebiet separat gesammelten PET-Getränkeflaschen (ungefähr 2'250 t) darstellen. Eine indirekte Beeinflussung der Sammelqualität in der PET-Sammlung kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Gemischte Sammlungen könnten aber sowohl einen positiven (Entlastung) wie auch negativen Einfluss (Belastung) haben. Die Auswirkung einer Auskoppelung von Kunststoffen aus Haushalten auf die Kehrrichtverwertung wurde nicht beurteilt. Die erreichten Sammelmengen sind mit weniger als 1% der in den KVA entsorgten Mengen noch klein, könnten aber dem Verarbeitungseingpass, der durch das jährliche Wachstum an Siedlungsabfällen mitverursacht wird, entgegenwirken. Bei KVA, die Abfälle importieren, ist der Wegfall an Mengen grundsätzlich weniger relevant. Im Fall KUH-Bag betreiben die Abfallzweckverbände sowohl KVA wie gemischte Kunststoffsammlung. So könnte das Wachstum der gemischten Sammlung und Verwertung von Behandlungsresten derart gesteuert werden, dass allfällige Effekte abgedeckt würden.

Wird ein Ausbau gemischter Sammlungen erwogen, müssten Rahmenbedingungen geschaffen werden, die diesen unterstützen und gleichzeitig eine sachgemässe Behandlung sicherstellen. Aus den Erfahrungen des KUH-Bags System muss vor einer Einführung von gemischten Kunststoffsammlungen sichergestellt werden, dass die nötigen Exportbewilligungen vorliegen. Während dem Betrieb müssen neben einer zentralen Erfassung der Sammelmengen und der Verarbeitung und Verbringung auch die Grösse von Zwischenlager erhoben werden.

Im Vergleich zur Gesamtumweltbelastung und den CO₂-Emissionen, die durch den Schweizer Konsum verursacht werden, ist die Reduktion durch eine gemischte Kunststoffsammlung relativ gering. Wird diese Reduktion aber in Bezug auf die von der Abfallwirtschaft verursachten CO₂-Emissionen betrachtet, so wird die Einsparung bedeutend. Die gemischte Sammlung hätte das Potenzial, zukünftig einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen der Abfallwirtschaft zu leisten.

Mit der geforderten Zielrecyclingquote von 70% stehen Systeme und Verarbeiter in der Verantwortung, die heutige, bereits sachgemässe Verarbeitung langfristig zu verbessern. Um das Ziel zu erreichen, ist es nötig, bestehende Machbarkeitsgrenzen auszuloten. Dies kann in Zusammenarbeit mit europäischen Recyclingbetrieben oder dem Aufbau neuer Verarbeitungskapazitäten in der Schweiz umgesetzt werden. In jedem Fall könnte die Schweiz mit der Umsetzung der Zielquote eine gewisse Vorreiterrolle einnehmen.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	1
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	8
TABELLENVERZEICHNIS	8
BEGRIFFE	9
ABKÜRZUNGEN	14
1 EINLEITUNG	16
1.1 KUNSTSTOFFFLÜSSE UND KUNSTSTOFFRECYCLING SCHWEIZ	16
1.2 RECYCLING VON KUNSTSTOFFEN AUS HAUSHALTEN.....	17
1.3 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG	18
2 GRUNDLAGEN	21
2.1 BESCHREIBUNG DES KUH-BAG SYSTEMS	21
2.2 QUOTEN ALS INDIKATOREN FÜR RECYCLINGSYSTEME	24
2.3 QUALITÄT UND ANWENDUNGSGEBIETE VON RECYCLINGKUNSTSTOFFEN	30
3 MONITORING VON GEMISCHTEN KUNSTSTOFFSAMMLUNGEN	32
3.1 KRITISCHE THEMENGEBIETE.....	32
3.2 DATENERHEBUNG	32
4 MATERIALFLÜSSE UND -ZUSAMMENSETZUNG IM KUH-BAG SYSTEM	35
4.1 ÜBERSICHT	35
4.2 SAMMLUNG	36
4.3 VERARBEITUNG.....	41
4.4 VERGLEICH DER RECYCLINGKETTEN.....	45
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	50
5.1 MONITORINGSYSTEM FÜR GEMISCHTE KUNSTSTOFFSAMMLUNGEN.....	50
5.2 ERREICHTE LEISTUNG DES KUH-BAG SYSTEMS UND VERBESSERUNGSMÖGLICHKEITEN.....	52
5.3 AUSWIRKUNGEN UND WECHSELWIRKUNGEN MIT BESTEHENDEN SAMMELSYSTEMEN	54
5.4 AUSBAU GEMISCHTER KUNSTSTOFFSAMMLUNGEN.....	57
6 LITERATURVERZEICHNIS	61
6.1 LITERATURVERWEISE	61
6.2 GESETZESTEXTE UND STANDARDdokUMENTE	64
6.3 PIKTOGRAMME	64
ANHANG	65
A I. ARTIKELANALYSE	65

A II.	NACHWEISFORMULAR ERSTEMPFÄNGER.....	68
A III.	HERLEITUNG DES TECHNISCHEN RECYCLINGPOTENZIALS	68
A IV.	ZUSAMMENFASSENDE ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung KUH-Bag Recyclingsystems und Recyclingkette	21
Abbildung 2:	Beispielhafte Berechnung von RQ und SQ in einem Recyclingsystem.....	24
Abbildung 3:	Beispiele zu intermediären und endgültigen Recyclingquoten im KUH-Bag System	27
Abbildung 4:	Massenflüsse, Massenbilanz des KUH-Bag Systems.....	28
Abbildung 5:	Endgültig rezyklierte Materialien in diesem Bericht	29
Abbildung 6:	Monitoringsystem mit zugehörigen Prozessen im KUH-Bag Recyclingsystem.....	33
Abbildung 7:	Gesamtflüsse der gesammelten KUH-Bag Materials nach 2-jährigem Betrieb	35
Abbildung 8:	Entwicklung der Sammelmengen über den Zeitraum des Pilotversuchs	36
Abbildung 9:	Zusammensetzung des Sammelmaterials auf Artikelebene	39
Abbildung 10:	Durchschnittliche Zusammensetzung des Sammelmaterials auf Materialebene.....	40
Abbildung 11:	Vergleich der Beiträge einzelner Rezyklate zur technischen Recyclingquote	46
Abbildung 12:	Vergleich der Ökobilanz Recyclingkette LVP+ und KVA.....	71
Abbildung 13:	Einfluss verschiedener tRQ auf die Umweltauswirkungen	71
Abbildung 14:	Umweltauswirkungen einer privaten Lieferung (Bringsystem).....	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mengenübersicht KUH-Bag Pilotversuch	3
Tabelle 2:	Ergebnisse Verarbeitung LVPn, Outputfraktionen und Herleitung der tRQ.....	42
Tabelle 3:	Ergebnisse Verarbeitung LVP+, Outputfraktionen und Herleitung der tRQ	43
Tabelle 4:	Verarbeitung MRK: Zusammensetzung nach Zielartikeln und Herleitung der tRQ.....	44
Tabelle 5:	Vergleich der untersuchten Recyclingketten anhand der berechneten Kennzahlen	47
Tabelle 6:	Eingesparte CO ₂ -Emissionen durch eine flächendeckende gemischte Sammlung	59
Tabelle 7:	Zusammensetzung und fossile CO ₂ -Bilanz von KVAs bei einer Auskopplung von KUH....	59
Tabelle 8:	Berechnung tRP für den artikelbasierten Ansatz.....	68
Tabelle 9:	Berechnung tRP für den materialbasierten Ansatz	69

Begriffe

Artikel	Gegenstände wie Verpackungen und Gebrauchsgegenstände, die im KUH-Bag entsorgt werden.
Artikelanalyse	Die Artikelanalyse ist eine von der Empa entwickelte händische Sortiermethode. Sie erlaubt, die Zusammensetzung und Qualität von gemischten Kunststoffsammlungen zu bestimmen.
Artikelbasierter Ansatz	Ansatz zur Verarbeitung von gemischt gesammelten Kunststoffen, bei dem zuerst die ganzen Artikel in einer Sortieranlage zu →Ballenware sortiert werden und erst in nachgelagerten Schritten zerkleinert und gewaschen werden.
Ballenware	Ballenware entsteht in der artikelbasierten Verarbeitung als Output der ersten Behandlung (Sortierung ganzer Artikel). Ein Beispiel ist ein Ballen HDPE-Flaschen oder PE-Folien. Ballenware ist eine →teilbehandelte Fraktion.
Batch-Versuch	Verarbeiten einer Charge in einer bestehenden Anlage unter repräsentativen Bedingungen, um Menge und Zusammensetzung der resultierenden Outputfraktionen zu bestimmen (in Anlehnung an: SN EN 50625-1:2014 de)
Behandlung	<p>Als Behandlung gilt jede physikalische, chemische oder biologische Veränderung der Abfälle (USG, Art 7, Ziff. 6^{bis}).</p> <p><i>Endbehandlung:</i> Behandlungen mit denen der Recycling oder Verwertungsprozess abgeschlossen ist wobei nutzbare →Rezyklate (→Recycling) oder Energie (→Verbrennung) entstehen kann. Beispielsweise ist die Extrusion von Kunststoffabfällen eine Endbehandlung, da sie als Ausgangsfraktion →Regranulate generiert, die den Status Rezyklat erreichen. (in Anlehnung an „final treatment“, CENELEC EN TS 50625-5, draft und „endgültiger Recyclingprozess“ EC, 2015)</p> <p><i>Zwischenbehandlung,</i> jegliche Behandlung, in der teilbehandelte Fraktionen entstehen und somit nicht als Endbehandlung gelten. Beispielsweise ist die Sortierung von Kunststoffartikeln eine Zwischenbehandlung, da sie als Ausgangsfraktionen teilbehandelte Kunststofffraktionen (Ballenware) generiert, die noch nicht den Status Rezyklat erreicht haben.</p>
Behandlungsreste	Material (→Wertstoffe und →Fehlstoffe) aus der Zwischen- und Endbehandlung, welches nicht →rezykliert wird und eine andere Endbehandlung durchlaufen muss.
Bringsammlung	Der Abfall muss an eine Sammelstelle gebracht werden (auch Bringsystem).
Entsorgung	Die Entsorgung der Abfälle umfasst ihre Verwertung oder Ablagerung sowie die Vorstufen Sammlung, Beförderung, Zwischenlagerung und Behandlung. (USG, Art. 7, Ziff. 6 ^{bis})

Erstempfänger	Erster Verarbeitungsbetrieb in der →Recyclingkette. Wird in einem ersten Behandlungsschritt das KUH Sammelmateriale nur gepresst um den weiteren Transport zu vereinfachen, so wird der nächste Verarbeitungsbetrieb als Erstempfänger betrachtet.
Fehlstoff	Materialien, die durch Behandlungsschritte entfernt werden müssen, so dass aus →Wertstoffen →Rezyklate produziert werden können. Beispiele: Etiketten, organische Abfälle und Restinhalte. Da eine Abgrenzung zwischen einem festen Material und der darin enthaltenen Feuchtigkeit schwierig ist, werden auch Wasseranteile zu Fehlstoffen gezählt.
Folgeempfänger	Jeder Verarbeitungsbetrieb in der Recyclingkette nach dem Erstempfänger bis das Material eine Endbehandlung durchlaufen hat.
Hohlkörper	Aus Kunststoff hergestellter Artikel, der im Inneren hohl ist (z.B. Flasche) und meist durch Extrusionsblasformen hergestellt wird (Wikipedia).
Holsammlung	Der Abfall wird zu Hause abgeholt (auch Holsystem).
Kunststoffe	<p>Werkstoffe, die hauptsächlich aus Makromolekülen bestehen (umgangssprachlich Plastik). Beispiele: Polypropylen, Polyethylen.</p> <p><i>Gemischte</i> Kunststoffe: Un- oder teilbehandelte Fraktion mit mehreren Kunststoffen, die auch noch →Nichtzielmaterialien enthalten.</p> <p><i>Sortenreine</i> Kunststoffe: Mit gleicher Kennzeichnung (bspw. nach DIN EN ISO 11469 bzw. VDA 260) nach einer bestimmten Formulierung hergestellt.</p> <p><i>Sortenähnliche</i> Kunststoffe: Recyclingkunststoffe, die aus demselben Grundpolymer bestehen, jedoch aus Teilen bestehen, die verschiedenen Eigenschaften aufweisen (Fließverhalten, Flammschutz etc.).</p> <p><i>Vermischte</i> Kunststoffe: bedeutet, dass unterschiedliche Kunststoffe mit chemischer Verträglichkeit aufbereitet werden (LDPE und HDPE, PE und PP). Kunststoffe sind dann verträglich, wenn sie in der Schmelze miteinander homogen mischbar sind und zu einem Formstoff mit befriedigenden mechanischen Eigenschaften und akzeptierbarer Oberfläche verarbeitet werden können. (Nach Wikipedia und Hellerich et al. 2010)</p>
Leichtverpackungen	Verpackungen, welche im naheliegenden Ausland zusammen gesammelt und verwertet werden. Je nach Region werden andere Artikel als Leichtverpackungen bezeichnet, immer darin enthalten sind jedoch Verpackungen aus Kunststoffen und Verbundmaterialien wie Getränkekartons.
Mahlgut	Mahlgut entsteht durch Mahlen von Kunststoff, hat unterschiedliche oder unregelmäßige Teilchengrößen von 2 bis 5 mm und kann Staubanteile enthalten (Hellerich et al., 2010). Mahlgut ist eine →teilbehandelte Fraktion.
Material	Material ist ein Sammelbegriff für Feststoffe, welche in Produktionsprozessen

verwendet werden, verbraucht werden oder anfallen. Material umfasst somit Rohstoffe, Werkstoffe, Halbzeuge, Hilfsstoffe, Betriebsstoffe, Bauteile, Baugruppen sowie Abfälle (nach Wikipedia).

In gewissen Begriffen wird „Stoff“ als Synonym zu „Material“ verwendet (z.B. Stoffbuchhaltung, stoffliche Verwertung, ...)

Materialbasierter Ansatz	Ansatz zur Verarbeitung von gemischt gesammelten Kunststoffen, bei dem zuerst die Artikel in kleine Stücke zerkleinert und gewaschen werden und diese in nachgelagerten Schritten in verschiedene Fraktionen sortiert werden.
Nichtzielartikel	Artikel, welche in der Sammlung nicht erwünscht sind und grösstenteils aus →Nichtzielmaterialien bestehen. Beispiel: Elektronische Geräte.
Nichtzielmaterial	Materialien welche in der Sammlung vorkommen können, deren Sammlung aber nicht das Ziel ist (→Fehlstoffe, aber auch →Wertstoffe wie PET-GF und Metalle).
Potenzialverlust	Der Potenzialverlust ist die Differenz zwischen →technischem Recyclingpotenzial und →technischer Recyclingquote und misst somit den Verlust an potenziell für das Recycling verfügbarem Material. Er ist somit ein Qualitätsmass für heutige Recyclingtechnologien und verfügbare Verwertungswege
Pressverlust	Beim ersten Pressen des Sammelmaterials austretende Flüssigkeit
Recycling	Recycling ist der letzte Prozessschritt einer →Recyclingkette wobei →Rezyklate entstehen und somit der Behandlungsprozess abgeschlossen wird (→Endbehandlung). Recycling ist synonym zu →stofflicher Verwertung.
Recycling- und Verwertungsquote	<p>Eine Quote ist ein massenbasierter Indikator für die Effizienz eines Prozesses, einer Anlage oder eines Systems, der zum Ausdruck bringt, in welchem Mass aus einem bestimmten Material ein Zielnutzen (→Recycling, →Verwertung) gewonnen werden kann.</p> <p>Quoten werden aus dem Quotient einer Outputmasse bezogen auf eine Inputmasse berechnet und meist in Prozent angegeben.</p> <p>Bei der Berechnung von <i>intermediären Quoten</i> wird das Material nicht bis und mit einer →Endbehandlung verfolgt, womit nur ein Teil der in der Behandlung anfallenden Materialverluste berücksichtigt werden. Bei <i>endgültigen Quoten</i> werden alle Verluste bis und mit der Endbehandlung berücksichtigt.</p>
Recyclingkette	Eine Recyclingkette ist ein Verarbeitungsweg, welche mit dem Ziel betrieben wird, →Wertstoffe als →Rezyklate zurückzugewinnen.
Recyclingsystem	Ein Recyclingsystem sammelt bestimmte Abfälle und verarbeitet diese in einer →Recyclingkette.
Regranulat	Regranulat wird aus Mahlgut über einen Schmelzprozess als Granulat gewonnen. Regranulat hat eine gleichmäßige Korngröße, keinen Staubanteil

und ist problemlos verarbeitbar. Im Rahmen dieses Berichtes werden auch Regenerate (Verarbeitung mit Zuschlagstoffen) als Regranulate bezeichnet. (Hellerich et al., 2010).

Rezyklat	Aus Abfällen aufbereitetes Material mit definierten Eigenschaften, welches in Produktionsprozessen eingesetzt werden kann. Rezyklate haben eine →Endbehandlung durchlaufen. Im Rahmen dieses Berichtes werden →Regranulate, →Zellstoff sowie →Rohmetall als Rezyklate betrachtet.
Rohmetall	Teilverarbeitetes Metall, welches von Fremdstoffen befreit ist und keine Schlacke mehr bildet.
Sammelquote	Massenanteil der effektiv gesammelten Materialien in Bezug auf die verfügbare Menge KUH-Bag Materials. Die Sammelquote misst die Effizienz der Sammlung.
Siedlungsabfall	Aus Haushalten stammende Abfälle sowie Abfälle aus Unternehmen mit weniger als 250 Vollzeitstellen, deren Zusammensetzung betreffend Inhaltsstoffe und Mengenverhältnisse mit Abfällen aus Haushalten vergleichbar sind (VVEA, Art. 3a).
System- recyclingquote (sRQ)	Eine auf der Ebene des →Recyclingsystems endgültig berechnete →Recyclingquote, welche sowohl die Verluste von Sammlung wie auch die Verluste der Verarbeitung bis und mit →Endbehandlung berücksichtigt.
technische Recyclingquote (tRQ)	Eine auf der Ebene der →Recyclingkette endgültig berechnete →Recyclingquote, welche sämtliche Verarbeitungsschritte ab Sammlung bis und mit zur →Endbehandlung berücksichtigt.
technisches Recyclingpotenzial (tRP)	Das technische Recyclingpotenzial (tRP) (auch technisch potenziell erreichbare Recyclingquote) ist der Massenanteil potenziell rezyklierbarer Materialien (potenzieller Output) bezogen auf die Masse verarbeitetes Inputmaterial. Zur Berechnung der tRP werden vom Gesamtmaterial der Anteil Nichtzielmaterialien sowie technisch unvermeidbare Verluste an Zielmaterialien abgezogen, wobei die Eigenheiten des →materialbasierten und →artikelbasierten Ansatzes berücksichtigt werden.
teilbehandelte Fraktion	Eine Fraktion gilt als teilbehandelt, wenn sie zwar bereits einzelne →Behandlungen, jedoch noch keine →Endbehandlung durchlaufen hat. Im Recycling von gemischten Kunststoffen sind insbesondere die teilbehandelten Fraktionen →Ballenware sowie →Mahlgut von Bedeutung.
Trennung	Prozess, in dem eine Ansammlung von Materialien anhand bestimmter Merkmale in verschiedene Fraktionen aufgeteilt wird (auch Sortierung).
Verbrennung	Verbrennung ist eine →Endbehandlung, in denen die in Materialien enthaltene chemische Energie unter Zufuhr von Sauerstoff freigesetzt wird.

Aufgrund gängiger Praxis wird der Begriff der Verbrennung als Synonym zur →energetischen Verwertung verwendet.

Verwertung	Verwertung ist eine Endstufe der Behandlung, in der Wert oder Nutzen generiert wird (nach USG). Der Nutzen fällt hierbei auf stofflicher oder energetischer Ebene an. Somit wird zwischen stofflicher Verwertung (→Recycling) und energetischer Verwertung (→Verbrennung) unterschieden (nach VVEA Art. 12).
Wertstoff	Materialien, die für ein →Recycling interessant sind. Neben den →Zielmaterialien zählen hierzu auch gewisse →Nichtzielmaterialien wie PET-GF und Metalle, die in den untersuchten Recyclingketten zurückgewonnen werden können.
Zellstoff	Zellstoff ist die beim chemischen Aufschluss von Pflanzenfasern entstehende faserige Masse, welche fast vollständig aus Cellulose besteht (Wikipedia).
Zielartikel	Artikel, welche in der Sammlung erwünscht sind und grösstenteils aus →Zielmaterialien bestehen. Beispiele: HPDE-Flasche, Verpackungsfolie.
Zielmaterial	Materialien auf Grund derer die Sammlung von Zielartikeln durchgeführt wird (PE; PP, PS, Zellstoff, und PET-NGF).

Abkürzungen

BafU	Bundesamt für Umwelt
CO₂-eq	CO ₂ -Äquivalente (Summe aller klimawirksamen Emissionen ausgedrückt als Menge CO ₂ mit gleicher Klimawirkung)
EAG	Elektro- und Elektronikaltgeräte
Empa	Forschungsinstitut des ETH-Bereichs für Materialwissenschaften und Technologieentwicklung
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
HDPE	Polyethylen hoher Dichte (high density)
HK	Hohlkörper
KUH	Kunststoffe aus Haushalten
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
KVA TG	Verband KVA Thurgau
LDPE	Polyethylen tiefer Dichte (low density)
LVP	Leichtverpackungen
MRK	materialbasierte Recyclingkette
NIR / VIS	Teile des elektromagnetischen Spektrums (Nahinfrarot: NIR; sichtbarer Bereich: VIS) welche für die Erkennung von verschiedenen Materialien eingesetzt werden kann.
OKI	Organisation Kommunale Infrastruktur des Schweizerischen Städteverbandes und des Schweizerischen Gemeindeverbandes
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PET-GF	PET aus Getränke-Flaschen
PETm	PET Mischfraktion, typischerweise jeweils 40-60% PET-NGF und PET-GF
PET-NGF	PET aus Nicht-Getränke-Flaschen, teilweise mit Sperrschichten aus anderen Polymeren oder in einer modifizierten kristallinen Form (cPET)
PO	Polyolefin. Aus der Vermischung von PE und PP hergestellte Recyclingkunststoffe.
PP	Polypropylen
PRS	PET Recycling Schweiz
PS	Polystyrol

Pusch	Stiftung Praktischer Umweltschutz Schweiz
PVC	Polyvinylchlorid
RVQ	Recycling- und Verwertungsquote
tRP	technisches Recyclingpotenzial
tRQ	technische Recyclingquote
UBP	Umweltbelastungspunkte (Wirkungsabschätzung einer Ökobilanz basierend auf dem Konzept der ökologischen Knappheit)
USG	Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz)
VBSA	Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen
VGW	Verordnung über Getränkeverpackungen
VKRS	Verein Kunststoffrecycling Schweiz
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung) vom 4. Dezember 2015 (Stand am 19. Juli 2016).
ZAB	Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid

1 Einleitung

1.1 Kunststoffflüsse und Kunststoffrecycling Schweiz

Kunststoffe erfüllen eine Vielzahl von Funktionen in verschiedensten Anwendungsgebieten. Sie sind aus unserer Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Im Jahr 2010 wurden in der Schweiz rund 1'000'000 t Kunststoffe in Produkten und Verpackungen konsumiert und rund 780'000 t als Abfall entsorgt. Dies entspricht ungefähr 100 kg Kunststoffabfällen pro Person und Jahr, wovon je rund 50% in Haushalten und der Industrie anfallen. Kunststoffabfälle werden heute in der Schweiz grösstenteils unter Rückgewinnung von Energie verbrannt. Im Jahre 2010 gelangten rund 84% in Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) und 6% in Zementwerke. Die restlichen 10% wurden als Rezyklate im In- und Ausland zur Herstellung von Rezyklaten verwendet und so der stofflichen Verwertung zugeführt (Redilo, 2011).

Von den ungefähr 76'000 t Recyclingkunststoffen, die im Jahr 2010 aus Schweizer Abfällen produziert wurden⁴, stammten rund 55-60% aus Haushalten (Flaschen, Verpackungen, Geräte und Fahrzeuge etc.) und 40-45% aus Industrie und Gewerbe (Grossgebäude und -verpackungen, Rohre und andere Bauabfälle, etc.). Mehr als die Hälfte aller Rezyklate, oder etwa rund 40'000 t stammten alleine aus dem Recycling von PET-Getränkeflaschen (EBP, 2013 und Redilo, 2011).

Seit der letzten Gesamterhebung der Kunststoffflüsse im Jahr 2010 ist der Konsum von Kunststoffen in den meisten Bereichen leicht gestiegen (PlasticsEurope, 2016). Die Verwertung von Kunststoffabfällen hat sich in einigen Bereichen jedoch vergleichsweise stark verändert. Beispielsweise werden Kunststoffe aus Elektro- und Elektronikgeräten (EAG) aufgrund strengerer Vorschriften sowie neuer technischer Möglichkeiten vermehrt rezykliert. Während im Jahr 2007 nur etwa 10% der EAG-Kunststoffe rezykliert wurden, lag dieser Anteil im Jahr 2013 bereits 30-40%.⁵

Aufgrund dieser Veränderungen liegt die durchschnittliche Recyclingquote für Kunststoffabfälle aus der Schweiz bei ungefähr 15-20%.⁶ Sie liegt damit hinter dem EU-Durchschnitt von 30%, EU-Spitzenreitern mit bis zu 40% (PlasticsEurope, 2015) sowie Indien mit 60% (WBCSD und Empa, 2016).⁷ Bei einzelnen Kunststoffabfällen, wie den PET-Getränkeflaschen, ist die Schweiz in Sammlung und Recycling Spitzenreiter. Aus vielen anderen Kunststoffabfällen werden aber kaum Rezyklate produziert, was diese vergleichsweise tiefe Recyclingquote erklärt.

Kunststoffrecycling kann einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung leisten, indem durch Rezyklate der Bedarf an primären Rohstoffen reduziert wird. Ein weiterer Ausbau des Kunststoffrecyclings, d.h. eine Nutzung zusätzlicher Kunststoffabfälle wird deshalb in einigen Kreisen als wichtiges Element einer Kreislaufwirtschaft betrachtet (Ellen MacArthur Foundation, 2016). Kunststoffe, welche statt einer Verbrennung wieder zu Produkten werden, können potenziell einen Beitrag zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen leisten.

⁴ Abschätzung: Ca. 85% der 90'000 t/a die der stofflichen Verwertung zugeführten Materialien werden tatsächlich zu Rezyklaten.

⁵ Abschätzung basierend auf internen Daten von Swico/Sens

⁶ Eigene Schätzung

⁷ Recyclingquoten werden verschieden berechnet und sind deshalb meist schlecht vergleichbar (siehe 2.2). In den aufgeführten Beispielen sind die Unterschiede aber so gross, dass sie nicht alleine auf eine unterschiedliche Berechnung zurückzuführen sind.

Aufgrund der vergleichsweise tiefen Recyclingquote für schweizerische Kunststoffabfälle stellt sich die Frage, ob in der Schweiz Handlungsbedarf besteht und ob das Recycling von Kunststoffabfällen ausgebaut und gefördert werden soll.

1.2 Recycling von Kunststoffen aus Haushalten

Ein Kunststoffabfall, dessen Recycling ausgebaut werden könnte, sind Kunststoffe aus Haushalten. Diese Kunststoffabfälle landen heutzutage meist als Teil der gemischten Siedlungsabfälle in Kehrichtsäcken und werden in KVA verbrannt⁸. Schätzungsweise 175'000 t Kunststoffe, oder 22% der gesamten Kunststoffabfälle, fallen jedes Jahr als Siedlungsabfall an. Zusätzlich zu den Kunststoffen fallen jedes Jahr rund 20'000 t/a Getränkekartons als Abfälle an (UMTEC und Carbotech, 2017), die ökologisch sinnvoll der Papierindustrie zur Rückgewinnung von Zellstoff (Karton) zugeführt werden könnten (Carbotech, 2013). In Europa sind Sammelsysteme, welche Kunststoffverpackungen zusammen mit Getränkekartons als Leichtverpackungen sammeln, sortieren und verwerten, weit verbreitet.

Eine Abschätzung zeigt, dass über alle Anwendungsgebiete von Kunststoffen aus Haushalten potenziell rund 112'000 t pro Jahr gesammelt werden könnten, d.h. etwas weniger als 60% der tatsächlich anfallenden Menge (UMTEC und Carbotech, 2017). Könnten davon 70% als Rezyklate nutzbar gemacht werden, würden aus Schweizer Verpackungsabfällen jedes Jahr zusätzliche 78'000 t Rezyklate (69'000 t Kunststoffregranulate und 9'000 t Zellstoff) gewonnen. *Ein ausgebautes Recycling von Kunststoffen aus Haushalten könnte somit potenziell die Menge Recyclingkunststoffe aus dem Jahr 2010 beinahe verdoppeln.*

Aus Materialsicht eignen sich Kunststoffe aus Haushalten grundsätzlich gut für ein Recycling: Als kurzlebige Artikel werden solche Kunststoffe tendenziell wenig der UV-Strahlung (Sonnenlicht) ausgesetzt und somit ist ihre chemische Struktur kaum beschädigt. Artikel aus dem Lebensmittelbereich sind zudem strengen Vorschriften bezüglich der zugelassenen Kunststoffformulierungen unterworfen. So beinhalten sie wenig besorgniserregende Zuschlagstoffe und Verunreinigungen, welche ein Recycling erschweren oder verunmöglichen können.

Die Erschliessung dieses Potenzials ist aber durch die hohe Vielfalt der eingesetzten Kunststoffsorten, deren Formulierungen eingeschränkt⁹. Im Lebensmittelbereich finden zudem mehrschichtige Verpackungen Verwendung, die eine verbesserte Barrierewirkung haben (Sauerstoff, Fett, Gerüche). Diese Vielfalt stellt spezielle Anforderungen an die Sammlung sowie die Verarbeitung von Kunststoffen aus Haushalten.

In der Sammlung führt diese Vielfalt dazu, dass die in der Schweiz verfolgte Philosophie einer sortenreinen Separatsammlung bei Kunststoffen aus Haushalten an ihre Grenzen stösst und für eine zusätzliche stoffliche Verwertung eine gemischte Sammlung nötig ist. Im Gegensatz zu den erfolgreichen Separatsammlungen von Glas, Metalldosen und PET-Getränkeflaschen, ist es für Konsumenten fast unmöglich, die verschiedenen Kunststofftypen zu erkennen, zu trennen und einer Vielzahl von Separatsammelsystemen zuzuführen.

⁸ Für eine genauere Auflistung der einzelnen Artikel in Siedlungsabfällen siehe 2.1.2. PET-Getränkeflaschen sind nicht Teil der aufgeführten Mengen, da für diese bereits ein etabliertes Rücknahme- und Recyclingsystem besteht.

⁹ Verschiedene Anwendungsgebiete verlangen nach Formulierungen mit verschiedenen Eigenschaften (z.B. Farben), was durch eine Beigabe verschiedener Zuschlagstoffe erreicht wird.

Eine gemischte Sammlung verlangt, dass die verschiedenen Wertstoffe in der Verarbeitung getrennt werden, so dass hochwertige Rezyklate herstellen zu können. Es müssen sowohl die zellstoffhaltigen Teile von den Kunststoffen sowie die Kunststoffe in möglichst sortenreine oder sortenähnliche, zumindest aber in kompatible Mischungen getrennt werden.

Die separate Verwertung von Kunststoffen aus Haushalten könnte nicht nur einen allenfalls bedeutenden Teil eines Überganges zu einer Kreislaufwirtschaft darstellen, sondern wäre auch in den meisten Fällen ökologisch sinnvoll. Ökobilanzen zeigen, dass die separate Sammlung und Verwertung von Kunststoffen aus Haushalten (erste Priorität Recycling, Behandlungsreste in ein Zementwerk oder KVA) im Vergleich zu einer direkten Verbrennung in der durchschnittlichen KVA ökologisch vorteilhaft ist (Carbotech, 2014a). Eine direkte energetische Nutzung in einem Zementwerk kann unter der Annahme, dass Kunststoffe aus Haushalte den Brennstoff Kohle ersetzen, noch besser abschneiden. Der ökologische Nettonutzen der Alternativen „Recycling“ und „Zementwerk“ ist hierbei von der gewählten Bewertungsmethode abhängig. Wird der Gesamtumweltnutzen, zum Beispiel mit der Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte, UBP) berechnet, fällt der Nutzen kleiner aus als wenn der Nutzen als vermiedene Emissionen von klimawirksamen Gasen (CO₂-Äquivalente, CO₂-eq.) ausgedrückt wird. Werden die Alternativen „Recycling“ und Zementwerk“ mit einer volloptimierten KVA verglichen, so ist der Umweltnutzen aller Entsorgungswege vergleichbar (Carbotech, 2014a).

Unter anderem aufgrund einer zunehmenden Nachfrage seitens der Bevölkerung wurden in den vergangenen Jahren in verschiedenen Regionen der Schweiz gemischte Kunststoffsammlungen aus Haushalten lanciert. Im Jahr 2016 wurden mindestens sechs eigenständige Systeme betrieben, welche sich bezüglich Sammelmaterial, Trägerschaft, Einzugsgebiet, Kostenstrukturen und Verarbeitung unterscheiden (UMTEC und Carbotech, 2017). Eines der Systeme ist das KUH¹⁰-Bag System, welches von den beiden Abfallzweckverbänden ZAB Bazenhaid und KVA TG in ihren jeweiligen Einzugsgebieten im Oktober 2015 in Zusammenarbeit mit dem Amt für Umwelt, Kanton Thurgau, gestartet wurde und für zwei Jahre als Pilotprojekt betrieben wird.

1.3 Motivation und Zielsetzung

Mit dem Pilotprojekt KUH-Bag wollen die Abfallzweckverbände Aufwand und Nutzen von gemischten Kunststoffsammlungen überprüfen. Das Ziel dieser Arbeit war es, die Verbände durch eine systematische Datenerhebung und Überwachung (Monitoring) der mit dem KUH-Bag System ausgelösten Materialflüsse sowie deren Auswertung zu unterstützen.

Die Kantone besitzen bei Kunststoffen aus Haushalten als Teil der Siedlungsabfälle das Entsorgungsmonopol und müssen deshalb deren sachgemässe Verwertung auch in einer gemischten Sammlung sicherstellen (USG Art. 31 und VVEA Art. 13). Anbieter von gemischten Kunststoffsammlungen - ob geadelt, konzessioniert oder beauftragt - sind somit verpflichtet, den Kantonen Auskunft über den Verbleib des Materials zu geben. Mit einem Monitoring und einer Veröffentlichung der Resultate können die Betreiber ihre Materialverantwortung wahrnehmen und so dem Beispiel anderer Entsorgungssysteme folgen (siehe z.B. Swico/Sens/SLRS, 2016; PRS, 2016; KVA TG, 2016).

¹⁰ KUH: Kunststoffe aus Haushalten. Da Getränkekarton im KUH-Bag gesammelt werden, werden diese auch als Teil von KUH betrachtet.

Mit der Verwertung von Siedlungsabfällen in KVA besteht für Kunststoffe aus Haushalten ein etabliertes Entsorgungssystem. Die Idee, diese aus den Siedlungsabfällen auszukoppeln, verursacht somit unabweichlich Interessenkonflikte. KVA sehen in einer Auskopplung teilweise die Gefahr einer Finanzierungslücke, da damit die rentabelsten Materialien wegfallen.¹¹ Infrastrukturelle „Lock-in“ in Form bestehender Kapazitäten und Investitionen bergen die Gefahr, dass die Umlenkung zu zusätzlichen Kosten zu Lasten der öffentlichen Hand führen könnte. Die Kunststoffrecyclingindustrie betont hingegen die Nachfrage von Teilen der Bevölkerung sowie den potenziellen gesamtwirtschaftlichen und ökologischen Nutzen (VKRS, 2017).¹² Umweltorganisationen begrüßen die separate Entsorgung als eine freiwillige Ergänzung zum bestehenden Entsorgungswegen (Pusch, 2017).

Die Diskussion um alternative Kunststoffverwertungswege ist kein neues Thema. Der potenzielle ökologische Nutzen und die finanziellen Auswirkungen auf KVA sind seit längerem bekannt (Empa, 2000). Mit dem KUH-Bag als bestehendes System kann nun aber überprüft werden, ob dieser Umweltnutzen in Realität auch tatsächlich erzielt wird. Neben dem Gesamtumweltnutzen sind in der Überwachung auch andere Bedenken gegenüber gemischten Kunststoffsammlungen zu berücksichtigen. Dies beinhaltet beispielsweise der effektive Anteil der gewonnenen Rezyklate, die Qualität der Recyclingkunststoffe, sowie die Verwertung der Behandlungsreste (SwissRecycling, 2016; BafU, 2016).

Ein Monitoring trägt dazu bei, den potenziellen Beitrag von gemischten Kunststoffsammlungen zu bestehenden umweltpolitischen Verpflichtungen, sowie dessen Sinnhaftigkeit, finanzielle Machbarkeit und Zumutbarkeit abschätzen zu können.

Da gemischte Kunststoffsammlungen in der Schweiz relativ neu sind, gibt es noch kein Monitoringsystem, welches die Materialflüsse aus diesen Sammlungen überwachen kann. *Als erster Arbeitsschritt wurde deshalb am Beispiel des KUH-Bags ein Monitoringsystem für gemischte Kunststoffsammlungen entwickelt, mit welchem Sammlung, Verarbeitung und Verbringung erfasst, dokumentiert und überprüft werden können.* Die Entwicklung stütze sich hierbei auf folgende Leitfragen:

- Welche kritischen Themengebiete sind in einer Überwachung besonders zu berücksichtigen?
- Wie kann die tatsächliche Leistung einer Recyclingkette für gemischte Kunststoffsammlungen gemessen und die potenziell mögliche Leistung bestimmt werden?
- Welche Abläufe ermöglichen die Überwachung der Sammlung und Verarbeitung?

Die Berechnung von Recyclingquoten und die Qualität von Recyclingkunststoffen waren zwei der als kritisch identifizierten Themengebiete. Um diese Themen angemessen berücksichtigen zu können, wurde eine vertiefte Grundlagenbetrachtung durchgeführt.

Als zweiter Arbeitsschritt wurde das Monitoringsystem während der Pilotphase auf das KUH-Bag System angewandt (?) und die daraus gesammelten Daten wurden aufbereitet. Auf Basis der als kritisch definierten Themengebiete wurden folgende Fragen angegangen:

¹¹ Die Kehrichtgebühr wird in der Regel volumenbasiert entrichtet (Gebührensäcke). KUH sind weit voluminöser (~44 kg/m³) als Mischkehricht (~150 kg/m³). Kunststoffe aus Haushalten sind nur ein relativ kleiner Anteil der Menge (24 kg/P a, 12-15%) der Gesamtmenge Siedlungsabfälle aus Haushalten (170-200 kg/P a), machen aber aufgrund der tieferen Dichte rund 45% des Volumens von Haushaltskehricht aus. Somit sind diese für fast die Hälfte der von Haushalten entrichteten Kehrichtsackgebühren verantwortlich. (Eigene Abschätzungen, Daten aus UMTEC und Carbotech, 2017; Bafu, 2012; siehe auch Cartier, 2014).

¹² Entsorgt ein Haushalt seine voluminösen Kunststoffabfälle in einem 60L-Sammelsack für Kunststoffe (2CHF) statt einem 35L-Kehrichtsack (2CHF), spart er ~25%, seiner Entsorgungskosten für Siedlungsabfälle (Eigene Berechnung). Diese Kostenersparnis ist auch Teil der Werbestrategie einzelner Systeme, siehe <https://www.kuh-bag.ch/?lid=1#l4>.

- Wie sehen die verursachten Materialflüsse insgesamt aus?
- Wie entwickeln sich die Sammelmengen und wie ist deren Zusammensetzung?
- Welcher Materialanteil kann potenziell und effektiv rezykliert werden? Wie werden die Behandlungsreste entsorgt?
- Wie unterscheiden sich Recyclingketten mit unterschiedlichen Verarbeitungsansätzen bezüglich zurückgewonnener Rezyklate, deren Qualität und der Verwertung der Behandlungsreste?

Als dritter Arbeitsschritt wurden Leistung des Monitoringsystems und des KUH-Bag Systems kritisch analysiert sowie Möglichkeiten und Grenzen zu deren Weiterentwicklung aufgezeigt. Folgende Fragen wurden untersucht:

- Kann das vorgestellte Monitoringsystem die nötigen Informationen sammeln? Wie müsste dieses weiterentwickelt werden?
- Generiert das KUH-Bag System einen Umweltnutzen? Ist dieser Umweltnutzen aus der praktischen Umsetzung mit denen der Vorstudie vergleichbar?
- Wie kann die Leistung des KUH-Bag Systems weiter verbessert werden?
- Wie schneiden das heutige und das verbesserte KUH-Bag System im Vergleich zur geforderten Zielrecyclingquote ab?

Um die Auswirkungen bestimmter Faktoren auf die Umweltauswirkungen genauer zu untersuchen, wurde die Erstellung einer Ökobilanz zum KUH-Bag Systems begleitet.

Als vierter Arbeitsschritt wurden mögliche weitreichendere Auswirkungen und der Beitrag von gemischten Kunststoffsammlungen auf das Schweizer Entsorgungssystem beschrieben. Folgende Fragen wurden untersucht:

- Welche stofflichen Wechselwirkungen bestehen zwischen gemischten Kunststoffsammlungen und bestehenden Entsorgungswegen?
- Welche Rahmenbedingungen sind einen Ausbau von gemischten Kunststoffsammlungen aus stofflicher Sicht sinnvoll?
- Welchen Beitrag könnten gemischte Kunststoffsammlungen zur Erreichung umweltpolitischer Ziele leisten?

2 Grundlagen

2.1 Beschreibung des KUH-Bag Systems

2.1.1 Übersicht

Der Nutzer hat mit dem KUH-Bag die Möglichkeit, gemischte Kunststoffe aus Haushalten in einem speziellen Gebührensack zu sammeln und einem Recycling zuzuführen. Die Gebühren finanzieren die Sammlung, die sachgemässe Verarbeitung (Sortierung, Aufbereitung und Recycling) des Materials wie auch das Monitoring (Abbildung 1). Nicht separat gesammelte Kunststoffe gelangen weiterhin via Kehrichtsäcke in KVA. Behandlungsreste aus der Verarbeitung von Kunststoffen werden der Verbrennung zugeführt, was neben der KVA auch Zementwerke umfassen kann.

Das KUH-Bag System wird von den Abfallzweckverbänden KVA Thurgau und ZAB Bazenheid betrieben. Neben dem gesamten Kanton Thurgau gehört auch das Toggenburg im Kanton St. Gallen zum Einzugsgebiet des KUH-Bags, da der ZAB auch in dieser Region das Entsorgungsmonopol für Siedlungsabfälle besitzt.

Im Einzugsgebiet des KUH-Bag Systems leben 4.6% der Schweizer Bevölkerung. Die Einwohner werden durch leicht günstigere volumenbezogene Entsorgungsgebühren,¹³ Nachhaltigkeitsargumente sowie einem Recyclingversprechen zu einer Teilnahme motiviert. Hauptzielgruppe des Angebotes sind private Haushalte.

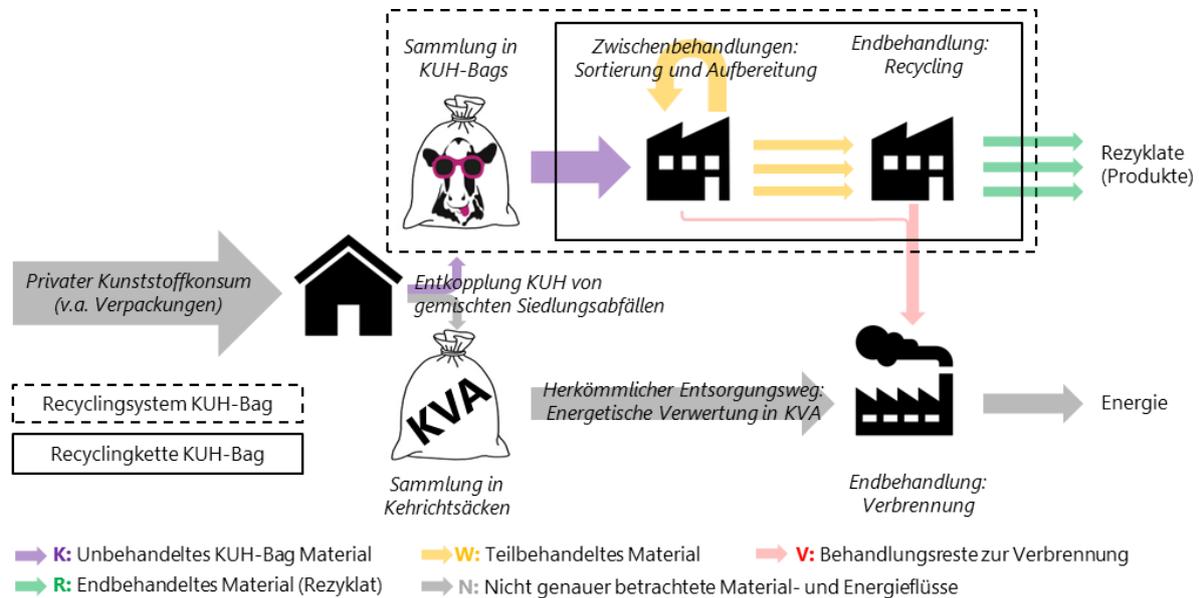


Abbildung 1: Schematische Darstellung KUH-Bag Recyclingsystems und Recyclingkette

¹³ KUH: Fr. 1.40 für 35L, Fr 2.- für 60L Säcke. Kehricht: Fr. 2.- für 35L, Fr. 3.- für 60L Säcke.

2.1.2 Sammlung

Die KUH-Bags wurden während der Pilotphase grösstenteils über ein *Bringsystem* gesammelt: Haushalte bringen dazu gefüllte Sammelsäcke zu einer von fast 60 Sammelstellen. In Wil SG wird in einigen dicht besiedelten Gebieten versuchsweise ein *Holsystem* angeboten. Alle zwei Wochen werden die KUH-Bags mit einem Kehrichtsammelfahrzeug gesammelt.

Im KUH-Bag können die meisten in Haushalten anfallenden Kunststoffabfälle sowie Getränkekartons entsorgt werden. Zu den *Zielartikeln* gehören also Verpackungen wie Flaschen, Becher, Schalen, Folien, Getränkekartons und auch kleine Kunststoffartikel wie Töpfe, Sichtmappen, Kleiderbügel, Kisten.¹⁴ Es gibt nur wenige Kunststoffartikel, die im KUH-Bag unerwünscht sind:

- *PET-Getränkeflaschen* sind im KUH-Bag aufgrund der etablierten und erfolgreichen Separatsammlung unerwünscht (BafU, 2016; OKI, 2016, SwissRecycling, 2016, Pusch, 2016). Der teilweise geschlossene Verwertungskreislauf (Bottle-to-Bottle) der bestehenden PET-Getränkeflaschensammlung könnte durch eine gemischte Sammlung potenziell gefährdet werden. PET aus anderen Verpackungen (PET-NGF, Nicht-Getränkeflaschen) ist aufgrund von Sperrschichten, welche aus anderen Materialien bestehen, teilweise nicht für die Herstellung von Getränkeflaschen geeignet. Zusätzlich ist eine Trennung von PET-GF und PET-NGF aufwändig ist, da maschinelle Verfahren nur eingeschränkt verfügbar sind (petcore Europe, 2017).
- *Stark verschmutzte Kunststoffe*, wie Verpackungen von Grillwaren, Einweggeschirr sowie Verpackungen mit bedeutenden Restinhalten sind aus hygienischen Gründen unerwünscht.
- Für *kunststoffhaltige elektrische Geräte* gibt es eigenständige Sammelsysteme, deren Verwerter auf die in diesem Abfall vorkommenden Schad- und Wertstoffe spezialisiert sind.
- *Spielzeuge (auch ohne elektrische Komponenten), Kabel, Luftmatratzen, Gartenschläuche o.ä.* bestehen teilweise aus PVC und können hohe Konzentrationen an Schadstoffen wie Schwermetallen oder Weichmachern aufweisen. Diese erschweren oder verhindern sowohl die stoffliche Verwertung des KUH-Bag Materials wie auch die Verwertung von Behandlungsresten.

Die im KUH-Bag gesammelten *Zielartikel* bestehen grösstenteils aus den stofflich verwertbaren *Zielmaterialien* PP, PE, PS und PET-NGF und Zellstoff (in Getränkekartons). *Nichtzielartikel*, also unerwünschte Artikel (siehe oben) sowie Fremdartikel (andere Siedlungsabfälle) bestehen grösstenteils aus *Nichtzielmaterialien* (organische Abfälle, andere Kunststoffe wie PVC, Metalle etc.).

Die Aufteilung in diese Kategorien ist nicht scharf. So können Nichtzielartikel durchaus auch Anteile von Zielmaterialien enthalten (z.B. Spielzeuge aus unbedenklichem PP), während Zielartikel auch Nichtzielmaterialien wie Restinhalte und Anhaftungen (*Fehlstoffe*) sowie Metalle enthalten können. Mehrschichtige und beschichtete Folien (Käse- oder Chipsverpackungen) sind Zielartikel, in denen zwar Schichten von Zielmaterialien vorhanden sind, diese aber so eng mit Schichten von Nichtzielmaterialien verbunden sind, dass deren stoffliche Verwertung stark eingeschränkt ist. Metalle und PET-GF sind zwar Nichtzielmaterialien, sind aber als *Wertstoffe* trotzdem für eine Rückgewinnung interessant und werden teilweise auch zurückgewonnen.

¹⁴ Siehe auch: <http://www.kuh-bag.ch/?lid=1#l2>

2.1.3 Verarbeitung

Gemischt gesammelte Kunststoffe können mittels zwei grundsätzlich unterschiedlichen Ansätzen verarbeitet werden. Während für ein Kunststoffrecycling immer dieselben Prozesse benötigt werden, unterscheiden sich die Ansätze darin, wie die einzelnen Prozessschritte angeordnet sind. Dies führt dazu, dass die verschiedenen Ansätze inhärente Vor- und Nachteile in der Verarbeitung aufweisen:

- In einem *artikelbasierten Ansatz* werden die Artikel zuerst auf Basis der Hauptbestandteile in verschiedene Fraktionen sortiert. Artikel, deren Zusammensetzung nicht eindeutig bestimmt werden kann oder die für eine Sortierung zu klein sind, werden aussortiert und verworfen. Die so erhaltene sortierte Ballenware (teilbehandelte Fraktion) wird in einem zweiten Schritt zerkleinert und Bestandteile der Ballen zu Rezyklaten verarbeitet. Aufgrund der doppelten Trennung ist es mit dem artikelbasierten Ansatz einfacher, hohe Materialqualitäten zu erreichen, es wird aber auch mehr Material von vornherein verworfen. Die einzelnen Behandlungsschritte werden von spezialisierten Betrieben durchgeführt, welche u.U. geographisch weit voneinander entfernt liegen können. So ist ein artikelbasierter Ansatz oft eine *zweistufige* Verarbeitung. In der Sortierung ziehen primäre Bestandteile eines Artikels (z.B. PET-NGF einer Ölfflasche) die sekundären Bestandteile (z.B. Flaschendeckel aus PE) in Ballenware mit, wo diese wegen kleinen Mengenanteilen in nachgelagerten Behandlungsschritten oft nicht zurückgewonnen und als Behandlungsreste verbrannt werden. Somit ist es mit dem artikelbasierten Ansatz schwieriger, einen hohen Materialanteil als Rezyklate zurückzugewinnen.
- In einem *materialbasierten Ansatz* werden die Artikel zuerst zerkleinert und die Stücke dann in verschiedene Kunststoffgruppen aufgetrennt und zu Mahlgut verarbeitet. Dabei werden keine ganzen Artikel, sondern nur die Teilstücke von Artikeln, welche aus Nichtzielmaterialien bestehen, verworfen. Die entstandenen gemischten Mahlgüter (teilbehandelte Fraktion) werden darauf weiter aufgetrennt und schliesslich zu Regranulaten verarbeitet. Da kaum Zielmaterial verworfen wird und sekundäre Bestandteile im ersten Behandlungsschritt „befreit“ werden, ist es aufgrund einer grösstenteils *integrierten* Verarbeitung einfacher, einen hohen Anteil des Materials als Rezyklate zurückzugewinnen. Ein materialbasierter Ansatz wird oft in einer oder wenigen Anlagen durchgeführt, welche sich am gleichen Standort befinden können. Da der materialbasierte Ansatz mit einem komplexen Ausgangsgemisch von Ziel- und Nichtzielmaterialien arbeitet, ist es schwieriger, mittels Trennverfahren hohe Materialqualitäten zu erreichen.

Ob und wie sich die inhärenten Vor- und Nachteile der beiden Verarbeitungsansätze in effektiver Menge und Qualität der Rezyklate niederschlagen ist Gegenstand laufender Diskussionen. Grundsätzlich sind beide Ansätze in den bestehenden Recyclingsystemen für Verpackungskunststoffe in Europa verbreitet. Um die effektive Leistung der beiden Ansätze zu beschreiben, wurde im Rahmen der Pilotphase des KUH-Bag Systems Sammelmateriale testweise mit beiden Ansätzen verarbeitet.

2.2 Quoten als Indikatoren für Recyclingsysteme

2.2.1 Übersicht

Quoten spielen in der technischen Bewertung von Recycling- und Verwertungssystemen eine wichtige Rolle. Eine Quote ist ein massenbasierter Indikator für die Effizienz eines Prozesses, einer Anlage oder einem System, der zum Ausdruck bringt, in welchem Mass aus einem bestimmten Material ein Zielnutzen (z.B. Recycling) gewonnen wird oder für eine separate Verwertung zur Verfügung steht (Sammelquote). Quoten werden aus dem Quotient einer Outputmasse bezogen auf eine Inputmasse berechnet. Die daraus resultierende einheitslose Kennzahl wird in Prozent angegeben.

Die Berechnung von Recycling- und Verwertungsquoten (RVQ) sowie Sammelquoten (SQ) folgt somit derselben Grundidee wie die Berechnung von Wirkungsgraden (Energie) oder der Ausbeute (Produktionsprozesse). Die Verarbeitung von Abfällen zu Rezyklaten ist wie die Verwendung von Energie oder Verarbeitung von Material in Produktionsprozessen zwangsweise mit Verlusten behaftet. Da im Recycling kein neues Material geschaffen wird, muss eine Quote, so lange sie auf einer kompletten Massenbilanz basiert, unter 100% liegen. Je mehr Prozesse in einer Quote berücksichtigt werden, desto tiefer muss eine berechnete Quote ausfallen (Abbildung 2). Mit der Wahl der betrachteten Prozesse, bzw. der *Systemgrenze* kann somit der Wert von RVQ sehr stark beeinflusst werden.

Für eine Transition zu nachhaltigeren Stoffkreisläufen spielen RVQ eine wichtige Rolle, da diese Informationen darüber geben, welcher Anteil von Abfällen erneut nutzbar gemacht wird. Es ist aber auch zu betonen, dass diese als rein massenbasierte Indikatoren wenig über den generierten Umweltnutzen aussagen (Haupt et al., 2016). Ebenso finden in RVQ auch die Qualität der resultierenden Materialien oder Energie keine Berücksichtigung.¹⁵

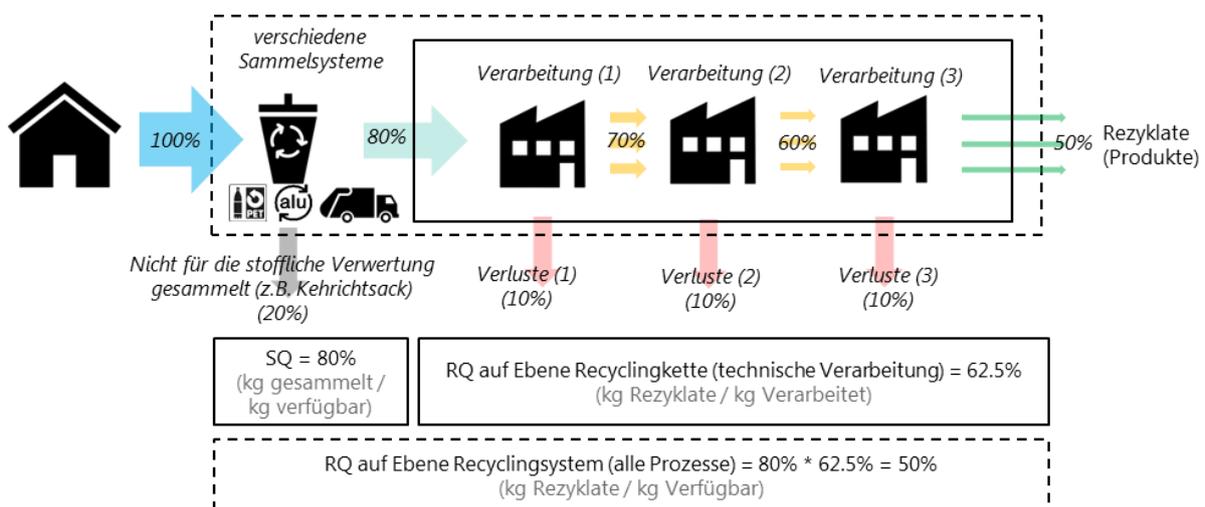


Abbildung 2: Beispielhafte Berechnung von RQ und SQ in einem Recyclingsystem

Gesetzgeber und Systembetreiber verwenden oft Mindestquoten, um eine minimale Leistung zu fordern und mit deren Erhöhung eine kontinuierliche Verbesserung einzuleiten. So werden nicht nur die Quoten selbst, sondern auch die dafür rechtlich bindenden Berechnungsmethoden bzw. die Wahl der

¹⁵ Eine Verwertungsquote unterscheidet nicht, ob elektrische Energie oder thermische Energie nutzbar gemacht wurde. Ebenso ist in einer Recyclingquote die Qualität der Rezyklate nicht berücksichtigt. Auf die Qualität von Recyclingkunststoffen wird in Kapitel 2.2.1 genauer eingegangen.

Systemgrenze zu politischen Einflussgrössen. Dies führt dazu, dass je nach betrachtetem Abfall andere Berechnungsmethoden und Systemgrenzen verwendet werden.

2.2.2 Heutige Mindestquoten und deren Systemgrenzen

In der Praxis ist die Berechnung von RVQ sowohl auf Ebene „Gesamtsystem“ (Recyclingsystem) oder der Ebene „technische Verarbeitung“ (Recyclingkette) üblich. Entsprechend liegt der Prozess der Sammlung innerhalb oder ausserhalb der Systemgrenze (Abbildung 2).

Beispiele für Quoten auf Ebene Gesamtsystem lassen sich sowohl in der Schweiz wie in der EU finden. In der Schweiz gelten gemäss der Verordnung über Getränkeverpackungen (VGV) Mindestverwertungsquoten von 75% für Getränkeverpackungen aus Glas, PET und Aluminium. In der EU gelten für alle Verpackungen und Verpackungsabfälle Mindestrecyclingquoten (60% für Glas, Papier und Karton, 50% für Metalle, 22.5% für Kunststoffe sowie 15% für Holz, Verpackungsrichtlinie 94/62/EG).

Ein Beispiel für Quoten auf Ebene der Recyclingketten sind die zwischen der Schweiz und der EU harmonisierten Mindestquoten für EAG (Swico und Sens, 2012; EAG-Richtlinie 2012/19/EU). Hier lagen die Recycling- und Verwertungsquoten je nach Gerätekategorie ursprünglich bei 50-80% bzw. 70-85% und steigen mit der Zeit an. Im Falle der EU gilt neben den RVQ zusätzlich eine Mindestsammelquote von 45% (ab 2016) sowie 65% (ab 2019).

Für das Recycling von Kunststoffen wurden in der Schweiz bis jetzt noch keine Mindestquoten festgelegt. Als Ziel wird jedoch gefordert, dass „[...] mindestens 70% der separat gesammelten Kunststoffe recycelt werden“ (BafU, 2016). Der Zielwert ist auf der Ebene der Recyclingkette festgelegt und fokussiert sich so allein auf die Verarbeitung.¹⁶

Da Sammlung und Verarbeitung zwei klar trennbare Prozesse sind, können RVQ dieser beiden Systemgrenzen ineinander umgerechnet werden (Abbildung 2). Da RVQ in Prozenten angegeben werden, kann es jedoch nur schon schwierig sein, die Systemgrenze einer veröffentlichten Quote festzustellen. Hier könnte mit einer konsequenten Angabe von Einheiten (Abbildung 2) sowie einer unterschiedlichen Bezeichnung der Quoten (siehe 2.2.4) mehr Klarheit geschaffen werden. Grundsätzlich ist eine Unterteilung der Systemleistung mit einer Sammelquote und einer RVQ auf Ebene der technischen Verarbeitung sinnvoll. Nur mit der Erhebung beider Werte kann die Leistung eines Systems umfassend beurteilt und ein Handlungsbedarf am richtigen Ort erkannt werden. Eine tiefe Sammelquote ist ein Hinweis darauf, dass die Lenkung der Abfälle verbessert werden sollte. Eine tiefe Recyclingquote (nur Verarbeitung) ist ein Hinweis darauf, dass eine verbesserte Verarbeitung angestrebt werden sollte.

Das Wissen, dass RVQ je nach Abfall die Sammlung mitberücksichtigen oder nicht ist jedoch noch nicht ausreichend, um Quoten verschiedener Abfälle bzw. Länder vergleichbar zu machen. RVQ verschiedener Abfälle unterscheiden sich zusätzlich darin, wie die Systemgrenzen innerhalb der technischen Verarbeitung gesetzt werden.

Dies kann so weit gehen, dass Quoten als RVQ ausgewiesen werden, die technische Verarbeitung jedoch gar nicht berücksichtigt wird und somit eigentlich Sammelquoten ausgewiesen werden (Glas und

¹⁶ Rücksprache mit Michel Monteil und Marco Buletti (Bafu) vom 27.09.2017.

Aluminium nach VGV; BafU, 2013a; BafU 2013b; Haupt et al., 2016).¹⁷ Im Falle der VGV ist zusätzlich erwähnenswert, dass die Quoten zwar als Verwertungsquoten bezeichnet werden, jedoch damit nach heutigem Wortgebrauch Recyclingquoten gemeint sind. In der VGV ist der Begriff „Verwertung“ aus historischen Gründen als „[...] Herstellung neuer Verpackungen oder anderer Produkte aus gebrauchten Verpackungen“ definiert und bezieht sich somit nur auf die stoffliche Verwertung (VGV, Art. 2).

Teilweise werden Sammelmengen mit Pauschalabzügen verrechnet, womit ein Teil der anfallenden Materialverluste abgebildet werden kann. Im Falle von PET-Getränkeflaschen (VGV) werden beispielsweise Abzüge für den Anteil der Fremdstoffe (Restinhalt der Flaschen, Fehlwürfe und Abfälle) sowie Nicht-PET Bestandteile von PET-Flaschen (Deckel, Deckelringe und Etiketten) gemacht (BafU, 2013c). Somit wird in Wirklichkeit der Gehalt an PET-GF (als Polymertyp) im Sammelmaterial bestimmt. Dies deckt sich jedoch nicht vollständig mit dem Anteil der effektiv rezyklierten Materialien, da ein Teil des PET-GF in der Verarbeitung verworfen wird. Dafür wird aber ein Teil der Deckelringe und Deckel als PE-Rezyklat zurückgewonnen (Haupt et al., 2016).

Die Wahl von Systemgrenzen ist nicht nur im Beispiel (Abbildung 2), sondern auch in der Realität von Bedeutung. Im Vergleich zu endgültig berechneten Recyclingquoten auf der Ebene Recyclingsystem liegen die in der Schweiz ausgewiesenen Quoten um 12-39% höher. Im Extremfall Papier wird eine Quote von 97% ausgewiesen, die bei endgültiger Betrachtung bei 58% liegt (Haupt et al, 2016). In mehreren Fällen ist hierbei nicht nur die Wahl der abgebildeten Prozesse für diesen Unterschied verantwortlich, sondern auch eine andere Erfassung der für das Recycling verfügbaren Abfälle. Insbesondere bei der Bestimmung der tatsächlich verfügbaren Abfallmengen werden immer Unsicherheiten bestehen. Materialflüsse wie der private Import von verpackten Lebensmitteln oder die als Restmengen im gemischten Siedlungsabfall verbleibenden Mengen können nur ungenau bestimmt werden.

2.2.3 *Intermediäre und endgültige Recyclingquoten*

RVQ, welche nur einen Teil der Verarbeitungskette abbilden, sind als *intermediäre RVQ* zu bezeichnen (Haupt et al., 2016). Beispielsweise kann der Output einer ersten Behandlung oder Sortierung oder der Input einer letzten Behandlung als rezykliert betrachtet werden (Eurometaux, 2016). Im Beispiel (Abbildung 2) würde entsprechend eine RQ von 70% oder 60% berechnet, wobei die *endgültige Recyclingquote* bei 50% liegt.

Werden Mindestquoten als intermediäre Recyclingquoten definiert, so wird damit ein Interessenskonflikt zwischen Systembetreiber, Gesetzgeber und Verarbeitungsbetrieben geschaffen. Mit intermediären Quoten ist es möglich, dass eine vergleichsweise schlechte Verarbeitung höhere Quoten erreicht. Verarbeitungsprozesse können so gewählt werden, dass ein möglichst hoher Teil der Verarbeitungsverluste ausserhalb der Systemgrenze anfallen.

Zusätzlich kann die Leistung verschiedener Recyclingketten unter intermediären Recyclingquoten nur bedingt verglichen werden, da je nach Verarbeitungsansatz nicht dieselben teilbehandelten Fraktionen entstehen und gewichtsmässig erfasst werden können. Abbildung 3 zeigt exemplarisch, wie intermediäre

¹⁷ Bei Glas wurde die Berechnungsmethode kürzlich angepasst, womit diese Verwertungsquote neu zusätzliche Prozesse berücksichtigt (Rücksprache mit Michel Monteil und Marco Buletti (Bafu) vom 27.09.2017).

äre Recyclingquoten im Falle der Verarbeitung gemischter Kunststoffsammlungen bei unterschiedlichen Verarbeitungsansätzen (siehe 2.1.3) unterschiedlich ausfallen können, obwohl im Beispiel beide dieselben endgültigen Recyclingquoten erreichen.

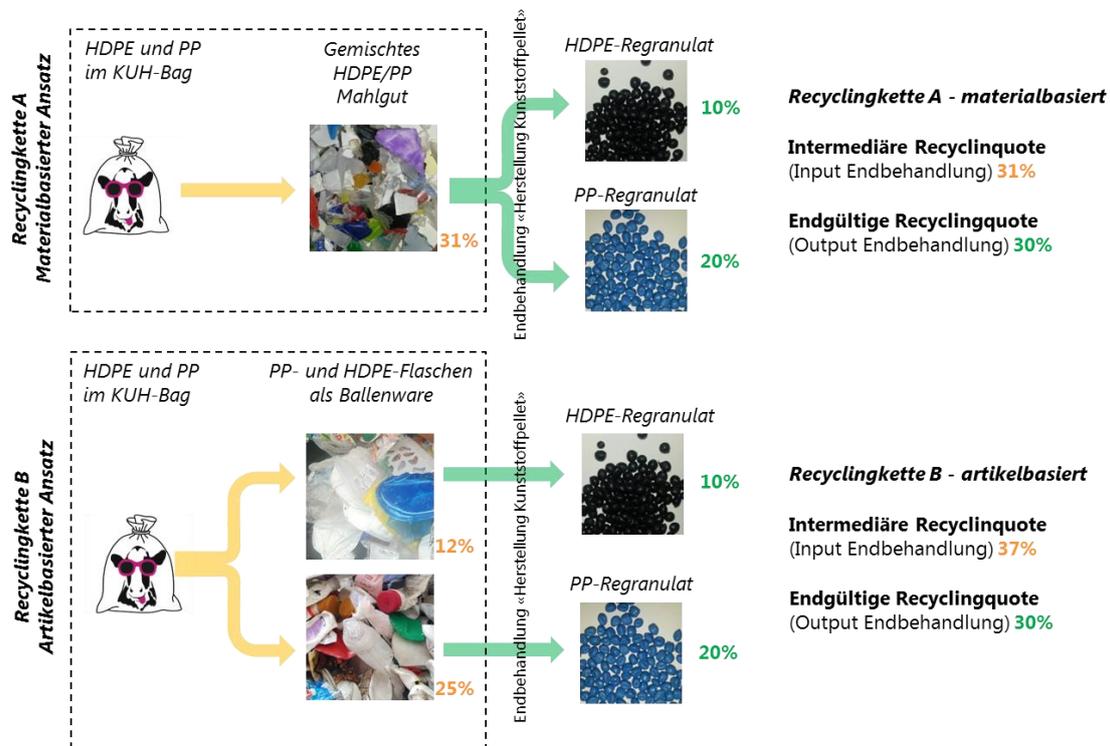


Abbildung 3: Beispiele zu intermediären und endgültigen Recyclingquoten im KUH-Bag System

Als technische sowie umweltpolitische Beurteilungsgrundlage sind intermediäre Recyclingquoten deshalb nur bedingt nützlich und endgültig berechnete Recyclingquoten sind zu bevorzugen. Aus technischer Sicht besteht das Hauptproblem darin, dass intermediäre Quoten fast unmöglich in endgültige Quoten umgerechnet werden können, da selten bestimmt werden kann, wie weit die Verluste für jede aus dem Sammelmateriale entstandene Fraktion berücksichtigt wurde. Aus umweltpolitischer Sicht liegt das Hauptproblem darin, dass mit intermediären Quoten der heutige Umweltnutzen und die heutigen Beiträge zu einer Kreislaufwirtschaft über- und zukünftige Verbesserungspotenziale unterschätzt werden (Haupt et al., 2016).

Auch in der Kommunikation können intermediäre Recyclingquoten problematisch sein. Mit intermediären Quoten wird eine scheinbar bessere Leistung ausgewiesen. Reaktionen in der Presse zeigen jedoch immer wieder, dass die Öffentlichkeit intermediäre Recyclingquoten als ungerechtfertigte Beschönigung betrachtet (NZZ, 2003; NZaS, 2017). Dies ist besonders dann problematisch, wenn Gesetze eigentlich eine endgültige Betrachtung vorschreiben würden, wie dies in Europa für Verpackungskunststoffe der Fall ist: „[Es wird] nur Material berücksichtigt, das durch stoffliche Verwertung wieder zu Kunststoff wird“ (Verpackungsrichtlinie 94/62/EG, Art 6e).

Rezyklate bewegen sich in einem Stoffkreislauf und werden nach Recyclingprozessen in Produktionsprozessen unter zusätzlichen Verlusten weiterverarbeitet. Somit stellt sich für jede Art von Recyclingquoten, auch für sogenannte „endgültige“ RQ die Frage, wann „genug“ Verluste miteinbezogen wurden, bzw. wann ein Material nun „wirklich“ als endgültig rezykliert gilt. Entsprechend ist es in jedem Fall

sinnvoll, bei der Berechnung einer RQ zu deklarieren, wo die Systemgrenzen gezogen wurden und welche Materialien als endgültig recycelt betrachtet wurden.

Auf politischer Ebene ist die Problematik verschiedener Berechnungsmethoden für Recyclingquoten erkannt (BafU, 2013c; EAfTEL, 2016). In der EU bestehen zurzeit Harmonisierungsbestrebungen, um die Recyclingquoten verschiedener Mitgliedstaaten vergleichbarer zu machen. Hierzu wird vorgeschlagen, die Berechnung mit Systemgrenze „Input des endgültigen Recyclingprozesses“ vorzuschreiben (EC, 2015). Meist wird dies als willkommener Fortschritt gesehen (Eurometaux, 2016), obwohl damit weiterhin intermediäre Recyclingquoten berechnet würden. Im Falle der EAG wird die Festlegung von der Industrie als Rückschritt betrachtet, da ein eigener Standard (CENELEC 50625 Serie) verlangt, dass die Ausbeute der Endbehandlung zu berücksichtigen ist (Digital Europe et al., 2016).

Die für Kunststoffsammlungen in der Schweiz geforderte Zielquote bezieht sich auf eine endgültig berechnete Quote¹⁸. Dies ist begrüßenswert, da dies erlaubt, das Monitoring in den neu aufkommenden gemischten Kunststoffsammlungen gleich zu Beginn auf eine fundierte Basis zu stellen.

2.2.4 Quoten und Kennzahlen für eine gemischte Kunststoffsammlung

Für Pilotsysteme wie gemischte Kunststoffsammlungen ist eine Unterteilung der Systemleistung in eine Sammelquote und eine Recyclingquote auf Verarbeitungsebene besonders wichtig (siehe 2.2.2). Zu Beginn ist eine tiefe Sammelquote zu erwarten, mit dem Sammelmateriale kann jedoch bereits die Verarbeitungsleistung verschiedener Verarbeitungsansätze (siehe 2.1.3) untersucht und verglichen werden. Die Quoten im vorliegenden Bericht werden auf der Grundlage der in Abbildung 4 vorgehobenen Massenflüssen und Massenbilanz berechnet.

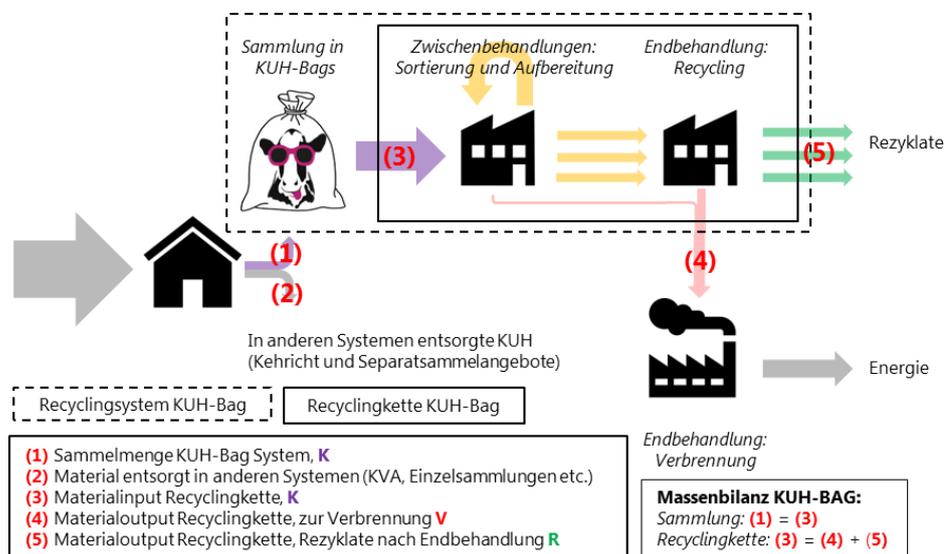


Abbildung 4: Massenflüsse, Massenbilanz des KUH-Bag Systems

Die **Sammelquote (SQ)** bezeichnet den Massenanteil der effektiv gesammelten Materialien in Bezug an der verfügbaren Menge KUH-Bag Material:

$$\text{Sammelquote (SQ)} / 100\% = \frac{\text{KUH Material gesammelt [t]}}{\text{KUH Material verfügbar [t]}} = \frac{(1)}{(1) + (2)} = \frac{(3)}{(1) + (2)}$$

¹⁸ Rücksprache mit Michel Monteil und Marco Buletti (Bafu) vom 27.09.2017.

Die **technische Recyclingquote (tRQ)** wird auf Ebene der Recyclingkette berechnet und beinhaltet somit sämtliche Verarbeitungsschritte ab Sammlung bis und mit zur Endbehandlung:

$$\text{technische Recyclingquote (tRQ)} / 100\% = \frac{\text{Regranulate} + \text{Zellstoff} + \text{Metall [t]}}{\text{KUH Material verarbeitet [t]}} = \frac{(5)}{(4) + (5)} = \frac{(5)}{(3)}$$

Als Endbehandlungen werden folgende Prozesse mit folgenden endgültig rezyklierten Materialien betrachtet: Extrusion zu Kunststoffpellets (Kunststoffregranulat), Rückgewinnen des Zellstoffs aus Getränkekartons (Zellstoff), sowie Einschmelzen der Deckel und Fremdmaterial wie Alu-Dosen (Metall, Abbildung 5). Die tRQ ist mit derselben Systemgrenze wie die geforderte Zielrecyclingquote von 70% berechnet und kann somit damit verglichen werden.



Abbildung 5: Endgültig rezyklierte Materialien in diesem Bericht

In diesem Bericht nicht verwendet, aber langfristig eine sinnvolle Grösse als Indikator für die Leistung des Gesamtsystems ist die **Systemrecyclingquote (sRQ)** als Produkt der technischen Recyclingquote und der Sammelquote:

$$\text{Systemrecyclingquote (sRQ)} / (100\%) = SQ * tRQ = \frac{(3)}{(1) + (2)} * \frac{(5)}{(3)} = \frac{(5)}{(1) + (2)}$$

Bei der Interpretation von Recyclingquoten wird oft nicht beachtet, dass gewisse Verluste unvermeidbar, bzw. sogar erwünscht sind, da sonst keine brauchbaren Rezyklate hergestellt werden können. Fehlstoffe wie Feuchte, Lebensmittelreste und Anhaftungen müssen in der Aufbereitung entfernt werden. Die verschiedenen Wertstoffe müssen in separate Fraktionen aufgeteilt werden, wobei immer eine gewisse Trennschärfe bleibt. Zusätzlich verwerfen gewisse Verarbeitungsansätze bewusst gewisse sekundäre Bestandteile.

In diesem Bericht werden zwei Werte berechnet, die die Interpretation von Recyclingquoten und Bewertung von Verwertungswegen unterstützen sollen.

Der **Anteil der rezyklierten Wertstoffe** im Sammelmateriale wird aus tRQ und dem Wertstoffgehalt¹⁹ bestimmt:

$$\text{Zurückgewonnene Wertstoffe} = tRQ / \text{Wertstoffgehalt} = \frac{\text{Rezyklate [t]}}{\text{Wertstoffe im KUH - Bag [t]}}$$

Der Anteil der rezyklierten Wertstoffe hilft, die Leistung verschiedener Recyclingketten unabhängig von Fehlstoffen wie Siedlungsabfällen und dem Wassergehalt zu berechnen. Liegt eine tRQ beispielsweise bei 60% und der Anteil Wertstoffe bei 80%, ist der Anteil der rezyklierten Wertstoffe 75% (60%/80%).

¹⁹ Der Wertstoffgehalt muss aus der Zusammensetzung des Sammelmateriale bestimmt werden.

Die potenziell technisch erreichbare Recyclingquote (oder **technisches Recyclingpotenzial, tRP**), berücksichtigt neben dem Gehalt von Fehlstoffe auch technisch unvermeidbare Wertstoffverluste. Da die Materialverluste je nach Verarbeitungsansatz (siehe 2.1.3) verschieden sein können, wird für jeden Ansatz ein separates technisches Recyclingpotenzial bestimmt:

$$\text{technisches Recyclingpotential (tRP)} = \frac{\text{potentielle Rezyklate aus KUH} - \text{Bag System}}{\text{Verarbeitetes KUH} - \text{Bag Material}} = \frac{(7)_{pot}}{(3)}$$

Das tRP wird mit denselben Systemgrenzen wie die tRQ berechnet und ist somit ebenso mit der geforderten Zielquote von 70% vergleichbar. Aus tRP und tRQ der Verlust an potenziell für das Recycling verfügbarem Material bestimmt werden (**Potenzialverlust**):

$$\text{Potentialverlust} = \text{tRP} - \text{tRQ}$$

Liegen Ziel- oder Mindestrecyclingquoten tiefer als das technische Recyclingpotenzial, so können diese alleine mit einer verbesserten Verarbeitung erreicht werden. Liegen die Ziel- oder Mindestwerte über dem tRP, so kann eine verbesserte Verarbeitung alleine die Ziele nicht erreichen und es sind weitreichendere Veränderungen nötig (z.B. Anpassung der Zielartikel, Einführen zusätzlicher Verarbeitungsschritte für verworfenes Material).

2.3 Qualität und Anwendungsgebiete von Recyclingkunststoffen

Recyclingkunststoffe können verschiedene Qualitäten aufweisen. Qualität kann hierbei unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet werden und ist eng mit den Anwendungsgebieten der Recyclingkunststoffe verknüpft. Eine Beurteilung der Qualität kann auf der *Material-, der Anwendungs- sowie der Nutzenebene* vorgenommen werden, wobei jeweils andere Kriterien zu betrachten sind:

- Auf der *Ebene Material* sind Werkstoffeigenschaften (Zähigkeit, Festigkeit, Beständigkeit etc.) wie auch Verarbeitungseigenschaften (Schmelz- und Kristallisationstemperatur, Schmelze-Masseflussrate MFR, etc.) zu berücksichtigen. Diese Eigenschaften verändern sich bei Kunststoffen mit zunehmendem Alter, da sich diese unter UV-Strahlung oft langsam zersetzen. Mit jeder erneuten Verarbeitung wird das Material durch Temperaturschwankungen weiter verändert. Bei Rezyklaten aus gemischten Kunststoffabfällen können diese Eigenschaften stärker beeinflusst werden, da solche Rezyklate höhere Gehalte an fremden Kunststoffen aufweisen können. Bei nicht-verträglichen Kunststoffen führt dies zu einer Verschlechterung der technischen Materialeigenschaften, bei kompatiblen Kunststoffen können auch erwünschte Eigenschaftskombinationen erzielt werden.

Zusätzlich sind auch Materialeigenschaften wie Oberflächenstruktur, Farbe, Geruch und Gehalt an bedenklichen Stoffen zu berücksichtigen, welche wichtige Kriterien für eine Qualitätsbeurteilung sein können. Die Bildung einer glatten Oberfläche kann durch Fremdstoffe oder fremde Kunststoffe eingeschränkt sein. Die Farbgebung eines Rezyklates ist durch die Farbe des Eingangsmaterials stark eingeschränkt. Ein kleiner Anteil dunkler Kunststoffe oder Fremdstoffe in einem Mahlgut führt zu trüber Farbgebung, bei höheren Anteilen können meist nur noch dunkle oder schwarze Rezyklate produziert werden. Gewisse Kunststoffe können Gerüche aus ihrer Umgebung (z.B. Marinaden, Gewürze, Putzmittel) aufnehmen oder mit der Alterung zusätzlichen Geruch entwickeln, welche teilweise in Rezyklaten bemerkbar bleiben.

- Auf der *Ebene der Anwendung* schränken rechtliche Erlasse die möglichen Anwendungsgebiete ein. So ist beispielsweise die Anwendung im Lebensmittelbereich eingeschränkt und erfordert eine Bewilligung (Lebensmittel- und Gebrauchsgegenständeverordnung, Art. 50 und Bedarfsgegenständeverordnung). Im Spielzeugbereich bestehen sehr tiefe Grenzwerte für bedenkliche Stoffe (Spielzeugverordnung, 3. Abschnitt) womit der Einsatz von Recyclingkunststoffen eingeschränkt ist. Die Erfüllung der Anforderungen, bzw. das Vorhandensein einer Bewilligung kann somit als zusätzliches Qualitätsmerkmal betrachtet werden.

Anstelle der möglichen Anwendungsgebiete kann auch die tatsächliche Anwendung der Recyclingkunststoffe als Qualitätsmerkmal verwendet dienen. Dies ist meist einfacher, da auf eine vollständige Analyse der Materialeigenschaften sowie potenzieller Anwendungsgebiete verzichtet werden kann. Wird die tatsächliche Anwendung als alleiniges Qualitätsmerkmal verwendet, so wird nicht berücksichtigt, dass diese teilweise mehr von der Bereitschaft der Kunststoffindustrie und Akzeptanz des Konsumenten zur Anwendung von Recyclingkunststoffen als von der Materialqualität selbst abhängig ist. Somit wird damit nicht das Potenzial der Recyclingkunststoffe abgebildet: Wie neuwertige Kunststoffe können auch hochwertige Recyclingkunststoffe bei Bedarf für tieferwertigen Anwendungen genutzt werden.

- Auf der *Ebene des Nutzens* können Kriterien der Material- und Anwendungsebenen kombiniert werden, um ein ganzheitlicheres Mass für die Qualität von Recyclingkunststoffen zu erhalten. Der direkte ökonomische Nutzen kann beispielsweise durch den erzielten Marktpreis abgebildet werden. Dieser berücksichtigt insbesondere die Materialeigenschaften sowie die effektiven Anwendungsgebiete.

Der Nutzen aus Sicht der Ressourceneffizienz kann sowohl durch die Bewertung der entstandenen Materialkreisläufe als geschlossen/offen (Verwendung in derselben/anderer Anwendung, Haupt et al., 2016) wie auch der Feststellung des Ersatzpotenzials der Recyclingkunststoffe realisiert werden. Hierbei können die Kriterien frei gewählt werden, eine vollständige Betrachtung müsste jedoch zusätzlich zu technischen Materialeigenschaften und rechtlichen Einschränkungen auch „weiche“ Faktoren wie Akzeptanz und dafür relevante Materialeigenschaften mitberücksichtigen.

Für die Ermittlung des gesamtökologischen Wertes der Recyclingkunststoffe wird ebenso ein Ersatzpotenzial bestimmt. Dieses beschränkt sich jedoch nur auf den Ersetzungsgrad von neuwertigen Kunststoffen aus ökologischer Sicht. Wird beispielweise für die Herstellung eines Produktes mit Rezyklat mehr Material als bei einer Herstellung mit neuwertigem Material benötigt (z.B. dickere Wandstärken um die Eigenschaften zu erhalten), wird dies mit einem Abzug in der Bewertung berücksichtigt. Für Farbe und Geruch werden hingegen keine Abzüge gemacht, da diese den ökologischen Nutzen nicht verringern, solange der Kunststoff immer noch verwendet wird.

Aufgrund der Vielzahl möglicher Bewertungsaspekte und -methoden kann keine umfassende Beurteilung der Qualität von Recyclingkunststoffen vorgenommen werden. Im Rahmen dieses Berichtes wird deshalb die Qualität der Recyclingkunststoffe nicht abschliessend beurteilt, die erreichten Qualitäten werden aber so weit möglich anhand der aufgeführten Kriterien beschrieben und verglichen.

3 Monitoring von gemischten Kunststoffsammlungen

3.1 Kritische Themengebiete

Als Vorbereitung zur Gestaltung des Monitoringsystems wurden die für eine Überwachung besonders kritischen Themengebiete bestimmt:

- *Gemischte Kunststoffsammlungen können potenziell eine ergänzende oder konkurrierende Wirkung auf bestehende Entsorgungssysteme haben.* Um diese Auswirkung beschreiben zu können, müssen sowohl Menge und Zusammensetzung des Sammelmaterials auf Artelebene als auch die Verwertung von Behandlungsresten erfasst werden.
- *Recyclingketten gewinnen unterschiedliche Anteile als Rezyklate in verschiedenen Qualitäten zurück.* Für deren Vergleich müssen sowohl die Zusammensetzung auf Materialebene wie auch die Menge und Qualität der einzelnen zurückgewonnenen Rezyklate bestimmt werden. Die daraus zu bestimmenden Quoten muss „endgültig“ sein, so dass diese mit der geforderten Zielquote verglichen werden kann. Um die Grenzen heutiger Verarbeitungswege in diesen Vergleich einzubeziehen, ist auch das technische Recyclingpotenzial zu bestimmen.
- *Kunststoffabfälle werden international gehandelt und können in (vorwiegend) asiatische Schwellen- und Entwicklungsländer gelangen, in denen diese Abfälle oft ohne Rücksicht auf soziale und umweltrechtliche Mindestanforderungen verarbeitet werden.* Somit muss der Behandlungsort von teilbehandelte Fraktionen bis zum Recycling und der Verwertung von Behandlungsresten bestimmt werden. Für die Behandlungsreste haben die Verbände als Systembetreiber zusätzlich eine Rückführungspflicht für wichtige Verarbeitern im Ausland festgelegt. Da eine physische Rückführung von KUH-Bag Behandlungsresten aufgrund von vermischten Verarbeitungen nicht vollständig möglich ist, kann so eine Rückführung im Mengenausgleich sichergestellt werden. Dies heisst, dass mehr Behandlungsreste aus dem Ausland für die Verwertung in die Schweiz importiert werden, als durch KUH-Bag Material im Ausland verursacht wird. Für teil- oder unbehandelte Fraktionen wären, falls ein Export in Schwellen- oder Entwicklungsländer festgestellt würde, weitere Abklärungen nötig.

Um diese Themengebiete abdecken zu können, muss das Sammelmaterial von der Sammelstelle bis und mit Endbehandlung untersucht werden (Systemgrenze).

3.2 Datenerhebung

3.2.1 Übersicht

Für das Monitoring der Materialflüsse werden Daten in der Sammlung und der Verarbeitung erhoben (Abbildung 4). Eine *Stoffbuchhaltung* führt die Materialflüsse zu einem Gesamtbild zusammen.

3.2.2 Sammlung

Die Sammlung wird durch die Erfassung von Sammelmengen und deren Zusammensetzung überwacht:

3.2.3 Verarbeitung

Zur Überwachung der Verarbeitung werden sowohl potenzielle wie effektive Recyclingquote (tRP und tRQ) der verschiedenen Recyclingketten, die Qualität, die Verbringung von teilbehandelten Fraktionen sowie die Verwertungsart der Behandlungsreste bestimmt:

- Das *technische Recyclingpotenzial* berücksichtigt neben dem Gehalt an Fehlstoffen auch technisch unvermeidbare Verluste von Wertstoffen der Verarbeitung (siehe 2.2.4). Für die Berechnung des tRP werden sowohl die Zusammensetzung auf Artekelebene wie auch auf Materialebene verwendet. Beim artikelbasierten Ansatz wurden die Nichtzielartikel mit wenig Wertstoffgehalt (Kat. 6), kleine flächige Zielartikel (Kat. 5) sowie die sekundären Wertstoffe und Fehlstoffe aller Zielartikel als technisch unvermeidbare Verluste betrachtet.²¹ Beim materialbasierten Ansatz wurden nur die Fehlstoffe als technische unvermeidbare Verluste betrachtet. In beiden Ansätzen wurden zusätzlich noch Verluste in der Endbehandlung mit materialspezifischen Rückgewinnungskoeffizienten berücksichtigt (Austritt von Gasen und Filtrierung der Kunststoffschmelze, Faserverluste durch Verkürzung bei Zellstoff, Metalloxydation und Schlackenverlust in der Metallschmelze).
- Die *technische Recyclingquote* wird durch eine genaue *Untersuchung der Verarbeitung beim Erstempfänger* und zusätzlichen *Informationen zu nachgelagerten Behandlungsschritten bei Folgeempfängern* bestimmt.

Die *Verarbeitung beim Erstempfänger* wird wenn möglich mit einem *Batch-Versuch* untersucht. Hierbei wird eine Charge KUH-Bag Sammelmateriale in einer zuvor entleerten und gereinigten Anlage verarbeitet. Dabei werden die Gewichte der Inputmenge, aller Output-Fractionen sowie allfällige Verluste (Restmengen in Anlagen, Feuchtigkeit, etc.) bestimmt. Zur Bestimmung der Qualität und deren Zusammensetzung werden die teilbehandelten Fraktionen händisch sortiert. Kann kein Batch-Versuch durchgeführt werden, wird die Verarbeitung modelliert. Hierzu legt ein Verarbeiter seine Anlagentechnik und Transferkoeffizienten der einzelnen Prozessschritte offen, welche für die Modellierung plausibilisiert werden.

Informationen zu nachgelagerten Behandlungsschritten werden mit einem *Nachweissystem* erfasst. Hierzu liefert der Erstempfänger Informationen zum Folgeempfänger, dessen Standort, Prozess, Ausbeute in der Verarbeitung (siehe Anhang A II). Führt der erste Folgeempfänger keine Endbehandlung durch, wird dieser Prozess wiederholt, bis die Endbehandlung erreicht wird. Die so erhaltenen Daten werden auf Ihre Plausibilität geprüft und punktuell mit Rückfragen bei Folgeempfängern ergänzt.

- Die *Qualität der Recyclingkunststoffe*, die *Verbringung von teilbehandelten Fraktionen* sowie die *Verwertungsart der Behandlungsreste* wird mit demselben *Nachweissystem* eingeholt, überprüft, und durch Rückfragen ergänzt.

Die Verarbeitung wurde zur Wahrung von Geschäftsgeheimnissen von der Empa überwacht.

²¹ Für eine genaue Beschreibung der Artikelkategorien siehe Anhang A I.

4 Materialflüsse und -zusammensetzung im KUH-Bag System

4.1 Übersicht

Während der Pilotphase (Oktober 2015 – September 2017) wurden insgesamt 752 t KUH-Bags gesammelt. Per Ende September 2017 wurden davon 641 t in verschiedenen Kampagnen verarbeitet, während eine Restmenge von 111 t oder 15% der gesamten Sammelmenge unverarbeitet gelagert war (Abbildung 7). Das unverarbeitete Material wird in einer noch nicht abgeschlossenen Verarbeitungskampagne im Oktober und November 2017 restlos verarbeitet.

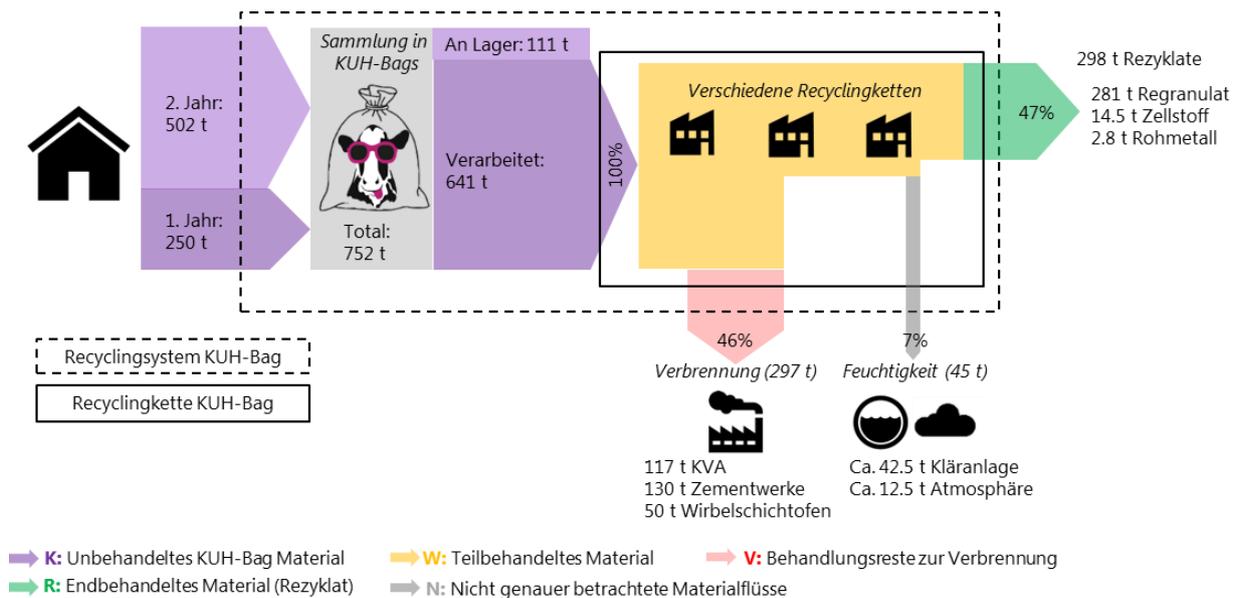


Abbildung 7: Gesamtflüsse der gesammelten KUH-Bag Materials nach 2-jährigem Betrieb

Über die ganze Pilotphase wurde eine durchschnittliche technische Recyclingquote von 47% erreicht, bzw. 61% der Wertstoffe im KUH-Bag zurückgewonnen²². Von den 298.5 t Rezyklaten waren 281 t Recyclingkunststoffe, 14.5 t Zellstoffe und 2.8 t Rohmetalle. Die Behandlungsreste von 46% oder 297 t des verarbeiteten Materials wurden via KVA Weinfelden und Bazenheid (117 t), Zementwerken im Inland (130 t) oder in einem Wirbelschichtofen (50 t) einer energetischen Verwertung zugeführt.

Grund für Rückführung in die KVA Weinfelden war nicht die Qualität der Behandlungsreste, sondern die nicht restlos geklärten gesetzlichen Rahmenbedingungen bezüglich einer Verwertung solcher Fraktionen in Zementwerken (VVEA Art. 24).²³ Entsprechend enthielten die Exportbewilligungen zu Beginn die Bedingung, dass Behandlungsreste des Erstempfängers in Schweizer KVA rückgeführt werden müssen. Ab Beginn 2017 wurde die Verbrennung von Behandlungsresten im Zementwerk erlaubt (BafU, 2017), womit ab Frühling 2017 wurden keine Behandlungsreste mehr in die KVA rückgeführt wurden.

Die restlichen 7% des verarbeiteten Materials sind flüssige, flüchtige oder lösbare Bestandteile des Sammelmaterials (Materialfeuchte, Restinhalte, Lebensmittelreste). Diese werden während den Recy-

²² Wertstoffgehalt im KUH-Bag: 77% (siehe 4.2.3).

²³ Bis Beginn 2017 galt KUH Sammelmateriale als „gemischte Siedlungsabfälle“ oder „gemischt gesammelte und nachträglich sortierte Siedlungsabfälle“, die gemäss VVEA Art. 24 nicht in Zementwerken verwertet werden durften.

lingprozessen entweder via Abwasser (bspw. beim Pressen und Waschen) oder in die Luft (bspw. beim Trocknen und Extrudieren) abgegeben.

4.2 Sammlung

4.2.1 Sammelmengen

Im ersten Jahr des Pilotversuches (Oktober 2015-16) lag die Sammelmenge bei 250 t, im zweiten Jahr (Oktober 2016-17) bei 502 t (Abbildung 8). Während zwischen einzelnen Monaten grosse Schwankungen zu beobachten waren, nicht zuletzt wegen unterschiedlicher Anzahl der Sammeltouren, ist die Sammelmenge über die gesamte Versuchszeit angestiegen. Aufgrund der grossen monatlichen Unterschiede kann nicht beurteilt werden, ob das Wachstum der Sammelmenge bereits verlangsamt.

In einzelnen Sammelstellen wurden noch grössere monatliche Schwankungen beobachtet. Beispielsweise konnte nach Gratisverteilaktionen von KUH-Bags jeweils ein Anstieg der Sammelmengen beobachtet werden. Dieser Kundenzuwachs blieb dem KUH-Bag System nur teilweise erhalten, da nicht der gesamte Mengenanstieg gehalten werden konnte. Dies lässt darauf schliessen, dass ein gewisser Teil der Bevölkerung das KUH-Bag System versuchsweise genutzt hat, aber eventuell vom Angebot noch nicht überzeugt war oder den Aufwand zur Teilnahme nicht aufbringen wollte.

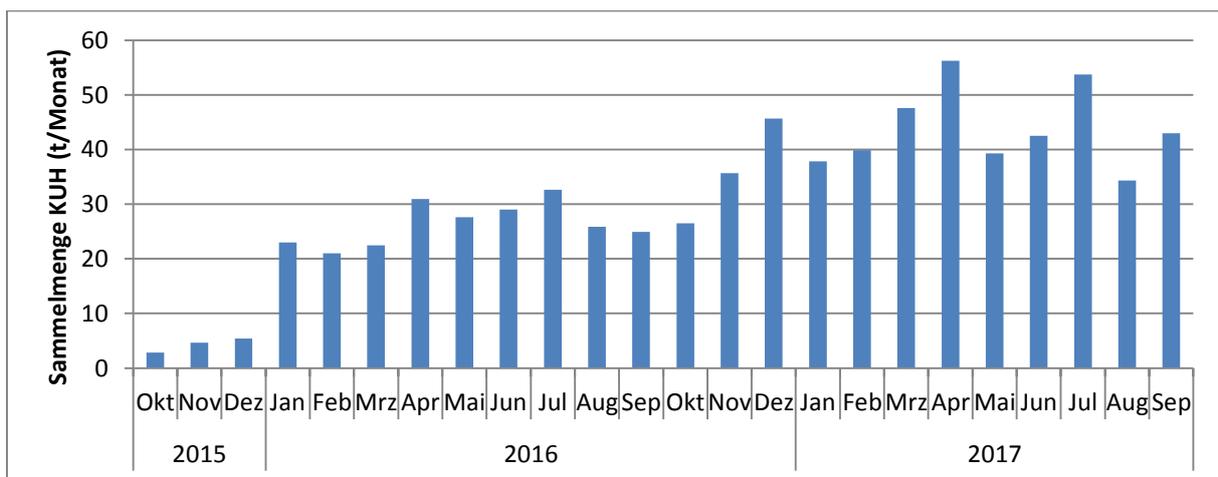


Abbildung 8: Entwicklung der Sammelmengen über den Zeitraum des Pilotversuchs

Die Sammelquote kann auf der Basis von Daten zum Aufkommen von Kunststoffabfällen in Haushalten grob abgeschätzt werden. Diese kann als Mass der Marktpenetration verwendet werden. Basierend auf einer potenziell verfügbaren Menge an KUH-Bag Material von 8'800 t im Einzugsgebiet, lag die Sammelquote im ersten Jahr bei 2.8% und im zweiten Jahr bei 5.6%. Bezogen auf eine maximal erreichbare Sammelmenge von 5'200 t, wurden im ersten Jahr 5.0% und im zweiten Jahr 10% gesammelt. Am Ende der Pilotphase nutzen somit Schätzungsweise 6-12% der Einwohner im Einzugsgebiet den KUH-Bag, was 22-44'000 Einwohnern oder 10-20'000 durchschnittlichen Haushalten entspricht.²⁴

²⁴ Abschätzungen basierend auf der KUH-Menge Schweiz von 195'000 t und einer potenziell sammelbaren Menge von 112'000 t in der Schweiz (UMTEC und Carbotech, 2017, maximale Sammelquote von 58%), dem sich im Einzugsgebiet des KUH-Bags befindenden Bevölkerungsanteils (4.6% der CH), und der Durchschnittsgrösse eines Haushaltes (2.22 Personen pro Haushalt, BFS, 2014). Die Abschätzung berücksichtigt nicht, dass Sammelmateriale verschmutzt gesammelt wird, die potenziell sammelbare Menge jedoch aus der Menge sauberer Kunststoffverpackungen bestimmt wird. Die berechneten Werte sind somit etwas zu hoch und die Sammelquote wird leicht überschätzt.

Während der ersten Wochen waren die Sammelmengen ungefähr gleichmässig auf beide Sammelgebiete verteilt. Im Verbandsgebiet der KVA TG stiegen diese dann jedoch stärker. Über die Gesamtdauer des Pilotversuches stammten rund 42% des Sammelmateriale aus dem Einzugsgebiet des ZAB und 58% aus dem Einzugsbereich des KVA TG. Diese Verteilung entspricht ungefähr der Einwohnerverteilung in den beiden Gebieten (ZAB: 46%; KVA TG: 54%).

4.2.2 *Zusammensetzung auf Artikelebene*

Für die fünf Artikelanalysen wurde Material der Sammelorte Bazenhaid, Kreuzlingen sowie Wil aus dem Materialfluss ausgeschleust. Die Sammelstellen Bazenhaid und Kreuzlingen wurden ausgewählt, da dort einerseits grosse Sammelmengen in der Bringsammlung anfallen und andererseits diese Gemeinden als gute Vertreter von eher ruralen bzw. urbanen Einzugsgebieten betrachtet wurden. Material von Wil wurde analysiert, um auch für die Holsammlung im urbanen Raum Informationen zu erhalten.

Material von Bazenhaid und Kreuzlingen wurde im April und Oktober 2016 möglichst zeitnah analysiert. In Wil wurde im Oktober 2016 eine Analyse durchgeführt. Die Tage der Artikelanalysen wurden so gewählt, dass die Zeitpunkte mit den erwartungsgemäss grössten Unterschieden untersucht werden konnten (Spätsommer: Grillsaison, viele Fleisch- und Grillverpackungen aus PET-NGF (Kat. 1b), Frühling: Gartenarbeit und Frühlingsputz, Gebrauchsgegenstände wie Pflanzenkisten (Kat. 1a)).²⁵ In den 5 Artikelanalysen wurden ungefähr 2 t Material händisch sortiert. Im April wurden jeweils rund 500 kg oder 200 Säcke für jede Artikelanalyse verwendet. Im Oktober wurden nur noch 350 kg oder 160 Säcke pro Analyse sortiert, da dies bereits zu Daten mit zufriedenstellender Genauigkeit führte (Daten von Daniel Graf, Stefan Hodel, Kaiser Simon, FHNW). Aus den einzelnen Artikelanalysen wurde mit einer Gewichtung die durchschnittliche Zusammensetzung auf Artikelebene bestimmt.

Ein durchschnittlicher KUH-Bag besteht zu 94.4% der Gesamtmasse aus Zielartikeln und zu 5.6% aus Nichtzielartikeln (Abbildung 9). Zur Gesamtmasse Zielartikel tragen Flaschen und Hohlkörper 16% (Kat. 4a), Schalen, Becher und weiteren formfeste Kunststoffe 35% (Kat. 1a+b), grosse Folien 24% (Kat. 2), Getränkekartons 8% (Kat. 3) und andere Kunststoffverpackungen wie kleine, beschichtete oder mehrschichtige Folien, Netze etc. (Kat. 5) 12% bei. Bei den Schalen, Bechern und weiteren Kunststoffen stammten 8% von Tiefziehschalen mit aufgeschweissten Folien (Kat. 1b). Von den Nichtzielartikel mit insgesamt 5.6% Massenanteil tragen die wertstoffhaltigen Fraktionen PET-Getränkeflaschen (Kat. 4b) 0.8% und Metalle (Kat. 7) 0.6% bei. Die restlichen 4.2% sind wenig wertstoffhaltige Nichtzielartikel wie PVC, Gummi, Elektrokleingeräte und Siedlungsabfälle (Kat. 6).

Im Vergleich zu den Artikelanalysen im April zeigten diejenigen im Oktober eine kleine Zunahme bei den Nichtzielartikeln mit wenig Wertstoffen (Kat. 6: +2.5%) und der Zielartikel der kleinen flächigen Kunststoffe (Kat 5: +7%). Eine Abnahme war bei den PET-Getränkeflaschen (Kat 4b: -0.7%), Folien (Kat. 2: -6%) und Schalen, Behältern und anderen formfesten Kunststoffen (Kat 1a: -4%) festzustellen. Bei den Schalen und Behältern sank der Gesamtanteil, der Anteil der Schalen mit aufgeschweisster Folie (Kat. 1b) nahm entsprechend den Vermutungen zu. Eine Zunahme wäre ebenso bei den PET-

²⁵ Ein Haushalt braucht zwischen 0.5 und 4 Wochen um einen KUH-Bag zu füllen. Dies ist abhängig von der Anzahl Personen pro Haushalt, der Grösse des verwendeten KUH-Bags (35 oder 60 Liter) sowie dem Verbrauch von Kunststoffverpackungen (eigene Abschätzungen). KUH-Bags verweilen bis zu 2 Wochen an der Sammelstelle (Bringsammlung), bzw. gefüllt in einem Haushalt (Holsammlung), bis diese für eine Artikelanalyse ausgeschleust werden können.

Getränkeflaschen zu erwarten, ist aber nicht eingetroffen. Gründe dafür werden im Rahmen der Wechselwirkungen Separatsammlung für PET-Getränkeflaschen in 5.3.2 diskutiert.

Im Vergleich zu den Artikelanalysen in Bazenhaid (rural) zeigen die Analysen in Kreuzlingen (urban) tendenziell höhere Anteile in den Zielartikelgruppen Getränkekartons (Kat. 3: +4%) und kleinen flächigen Kunststoffen (Kat. 5: +2%) und allen Nichtzielartikelgruppen (Kat. 4b: +0.7%, Kat. 7: +0.9%, Kat. 6: +1.5%). Ein tieferer Anteil ist insbesondere bei den Flaschen und Hohlkörpern zu beobachten (-7%). Bei Flaschen und Hohlkörpern könnten insbesondere kürzere Distanzen zu den Sammelstellen von Detailhändlern im urbanen Raum eine Rolle spielen.

Im Vergleich zur Zusammensetzung der Bringsammlungen,²⁶ ist bei der Holsammlung in Wil der Anteil der Zielartikelgruppen Flaschen und Hohlkörper (Kat. 4a: +5%) und Getränkekartons (Kat. 3: +2%) sowie der Nichtzielartikelgruppe der PET-Getränkeflaschen (Kat. 4b: +0.6%) höher. Die Anteile der kleinen flächigen Kunststoffe (Kat. 5: -5%), der Metalle (Kat. 7: -0.7%) und wenig wertstoffhaltigen Nichtzielartikel (Kat. 6: -2%) ist etwas tiefer. *Interessanterweise ist der Anteil aller kunststoffhaltigen Artikel, für die bereits separate Sammelsysteme existieren, höher. Der Komfort einer Holsammlung gegenüber einer Bringsammlung könnte somit ein ausschlaggebender Faktor sein, der dazu führt, dass bestehende Separatsammelsysteme für Kunststoffe bei Detailhändlern teilweise aufgegeben werden.* Der tiefere Anteil an kleinen flächigen Kunststoffen, die tendenziell stärker geruchsbildend sein können (z.B. Folienverpackungen für Käse) könnte unter anderem dadurch verursacht sein, dass volle KUH-Bags bis zur Abholung weiterhin zu Hause gelagert werden müssen, während für Kehrriechsäcke meist Container ausserhalb der Wohnung verfügbar sind. Zusätzlich könnte eine Rolle spielen, dass mit der Auskopplung von hochvoluminösen gemischten Kunststoffen Kehrriechsäcke weit weniger schnell voll werden. Gerade im Sommer wäre es deshalb möglich, dass stark riechende Kunststoffverpackungen weiter im Kehrriechsack entsorgt werden, damit dieser schneller voll wird und so schneller ausserhalb der Wohnung gelagert werden können.²⁷

Da die Artikelanalysen nur während einem Jahr durchgeführt wurden, bestehen keine längeren Zeitreihen. Deshalb kann der Effekt der Jahreszeit nicht komplett von einer längerfristigen Änderung der Zusammensetzung unterschieden werden. Solche Änderungen könnten durch verschiedene Faktoren entstehen, beispielsweise:

- Erstanwender und „Nachzügler“ generieren eine andere Mischung von Kunststoffabfällen.
- Veränderte Entsorgungsgewohnheiten, z.B. indem die Nutzung anderer Separatsammelsysteme wie die Flaschensammlung bei Detailhändlern aus Komfortgründen aufgegeben wird.
- Sinkende Sammelmotivation der Anwender über die Zeit: Grössere Anteile an Nichtzielartikeln.
- Änderung der Konsumgewohnheiten durch gemischte Kunststoffsammlung.

Es wäre deshalb wichtig, periodische Artikelanalysen durchzuführen, um solche Entwicklungen zu erkennen.

²⁶ Als Vergleichswert wird die Bringsammlung in Kreuzlingen vom Oktober 2016 verwendet, da hier sowohl Art des Einzugsgebietes (urban) sowie Jahreszeit (Oktober) ähnlich sind.

²⁷ Wenn gemischte Kunststoffe rund 45% des Kehrriechvolumens ausmachen, führt eine vollständige Auskopplung dazu, dass sich die Zeit zum Füllen eines Kehrriechsackes beinahe verdoppelt. Weicht ein Haushalt auf kleinere Kehrriechsäcke aus, bleibt die Fülldauer ungefähr gleich.

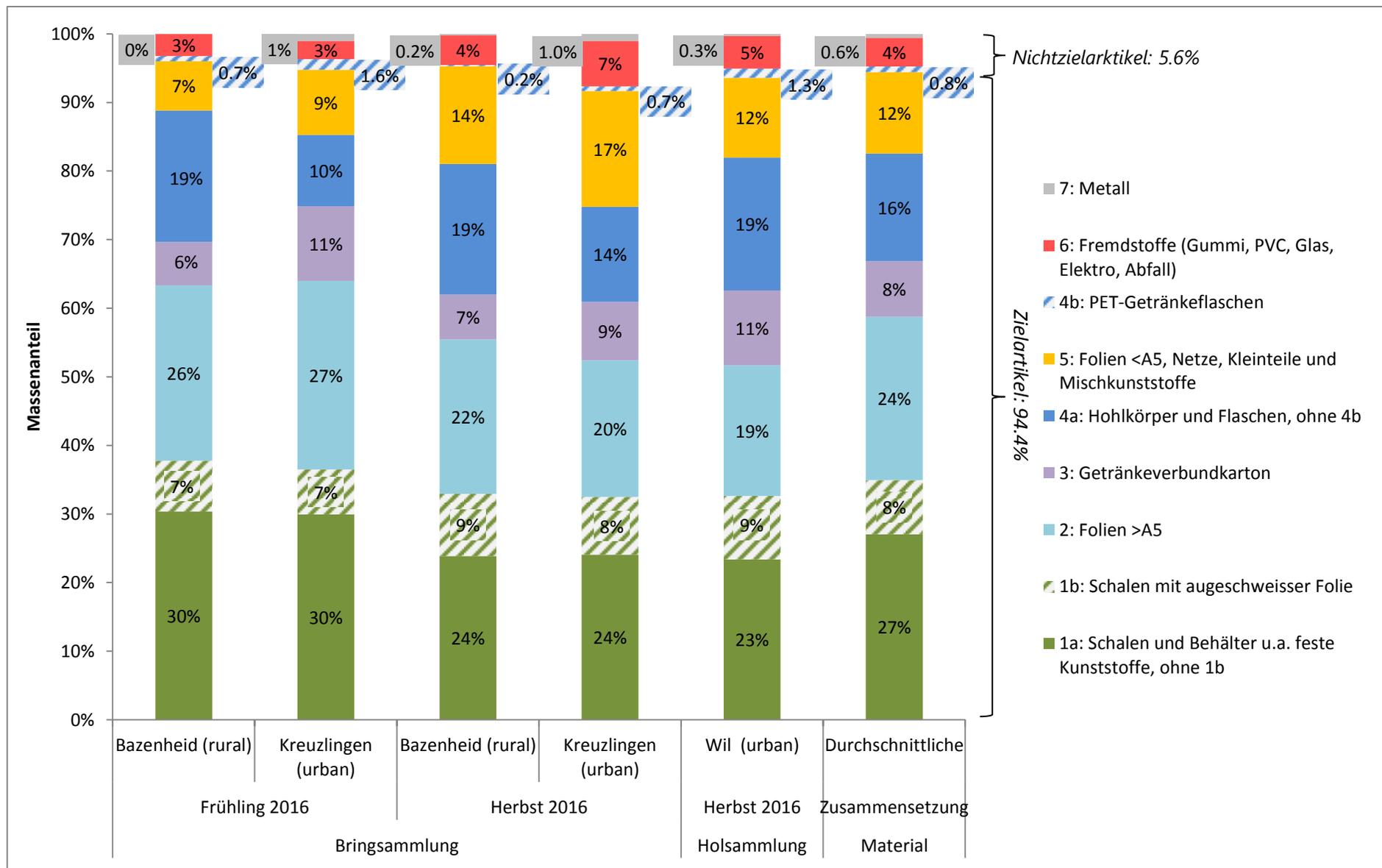


Abbildung 9: Zusammensetzung des Sammelmaterials auf Articlebene

Die Zusammensetzung des Sammelmaterials kann mit einem Zielartikelanteil von 94.4% trotz Schwankungen abhängig von Jahreszeit, Einzugsgebiet und Sammelsystem (Hol/Bring) als sehr gut und relativ konstant bezeichnet werden. Während der Handsortierung kam es höchst selten vor, dass der Inhalt aus KUH-Bags aus hygienischen Gründen oder wegen starkem Geruch nicht sortiert werden konnte. Auch stark verschmutzte Verpackungen waren kaum anzutreffen. Dieser Eindruck wird von Betreibern von Verarbeitungsanlagen, die sonst Material aus anderen europäischen Sammlungen verarbeiten, bestätigt.

Die Bevölkerung scheint den KUH-Bag wie erwünscht zu nutzen. Nicht-erwünschte Artikel, die bereits in anderen Separatsammelsystemen gesammelt werden (PET-Getränkeflaschen, Metallverpackungen, Glas und Elektroaltgeräte) sind mit jeweils <1% kaum im Sammelmateriale anzutreffen. Die Anteile von anderen Siedlungsabfällen, die in einen Kehrichtsack gehören würden sind ebenso sehr klein (meist <3%). Nutzer können den KUH-Bag also gut von anderen, selektiveren Sammlungen unterscheiden zu können. Sie scheinen den KUH-Bag grösstenteils ergänzend zu nutzen und nutzen ihn auch nicht als günstigere Alternative zum Kehrichtsack, da andere Siedlungsabfälle weiterhin im Kehrichtsack landen.

4.2.3 Zusammensetzung auf Materialebene

Für die Bestimmung der Wertstoffanteile wurde auf die Recyclingcodes auf einzelnen Artikel zurückgegriffen (Daten von Daniel Graf, Stefan Hodel, Kaiser Simon, FHNW), welche mit Angaben von Experten und Literatur ergänzt und angepasst wurden.²⁸ Der Anteil an Fehlstoffen wurde auf Basis von Erfahrungswerten der Recyclingbetriebe aus der Verarbeitung von vergleichbarem Material aus dem Ausland berechnet.

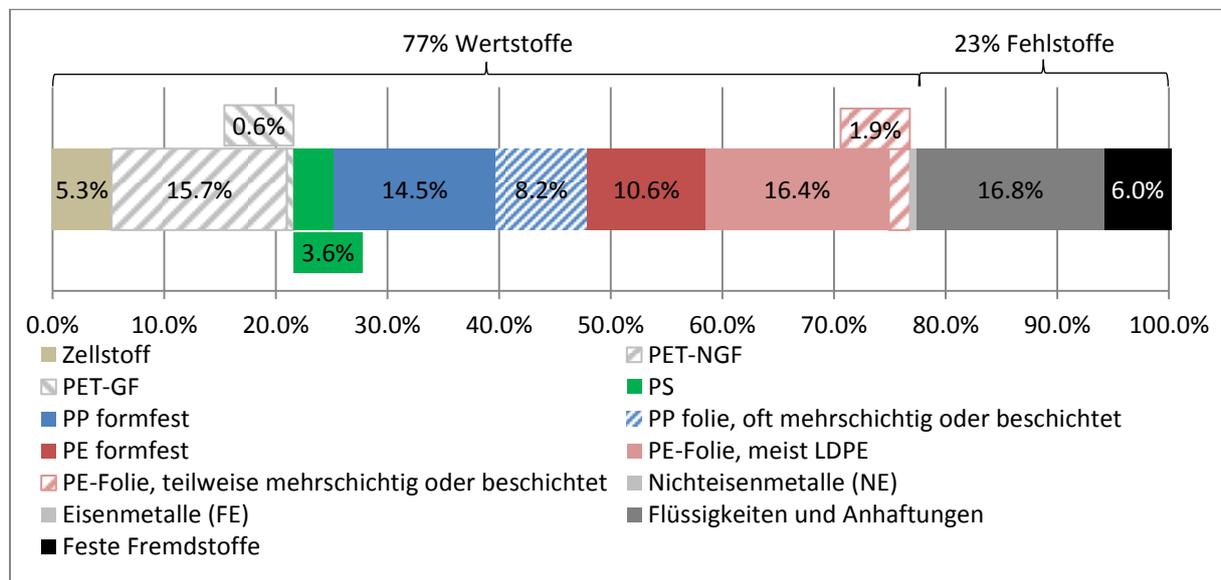


Abbildung 10: Durchschnittliche Zusammensetzung des Sammelmaterials auf Materialebene

²⁸ Recyclingcodes wie  deklarieren den Kunststofftyp (Wertstoff) einer Verpackung. Diese sind jedoch nicht auf allen Artikeln zu finden, sind teilweise falsch oder deklarieren nur den primären Bestandteil einer Verpackung. Dies bedingt eine Ergänzung und Anpassung.

Ein durchschnittlicher KUH-Bag besteht zu rund 77% aus Wertstoffen und 23% aus Fehlstoffen (Abbildung 10). Nichtzielmaterialien (PET-GF und Metalle) tragen hierbei kaum zur Wertstoffmenge bei. Zur Gesamtmasse Zielmaterialien tragen PE-Polymere (HD- sowie LDPE) rund 29%, PP-Polymere rund 23%, PET 16%, PS 3.6% und Zellstoff 5.3% bei. Insbesondere bei PP und PET sind mehrschichtige oder beschichtete Kunststoffe häufig deren genaue Aufschlüsselung in einzelne Materialien nicht möglich war. Bei PE ist dieser Anteil eher klein. Auf der Seite der Fehlstoffe machen Flüssigkeiten und Anhaftungen wie Lebensmittelreste rund 17% aus, während feste Fremdstoffe rund 6% zur Gesamtmasse beitragen. Die bestimmte Zusammensetzung ist aufgrund der vielfältigen Datenquellen und teilweise kleiner Stichproben als Richtwert zu verstehen. Der Anteil der Wertstoff könnte unterschätzt worden sein, da die Fehlstoffanteile auf Basis von Erfahrungswerte von Material aus Sammlungen aus dem Ausland abgeschätzt wurden, das KUH-Sammelmaterial aber einiges sauberer ist (siehe auch 5.1.2).

4.3 Verarbeitung

4.3.1 Übersicht der verschiedenen Recyclingketten

Ursprünglich war vorgesehen, KUH-Bag Sammelmaterial während der Pilotphase auf wenigen Anlagen zu verarbeiten. Es kam jedoch mehrmals vor, dass eine geplante Verarbeitung nicht möglich war (fehlende Exportbewilligungen, Kapazität beim Erstampfer, etc.). Zum Abbau der entstandenen Zwischenlager wurden gewisse Chargen anderweitig als ursprünglich vorgesehen verarbeitet. Um Fragen zu den kritischen Themengebiete (siehe 3.1) in allen Recyclingketten beantworten zu können und eine tRQ für die Gesamtmenge bestimmen zu können, wurden auch diese Chargen entsprechend dem Monitoringsystem überwacht.

Von den insgesamt 641 t verarbeiteten Sammelmaterial wurde die Verarbeitung von 126 t genau untersucht und die Recyclingketten im Detail beschrieben (siehe 4.3.3 und 4.3.4). Weitere 414 t Material wurden in den gleichen Recyclingketten unter ähnlichen Bedingungen und die restlichen 101 t wurden in anderen Recyclingketten verarbeitet (siehe 4.3.5).

4.3.2 Technisches Recyclingpotenzial (tRP)

Das technische Recyclingpotenzial des artikelbasierten Ansatzes liegt bei ungefähr 65%, dasjenige des materialbasierten Ansatzes bei 75% des Sammelmaterials (siehe A III). Der Unterschied von 10% ist zu ungefähr 3-4% dem Verwerfen von sekundären Bestandteilen und 6-7% dem Verwerfen von kleinen, flächigen Kunststoffartikeln im artikelbasierten Ansatz zuzuordnen. Da das technische Recyclingpotenzial aus der Zusammensetzung auf Materialebene abgeleitet ist, sind die Werte als Schätzungen zu verstehen.

Das tRP des artikelbasierten Ansatzes liegt leicht unter, das tRP des materialbasierten Ansatzes liegt leicht über der geforderten Zielquote von 70%. Somit kann mit der bestehenden Materialzusammensetzung die Zielquote im artikelbasierten Ansatz nicht, und im materialbasierten knapp erreicht werden. Im artikelbasierten Ansatz könnte mit einer besseren Integration einzelner Verarbeitungsschritte, d.h. der Rückführung sekundärer Bestandteile etwas erhöht werden und so die Zielquote theoretisch erreicht werden.

4.3.3 Artikelbasierte Recyclingkette, LVP

In einer Sortieranlage für Leichtverpackungen werden zuerst flächige von formstabilen Artikeln getrennt und danach die formstabilen Artikel weiter aussortiert. Im ersten Sortierschritt werden Sortiermethoden wie Trommel- und Schüttelsiebe sowie Ballistiksichter genutzt. Der zweite Sortierschritt erfolgt mit mehrfacher optischer Trennung (NIR / VIS Sensoren mit Ausblasung) und teilweise händischer Kontrolle. Die Anlage wird typischerweise mit nicht-gepresstem Material beschickt, um ein Verkleben zu verhindern. Um das Sammelmateriale aus den Sammelsäcken zu entnehmen, ist ein Sackzerreisser vorgeschaltet. Der Verarbeitungsprozess einer ähnlichen Anlage ist in Titech (2009) genauer beschrieben.

Die Sortieranlage hat die Möglichkeit, Materialanlieferungen verschiedener Kunden chargenweise zu verarbeiten, da die Anlage einfach zwischen verschiedenen Verarbeitungsläufen entleert werden kann. So kann der Anlagenbetreiber jedem einzelnen Kunden seine eigenen Output Fraktionen zuweisen.

Es wurden zwei Batch-Versuche in der Sortieranlage LVP durchgeführt. Im ersten Batch-Versuch wurde das Material mit normalem Sortieraufwand, d.h. entsprechend den üblichen Betriebsbedingungen wie von anderen Kunden verlangt (LVPn), verarbeitet. Im zweiten Batch-Versuch wurde das Material mit zusätzlichem Sortieraufwand verarbeitet (LVP+). Hierzu wurde die Anlage mit nur rund 2/3 des üblichen Durchsatzes beschickt und es wurde zusätzliches Personal eingesetzt, um die Sortierverluste zu minimieren. Der Fremdstoffanteil und die Reinheit der Ballenware wurde für die Sortierung LVP+ händisch kontrolliert, indem je 2 Ballen pro Kunststofffraktion mit Ausnahme PO aus dem Vertrieb ausgeschleust und erneut händisch kontrolliert wurden.

Tabelle 2: Ergebnisse Verarbeitung LVPn, Outputfraktionen und Herleitung der tRQ

Erstbehandlung: Sortierung LVPn		Nachgelagerte Behandlung Inkl. Endbehandlung	
Outputfraktion	Anteil	%R	Anteile R
PP HK (W)	9.1%	83%	8%
PET mix (W)	5.5%	83%	5%
PP/PE Eimer & Kl. Kisten (W)	0.6%	90%	1%
PE Grossgebände (W)	0.3%	90%	0%
PS Hohlkörper Becher(W)	3.0%	83%	2%
PE Hohlkörper Flaschen (W)	8.9%	85%	8%
PE Folien (W)	10.4%	88%	9%
Metalle (W)	0.9%	80%	1%
Getränkekartons (W)	8.3%	56%	5%
Sortierreste (V)	48.0%	0%	0%
Pressverlust	5.0%	0%	0%
Summe Ballenware (W)	47.0%	tRQ (Summe R)	37%
Summe Output	100%	% zurückgewonnene Wertstoffe:	47%

Bei der Erstbehandlung unter normalem Sortieraufwand (LVPn, 8.7 t unverpresst) verblieben 48% des Sammelmateriale als Sortierreste und 47% als Ballenware (Tabelle 2). Unter Berücksichtigung der Reinheit der Ballenware und den durch Folgeempfänger erreichten Rückgewinnungsgrade wurde eine tRQ von 37% ermittelt. Somit wurden rund 47% der im KUH-Bag vorhandenen Wertstoffe zurückgewonnen.

Bei der Erstbehandlung unter zusätzlichem Sortieraufwand (LVP+, 95.2 t unverpresst) verblieben 33% des Sammelmaterials als Sortierreste und 62% als Ballenware (Tabelle 3). Unter Berücksichtigung der Reinheit der Ballenware und den durch Folgeempfänger erreichten Rückgewinnungsgrade wurde eine tRQ von 49% ermittelt. Somit wurden rund 64% der im KUH-Bag vorhandenen Wertstoffe zurückgewonnen.

Tabelle 3: Ergebnisse Verarbeitung LVP+, Outputfraktionen und Herleitung der tRQ

Erstbehandlung: Sortierung LVP+		Nachgelagerte Behandlung Inkl. Endbehandlung	
Outputfraktionen	Anteil	%R	Anteile R
PP HK (W)	9.4%	80%	8%
PET mix (W)	8.8%	84%	7%
PP/PE Eimer & Kl. Kisten (W)	0.9%	88%	1%
PE Grossgebinde (W)	0.3%	88%	0%
PS Hohlkörper Becher (W)	1.8%	80%	1%
PE Hohlkörper Flaschen (W)	7.2%	83%	6%
Folien (W)	10.8%	85%	9%
PO-Fraktion (W)	19.0%	78%	15%
Metalle (W)	0.0%	80%	0%
Getränkekartons (W)	3.8%	53%	2%
Sortierreste (V)	33.0%	0%	0%
Pressverlust	5.0%	0%	0%
Summe Ballenware (W)	62.0%	tRQ (Summe R)	49%
Summe Outputs	100.0%	% zurückgewonnene Wertstoffe:	64%

Im Vergleich zu LVP aus anderen Ländern sind bei KUH aus der Schweiz gewisse Verpackungen aus anderen Zielmaterialien, oder es herrschen andere Korngrößen vor, so dass mit kleinen Optimierungen an der bestehenden Anlage der Anteil von Ballenware und somit auch die tRQ um wenige Prozentpunkte erhöht werden könnte. Dabei ist es bereits heute so, dass je nach Kunde, dessen Vorgaben sowie der Materialherkunft die Sortierabläufe leicht angepasst werden.

Mit einem erhöhten Sortieraufwand kann der Anteil der Ballenware und somit der zurückgewonnenen Recyclingkunststoffe aus KUH in einer Sortieranlage für LVP bedeutend erhöht werden. Somit steigt auch der Erlös pro Tonne KUH aus der erzielten Ballenware. Abschätzungen zeigen, dass dieser zusätzliche Erlös die zusätzlichen Kosten der Sortierung nicht zu decken vermag. Entsprechend müssen Systeme, sowohl die Zusatzkosten einer aufwändigeren Sortierung übernehmen und auch sicherstellen, dass das Material tatsächlich unter zusätzlichem Aufwand verarbeitet wurde.

4.3.4 Materialbasierte Recyclingkette, MRK

In der materialbasierten Verarbeitung wird das Inputmaterial in einem ersten Prozessschritt in einem Schredder zerkleinert. Der Schredder kann auch gepresstes Material einwandfrei voneinander trennen, womit Transportaufwände verringert werden können. Nach dem Schredder werden zellstoffhaltige Stücke (Getränkekartons sowie Papierreste) mittels NIR/VIS Sensorik erkannt und ausgeblasen, bevor die verbleibenden Kunststoff- und Metallstücke in mehreren Nass- und Trockenprozessen gereinigt

und in verschiedene Fraktionen getrennt werden. Gewisse Fraktionen werden direkt vor Ort zu Regranulaten verarbeitet, während andere Fraktionen als teilbehandeltes Mahlgut anfallen und in nachgelagerten Prozessen weiter sortiert und granuliert wird.

Die Trennung erfolgt grösstenteils mit physikalischen Verfahren wie z.B. einer Dichtentrennung. Damit werden bestimmte Materialeigenschaften der zu trennenden Stücke zur Klassierung ausgenutzt. Dadurch kann die Anlage grösstenteils automatisch betrieben werden und es sind kaum händische Nachkontrollen nötig. Aufbau und Verarbeitungsprozess einer ähnlichen Anlage sind in RecyclingNews (2008) beschrieben.

Tabelle 4: Verarbeitung MRK: Zusammensetzung nach Zielartikeln und Herleitung der tRQ

Sammelmaterial Artikelgruppe nach primärem Bestandteil	Anteile (%)	Materialbasierte Recyclingkette: Transferkoeffizienten Input->Rezyklat %R			Anteile R
		Primäre Bestandteile	Sekundäre Bestandteile	Summe %R	
HDPE formstabil	7.1%	82.8%	n/a	83%	6%
PP formstabil	20.1%	83%	n/a	83%	17%
PS formstabil	4.0%	81%	n/a	81%	3%
PET formstabil	17.8%	0%	7%	7%	1%
PET weich 2D	1.4%	0%	11%	11%	0%
LDPE Folie	29.4%	76%	n/a	76%	22%
PP Folie	1.7%	76%	n/a	76%	1%
NE	0.2%	61%	n/a	0%*	0%
FE	0.2%	61%	n/a	61%	0%
Papier	0.8%	50%	n/a	50%	0%
Getränkekarton	7.0%	38%	10%	48%	3%
Nichtzielmaterial	5.7%	0%	0%	0%	0%
Pressverlust	5.0%				
Summe Input	100.0%	tRQ (Summe R)			55%
		% zurückgewonnene Wertstoffe			71%

*: siehe 4.4.3

Die Anlage verarbeitet Anlieferungen verschiedener Kunden gemeinsam, um eine stets gleichbleibende Zusammensetzung und eine gute Auslastung der einzelnen Prozessabschnitte der Anlage sicherzustellen. Die Durchführung eines Batch-Versuches war deshalb nicht möglich, weshalb alternativ der gesamte Anlagenprozess mittels Betreiberinformationen modelliert wurde. Für die Modellierung wurde berücksichtigt, dass der materialbasierte Ansatz sekundäre Bestandteile von Verpackungen zurückgewinnen kann, indem für jede Artikelgruppe der Anteil sekundärer Bestandteile und deren Verbleib im Prozess bestimmt wurden.

Als Dateninput für die Modellierung wurde die Zusammensetzung des angelieferten Materials (20.8 t verpresst, 21.9 t unverpresst) entsprechend der in der Anlage relevanten Materialkategorien von einer externen Fachperson der GBP Quality AG unabhängig bestimmt. Diese Daten wurden mit internen Informationen leicht angepasst, um die durchschnittliche Zusammensetzung besser abzubilden.

Unter Berücksichtigung aller Endbehandlungen wurde im Verfahren MRK eine tRQ von 55% erreicht. Somit wurden rund 71% der im KUH-Bag vorhandenen Wertstoffe zurückgewonnen. Aufgrund der angewandten Trennmethode werden die meisten Zielmaterialien bereits beinahe vollständig zurückgewonnen. Somit können weder kleinere Anlagenoptimierungen noch ein erhöhter Sortieraufwand die erreichte tRQ massgeblich weiter erhöhen.

4.3.5 Weitere Verarbeitungen

In den bereits beschriebenen Recyclingketten wurden folgende weiteren Mengen verarbeitet:

- In der LVP-Sortieranlage wurden zusätzliche 289 t Sammelmateriale verarbeitet. In diesen Chargen fielen durchschnittlich 53% als Ballenware an und es wurde dabei eine tRQ von 42% erreicht, bzw. 55% der enthaltenen Wertstoffe wurden zurückgewonnen. Diese Resultate liegen zwischen den genauer beschriebenen Verarbeitungen LVP+ und LVPn. Teilweise musste gepresstes Material verarbeitet werden und die Sortierung wurde auch nicht durchgehend mit demselben erhöhtem Sortieraufwand durchgeführt.
- In der materialbasierten Recyclingkette MRK wurden weitere 125 t Sammelmateriale verarbeitet. Da für das Material keine Exportbewilligung vorhanden war, wurden die Getränkekartons händisch entfernt. Mit dem so vorbehandelten Material wurde eine tRQ von 56% erreicht.

Die restlichen Mengen wurden anderen Sortieranlagen zugeführt und somit in anderen artikelbasierten Recyclingketten verarbeitet:

- Eine andere Sortieranlage für LVP hat 48 t Material verarbeitet. Die Getränkekartons wurden von dem Export händisch entfernt. Mit dem so vorbehandelten Material wurde eine tRQ von 51% erreicht.
- Eine Sortieranlage für Hohlkörper hat 46 t Material verarbeitet und es wurde eine tRQ von 34% erreicht. Da die Sortieranlage nicht auf das Material ausgelegt war, sind erhebliche Probleme aufgetreten. Eine Verarbeitung von KUH-Bag Material in einer HK-Sortieranlage ist aufgrund dieser Probleme und der Recyclingquote nicht interessant.
- Die händisch entnommenen Getränkekartons (insgesamt 7 t) wurden direkt einer Papierfabrik zugeführt, wo eine tRQ von 62% erreicht wurde.

4.4 Vergleich der Recyclingketten

4.4.1 Art und Menge zurückgewonnener Materialien

Da sich die Zusammensetzung des Sammelmateriale ständig verändert, ist ein direkter Vergleich der erhaltenen Rezyklate in verschiedenen Recyclingketten nur bedingt zulässig. Es sind jedoch Tendenzen ersichtlich, welche die Unterschiede der einzelnen Recyclingketten gut darstellen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die beiden genau untersuchten Recyclingketten nur jeweils ein Beispiel für die beiden Ansätze darstellen, und die Resultate nur bedingt auf andere Recyclingketten mit demselben Ansatz zutreffen.

Die erreichten tRQ steigen in der Reihenfolge LVPn, LVP+, und MRK an (Abbildung 11). Mit steigender tRQ wird jedoch auch ein erhöhter Anteil des Materials als PO Rezyklat, einer Mischung von PP und

(LD)-PE, zurückgewonnen (0% in LVPn, 25% in MRK). Der Beitrag sortenähnlicher Regranulate (PP, HDPE, LDPE, PS, PETm) nimmt gleichzeitig ab (35% in LVPn, 26% in MRK). Im Vergleich von LVPn und LVP+ ist insbesondere der ansteigende Anteil PETm-Rezyklat auffällig. Im Rahmen der Batch-Versuches LVP+ wurde der Rückgewinnung von PET-NGF besondere Aufmerksamkeit geschenkt, wodurch ein Anstieg dieses Anteils erwartet wurde. Beim Vergleich der artikelbasierten mit der materialbasierten Recyclingkette ist ersichtlich, dass in der artikelbasierten Recyclingkette zusätzliche Typen sortenähnlicher Regranulate entstehen (LDPE und PETm), die in der materialbasierten Recyclingkette verworfen werden (PET) oder zur PO-Fraktion beitragen (LDPE). *Diese Trends zeigen den im Kunststoffrecycling typischen Zielkonflikt zwischen möglichst hohen tRQ und hohen Anteilen sortenähnlicher Rezyklate mit tendenziell besseren Qualitäten.*

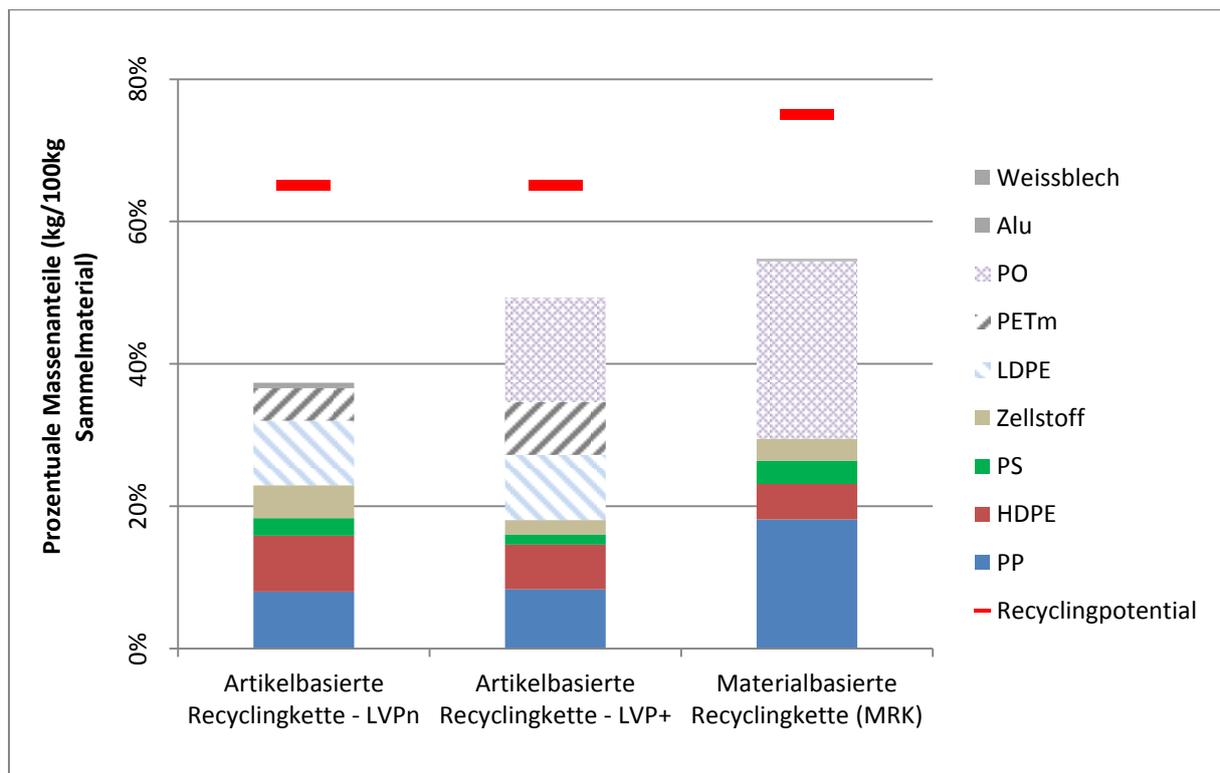


Abbildung 11: Vergleich der Beiträge einzelner Rezyklate zur technischen Recyclingquote

4.4.2 Vergleich tRQ und tRP sowie Potenzialverluste

Im Vergleich zu einem technischen Recyclingpotenzial von 65% im artikelbasierten Ansatz, erreicht die Recyclingketten LVPn und LVP+ technische Recyclingquoten von 37% bzw. 49%. Entsprechend betragen die Potenzialverluste für LVPn 28% und LVP+ 16% (Tabelle 5). Beim materialbasierten Ansatz liegt das technische Recyclingpotenzial bei 75% und die Recyclingkette MRK erreicht eine technische Recyclingquote von 55%. Somit liegt der Potenzialverlust bei 20%. *In den artikelbasierten Recyclingketten LVPn und LVP+ geht von jedem Wertstoff ein gewisser Anteil verloren, wobei dieser Verlust grösstenteils auf Stufe der Sortierung geschieht. In der materialbasierten Recyclingkette MRK werden die meisten Wertstoffe beinahe vollständig zurückgewonnen und 75% des Potenzialverlustes sind allein auf den Verwurf von PET zurückzuführen.*

Wie die Ergebnisse zeigen, ist das tRP eine sehr optimistische Grösse. Für dessen Berechnung wird unter anderem angenommen, dass die angewendeten Trenn- und Sortierprozesse die verschiedenen Artikel und Materialien perfekt trennen können und für alle Wertstoffe in den erhaltenen Qualitäten Verwertungswege existieren, was z.B. bei kristallinem PET (teilweise vorhanden in PET-NGF) nicht der Fall ist.

Tabelle 5: Vergleich der untersuchten Recyclingketten anhand der berechneten Kennzahlen

(kg / kg Sammelmateriale) * 100%	Artikelbasierter Recyclingkette		Materialbasierte Recyclingkette (MRK)
	LVPn	LVP+	
technische Recyclingquote (tRQ)	37%	49%	55%
technisches Recyclingpotenzial (tRP)	65%	65%	75%
Potenzialverlust (tRP-tRQ)	28%	16%	20%

4.4.3 Verwertung von Behandlungsresten und Export teilbehandelter Fraktionen

Während der Untersuchung der Recyclingketten wurden die Behandlungsreste des Erempfängers in den Recyclingketten LVPn, LVP+ und MRK im Mengenausgleich in die KVA Weinfelden zurückgeführt und verbrannt. Normalerweise werden die Behandlungsreste aus der artikelbasierten Recyclingkette in Zementwerken, die der materialbasierten Recyclingkette schonend einer Pyrolyse verölt oder einem Wirbelschichtofen schonend verbrannt und somit energetisch verwertet. Bei einer schonenden Verwertung besteht im Vergleich zu einer Verbrennung in der KVA oder Zementwerk die Möglichkeit, Aluminium als Nebenprodukt zurückzugewinnen und stofflich zu verwerten. Aufgrund der Rückführung der Behandlungsreste in eine KVA während der Untersuchung der Recyclingkette wurde das Aluminium als verloren betrachtet (siehe Tabelle 4). Mit klareren gesetzlichen Rahmenbedingungen ist seit Beginn 2017 eine anderweitige Verwertung von Behandlungsresten wie z.B. in Zementwerken möglich. Eine schonende thermische Verwertung (Wirbelschichtofen) erlaubt, dass das Aluminium in nachfolgenden Chargen in der materialbasierten Recyclingkette aus den Rückständen zurückgewonnen wird.²⁹

In den Recyclingketten LVPn, und LVP+ konnten die Anlagenbetreiber die erhaltene Ballenware frei vermarkten. So wurden die nachgelagerten Behandlungsschritte teilweise in der Schweiz, teilweise in der EU durchgeführt. Bei der Recyclingkette MRK fanden weitere Behandlungsschritte beinahe vollständig in der EU statt. Von insgesamt 641 t verarbeitetem Material wurden rund 35% in der Schweiz sowie 65% in der EU endgültig behandelt. *Alle gesammelten Hinweise lassen darauf schliessen, dass bei jedem Materialstrom die Endbehandlung innerhalb Europa EU abgeschlossen wurde und kein teilbehandeltes Material in Schwellen- und Entwicklungsländer exportiert wurde.*

4.4.4 Qualitäten der Rezyklate und Anwendungsgebiete

Rezyklate sind als Produkte frei handelbar und können überall eingesetzt werden, wenn sie die rechtlichen Anforderungen erfüllen. Während deren Nutzung nicht verfolgt wurde, lassen Informationen von Verarbeitern, die Qualitätsmerkmale der Regranulate, und auch die Kosten der Regranulate vermuten,

²⁹ KUH Sammelmateriale gilt seit Januar 2017 wie andere Siedlungsabfälle, „die im Hinblick auf eine stoffliche Verwertung nach Stand der Technik separat gesammelt werden“, nicht als gemischt gesammelte Siedlungsabfälle. Somit dürfen Behandlungsreste („Ausschüsse“) in einem Zementwerk verwertet werden (Bafu 2017). Nach Beginn 2017 ausgestellte Exportbewilligungen wurden erteilt, ohne dass eine Rückführung der Behandlungsreste in eine Schweizer KVA verlangt wurde.

dass diese mit hoher Wahrscheinlichkeit in der EU weiterverarbeitet wurden. Auch in der Schweizer Industrie besteht eine gewisse Nachfrage an Recyclingkunststoffen, welche aufgrund von fehlendem Angebot in der Schweiz oft durch Recyclingkunststoffe aus der EU gedeckt wird.

Sammelmaterial und teilbehandelte Fraktionen wiesen im europäischen Vergleich ähnliche oder höhere Qualitäten auf und wurden bis auf eine Ausnahme von Betrieben verarbeitet, die langjährige Verarbeitungserfahrung und Abnehmerverträge für ihre Regranulate haben. Dies ist ein Hinweis, dass auch die hergestellten Recyclingkunststoffe mit denen von ausländischen Systemen vergleichbar sind und entsprechend die Qualitätsanforderungen von Produktionsbetrieben erfüllt werden können³⁰. *Die aus dem KUH Sammelmaterial hergestellten Regranulate werden in keinem Fall wieder für ihre ursprüngliche Anwendung als Verpackung im Lebensmittelbereich verwendet.* Das Recycling von gemischten Kunststoffen ist somit kein geschlossener Kreislauf, mit einer Kaskadennutzung wird aber trotzdem der Bedarf an primären Kunststoffen verkleinert.

Recyclingkunststoffe werden nie alleine aus KUH-Bag Material produziert, sondern stets mit Material von anderen Sammlungen vermischt, um möglichst gleichbleibende und definierte Materialeigenschaften zu erreichen. Im materialbasierten Ansatz ist diese Vermischung Teil der Erstbehandlung, im artikelbasierten Ansatz ist diese Vermischung Teil der Endbehandlung oder wird mit der Mischung von kompatiblen Regranulaten mit verschiedenen Eigenschaften realisiert. Im europäischen Vergleich ist die Reinheit der Ballenware vergleichsweise hoch, was sowohl durch die Verwendung einer vergleichsweise fortgeschrittenen Sortieranlage sowie der hohen Sammelqualität zu erklären ist. In der artikelbasierten Verarbeitung kann somit davon ausgegangen werden, dass Ballenware aus KUH in einer Mischung eher zu hochwertigeren Materialeigenschaften beiträgt.

Rezyklate, die in allen Recyclingketten entstehen (HDPE, PP, PS), zeigen grösstenteils eine ähnliche Qualität und ähnliche Anwendungsgebiete. HDPE wird beispielsweise für die Produktion von Rohren und teilweise in Flaschen eingesetzt. PP und PS finden als Bauteile in Fahrzeugen, Kisten, Töpfen und anderen Nutzartikeln Verwendung. In einigen Fällen sind jedoch gewisse Qualitätsunterschiede zu beobachten und der materialbasierte Ansatz zeigt gegenüber der im artikelbasierten Ansatz verwendeten Folgeempfänger gewisse Vorteile. Diese Vorteile sind jedoch eher auf das Vorhandensein nachgelagerter Trenntechnologien (z.B. nach Farbe) als auf den Ansatz selbst zurückzuführen. Diese Trenntechnologien können grundsätzlich in beiden Ansätzen Anwendung finden.

Bei Rezyklaten, die nur in einigen Recyclingketten entstehen (PETm, PO und LDPE), muss neben der effektiven Qualität auch berücksichtigt werden, wo dieser Wertstoff in anderen Recyclingketten landet:

- *LDPE* wird im artikelbasierten Verfahren als separate Fraktion zurückgewonnen. Im Falle des KUH Materials wurden die LDPE-Fractionen jedoch zu einem Grossteil in der Endbehandlung mit HDPE vermischt. Hierbei entstehen LD/HDPE-Rezyklate, die etwas weicher und deshalb für die Herstellung gewisser Rohr-Produkte geeignet sind. Während LDPE-Fractionen grundsätzlich für eine erneute Produktion von teiltransparenten Folien geeignet wären, war dies während dem Pilotbetrieb der Verarbeitung kaum der Fall. Im materialbasierten Verfahren gelangt das LDPE in ein PO-Rezyklat womit eine erneute Verwendung als Folien ausgeschlossen wird.

³⁰ Die Ausnahme PO-Regnanulat aus dem artikelbasierten Ansatz wird später diskutiert.

Der Rückgewinn von LDPE in einer eigenen Fraktion anstelle einer PO-Mischfraktion wäre demnach sicherlich zu bevorzugen.

- *PO-Rezyklate zeigen Materialeigenschaften, die sortenähnlichen Recyclingkunststoffen in den meisten Fällen unterlegen sind. In gewissen Anwendungen wie Paletten, Rasenwaben und Gefässen für den Garten ist dies von geringer Bedeutung. Aufgrund der sich unterscheidenden Zusammensetzung der PO-Rezyklate in der artikelbasierten (mehr HDPE) und materialbasierten (mehr LDPE) Recyclingkette könnten sich die Materialeigenschaften der beiden PO-Regnanulate bedeutend unterscheiden. Es wurden aber keine Informationen gesammelt, die diese Vermutung bestätigen könnten*
- *PETm-Rezyklate werden nur im artikelbasierten Ansatz zurückgewonnen. Im materialbasierten Ansatz wird PET energetisch verwertet. Von allen verfolgten Materialien besteht bei PETm noch die grösste Unsicherheit bezüglich Verarbeitung und Anwendungsgebiete, da nur beschränkt Informationen zur Endverarbeitung verfügbar waren. Aufgrund von Literaturangaben sind sowohl Anwendungen in der Verpackungs- als auch in der Textilindustrie häufig (petcore Europe, 2014), was für das KUH-Bag Material jedoch nicht bestätigt werden konnte. Dass gerade bei PETm noch Fragezeichen bestehen, ist nicht verwunderlich, da auf europäischer Ebene grosses Verbesserungspotenzial gesehen wird und mit Hochdruck nach möglichen alternativen Verwertungswegen gesucht wird (petcore Europe, 2017). Gerade aufgrund dieser unsicheren Verwertungslage müsste den Verwertungswegen von PETm in nachfolgenden Stoffflussuntersuchungen zusätzliche Aufmerksamkeit geschenkt werden.*

Bezüglich der erreichbaren Qualitäten hat der artikelbasierte Ansatz gegenüber dem materialbasierten Ansatz einen inhärenten Vorteil (siehe 2.1.3). Werden die Resultate der zurückgewonnen Materialanteile und der Qualitäten einzelner Kunststoffe zusammen betrachtet ergibt sich ein weit differenzierteres Bild. Während bei LDPE und PETm dieser Vorteil bestätigt werden kann, sind bei PO weitere Abklärungen nötig. Bei HDPE und PP kann dieser Vorteil aufgrund der vorhandenen Informationen nicht bestätigt werden. Handsortierungen der Ballenware aus dem artikelbasierten Ansatz zeigen in der PP-Ballenware LD- und HDPE-Anteile von bis zu 9%. In der HDPE-Ballenware beträgt der Anteil PP rund 2%. Folgeempfänger dieser Fraktionen trennen PE und PP nicht, womit erwartet werden kann, dass diese Anteile auch in die Regnanulate gelangen. Beim materialbasierten Ansatz zeigen die Regnanulate ähnliche Gehalte (bis zu 10% PE im PP-Regnanulat, 2% PP im PE-Regnanulat). Solche Formulierungen besitzen für gewisse Anwendungen erwünschte Eigenschaftskombinationen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Monitoringsystem für gemischte Kunststoffsammlungen

5.1.1 Vor- und Nachteile des entwickelten Monitoringsystems

Das entwickelte Monitoringsystem überwacht Sammlung, Verarbeitung und Endverbringung von im KUH-Bag gesammelten Materialien. Es ist modular aufgebaut und stützt sich was die Sammlung betrifft auf die Datenerhebung durch die Systembetreiber. Die Überwachung der Verarbeitung wird mittels Datenerhebung beim Erstpfeänger, welche mit zusätzlichen Informationen von Folgeempfängern ergänzt wird erfasst und kann durch eine externe Institution durchgeführt werden um Geschäftsgeheimnisse zu wahren.

Wie die Resultate der Recyclingketten LVPn und LVP+ zeigen, ist ein Fokus auf die Verarbeitung beim Erstpfeänger sinnvoll, da die Erstverarbeitung den grössten Einfluss auf die erreichte tRQ hat. Der Export von teilbehandelten Fraktionen in Entwicklungs- und Schwellenländer ist mit diesem Fokus aber schwierig zu kontrollieren, da das entwickelte System keine vollständige Überwachung der Materialflüsse sicherstellt.

Mit dem Monitoringsystem wurde eine grosse Menge an Daten erhoben und aufbereitet. Es ist Ermessenssache der einzelnen Kantone zu bestimmen, ob diese die Auskunftspflicht der Betreiber gegenüber dem Gesetzgeber erfüllen.

Als Grundlage für die Überwachung von gemischten Kunststoffsammlungen wurde eine Berechnungsmethode für die technische Recyclingquote und das Recyclingpotenzial entwickelt. Während tRP und Wertstoffanteil Hinweise darauf geben können, ob allfällige Ziel- oder Mindestquoten realistisch gesetzt wurden, so ist gerade das Recyclingpotenzial in der täglichen Verarbeitung von wenig Bedeutung. Die tRQ ist eine endgültig berechnete Quote und hat so den Vorteil, dass die tRQ für die Öffentlichkeit verständlich ist, wissenschaftlichen Anforderungen zu genügt und eine umweltpolitisch relevante Kenngrösse ist.

5.1.2 Offene Fragen

In der Verarbeitung, der Berechnung der Kennzahlen sowie der Qualität der Recyclingkunststoffe bestehen aus wissenschaftlicher Sicht noch offene Fragen, die weitere Abklärungen benötigen. Je nach zukünftig verwendeten Recyclingketten sind unterschiedliche Fragen vorrangig zu untersuchen.

Bei einer weiteren Verarbeitung in der artikelbasierten Recyclingkette LVP müssten weitere Informationen zu gewissen Regranulaten (PO und PETm) gesammelt werden um folgende Fragen zu beantworten:

- Wie erfolgt die Verarbeitung von teilbehandelte PETm-Fraktionen. Inwiefern können neu aufkommende Verwertungswege einen Beitrag zu einer besseren Verarbeitung dieser Fraktionen leisten?
- Welche Qualität wird in PO- und PETm-Regranulaten erreicht und in welchen Anwendungsgebieten finden diese Regranulate Anwendung?

Bei einer weiteren Verarbeitung in der materialbasierten Recyclingkette MRK wäre die Durchführung eines Batch-Versuches anzustreben, um folgende Fragen zu beantworten:

- Können die in der Modellierung bestimmten Anteile einzelner Rezyklate bestätigt werden?
- Muss aufgrund dieser Resultate der Beschrieb der Recyclingkette MRK angepasst werden?

Hierbei könnte es sinnvoll sein, Material aus verschiedenen Sammelsystemen zu mischen, um einen Durchschnittswert für Schweizer Sammelmateriale zu bestimmen.

Bei beiden Verarbeitungsansätzen bestehen aufgrund der verwendeten Abschätzungen zum Gehalt von Fehlstoffen noch Unsicherheiten in den Kennzahlen Wertstoffanteil, tRP und tRQ. Folgende Frage sollten in diesem Bereich weiter untersucht werden:

- Lassen sich die getroffenen Annahmen durch Nachweise aus der Verarbeitung oder Messungen von Schweizer Sammelmateriale bestätigen?
- Müssen für die zukünftige Berechnung dieser Kennzahlen andere Werte verwendet werden?

Als einfach zu prüfende Annahme könnte in einem ersten Schritt der Pressverlust genauer bestimmt werden. Dieser wurde im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund fehlender Daten mit 5% der Gesamtmenge als relativ hoch geschätzt (Tabellen 1, 2 und 3).

5.1.3 Weiterentwicklung des Monitoringsystems

Bleiben gemischte Kunststoffsammlungen Teil des Schweizerischen Entsorgungssystems, müsste eine Harmonisierung verschiedener Monitoringsysteme der einzelnen Systemanbieter angestrebt werden. Der Gesetzgeber muss sich darauf verlassen können, dass die ihm zur Verfügung gestellte Daten einheitlich erhoben wurden, da er sonst die seine Aufsichtsfunktion nicht wahrnehmen kann. Zusätzlich würde eine Harmonisierung der Monitoringsysteme eine gemeinsame Verarbeitung und Berichterstattung ermöglichen, womit Kosten eingespart, bzw. auf mehrere Systeme verteilt werden könnten. Als zentrales Element für diese Harmonisierung muss die Systemgrenzen sowie die Berechnungsgrundlage für Recyclingquoten und anderen Kennzahlen festgelegt werden. Als Beispiel sei hier auf die Harmonisierung von Verarbeitungsvorschriften und Berechnungsmethoden für RVQ im Falle EAG in der Schweiz verwiesen, wo diese Grundlagen öffentlich zugänglich sind (Swico/Sens, 2012).

Aufgrund der in diesem Bericht vorgestellten Informationen sollte es möglich sein, dass Monitoringsysteme für gemischte Kunststoffsammlungen zu vereinfacht werden, so dass das Monitoring von den Systemen selbst oder privaten Dienstleistern übernommen werden können. Überlagert könnte eine technische Kommission aus Experten und Interessensvertretern die Rahmenbedingungen für gemischte Kunststoffsammlungen weiterentwickeln und je nach Bedarf alternative Verwertungswege für gewisse Fraktionen untersuchen.

Ein zukünftiges Monitoringsystem müsste folgende Eigenschaften aufweisen, um mit kleinem Aufwand weiterhin alle wichtigen Informationen zu sammeln:

- *Der Umfang des Monitoringsystems einzelner Systeme ist der Art der genutzten Recyclingkette anzupassen. Im artikelbasierten Recyclingketten besteht im Vergleich zum materialbasierten Recyclingketten ein weit höherer Bedarf an ein Monitoring der Materialflüsse. Die Ballenfrakti-*

onen im artikelbasierten Ansatz werden grossräumig gehandelt und so bestehen viele Möglichkeiten, wie Material unsachgemäss behandelt werden könnte.

- *Ein automatisiertes Nachweissystem muss die Materialflüsse bis und mit einer Endbehandlung verfolgen.* Dies würde bedingen, dass Verträge mit Erstempfängern obligatorisch einen Nachweis über die Weitergabe, Verwertung und Qualität über ihre eigene Verarbeitung in einem vorgegebenen Format liefern, und dass sie dieselben Informationen auch von allen Folgeempfängern einholen. Bei der PETm-Fraktion besteht hier aufgrund der sich wandelnden Verwertungslandschaft der grösste Bedarf.
- *Ein Teil der Überwachung der Materialflüsse, Verarbeiter und Verarbeitung könnte durch bereits bestehende europäische Zertifizierungsmechanismen abgedeckt werden.*³¹ Während es möglich ist, dass mit der Einführung von gemischten Kunststoffsammlungen neue Verarbeiter in der Schweiz entstehen, ist auch längerfristig eine Verarbeitung gewisser Fraktionen in der EU absehbar, womit ein Anschluss an solche Mechanismen sinnvoll wäre.

5.2 Erreichte Leistung des KUH-Bag Systems und Verbesserungsmöglichkeiten

5.2.1 Leistung während der Pilotphase und Vergleich mit der Zielquote

Mit etwa 22-44'000 Nutzern im Einzugsgebiet des KUH-Bags wird bereits ein beachtlicher Anteil der Bevölkerung erreicht. Der hohe Anteil an Zielartikel von 94.4% im Sammelmateriale lässt darauf schliessen, dass sich die Nutzer bewusst sind, welche Artikel im KUH-Bag entsorgt werden dürfen und sie nutzen den KUH-Bag ergänzend zu bestehenden Separatsammelsystemen sowie den Kehrriechsäcken.

In der Verarbeitung konnten während der Pilotphase wichtige Erfahrungen mit der Logistik und verschiedenen Recyclingketten gesammelt werden. Aufgrund von Verarbeitungsengpässen wurden während der Pilotphase gewisse Mengen entweder in ungeeigneten Anlagen (Sortieranlage für Hohlkörper) oder unter hohen Kosten verarbeitet (händische Entnahme von Getränkekartons zur Erfüllung der Exportbestimmungen). So wurde durchschnittlich eine technische Recyclingquote von 47% erreicht, die im Vergleich zu einer reinen Verarbeitung in den Recyclingketten LVP+ (49%) oder MRK (55%) noch etwas tiefer liegt. Die Verwertung von Behandlungsresten wurde entsprechend den Vorgaben umgesetzt. Somit wurde ein Teil davon in Schweizer KVA zurückgeführt, obwohl eine alternative Verwertung einen höheren Umweltnutzen generieren würde.

Der Umweltnutzen des KUH-Bag Systems war wegen einer noch nicht einwandfreien Verarbeitung insbesondere im ersten Jahr weniger gross als er hätte sein können. Die externe Studie von UMTEC und Carbotech (2017) hat den Umweltnutzen des KUH-Bag Systems im ersten Betriebsjahr untersucht und weist diesen als „Bringsystem 1“ aus. Wie dieser Studie zu entnehmen ist, war der Umweltnutzen auch schon im ersten Jahr positiv. Im zweiten Betriebsjahr konnte der Umweltnutzen aufgrund höherer tRQ und Recyclingquote weiter erhöht werden.

³¹ EuCertPlast (<http://www.eucertplast.eu/>) ist ein von der EU unterstütztes Projekt zur Schaffung einer europäischen Zertifizierung, welche zusätzlich zur Überprüfung der Gesetzeskonformität auch die Transparenz in der Kunststoffrecyclingindustrie erhöhen, die Nachverfolgbarkeit von Abfällen garantieren sowie Handel und Auslagerung von Verarbeitungsprozessen an Mindestanforderungen knüpfen will.

Die in der Verarbeitung erreichten technischen Recyclingquoten sind von der geforderten Zielrecyclingquote von 70% noch entfernt. Es ist heute auch noch nicht möglich ist, dieses Ziel mit bestehenden Recyclingketten zu erreichen. Laut den Wertstoffanteilen kann das Ziel aber grundsätzlich erreicht werden. Die technischen Recyclingpotenziale von 65% (artikelbasiert) und 75% (materialbasiert) sind ein Hinweis darauf, dass das Erreichen der Zielquoten langfristig herausfordernd bleibt und das festgelegte Ziel gute Anreize schafft, die Verwertung von Kunststoffen weiter zu verbessern.

5.2.2 Verbesserung der Sammlung

Mit einer Sammelquote von 5.6% des im Einzugsgebiet anfallenden KUH-Bag Materials besteht noch bedeutendes Potenzial, zusätzliches Material separat zu sammeln und einer stofflichen Verwertung zuzuführen. Bei einem Weiterbetrieb des KUH-Bag Systems, kann davon ausgegangen werden, dass die Mengen mittelfristig weiter zunehmen werden (siehe 4.2.1). Mit weiteren Massnahmen könnte das Wachstum der Sammelmenge zusätzlich gefördert werden.

Eine transparente Kommunikation der Resultate des Pilotversuches könnte Vertrauen in den KUH-Bag schaffen und eine Mengenerhöhung bewirken. Hierbei wäre es wichtig, mit einem Ausblick weitere Verbesserungen des Systems in Aussicht zu stellen.

Ein wichtiger Faktor für die Nutzung des KUH-Bags ist der Komfort. Sowohl ein engeres Netz an Sammelstellen wie auch eine Ausweitung der Holsammlung in andere Städte könnten die Sammelmengen erhöhen. Wie die Ökobilanz zeigt (siehe A IV), würde als Nebeneffekt auch der Gesamtumweltnutzen der Sammlung steigen. Die Änderung des Sammelsystems kann die Zusammensetzung des Sammelmaterials beeinflussen. Es gibt Hinweise, dass mit dem Wechsel von der Bring- zur Holsammlung der Anteil Flaschen und Hohlkörpern ansteigt. Falls diese Beobachtung bestätigt werden kann, würde dies zu leicht höheren Recyclingquoten führen.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Preis des KUH-Bags. Mit steigenden Sammelmengen können Fixkosten breiter verteilt werden. Die zusätzlich verfügbaren Gelder könnten zur Reduktion der Sackgebühren oder zur Umsetzung verbesserter Verarbeitungsabläufen eingesetzt werden, womit ein für den Kunden ansprecheres Preis/Leistungsverhältnis erzielt wird. Bei der Reduktion der Sackgebühren könnte eine verminderte Lenkungs-kraft jedoch zu tieferen Sammelqualitäten führen.

Bei einer hohen Sammelquote würde die Menge an Kehrriechtsäcken merklich abnehmen und durch KUH-Bag Säcke ersetzt werden. In diesem Falle wäre ein Weiterbestand einer Bringsammlung kaum sinnvoll, da mit dem Wegfall an Kehrriechtsäcken freie Logistikkapazitäten geschaffen würden. Längerfristig könnte somit eine gemeinsame Holsammlung von Kehrriechtsäcken und KUH-Bags mit nachfolgender Sortierung sinnvoll sein.

5.2.3 Verbesserung der Verarbeitung

Ein wichtiger Aspekt einer verbesserten Verarbeitung ist die Erhöhung der Recyclingquote. Kurzfristig könnte die durchschnittliche tRQ durch verschiedene Massnahmen weiter erhöht werden:

- Festlegen von Mindestverarbeitungsvorschriften, die gegenüber Kunden, Verarbeiter und Gesetzgeber Transparenz schaffen. Mindestverarbeitungsvorschriften müssten Bestandteil von Abnahmeverträgen werden.
- Sicherung von Verarbeitungskapazitäten in Anlagen, die hohe tRQ erreichen
- Weiterhin Verarbeitung und Verbringung überprüfen. Dies ist im artikelbasierten Ansatz besonders wichtig, da eine grössere Anzahl von möglichen Verarbeitern das Material behandelt und die tRQs von Charge zu Charge stark variieren kann.

Die tRQ könnte auch mit einer selektiveren Auswahl des Sammelmaterials optimiert werden. Hiermit wird aber lediglich die Quote, nicht aber der erreichte Umweltnutzen erhöht. Für eine Verarbeitung mit dem materialbasierten Ansatz könnten beispielsweise stark PET-NGF – haltige Artikel vom Sammelmateriale ausgeschlossen werden (Wurst- und Käseverpackungen, Salatschalen, Öl- und Essigflaschen), da diese kaum zur Gesamtmenge Rezyklate beitragen. Gerade bei PET-haltigen Artikeln wäre mit negativen Auswirkungen auf die PET-Getränkeflaschensammlung zu rechnen, womit eine solche Änderung sorgfältig geprüft werden müsste.

Mittelfristig ist nicht nur die optimierte Nutzung bestehender, sondern auch eine Aufbau zusätzlicher Infrastruktur oder zweifacher Verarbeitung zur Erhöhung der tRQ in Betracht zu ziehen. Mit einer Kombination von artikel- und materialbasiertem Ansatz ergäben sich Möglichkeiten, welche die tRQ sowie den Anteil hochwertigerer Rezyklate erhöht werden könnte. Hierzu wäre unter anderem das Vorschalten von artikelbasierten Trennmethoden vor einer materialbasierten Ansatz zu prüfen. So könnten beispielsweise PET-haltige Artikel, die im materialbasierten Ansatz verloren gehen, zusätzlich zurückgewonnen werden.

Ein weiterer Aspekt ist die stetige Verbesserung der Qualität von Recyclingkunststoffen. Während es hauptsächlich Aufgabe der Recyclingindustrie ist, diese Verbesserung durch die Inbetriebnahme neuer Technologien voranzutreiben, kann ein Systembetreiber eine wichtige Rolle spielen. Als neutraler Akteur zwischen Verarbeiter und Detailhändler als Inverkehrbringer, könnte ein Systembetreiber zudem Erfahrungen zur Rezyklierfähigkeit von Verpackungen an die Detailhändler zurückgeben, die teilweise ihre Verpackungen ökologisch optimieren wollen (Migros-Genossenschafts-Bund, 2016).

5.3 Auswirkungen und Wechselwirkungen mit bestehenden Sammelsystemen

5.3.1 Sammlungen der Grossverteiler

Im Einzugsgebiet des KUH-Bag Sammelsystem gibt es weitere Kunststoffsammelsysteme, die zumindest zu einem Teil dieselben Zielartikel sammeln. Zu erwähnen sind insbesondere die Hohlkörper- und Flaschensammlungen der Detailhändler Migros und Coop sowie die gemeinsame Sammlung von Aldi (Kunststoffflaschen und Getränkekartons). Die Sammlungen konkurrieren somit teilweise um dasselbe Material. Gleichzeitig besteht aber auch die Möglichkeit, dass mit jedem neuen Rückgabeangebot auch eine weitere Zielgruppe von Konsumenten angesprochen werden kann.

Die Wechselwirkung mit den Angeboten von Migros und Coop können nicht untersucht werden, da diese bereits vor Inbetriebnahme des KUH-Bag Systems existierten. Aldi Suisse hat die eigene Sammlung im Herbst 2016 lanciert, als die Artikelanalysen des KUH-Bags bereits abgeschlossen waren. Somit

können die Auswirkung dieses Konkurrenzangebotes nicht genau abgeschätzt werden. Die Resultate aus der Verarbeitung lassen aber darauf schliessen, dass aufgrund dieses neuen Angebotes der Anteil Getränkekartons in den KUH-Bags merkbar abgenommen hat und somit zumindest eine gewisse konkurrierende Wirkung besteht.

5.3.2 Sammlung für PET-Getränkeflaschen

Das Separatsammelsystem für PET-Getränkeflaschen ist bei Konsumenten beliebt und leistet einen bedeutenden Beitrag zur Ressourcenschonung. Seit der Einführung einer gemischten Sammlung von Kunststoffen aus Haushalten bestehen Bedenken, dass diese die PET-Separatsammlung und den teilweise geschlossenen Recyclingkreislauf gefährdet (BafU, 2016; OKI, 2016, SwissRecycling, 2016, Pusch, 2016). Die Berücksichtigung solcher Effekte ist für die Beurteilung von gemischten Kunststoffsammlungen wie den KUH-Bag sehr wichtig. Gleichzeitig bestehen mit einer gemischten Sammlung aber auch Chancen, da das KUH-Bag System ergänzend zur PET-Separatsammlung wirken könnte.

In den erhobenen Daten wurden keine Hinweise gefunden, dass der KUH-Bag die bestehende PET-Separatsammlung gefährdet. Es müssen aber noch weitere Informationen gesammelt werden, um die Auswirkung von gemischten Sammlungen umfassend beurteilen zu können. Gemischte Sammlungen können die PET-Separatsammlung sowohl direkt wie indirekt beeinflussen, wobei in beiden Fällen eine gefährdende wie ergänzende Wirkung möglich ist und für eine abschliessende Beurteilung beide Aspekte berücksichtigt werden müssen.

Eine direkte Beeinflussung besteht, wenn gemischte Sammlungen einen bedeutenden Anteil PET-Getränkeflaschen enthalten. Laut den Artikelanalysen besteht KUH Sammelmateriale im Durchschnitt zu 0.8% aus PET-Getränkeflaschen. Somit wurden mit dem KUH-Bag im ersten Jahr rund 2.1 t und im zweiten Jahr rund 4.0 t PET-Getränkeflaschen gesammelt. Im Einzugsgebiet des KUH-Bags fällt in der PET-Separatsammlung rund 2'250 t Sammelgut an.³² Ein bedeutender Verlust an PET-Getränkeflaschen im KUH-Bag scheint somit nicht gegeben.

Interessanterweise konnte zwischen Frühling und Herbst 2016 ein Rückgang an PET-Getränkeflaschen im Sammelmateriale beobachtet werden, obwohl gerade im Sommer ein höherer Konsum an PET-Getränkeflaschen zu erwarten ist. Zwischen Frühling und Herbst 2016 haben sowohl PET-Recycling Schweiz wie auch die Betreiber des KUH-Bag Systems die Bevölkerung verstärkt informiert, dass PET-Getränkeflaschen gemäss verschiedener Empfehlungen (BafU, 2016; OKI, 2016, SwissRecycling, 2016, Pusch, 2016) nicht in den KUH-Bag gehören. Diese Massnahme scheint somit eine Wirkung entfaltet zu haben.

Selbst wenn PET-Getränkeflaschen in der gemischten Sammlung einen bedeutenden Anteil ausmachen würden, ist eine Gefährdung der PET-Separatsammlung noch nicht nachgewiesen. Es müsste zusätzlich gezeigt werden, dass die PET-Getränkeflaschen in der gemischten Sammlung tatsächlich aus der PET-Separatsammlung stammen und nicht aus dem gemischten Siedlungsabfall. Ebenso müssten PET-Getränkeflaschen in der gemischten Sammlung nicht stofflich verwertet werden. In Österreich sind

³² Basierend auf der Sammelmenge Schweiz des PET-Separatsammelsystems (45'891 t; PRS, 2016) und einem Bevölkerungsanteil von 4.6% der Schweizer Einwohner im Einzugsgebiet der Verbände ZAB und KVA TG.

PET-Getränkeflaschen Teil der gemischten Sammlung und können trotzdem in einen teilweise geschlossenen Kreislauf (Bottle-to-Bottle) geführt werden (ARA, n/a).

Eine indirekte Beeinflussung besteht, wenn mit dem Vorhandensein einer gemischten Sammlung die Sammelqualität, bzw. der Anteil an Nichtzielartikel oder Fremdstoffen in der PET-Separatsammlung beeinflusst wird. Der Anteil an Fremdstoffen in der PET-Separatsammlung hat in den letzten Jahren zugenommen, was jedoch eine langfristige Entwicklung zu sein scheint, welche bereits vor dem Aufkommen gemischter Sacksammlungen wie dem KUH-Bag begonnen hat. Um nachzuweisen, dass gemischte Sammlungen einen Einfluss auf die Zusammensetzung haben, müssten Änderungen dokumentiert werden, welche sich mit dem Zeitpunkt der Einführung von gemischten Sammlungen decken. Bei einer Verbesserung der Zusammensetzung müsste von einer ergänzenden Wirkung gesprochen werden. Zum Beispiel könnte das PET-Separatsammelsystem entlastet werden, da Konsumenten nun Möglichkeiten haben, andere Kunststoffverpackungen einer stofflichen Verwertung zuzuführen. Aber auch bei einer Verschlechterung der Zusammensetzung ist eine Gefährdung PET-Separatsammelsystems nur gegeben, wenn die zusätzlichen Fremdstoffe tatsächlich die Verarbeitung und die Schliessung des Kreislaufes verhindert.

Der Anteil PET-Getränkeflaschen in gemischten Sammlungen sollte weiterhin überwacht werden. Informationskampagnen, wie sie bereits 2016 durchgeführt wurden, scheinen den Anteil an PET-Getränkeflaschen wirksam reduzieren zu können. Entwickeln sich die Mengen zu bedeutenden Anteilen, gäbe es Lösungen, die sicherstellen könnten, dass auch PET-Getränkeflaschen aus gemischten Sammlungen in einen teilweise geschlossenen Kreislauf rückgeführt werden (ARA, n/a). Gemischte Sammlungen würden so zur Erreichung gesetzlicher Vorgaben (VGV) beitragen und müssten entsprechend die Menge und Verarbeitung der PET-Getränkeflaschen an die zuständige Organisation melden, hätten aber gleichzeitig Anrecht auf einen Teil der vorgezogenen Recyclinggebühr. Ein Fluss von Materialien und Gebühren zwischen verschiedenen Systemen ist hierbei nicht neu. Beispielsweise besteht zwischen den Systemen InoBat und Swico eine Abmachung, die garantiert, dass Batterien aus EAG von InoBat übernommen werden und deren Entnahme entschädigt wird.

5.3.3 Auskopplung von gemischten Kunststoffen aus dem Kehrriech

In der KVA Weinfeldern wurde im Geschäftsjahr 2016 insgesamt 148'533 t Abfälle, wovon 39'540 t (26%) aus der öffentlichen Kehrriechsammlung aus dem Verbandsgebiet stammten, verwertet (KVA TG, 2016). In der KVA Bazenheid wurden im Geschäftsjahr 2016, insgesamt 85'600 t Abfälle, wovon 33'876 t (39%) aus der öffentlichen Kehrriechsammlung stammten, verwertet (ZAB, 2016). Im zweiten Betriebsjahr des KUH-Bag Systems wird eine Sammelmenge von rund 502 t KUH erreicht werden, wovon etwa 327 t auf das Einzugsgebiet KVA TG und 175 t auf das Einzugsgebiet ZAB entfallen. Diese Mengen machen weniger als 1% der in den jeweiligen KVAs verwerteten Siedlungsabfälle aus und sind mengenmässig als kaum bedeutend zu beurteilen. Die potenziellen Sammelmengen für KUH für die beiden Einzugsgebiete liegen bei 3'000 t für KVA TG und 2'500 t für ZAB, was jeweils 7.5% der verwerteten Siedlungsabfälle, oder 2% (KVA Weinfeldern) und 3% (KVA Bazenheid) der insgesamt verwerteten Abfälle entspricht.

Die Bedeutung eines Wegfalls solcher Mengen wurde im Rahmen dieses Berichts nicht beurteilt. Mit einem Wachstum der Menge Siedlungsabfälle könnte eine gemischte Sammlung bestehenden Verarbeitungspässen (VBSA, n/a), insbesondere auch durch die tiefe Dichte von KUH, entgegenwirken. Grundsätzlich ist ein Wegfall von gemischten Kunststoffen bei KVAs mit hohem Anteil importierter Abfälle weniger bedeutend, wie dies beim KUH-Bag exemplarisch an den KVA Bazenheid (kaum Importe) und KVA Weinfelden (42% der verwerteten Abfälle importiert) gezeigt werden kann. Aus Sicht der Abfallindustrie wird die heutige Sammelmenge im Kanton Thurgau als nicht relevant, die potenzielle Sammelmenge als kaum spürbar betrachtet (Landbote, 2017). Bei KVA mit insbesondere auf der finanziellen Seite (wegfallende Gebühren) müsste die Auswirkung von gemischten Kunststoffsammlungen auf KVAs weiter beobachtet werden.

Gemischte Kunststoffsammlungen wie das KUH-Bag System, das von öffentlich-rechtlichen KVA Zweckverbänden betrieben werden, haben die Möglichkeit, Wachstum und Verwertung von Behandlungsresten so zu steuern, dass die Auskopplung den KVA-Betrieb nur wenig beeinflusst und können so Planungssicherheit schaffen. Dies kann mit einem Mengenausgleich umgesetzt werden, bei dem gewisse Behandlungsreste denjenigen KVA zugeführt werden, die am Meisten von einer Auskopplung betroffen sind.

5.4 Ausbau gemischter Kunststoffsammlungen

5.4.1 Rahmenbedingungen für den Ausbau

Wie das Beispiel KUH-Bag zeigt, kann die Sicherung von Verarbeitungskapazitäten für Schweizer Systeme aufgrund kleiner Mengen schwierig sein. Wenn Systeme keine zeitnahe Verarbeitung ihres Sammelmaterials garantieren können, besteht die Gefahr, dass bedeutende Zwischenlager entstehen. Deshalb wäre es wichtig, vor der Einführung von gemischten Sammlungen bereits die nötigen Exportbewilligungen einzuholen. Während dem Betrieb müssten neben Sammelmenge und Informationen zur Verarbeitung und Verbringung auch die Lagermengen der verschiedenen Systeme erfasst und überprüft werden. So kann sichergestellt sein, dass die Abfälle gesetzeskonform gelagert werden und keine Immissionen verursachen.

Während Systeme selber dafür verantwortlich sind, Verarbeitungskapazitäten zu sichern, ist ein Teil der Lagerbildung auch auf das Ausbleiben von Exportbewilligungen zurückzuführen. Mit einer Klärung der rechtlichen Grundlagen (siehe 4.4.3) scheint sich diese Situation bereits verbessert zu haben. Es gilt jedoch zu prüfen, ob nicht weitere Änderungen in Betracht gezogen werden müssten. *Die uneinheitliche Handhabung von Sammelgut mit und ohne Getränkekartons zusammen mit ausbleibenden Exportnotifikationen führt dazu, dass teilweise unter hohem Aufwand Getränkekartons händisch entfernt werden müssen. Da Sammelgut mit und ohne Getränkekartons in ähnlichen Anlagen verarbeitet wird und von Getränkekartons keine zusätzlichen Bedenken ausgehen, müsste geprüft werden, ob Sammelgut mit und ohne Getränkekartons nicht einheitlich behandelt werden sollte.*

5.4.2 Beitrag zu umweltpolitischen Zielen

Durch den Konsum wird von der schweizerischen Bevölkerung eine jährliche Umweltbelastung von insgesamt 165'000 mio. Umweltbelastungspunkten (UBP) im In- und Ausland generiert. Die entspricht 20.6 mio. UBP pro Person und Jahr. Ein naturverträgliches Mass an Umweltbelastung würde erreicht, wenn die Umweltbelastung um 70% auf 50'000 mio. UBP, bzw. 6.25 mio. UBP pro Person gesenkt werden könnte (BafU, 2014). Mit einer schweizweiten Kunststoffsammlung kann die jährliche Umweltbelastung um 90 mio. UBP pro Jahr, 11'000 UBP pro Person und Jahr oder 0.05% gesenkt werden (UMTEC und Carbotech, 2017).

Die Schweiz verursacht eine jährliche Emission klimarelevanter Gase von ungefähr 108.8 mio. t CO₂-eq. Dies entspricht 13.6 t CO₂-eq pro Kopf und Jahr (BafU, 2014). Bis Mitte des Jahrhunderts müssen diese Emissionen um etwa 93% auf 8 mio. t CO₂-eq oder 1 t CO₂-eq pro Kopf reduziert werden, um das von den Weltgemeinschaft gesetzte 2°C-Ziel zu erreichen. Mit einer schweizweiten Kunststoffsammlung können die jährlichen Emissionen um bis zu 190'000 t CO₂-eq pro Jahr, 23 kg CO₂-eq pro Person und Jahr oder 0.2% gesenkt werden³³.

In beiden Fällen ist die erreichbare Einsparung gemessen an den als mittel- bis langfristig erachteten Reduktionen der Schweizerischen Umweltauswirkungen relativ klein. Dies liegt insbesondere daran, dass der Verbrauch von Kunststoffen in Haushalten auch nur einen kleinen Anteil der gesamten Verursachten CO₂-Emissionen und Umweltbelastung ausmacht, womit das Recycling von Kunststoffen auch nur einen kleinen Beitrag zu den notwendigen Reduktionen leisten kann. Betrachtet man den Nutzen einzelner Recyclingsysteme, so kann eine ausgebaute gemischte Sammlung (90 Mia. UBP bzw. 190'000 t CO₂-eq) mit der bestehenden Separatsammlung von PET-Getränkeflaschen mithalten (90 Mia. UBP bzw. 124'000 t CO₂-eq pro Jahr³⁴) und so einen zusätzlichen Nutzen generieren.

Die Reduktion der Gesamtumweltbelastung ist ein erwünschter Effekt, es gibt aber keine rechtlichen Verpflichtungen, die Gesamtumweltbelastung zu reduzieren. Hingegen besteht bei den CO₂-Emissionen mit dem CO₂-Gesetz die rechtliche Verpflichtung, diese im Inland bis 2020 um mindestens 20% gegenüber 1990 senken.

Die Abfallindustrie hat sich in einer Branchenvereinbarung verpflichtet, ihre Emissionen von 1.14 Mio. t CO₂-eq im Jahr 2010 auf 0.94 Mio. t CO₂-eq im Jahr 2020 zu reduzieren und so die Reduktionsziele des CO₂-Gesetzes mit einer Reduktion von 200'000 t CO₂ mitzutragen (UVEK & VBSA, 2014). Somit ist es wichtig, den Beitrag von gemischten Kunststoffsammlungen zur bestehenden Reduktionsverpflichtung zu untersuchen.

Das CO₂-Gesetz beschränkt sich auf Emissionen, die durch das Verbrennen von fossilem Kohlenstoff entstehen. Bei der Berechnung der CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Siedlungsabfällen wird somit berücksichtigt, dass nur ein Teil (48%) des darin enthaltenen Kohlenstoffes fossilen Ursprungs ist. Weitere Gutschriften für die Lieferung von Wärme und Strom, sowie der Metallrückgewinnung aus

³³ Sammelmenge von 112'000 t pro Jahr und eine von vielen Sammelsystemen bereits erreichten Einsparung von 1.7 t CO₂-eq / t Sammelmateriale (UMTEC und Carbotech, 2017). Diese und jegliche weitere Abschätzungen mit dieser Sammelmenge berücksichtigen nicht, dass das Sammelmateriale verschmutzt gesammelt wird, aber aus der Masse reiner Kunststoffverpackungen bestimmt wurde. Entsprechend ist damit zu rechnen, dass die berechneten Werte den Gesamtnutzen leicht unterschätzen.

³⁴ Sammelmenge 45'891 t pro Jahr (PRS, 2016) und Einsparung von 2.7 t CO₂-eq / t Sammelmateriale (UMTEC und Carbotech, 2017).

Verbrennungsrückständen, werden berücksichtigt um aus den fossilen Bruttoemissionen die fossilen Nettoemissionen zu berechnen.

Tabelle 6: Eingesparte CO₂-Emissionen durch eine flächendeckende gemischte Sammlung

	Reduktionsfaktor (t CO₂-eq/t Sammelmenge)	Potenzielle Gutschrift (t CO₂ /a)
Szenario 0: Bisherige Berechnung	0.5	56'000 t CO ₂
Szenario 1: Berücksichtigung Kunststoffrecycling	1.7	190'000 t CO ₂
Szenario 2: Berücksichtigung Kunststoffrecycling + Änderung Siedlungsabfall	4.79 (1.7 + 2.79)	502'000 t CO ₂

Die der Branchenvereinbarung zu Grunde liegenden Berechnungsmethodik sieht keine Gutschriften für eine Auskopplung vor der Verbrennung vor wie dies für eine angemessene Berücksichtigung des Kunststoffrecyclings notwendig wäre. Eine Auskopplung von Kunststofffraktionen unter bestehenden Rahmenbedingungen (Szenario 0) ist trotzdem mit Reduktionen verbunden da die Gesamtmenge von in KVAs verwerteten Abfällen sinkt. Abschätzungen zeigen, dass pro Tonne ausgekoppelter Kunststoffe eine Gutschrift von ungefähr 0.5 t CO₂-eq ausgelöst wird. Somit liegt der anrechenbare Gesamtnutzen einer Kunststoffsammlung bei 56'000 t CO₂-eq, während in Tat und Wahrheit direkte Einsparungen von 190'000 t CO₂-eq anfallen (Szenario 1, Tabelle 6).

Tabelle 7: Zusammensetzung und fossile CO₂-Bilanz von KVAs bei einer Auskopplung von KUH

		Abfälle in KVA (bisher)	Entkoppelte Abfälle KUH Restmenge in KVA	
<i>Mengen und Gehalte</i>	Menge (t/a)	3'890'000	112'000	3'778'000
	Org. Kohlenstoff (t/t Abfall)	0.290	0.800	0.276
	Foss. Kohlenstoff (t/t Abfall)	0.139	0.800	0.121
	Foss C/Org C (%)	48%	100%	43.8%
<i>Verbrennung: Brutto- Emissionen</i>	Emissionsfaktor (t CO ₂ /t C)	3.67	3.67	3.67
	Emissionsfaktor (t foss CO ₂ /t Abfall)	0.51	2.79	0.443
	Fossile Bruttoemissionen (t CO ₂ /a)	1'985'500	312'100	1'673'400
<i>Nettoemissionen relevant nach CO₂-Gesetz</i>	Gutschriften Wärme, Strom, Metall (bisher, (t CO ₂ /a)) ¹	950'000	n/a	950'000
	Gutschrift Kunststoffrecycling (neu, (t CO ₂ /a))	n/a	n/a	190'000
	Fossile Nettoemissionen (t CO ₂ /a)	1'035'500	n/a	533'400

¹ Annahme, dass dieselben Mengen Wärme und Strom geliefert werden können.

Mit der Auskopplung von Kunststoffen aus der KVA fallen neben den direkten Einsparungen zusätzlich indirekte Einsparungen an. Da gemischte Kunststoffe vor allem fossilen Kohlenstoff beinhalten, reduziert eine Auskopplung den Gehalt von fossilem Kohlenstoff in den restlichen Abfällen. Abschätzungen zeigen, dass durch eine Auskopplung von den als sammelbar betrachteten Kunststoffen der Anteil an fossilem Kohlenstoff um rund 4% abnimmt (Tabelle 7, Eigene Berechnungen, Daten aus UVEK & VBSA,

2014, VBSA, 2016, UMTEC & Carbotech, 2017). Aus der Sicht des CO₂-Gesetzes werden somit nach einer Auskopplung weitaus „sauberere“ Abfälle in der KVA verbrannt, da ein grösserer Anteil des Kohlenstoffs aus nichtfossilen Quellen stammt. Die Differenz der Bruttoemissionen vor und nach der Auskopplung liegt bei rund 312'000 t fossilem CO₂. Unter Berücksichtigung dieser indirekten Einsparungen wird eine Emissionsreduktion von insgesamt 4.5 t fossilem CO₂ / t Sammelmateriale beziehungsweise eine potenzielle Gesamtgutschrift von 502'000 t fossilem CO₂ erzielt (Szenario 2, Tabelle 6).

Um die Emissionsreduktionen im Rahmen der Branchenvereinbarung anrechenbar zu machen, müsste eine Änderung der Berechnungsmethodik angestrebt werden. Im Rahmen der letzten Berichterstattung wurde bereits eine Anpassung der Berechnungsgrundlage vorgeschlagen und scheint somit möglich zu sein (VBSA, 2016). Die vorgeschlagene Anpassung soll der Abfallwirtschaft eine Gutschrift für Wärme geben, die sie zwar bereitgestellt hat, aber aufgrund von warmen Wintern nicht abgeben konnte. Eine solche Heizgradtage-Korrektur würde in Jahren mit warmen Wintern eine Gutschrift von rund 50'000 t fossilem CO₂ auslösen (VBSA, 2016).

Eine „Kunststoffrecycling-Korrektur“ würde im Gegensatz zur Heizgradtage-Korrektur die Erfassung weit grössere Einsparungen ermöglichen. Bei der Berücksichtigung der direkten Einsparungen (Szenario 1) kann beinahe die ganze Reduktionsverpflichtung von 200'000 t CO₂ durch ein ausgebautes Recycling von Kunststoffen aus Haushalten abgedeckt werden. Bei einer zusätzlichen Berücksichtigung der indirekten Einsparungen (Szenario 2) liegen die Einsparungen durch ein ausgebautes Recycling um Faktor 2.5 höher als die eingegangenen Reduktionsverpflichtungen. Somit kann ein Ausbau nicht nur in der jetzigen Reduktionsperiode bis 2020 sondern auch in künftigen Verpflichtungsperioden einen wichtigen Beitrag leisten. Ob die indirekten Reduktionen berücksichtigt werden sollen ist abhängig davon ob künftige Verpflichtungsperioden weiterhin die Reduktion von fossilen CO₂-Emissionen zum Ziel haben. Ebenso müssten die hier aufgeführten ersten Abschätzungen mit weiteren Berechnungen bestätigt werden und die Auswirkung weiterer Effekte, wie einem zusätzlichen Import von Abfällen aus dem Ausland, untersucht werden.

5.4.3 Signalwirkung in Europa

Mit der geforderten Zielrecyclingquote von 70% stehen Systeme und Verarbeiter in der Verantwortung, die heutige, bereits sachgemässe Verarbeitung langfristig zu verbessern. Das berechnete Recyclingpotenzial zeigt, dass es herausfordernd sein wird, dieses Ziel zu erreichen, und ggf. neuartige Prozessabläufe notwendig sein könnten. Sowohl eine selektive Nutzung der bestehenden europäischen Recyclinginfrastruktur wie auch der Aufbau gewisser Verarbeitungskapazitäten in der Schweiz könnte hierbei eine Rolle spielen.

In beiden Fällen müssten heutige Machbarkeitsgrenzen ausgelotet werden, insbesondere wenn neben einer hohen Recyclingquote auch eine gute Qualität der Rezyklate erreicht werden soll. Da in der Schweiz kaum infrastrukturelle Lock-ins im Kunststoffrecycling bestehen, kann eine Verarbeitung nach neustem Stand der Technik angestrebt werden und mit hohen Mindestanforderungen eine flächendeckend hochwertige Verwertung von gemischten Kunststoffen demonstriert werden. So kann die Schweiz gerade wegen einem vergleichsweise späten Start in das Kunststoffrecycling durch heutigen, fortgeschrittenen Stand der Technik höhere Recyclingquoten erreichen als in Europa erreichen.

6 Literaturverzeichnis

6.1 Literaturverweise

ARA, n/a. Artikel „Kunststoffverpackungen im Kreislauf“.

<http://www.ara.at/d/konsumenten/recycling/kunststoffverpackung.html>. Besucht am 31.08.2017.

BafU, 2012. Erhebung der Kehrrichtzusammensetzung 2012.

<https://kommunale-infrastruktur.ch/cmsfiles/33597.pdf>

BafU, 2013a. Faktenblatt: Berechnung der Verwertungsquote von Altglas-Flaschen.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinfo-daten/faktenblatt_berechnungderverwertungsquotevonaltglas-flaschen.pdf.download.pdf/faktenblatt_berechnungderverwertungsquotevonaltglas-flaschen.pdf

BafU, 2013b. Faktenblatt: Berechnung der Verwertungsquote von Alu-Dosen.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinfo-daten/faktenblatt_berechnungderverwertungsquotevonalu-dosen.pdf.download.pdf/faktenblatt_berechnungderverwertungsquotevonalu-dosen.pdf

BafU, 2013c. Faktenblatt: Berechnung der Verwertungsquote von PET-Getränkeflaschen.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinfo-daten/faktenblatt_berechnungderverwertungsquotevonpet-flaschen.pdf.download.pdf/faktenblatt_berechnungderverwertungsquotevonpet-flaschen.pdf

BafU, 2014. Entwicklung der weltweiten Umweltauswirkungen der Schweiz.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wirtschaft-konsum/uw-umwelt-wis-sen/entwicklung_der_weltweitemumweltauswirkungenderschweiz.1.pdf.download.pdf/entwicklung_der_weltweitemumweltauswirkungenderschweiz.pdf

BafU, 2016. Artikel „Kunststoff“

<http://www.bafu.admin.ch/abfall/01472/01483/index.html?lang=de> vom 30.09..2017.

BafU, 2017. FAQ – Häufig gestellte Fragen zur VVEA.

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/fachinformationen/abfallpolitik-und-massnahmen/revidierte-technische-verordnung-ueber-abfaelle--schritt-zur-res/faq--haeufig-gestellte-fragen-zur-revidierten-tva--neu-vvea-.html>. Stand: 06.07.2017

BFS, 2014. Durchschnittliche Haushaltseinkommen und –ausgaben sämtlicher Haushalte, HABE 2014.

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/wirtschaftliche-soziale-situation-bevoelkerung/einkommen-verbrauch-vermoegen/haushaltsbudget.html>.

Carbotech, 2013. Zusammenfassung der Studie Öko-Effizienz Analyse Getränkekarton-Recycling.

http://static.getraenkekarton.ch/PDF/LCA-GKR_Summary.pdf

Carbotech, 2014a. Kurzbericht der Ökobilanz PE-Verwertungswege. Update und Ergänzung zu den beiden Studien „Ökologischer Vergleich von PE-Selektiv- und Gemischtsammlung mit der Verwertung in KVA Schweiz und Thurgau“ sowie „Entsorgung von 100'000t Kunststoff“.

Carbotech, 2014b. Ökobilanz Getränkeverpackungen – Gesamtbericht. Studie im Auftrag des BafU.

<http://www.bafu.admin.ch/abfall/01472/01491/index.html?lang=de>.

Cartier, R., 2014. Entwicklung der Rahmenbedingungen für die Kehrrichtverbrennungsanlagen in der Schweiz. Vortragsunterlagen des 3-Ländertreffens am 27.10.2014 in Brunnen. <http://vbsa.ch/wp-content/uploads/2014/10/1.7-Entwicklung-Rahmenbedingungen-CH.pdf>.

DigitalEurope, CECED, EERA, WEEEforum, 2016. Joint statement: European EEE industries, compliance

schemes and recyclers call for consistency in the calculation of recycling rates. June 30th 2016. http://www.digitaleurope.org/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=2219&language=en-US&PortalId=0&TabId=353

EBP, 2013. Verwertung Kunststoffabfälle Schweiz. Schlussbericht Module 3+4. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/externe-studien-berichte/projekt_kunststoffverwertung_schweiz_modul_3und4.pdf.download.pdf/projekt_kunststoffverwertung_schweiz_modul_3und4.pdf

Ellen MacArthur Foundation, 2016. The new plastics economy – rethinking the future of plastics. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/EllenMacArthurFoundation_TheNewPlasticsEconomy_15-3-16.pdf

Empa, 2000. Auswirkungen der thermischen und stofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen auf die schweizerische Abfallwirtschaft. Empa-Bericht Nr. 249. http://library.eawag-empa.ch/empa_berichte/EMPA_Bericht_249.pdf.

Eurometaux, 2016. Questions and Answers: A single EU calculation method for measuring real recycling rates. <https://www.eurometaux.eu/media/1596/eurometaux-qa-on-recycling-rate-calculation.pdf>

Europäische Kommission (EC), 2015. Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52015PC0596:DE:HTML>

European Academy for Taxes, Economics and Law (EAfTEL), 2016. New Calculation Method for Measurement of Recycling Rates and Influence on Recycling Quotas. https://www.tomm-c.de/fileadmin/pdf/2016/160425_Calculation_methods_for_recycling_rates.pdf

Hellerich, Walter ; Harsch, Günther; Baur, Erwin, 2010. Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften – Prüfungen – Kennwerte. Carl Hanser Verlag.

Horst, Joel. 2017. KUH-Bag: Ökobilanz der separaten Kunststoffsammlung. Bachelorthesis FHNW, vertraulich.

KVA TG, 2016. Jahres- und Mengenbericht, 2016. http://www.kvatg.ch/fileadmin/user_upload/download/jahresberichte/JB_2016.pdf

Landbote, 2017. „Kein Kampf um Kunststoff“ von Markus Brupbacher. Online, vom 16.08.2017. <https://www.landbote.ch/region/kein-kampf-um-kunststoff/story/16499932>

Migros-Genossenschafts-Bund, 2016. Artikel „Unser Versprechen: Ökologischere Verpackung“. <https://generation-m.migros.ch/de/versprechen/verpackungen.html>, 31.12.2016.

NZZ, 2003. „Fragezeichen zum Schweizer PET-Recycling – Weltmeister-Sammelquote und falsche Messungen“ von Sven Bradke. NZZ Nr. 115 vom 20.05.2003.

NZZaS, 2017. „Sammeln ist noch kein Recycling – Überschätzte Wiederverwertung“ von Franziska Pfister. NZZ am Sonntag vom 23.07.2017.

OKI, 2016. Kunststoffsammlungen: Checkliste für Gemeinden. <http://www.swissrecycling.ch/fileadmin/rd/pdf/wertstoffe/kunststoff/okichecklistekunststoffe2016.pdf>

Petcore Europe, 2014. Recycled products from PET. <http://www.petcore-europe.org/recycled-products>. Besucht am 22.08.2017.

Petcore Europe, 2017. Highlights PET Thermoforms Working Group. Report on the 5th Working Group Meeting 06 December 2016 – Brüssel. http://www.petcore-europe.org/sites/default/files/generated/files/news/01-2017_Highlights%20of%20the%205th%20Petcore%20Europe%20Thermoforms%20Working%20Group_report.pdf.

PlasticsEurope, 2015. Plastics – the facts 2015.

<http://www.plasticseurope.org/Document/plastics---the-facts-2015.aspx>

PlasticsEurope, 2016. Plastics – the facts 2016.

[http://www.plasticseurope.org/documents/document/20161014113313-plastics the facts 2016 final version.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20161014113313-plastics%20the%20facts%202016%20final%20version.pdf)

PRS, 2016. Geschäftsbericht PET-Recycling Schweiz 2016.

http://www.petrecycling.ch/tl_files/content/PDF/Geschaeftsbericht/PET-Recycling_Schweiz_Gesch%C3%A4ftsbericht_2016.pdf

Pusch, 2016. Position zur separaten Sammlung von Kunststoffen aus Haushalten 2016.

http://www.pusch.ch/fileadmin/kundendaten/de/Pusch/Positionen/Pusch_Position_Kunststoffrecycling_2016.pdf

Pusch, 2017. Pusch-Position zur separaten Sammlung von Kunststoffen aus Haushalten 2017.

http://www.pusch.ch/fileadmin/kundendaten/de/Pusch/Positionen/Pusch_Position_Kunststoffrecycling_2017_01.pdf

RecyclingNews, 2008. Wer wir Müllionär?. Artikel vom 21.01.2008.

<https://www.recyclingnews.info/recycling/wer-wird-muellionae/>. Besucht am 09.08.2017.

Redilo, 2011. Projekt „Kunststoff-Verwertung Schweiz“ Bericht der Module 1 und 2.

http://www.bafu.admin.ch/abfall/01472/01483/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6iONTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCGe3x4g2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--

Swico und Sens, 2012. Technische Vorschriften zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinfo-daten/sens_swico_-_technischevorschriftenzurentsorgungvonelektro-undel.pdf.download.pdf/sens_swico_-_technischevorschriftenzurentsorgungvonelektro-undel.pdf

Swico/Sens/SLRS, 2016. Fachbericht 2017.

<http://www.swicorecycling.ch/downloads/dokumente/fachbericht-swico-sens-slrs-2016.pdf/3836>

SwissRecycling, 2016. Faktenblatt Kunststoffrecycling – Fragen und Antworten.

http://www.swissrecycling.ch/fileadmin/rd/pdf/wertstoffe/kunststoff/20160513_FB_KST_d.pdf

Titech, 2009. Leistungsfähige Sortiersysteme in der Kunststofftrennung. Vortragsunterlagen HdK Dresden. http://www.hdk-dresden.de/dokumente/kunststoffrecycling_2009/09_Sortiersysteme.pdf. Besucht am 10.08.2017.

UMTEC und Carbotech, 2017. KuRve (Kunststoff Recycling und Verwertung). Ökonomisch-ökologische Analyse von Sammel- und Verwertungssystemen von Kunststoffen aus Haushalten in der Schweiz. Kurzbericht v3.2. https://kommunale-infrastruktur.ch/cmsfiles/kuurve_bericht_oeffentlich.pdf

UVEK und VBSA, 2014. Vertrag zwischen UVEK und VBSA betreffend der Reduktion der fossilen CO₂-Emissionen aus der Abfallverbrennung.

<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/36222.pdf>

VBSA, 2016. Monitoring-Bericht zur CO₂-Branchenvereinbarung für das Jahr 2015.

<http://vbsa.ch/wp-content/uploads/2016/11/Monitoringbericht-CO2-BV-2016-11-08-v2.pdf>

VBSA, n/a. Artikel „In Schweizer KVA verbrannte Menge“. <http://vbsa.ch/fakten/abfallverwertung/>

VKRS, 2017. Ergänzend Haushalt-Kunststoffe sammeln schon die Umwelt.

http://sammelsack.ch/images/MM_Umweltnutzen_Haushalt-Kunststoffe.pdf

WBCSD und Empa, 2016. Informal approaches towards a circular economy – learning from the plastics recycling sector in India. <https://sustainable-recycling.org/informal-approaches-towards-a-circular-economy-learning-from-india/>

ZAB, 2016. Geschäftsbericht 2016. https://www.zab.ch/files/documents/GB_2016_web.pdf

6.2 Gesetzestexte und Standarddokumente

Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, **USG**), 814.01,
<https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19830267/index.html>

CENELEC EN 50625 Serie. Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten.
https://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:938402346963601:::FSP_ORG_ID,FSP_PROJECT,FSP_LAN_ID:1258637,47528,25

Lebensmittel- und Gebrauchsgegenständeverordnung (**LGV**), 817.02,
<https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20143388/index.html>

Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:de:PDF>

Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle (Verpackungsrichtlinie).
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1994L0062:20090420:DE:PDF>

Verordnung des EDI über die Sicherheit von Spielzeug (Spielzeugverordnung, **VSS**), 817.023.11.
<https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20111581/index.html>

Verordnung des EDI über Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen (Bedarfsgegenständeverordnung, **BGSV**). 817.023.21.
<https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20143393/index.html>

Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, **VVEA**) vom 4. Dezember 2015 (Stand am 19. Juli 2016), 814.600.
<https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20141858/>

Verordnung über Getränkeverpackungen (**VGV**), 814.621,
<https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20001238/index.html>

6.3 Piktogramme



Veronika Krpčiarova, CC BY 3.0 US



Edward Boatman, CC BY 3.0 US



Jenie Tomboc, CC BY 3.0 US



Rflor, CC BY 3.0 US



Vladimir Belochkin, CC BY 3.0 US



Rihard Gromuls, CC BY 3.0 US



Alsia Anderson, Public Domain

www.thenounproject.com

Anhang

A I. Artikelanalyse

Zweck

Zweck der Artikelanalyse ist eine schnelle und vergleichbare Erhebung der Zusammensetzung einzelner KUH-Bags. Repräsentative Stichproben erlauben aus den einzelnen analysierten KUH-Bags die durchschnittliche Zusammensetzung der Sammelmateriale abzuschätzen. Die Erfassung der Zusammensetzung erfolgt in intuitiven Kategorien, um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten.

Anwendungsbereich

Die Artikelanalyse wurde für gemischte Kunststoffseparatsammlungen in Gebührensäcken entwickelt und ist auf das KUH-Bag System ausgerichtet. Mit ähnlichen Angeboten gesammeltes Material kann mit demselben Vorgehen beschrieben werden.

Benötigtes Material

- Sortiergefäße, Mindestens 1 pro separate zu sammelnde Kategorie. Beschriftet, mit Beispielfotos. 200L-Säcke sind praktisch.
- Verschiedenen Waagen für die Messung von Gewichten von 0.1 bis 20 kg.
- Handbesen, Handschuhe

Stichprobenauswahl

Zur Sammlung aussagekräftiger Daten muss eine repräsentative Stichprobe aus den zu untersuchenden Säcken (die Grundmenge) gezogen werden. Säcke verschiedener Herkunft (Region, Art der Sammlung, Abgabe unter Aufsicht...) können unterschiedliche Inhalte aufweisen. Während der Zusammenführung von Material verschiedener Sammelstellen ist zu erwarten, dass Säcke ähnlicher Herkunft tendenziell zusammenbleiben und somit Klumpen bilden. Während der Probenahme müssen solche Klumpen angemessen berücksichtigt werden. Dazu eignen sich systematische Auswahlmethoden: Die Grundmenge wird nach einem definierten System in Untergruppen aufgeteilt, wovon dann je gleichmäßig viele Säcke für die Analyse ausgewählt werden.

Beispiele

Art der Lagerung	Mögliche Stichprobenauswahl
... in Haufen	<i>Systematische Zufallswahl:</i> Aufteilung des Haufen in „Kuchenstücke“. Pro Stück XY Säcke zufällig auswählen <i>Systematische Rasterwahl:</i> Aufteilung des Haufen in „Kuchenstücke“. Alle Säcke in einem Kuchenstück. Jeder 10. Sack
.. in Paletten	<i>Systematische Rasterwahl:</i> Pro Palette jeweils der oberste Sacke vorne links Oberste Schicht abtragen <i>Systematische Zufallswahl:</i> Zufällige Auswahl von XY Säcken pro Palette aus der obersten Schicht.
.. in Containern	<i>Systematische Rasterwahl:</i> In jedem Container alle Säcke, welche die Linke Wand berühren <i>Systematische Zufallswahl:</i> Pro Container zufällig XY Säcke.

Stichprobengrösse

Die Grösse der Stichprobe bestimmt, wie genau die durchschnittliche Zusammensetzung der Grundmenge auf Artikelebene bestimmt werden kann. Modellierungen zeigen, dass mit einer Stichprobengrösse von 160 bis 200 Säcken eine relative Genauigkeit von $\pm 4\%$ für häufige Fraktionen (z.B. Folien, in fast jedem KUH-Bag) und $\pm 40\%$ für seltene Fraktionen (z.B. PET-Getränkeflaschen, nur in wenigen Säcken) erreicht werden, was für die Datenerhebung als ausreichend betrachtet wurde. Die Stichprobe wird in Chargen von 20 Säcken verarbeitet, um ein Mass für die Streuung der Zusammensetzung zu erhalten.

Ablauf der Artikelanalyse

- Auswahl zufälligen Auswahl von 20 Säcken für eine Charge.
- Säcke öffnen und ausleeren
- Einzelne Inhaltsstücke gemässe Kategorien (siehe unten) und Instruktion in den Sortiergefässen sortieren.
- Die Inhalte der Sortiergefässe wiegen. Leergewichte der Gefässe berücksichtigen.
- Die gewogenen Gewichte in das Probenformular eintragen.
- Besondere Inhalte mit einem Kommentar auf dem Formular vermerken.
- Die einzelnen Fraktionen entsprechend lokalen Anweisungen entsorgen.

Artikelkategorien

Kategorie	Ziel- artikel	Wert- stoff	Genauere Beschreibung
1a: Schalen und Behälter u.a. feste Kunststoffe, ohne 1b	Ja	Ja	Joghurtbecher und –behälter, Früchte- und Gemüseschalen, Kunststoffdosen für Waschmittel, Wäschekörbe, Kleiderbügel, Kisten, Töpfe, Zahnbürsten, Wäscheklammern etc.
1b: Schalen mit aufgeschweisster Folie	Ja	Ja	Tray für Käsescheiben, Grillfleisch und andere leicht verderbliche Produkte (v.a. aus PET-NGF)
2: Folien >A5	Ja	Ja	Verpackung mehrerer Flaschen (z.B. Sixpack), Frischsalate, Plastiksäcke, Kunststoffmappen etc.
3: Getränkekartons	Ja	Ja	n/a
4a: Hohlkörper und Flaschen, ohne 4b	Ja	Ja	Flaschen für Milchgetränke und Milch Flaschen für Öl, Essig und Fruchtsäfte (ohne PET-Recycling Symbol) Hohlkörper für Shampoo, Waschmittel etc.
4b: PET-Getränkeflaschen	Nein	Ja	n/a
5: Folien <A5, Netze, Kleinteile und Mischkunststoffe	Ja	Ja	Folien <A5: Süssigkeiten, Einzelverpackungen von Geschirrspüler-Tabs etc. Netze, z.B. von Orangen Mischkunststoffe und beschichtete Kunststoffe: Verpackungen von Käse, Chips, etc.
6: Fremdstoffe	Nein	Nein	Gummihaltige Abfälle (z.B. Veloreifen) PVC (z.B. aufblasbare Matratzen, Schwimmhilfen) und Spielzeuge Glasflaschen elektronische Geräte (z.B. Mobiltelefone, Velolampen) Andere Siedlungsabfälle (z.B. Videokassetten, Fensterdekoration, Textilien, Windeln)
7: Metall	Nein	Ja	Konservendosen, Aluminiumdosen, etc.

Detailsortierung

Einzelne Kategorien werden bei zusätzlichem Datenbedarf auf Materialebene in weitere Unterkategorien und bis auf Ebene Polymer bzw. bestimmter Zielmaterialien aufgelöst. Die Detailsortierung für diese Studie wurde folgendermassen vorgenommen:

Kategorie	Erste Nachsortierung	Zweite Nachsortierung
Kat 1a: Becher, Schalen & Behälter u.a. feste Kunststoffe ohne 1b.	Blumentöpfe, schwarze/ dunkle Kunststoffe aussortieren	Restliche Stücke nach Polymertyp sortieren
Kat 1b: Schalen mit aufgeschweisster Deckfolie	Alle Deckfolien entfernen so gut wie möglich	Aufteilung in transparente, gelbe, schwarze, andere Schalen
Kat 2: Folien >A5	Weiche, dehnbare (PE) von knisternden, nicht dehnbaren (PP, ggf. PET) unterscheiden	PE Folien in (farbig / stark bedruckt) und (transparent / kaum bedruckt) aufteilen
Kat 4a: Flaschen und Hohlkörper ohne PET-Getränkeflaschen	Milchflaschen weiss (HDPE)	Restliche Artikel nach Recyclingcode sortieren
Kat 3/4b/5/6/7	Nicht weiter sortieren	

A II. Nachweisformular Erstempfänger

Eingeholte Informationen

1. Prozessschema der Anlage.
2. Tabelle (unten), ausgefüllt für jede Fraktion. Falls möglich, Angaben für das verarbeitete Schweizer Material. Alternativ durchschnittliche Angaben. Bei nicht stofflich verwerteten Fraktionen nur relevante Felder ausfüllen.

Fraktionsname		Fraktion XY (W)	Fraktion ZQ (V)
Zusammensetzung der Fraktion			
Informationen zum Folgeempfänger	Land		
	Name		
	Hergestellte Fraktion & Anwendungsgebiet		n/a
	Beschreibung des Prozesses		
Ausbeute			n/a

3. Fotos der hergestellten Fraktionen

A III. Herleitung des technischen Recyclingpotenzials

Für die Berechnung wurden maximal erreichbare Rückgewinnungseffizienzen von 97.5% (Kunststoffe, Schätzung basierend auf Informationen von Verarbeitern), 76% (Getränkekartons, Carbotech, 2014b) und 80% (Metalle, eigene Schätzung) angenommen. Die tRQ der beiden Verarbeitungsansätze sind aus Tabelle 8 (Stufe 1: Sortierung. Stufe 2: Weiterführende Behandlungsstufen) und Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 8: Berechnung tRP für den artikelbasierten Ansatz

Artikelgruppe	Anteile	Transferkoeffizienten tRP Artikelbasiert			Anteile tRP
		Stufe (1)	Stufe (2)	Total (1)*(2)	
1a: Schalen und Behälter, feste Kunststoffe ohne 1b	27%	100%	82%	82%	22%
1b: Tiefziehschalen mit Folienabdeckung	8%	100%	75%	75%	6%
2: Folien	24%	100%	78%	78%	18%
3. Getränkekartons(*)	8%	100%	68%	68%	6%
4a: Weitere Hohlkörper und Flaschen, ohne 4b	16%	100%	78%	78%	12%
4b: PET-Getränkeflaschen	1%	100%	85%	85%	1%
5: Restkunststoffe und Mischkunststoffe	12%	0%	0%	0%	0%
6: Fremdstoffe (Gummi, PVC, Glas, Elektro, Abfall)	4%	0%	0%	0%	0%
7: Metall	1%	100%	80%	80%	0%
Summe	100%				tRP: 65%

Tabelle 9: Berechnung tRP für den materialbasierten Ansatz

Materialkategorie	Anteile	Transferkoeffizienten tRP Materialbasiert	Anteile tRP
Zellstoff(*)	5%	76%	4%
Zielkunststoffe	72%	97.5%	71%
NE	0%	80%	0%
FE	0%	80%	0%
Andere Materialien	23%	0%	0%
Summe	100%		tRP: 75%

*: Die Kategorien Getränkekarton (artikelbasiert) und Zellstoff (materialbasiert) sind nicht miteinander vergleichbar, da im materialbasierten Ansatz deren Anteile PE aus Getränkekartons (Deckel etc.) in der Fraktion „Zielkunststoffe“ wiederzufinden sind.

A IV. Zusammenfassende Ergebnisse der Ökobilanz

Einleitung

Die hier vorgestellten Resultate sind eine Zusammenfassung einer Bachelorarbeit der FHNW (Horst, 2017). Die Arbeit ist aufgrund darin enthaltener interner Daten nicht öffentlich zugänglich.

Die Bachelorarbeit wurde auf Basis der im Rahmen dieser Studie von der Empa erhobenen und aufbereiteten Daten durchgeführt und neben der Empa auch von einem Experten für Ökobilanzen (Thomas Kägi, Carbotech) sowie einem Dozenten der FHNW (Martin Streicher-Porte) mitbetreut.

In der Vergangenheit wurde bereits eine Vielzahl an Ökobilanzen zur Thematik separate Verwertung von Kunststoffen aus Haushalten durchgeführt, die alle zu einem ähnlichen Ergebnis kommen (Empa, 2000; Carbotech, 2014a; UMTEC und Carbotech, 2017). Diese basierten jedoch meist auf Abschätzungen, da bei deren Erstellung noch keine Informationen von realen Systemen existierten.

Entsprechend mussten die Aussagen früherer Ökobilanzen überprüft werden, da mit dem Monitoring des KUH-Bag Systems nun auch detaillierte Informationen zur Verfügung stehen. Im Rahmen dieser Überprüfung konnten nebenbei folgende zusätzliche Fragestellungen nach Bedarf der Begleitgruppe untersucht werden:

- Wie ist eine Bring/Holsammlung aus Sicht der Umweltauswirkungen zu bewerten?
- Berücksichtigen die in Ökobilanzen verwendeten Datensätze zur Verbrennung von Kunststoffen, dass die Verbrennung von Kunststoffen kaum zu deponierende Rückstände bildet?

Die Ökobilanz konnte aus Zeitgründen nicht für alle Recyclingketten durchgeführt werden und beschränkt sich auf die Untersuchung der Recyclingkette LVP+. Die Bachelorarbeit rechnet hierbei für LVP+ mit einer tRQ von 53%, die etwas höher liegt als in diesem Bericht beschreiben (49%, siehe 4.3.1). Dies liegt daran, dass die Ökobilanz abgeschlossen werden musste, bevor die Verluste der Recyclingkette LVP+ endgültig erfasst waren. In einer Sensitivitätsanalyse wurde die Auswirkung einer tRQ von 20-56% untersucht, womit auch der Umweltnutzen einer tRQ von 49% ersichtlich wird. Zusätzlich kann somit auch für die Recyclingkette LVPn eine Aussage zum Umweltnutzen gemacht werden.

Methode

Für die Bilanzierung werden die Umweltauswirkungen eines Kilogramm Abfalls mit der spezifischen Zusammensetzung des KUH-Bags betrachtet. Dieser Abfall wird entweder via Recyclingkette LVP+ oder Vergleichsszenario via Kehricht in der KVA entsorgt.

Die Ökobilanz wurde für die während der Untersuchung der Recyclingkette LVP+ geltenden Rahmenbedingungen erstellt, womit für die Behandlungsreste aus der Sortierung eine Verbrennung in der KVA Weinfeldern angenommen wurde (siehe 4.1). Wie aus früheren Ökobilanzen bekannt, würde eine Verwertung dieser Reste im Zementwerk zu höheren Gutschriften führen.

Als Systemgrenze für die Ökobilanz wurden folgende Prozesse und Dienstleistungen sowie deren ökologische Auswirkungen auf Luft, Boden, Wasser und deren Ressourcenverbrauch in stofflicher und energetischer Hinsicht berücksichtigt: Sammlung, inklusive Infrastruktur und Treibstoff, Sortierung der Kunststoffabfälle, Aufbereiten und/oder die Entsorgung der Kunststoffabfälle.

Soweit vorhanden wurden auf Informationen der Empa bzw. der Verarbeitungsbetriebe der Recyclingkette LVP+ zurückgegriffen. Für zusätzliche Daten wurde soweit möglich auf lokale Daten zurückgegriffen. Dies betrifft insbesondere die Wirkungsgrade der betroffenen KVA sowie die Zusammensetzung des Strommixes. Für Ökoinventare wurden aus der Ecoinvent-Datenbank möglichst aktuelle Angaben verwendet.

Die Beurteilung der Umweltauswirkung wurde mit der Bilanzierungsmethode der ökologischen Knappheit 2013 (UBP 2013) durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Bewertungsverfahren, bei welchem die verschiedenen Auswirkungen zu einem Gesamtwert zusammengefasst werden. Zusätzlich wurden weitere gesamt-aggregierende Bilanzierungsmethoden sowie singuläre Bewertungsmodelle verwendet, von der jedoch nur die Emissionen an klimarelevanten Gasen (CO₂-eq nach Methode IPCC 2013 100a) hier ausgewiesen wird.

Resultate und Diskussion

Die Recyclingkette LVP+ ist eine grundsätzlich ökologischere Entsorgungsvariante im Vergleich zu einer gemischten Entsorgung im Kehricht (Abbildung 12). Nach Methode der ökologischen Knappheit (UBP) liegen die Umweltauswirkungen rund 46%, aus Sicht der CO₂-Emissionen rund 50% tiefer.

Eine detaillierte Betrachtung zeigt, dass der erreichte Nettonutzen zu rund 70% aus der Vermeidung von Emissionen aus der KVA stammt. *Die für die Berechnung verwendeten Datensätze berücksichtigen bereits, dass Kunststoffe beinahe rückstandsfrei verbrennen.* Rund 30% des Nettonutzens entsteht durch den Ersatz von primären Kunststoffen mit Regranulaten. Entsprechend beeinflusst die Wahl des Substitutionsgrades von Regranulaten die Resultate von Ökobilanzen kaum (siehe 2.3). Aus rein ökologischer Sicht ist es somit wichtiger, möglichst viele Kunststoffe vor der thermischen Verwertung zu „retten“, als daraus hochqualitative Rezyklate zu generieren.

Während kein direkter Vergleich mit der Vorstudie (Carbotech 2014a) durchgeführt wurde, so zeigen die ähnlichen Resultate, dass die Resultate der Vorstudie durchaus plausibel waren. Mit den verschiedenen Recyclingketten während dem Pilotversuch und den sich ändernden Rahmenbedingungen be-

stehen aber durchaus noch Möglichkeiten, die wie der ökologische Gesamtnutzen des KUH-Bag Systems weiter verbessert werden kann (siehe 5.2).

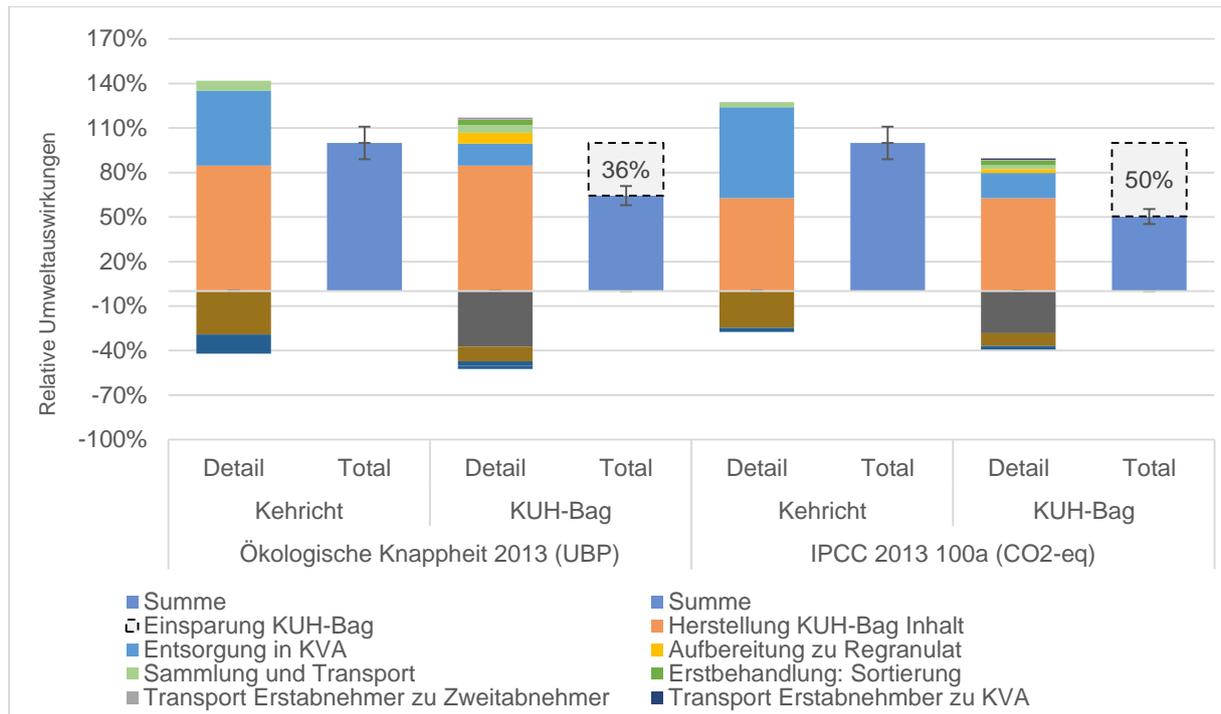


Abbildung 12: Vergleich der Ökobilanz Recyclingkette LVP+ und KVA

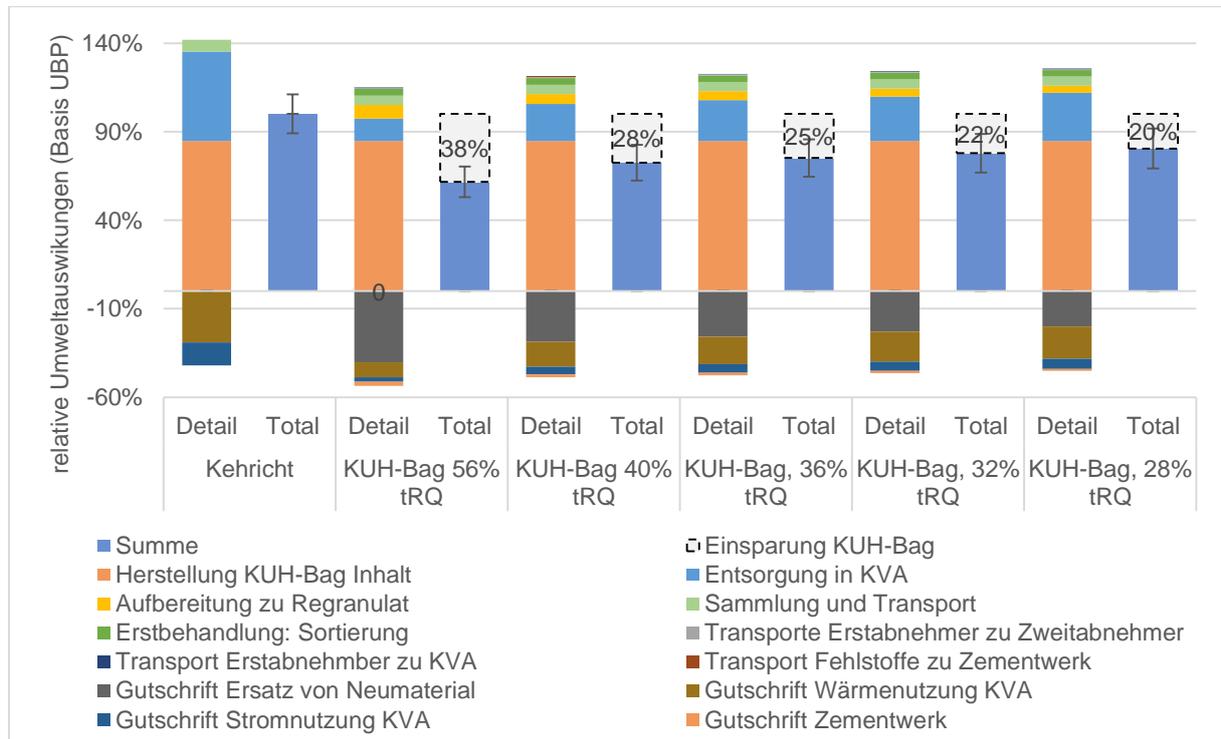


Abbildung 13: Einfluss verschiedener tRQ auf die Umweltauswirkungen

Die in der Recyclingkette LVP+ tatsächlich erreichte tRQ von 49% führt nur zu kleinen Änderungen in der Umweltauswirkung und die obigen Aussagen ändern sich nicht (Abbildung 13). Unter der Annahme, dass Sortierreste in die KVA rückgeführt werden, der KUH-Bag bis zu einer tRQ von 40% die ökologischere Variante. Liegt die tRQ unter 40 % kann der KUH-Bag nur noch als die tendenziell ökologischere

Entsorgungsvariante bezeichnet werden. Eine Verarbeitung nach LVPn liegt ungefähr auf dieser Grenze. Um die Umweltauswirkungen der verschiedenen Sammelsysteme zu untersuchen, wurden verschiedene Modellrechnungen für die Bringsammlung gemacht, da diese bis jetzt den dominanten Rücknahmekanal darstellt (Abbildung 14). Diese zeigen, dass ein dichtes Netz an Sammelstellen sehr wichtig ist, um den Umweltnutzen einer gemischten Kunststoffsammlung garantieren zu können (siehe 5.2.1).

- Wird ein 35L KUH-Bag *alleine* für 2.5km (Durchschnitt CH: Distanz Haus <-> kommunale Sammelstelle) mit einem durchschnittlichen Fahrzeug transportiert, so bringt das KUH-Bag System keinen ökologischer Vorteil mehr. Bei einem 60L KUH-Bag ist der ökologische Gesamtnutzen ungefähr halbiert.
- Im Durchschnitt wird bei einer Anfahrt an eine Sammelstelle jeweils 12kg anderer Abfall entsorgt. Wird anfahrtsbedingte Umweltschaden auf alle Abfälle verteilt, so ist der Privattransport praktisch unbedeutend.

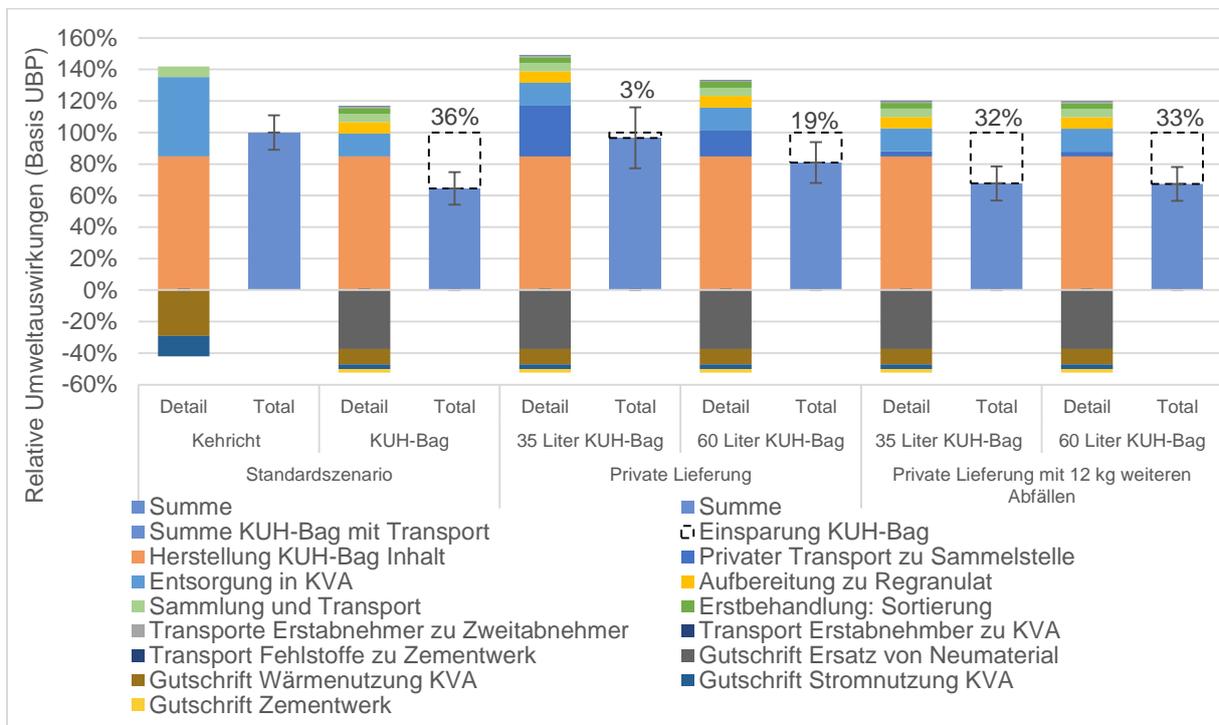


Abbildung 14: Umweltauswirkungen einer privaten Lieferung (Bringsystem)

