

## BEWILLIGUNGSEMPFÄNGER



Abschlussbericht zur Projektphase 1:

### ***Hightech-Trenn- und Aufbereitungsverfahren zum PE- & PP- Recycling bisher nicht verwertbarer, minderwertiger Post- Consumer Abfälle zur Substitution von Primärgranulat***

***(Kurztitel: „POmixed Recycling“)***

Phase 1: Primärgranulatsubstitution durch Abtrennung und Aufbereitung des höchstwertigen Teiles eines qualitativ minderwertigen POMixed-Materialeingangsstromes

Art des Berichtes:

Abschlussbericht zum Vorhaben mit dem Aktenzeichen 33239/01-21/2

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

Verfasser: J. Dräger

Teningen im Februar 2017

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>33239/01-21/2</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>120.000 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Hightech-Trenn- und Aufbereitungsverfahren zum PE- &amp; PP-Recycling bisher nicht verwertbarer, minderwertiger Post-Consumer Abfälle zur Substitution von Primärgranulat</b>			
<b>Stichworte</b>		Recycling, Sortierung, Polyolefine, rußgeschwärzt, kommunale Hartkunststoffe			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
<b>9 Monate</b>		<b>11.03.2016</b>		<b>10.12.2016</b>	
Zwischenberichte		halbjährlich			
<b>Bewilligungsempfänger</b>		OPG Holding GmbH Carl-Zeiss-Str. 4 79331 Teningen		Tel 0 7641 589-822 Fax 0 7641 589-55822	
				Projektleitung Herr Jörg Dräger	
				Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>		Graf Plastics GmbH Carl-Zeiss-Str. 4 79331 Teningen			
<b>Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens</b>					
<p>Die Weltwirtschaft verzeichnet eine stetig steigende Nachfrage nach Kunststoffen. Einerseits lässt sich im Bereich der Polyolefine (Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)) durch hochwertiges werkstoffliches Recycling eine Energieeinsparung von ca. 2000 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Tonne Recyclinggranulat erreichen, andererseits steht die kunststoffverarbeitende Industrie auch einer zunehmenden Ressourcenknappheit, sowohl im Bereich der Primärware, als auch im Bereich qualitativ hochwertiger, verhältnismäßig einfach recycelbarer Altkunststofffraktionen gegenüber. Den limitierenden Faktor zur notwendigen Erhöhung des Anteils hochwertigen werkstofflichen Recyclings an der Wiederverwertung stellt derzeit die Qualität der zur Verfügung stehenden Materialströme dar; dies betrifft insbesondere Sortenreinheit, Färbung und Verschmutzungsgrad. Vor diesem Hintergrund ist es innovatives Ziel des vorliegenden Projektes eine Prozesskette zur hochwertigen werkstofflichen Verwertung eines bisher deponierten Materialstromes mit hohem Polyolefinanteil aus dem Bereich „Kommunale Hartkunststoffe“ zu entwickeln, die es erlaubt auch den rußgeschwärzten Anteil dieses Materialstromes sortenrein zu sortieren. Gleichzeitig werden sich Entwicklungsarbeiten mit der Adaption und zielgerichteten Modifikation zur Qualitätserhöhung des ausgewählten Materialstroms befassen. So kann der Anteil der hochwertigen werkstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen dauerhaft gesteigert werden.</p>					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<p>Der verfolgte Lösungsansatz beruht auf der wechselseitigen Adaption der Prozesskette (Vorsortierung, Reinigung, neuartige MIR-Sortiertechnik für schwarze Kunststoffe, aufbereitende Compoundiertechnik) und des neuartigen Materialeingangsstroms. Dies beinhaltet die Senkung des Störstoffanteils sowie eine Stabilisierung der Zusammensetzung des Materialeingangsstroms, die Etablierung von 4 Qualitätsstufen nach der Sortierung sowie die Demonstration einer Aufbereitung der höchsten Qualitätsstufe zu einem sortenreinen Rezyklat mit den Eigenschaften von Primärware. Ein hochwertiges werkstoffliches Recycling des vorgesehenen Materialstroms minderer Qualität ist in der geplanten Form völlig neu und technisch entsprechend herausfordernd in seiner Realisierung.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Das Projektziel, einen neuen Materialeingangsstrom aus Polyolefinen (PO), die aus kommunalen Hartkunststoffsammlungen stammen, in seine Hauptbestandteile PE, PP, Buntanteil, Schwarzanteil zu separieren, wurde erreicht, indem in der Trennlinie eine NIR-Trennanlage die Buntanteile in PE und PP auf trennt und der verbleibende Schwarzanteil danach einer MIR-Trennanlage zugeführt wird. Jedoch wurden im Projektverlauf zusätzlich auftretende Nebenströme ermittelt (z. B. Unterkornanteil).

Darüber hinaus zeigte sich, dass die Zusammensetzung kommunaler Hartkunststoffsammlungen starken Schwankungen unterliegt, denen durch eine robuste Prozessführung zu begegnen ist. Ebenfalls stellt die Korngrößenverteilung und Kornbeschaffenheit des zerkleinerten PO-Wertstoffstromes eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche und effektive Verarbeitung zum Regranulat dar.

Das Projektziel den qualitativ hochwertigsten Teilstrom (PP bunt) mittels einer im Projekt zu entwickelnden Additivierung und Prozessierung zu einem Regranulat mit den vollwertigen Eigenschaften von Kunststoffneuware zu verarbeiten wurde ebenfalls erreicht.

Jedoch wurde auch ein unerwartetes und in der Zukunft dringend zu bearbeitendes Problem identifiziert. Dieses besteht in der Kontamination der PE-Teilströme mit quervernetzten PE-Bestandteilen (PE<sub>x</sub>). Diese PE<sub>x</sub>-Bestandteile sind mit derzeit marktverfügbarer NIR-Trenntechnologie nicht erkennbar, lassen sich dementsprechend nicht separieren und verschlechtern die Materialgüte des PE<sub>x</sub>-kontaminierten PE drastisch. Im Projektverlauf wurden technische Lösungsansätze zur Überwindung dieser Problematik erarbeitet, die ggf. in einem Folgeprojekt umgesetzt werden sollen.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Mit der Öffentlichkeitsarbeit wurde bereits dahingehend begonnen, dass auf Basis der Projektergebnisse intensive Gespräche mit möglichen Materialzulieferern aus dem Kommunalbereich geführt werden. Die Projektergebnisse begünstigen diese Gespräche dahingehend, dass auf deren Basis Merkkarten und Handlungsanweisungen zum Mitarbeitertraining in kommunalen Sammelstellen von der Unternehmensgruppe GRAF erstellt wurden und die Präsentation von Teilen der Projektergebnisse dabei hilft, die Vorverarbeitung der Materialströme (z. B. Zerkleinerung) zu optimieren.

### ***Fazit***

Das im Projektantrag formulierte Ziel einen Materialeingangsstrom aus Polyolefinen mit hohem Schwarzanteil in mindestens vier Teilströme (PP bunt, PP schwarz, PE bunt, PE schwarz) zu separieren und mittels einer industriell einsetzbaren Prozesskette den hochwertigsten Teilstrom PP-bunt zu einem Regranulat mit Materialeigenschaften auf Neuwareniveau zu verarbeiten wurde prinzipiell voll erreicht.

Neben den erfolgreich durchgeführten Entwicklungsarbeiten zur Adaptierung der Materialströme und der Anlagentechnik untereinander wurde jedoch für den Bereich PE ein bedeutendes Problem identifiziert: Die Kontamination mit quervernetzten PE-Anteilen führt zu einer drastischen Abwertung der Regranulateigenschaften. Zur Lösung dieses Problems wurden im Projekt bereits Lösungsansätze erarbeitet, die in der Zukunft, ggf. in einem Nachfolgeprojekt umgesetzt werden sollen. Die vorliegende Problematik behindert die wirtschaftliche Verwertung des Gesamtmaterialstroms derzeit noch erheblich.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>PROJEKTKENNBLETT .....</b>	<b>1</b>
<b>VERZEICHNIS VON BILDERN, ZEICHNUNGEN, GRAFIKEN UND TABELLEN ....</b>	<b>4</b>
<b>1. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>6</b>
<b>2. EINLEITUNG .....</b>	<b>7</b>
<b>3. ENTWICKLUNGSARBEITEN UND ERREICHTE ERGEBNISSE .....</b>	<b>11</b>
<b>FAZIT .....</b>	<b>30</b>
<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>31</b>

## Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

### Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: China – Importe von Altkunststoffen, Januar – April 2015, Quelle: China Entry-Exit Inspection and Quarantine Association Reused and Recycling Branch (CIQAR) .....	7
Abbildung 2: China – Importe von Altkunststoffen, 2012 – 2015, Quelle: China Entry-Exit Inspection and Quarantine Association Reused and Recycling Branch (CIQAR).....	7
Abbildung 3: Fotografien eines Materialeingangs aus kommunalen Sammlungen von Hartkunststoffen mit hohem Störstoffanteil. ....	12
Abbildung 4: Fotografie des Materialeingangs aus kommunalen Sammlungen in vermahlener Form, starke Verschmutzung sichtbar. ....	13
Abbildung 5: Sortiervorschrift für die Kunststoffvorsortierung im Kommunalbereich.....	13
Abbildung 6: Erreichbarer Materialdurchsatz eines Schredders (Lindner Meteor 1750) bei Einsatz von Siebkörben mit 25 und 30 mm Maschenweite .....	14
Abbildung 7: Gemessene Bestandteile der Unterkornfraktion .....	15
Abbildung 8: Erreichter Materialdurchsatz in den Sortierern (RTT Steinert UniSort Modell P750 NIR und UniSort Modell B750 Blackscanner) mit Flocken, die eine zerklüftete Außenkontur und eine scharf umrissene Außenkontur aufweisen. ....	16
Abbildung 9: Einfluss der vorgeschalteten Materialtrocknung auf die Reinigungsintervalle der Sortieranlagen (RTT Steinert UniSort Modell P750 NIR und UniSort Modell B750 Blackscanner).....	18
Abbildung 10: Screenshots der Betriebssoftware der Sortieranlage im Sortierbetrieb von stark verstaubtem Trenngut (links) und entstaubtem Trenngut (rechts); die detektierten Schwarzanteile sind von der Software in Weiss dargestellt. ....	19
Abbildung 11: Fotografie von verbrannten Störstoffpartikeln im Materialstrom nach Durchlauf der MIR-Sortierung für den Schwarzanteil. ....	19
Abbildung 12: Unregelmäßige Bandbelegung bei pneumatischer Aktuation des Schiebers am Bunker (oben), konstantere und höhere Bandbelegung bei elektrischer Aktuation des Schiebers am Bunker (unten). 20	
Abbildung 13: Materialdurchsatz der Sortieranlage bei pneumatischer und elektrischer Aktuation des Schiebers am Bunker. ....	20
Abbildung 14: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms PP (bunt/hell) .....	21
Abbildung 15: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms PE (bunt/hell) .....	21
Abbildung 16: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms PP (schwarz).....	22
Abbildung 17: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms PE (schwarz).....	22
Abbildung 18: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms Unterkornanteil.....	22
Abbildung 19: Extruderdurchsatz bei der Compoundierung von Mahlgut mit Flockengrößen kleiner 15 x 15 mm und Flockengrößen größer 15 x 15 mm .....	24
Abbildung 20: Leistungscharakteristika (Durchsatzleistung und Filterstandzeit bis zum Wechsel) der eingesetzten Filtersysteme mit Einsatz einer zusätzlichen Schmelzepumpe .....	26
Abbildung 21: Vorläufiges Datenblatt für das aus dem Teilstrom PP-bunt hergestellte Regranulat. 27	

---

Abbildung 22: Fotografie (in mikroskopischer Auflösung) der Oberfläche eines mittels Blasverfahren gefertigten Bauteils aus PE (mit PEx kontaminiert)..... 28

**Tabellenverzeichnis:**

Tabelle 1: Verwertete Kunststoffabfälle (Post-Consumer- und Produktionsabfälle), Deutschland 2007, Quelle: Studie Umwelt Bundesamt „Beitrag der Abfallwirtschaft zur Ressourcenproduktivität“ (Forschungskennzahl 3709 33 316)	9
Tabelle 2: Vorgenommene Zielspezifikationen	11
Tabelle 3: Durchschnittliche Stoffanteile an Materialeingangsströmen aus dem Bereich kommunaler Hartkunststoffsammlungen	17

## 1. Zusammenfassung

Den wesentlichen innovativen Ansatz des hier vorliegenden Projekts stellte die Trennung und Aufbereitung bisher nicht verwertbarer, qualitativ minderwertiger Polyolefin-Kunststoffabfälle (POMixed Gemenge) mit hohem Schwarzanteil zu sortenrein vorliegenden Kunststoffen (Störstoffanteil < 5 %) als Primärgranulatersatz für PE und PP dar. Durch das im Projekt realisierte Trenn- und Aufbereitungsverfahren können bisher dem Recycling zu Primärgranulatersatz nicht zuführbare POMixed-Gemenge aus dem Bereich kommunaler Hartkunststoffabfälle einer hochwertigen, werkstofflichen Verwertung zugeführt werden und somit erstmals zur Substitution von Primärkunststoffen genutzt werden.

Der verfolgte Lösungsansatz bestand in der dezidierten Adaption und Weiterentwicklung des in einer vor Projektbeginn durchgeführten Machbarkeitsstudie identifizierten Trennverfahrens auf Basis mittlerer Infrarotstrahlung für schwarze POMixed-Gemenge auf die neuen Materialeingangsströme sowie die wechselseitige Adaption der neuen Materialeingangsströme selbst auf das neue Trenn- und insbesondere Aufbereitungsverfahren. Dazu waren die folgenden Lösungsschritte erforderlich:

1. Zunächst musste der Störstoffanteil des minderwertigen Ausgangsmaterials gesenkt werden (von zu Projektbeginn ca. 30 bis 40 % auf heute konstant unter 15 %). Dazu wurde beim Zulieferer eine auf unsere Bedürfnisse angepasste Vorprozessierung (Vorsortierung, Zerkleinerung und Reinigung) etabliert. Dies ermöglichte die Erreichung einer Partikelgrößenverteilung und -beschaffenheit, welche die nachfolgende Prozessierung mittels industriell einsetzbarer Anlagentechnik erlaubte. Parallel dazu wurde die MIR-Trenntechnologie für schwarze Kunststoffe auf den Materialeingangsstrom adaptiert.
2. Durch die realisierte Trenntechnologie gelang es, den vorprozessierten Materialstrom in zunächst vier Qualitätsstufen aufzutrennen. Diese umfassten die Teilströme PP-bunt, PP-schwarz, PE-bunt und PE-schwarz. In der vorliegenden Projektphase 1 wurde ein Aufbereitungsverfahren zur Nutzung des Materialstroms der höchsten Qualitätsstufe (PP-bunt) als Neuwareersatz entwickelt und demonstriert. Diese Prozesskette umfasste die Compoundierung unter Zusatz von Additiven. Mittels der Möglichkeiten der reaktiven Compoundierung erfolgte das gezielte Einbringen der Additive als Stabilisatoren oder Füllstoffe. Auf diese Weise wurde das Rezyklat hinsichtlich seiner Viskosität und Materialeigenschaften (Viskosität, UV-Beständigkeit, Verwitterungsbeständigkeit, Festigkeit etc.) so eingestellt, dass es als vollwertiger Primärgranulatersatz fungiert.

## 2. Einleitung

Eine Betrachtung der jüngeren Lage am Markt zeigt, dass in den letzten Jahren ein beträchtlicher Markt für Recycling und Rezyklate entstanden ist. Importe von Altkunststoffen (insbesondere Polyethylene, siehe Abbildung 1) steigen in China kontinuierlich an. Von rund 14,9 Mio. t im Jahr 2012 stiegen die Einfuhren auf 17,2 Mio. t nur in den ersten vier Monaten des Jahres 2015. Die zu erwartende Verdrei- bis Vervielfachung ist durch die offiziellen chinesischen Zahlen (siehe Abbildung 2) belegt. Bereits mehr als 17 Mio. t wurden im ersten Drittel des Jahres 2015 eingeführt.

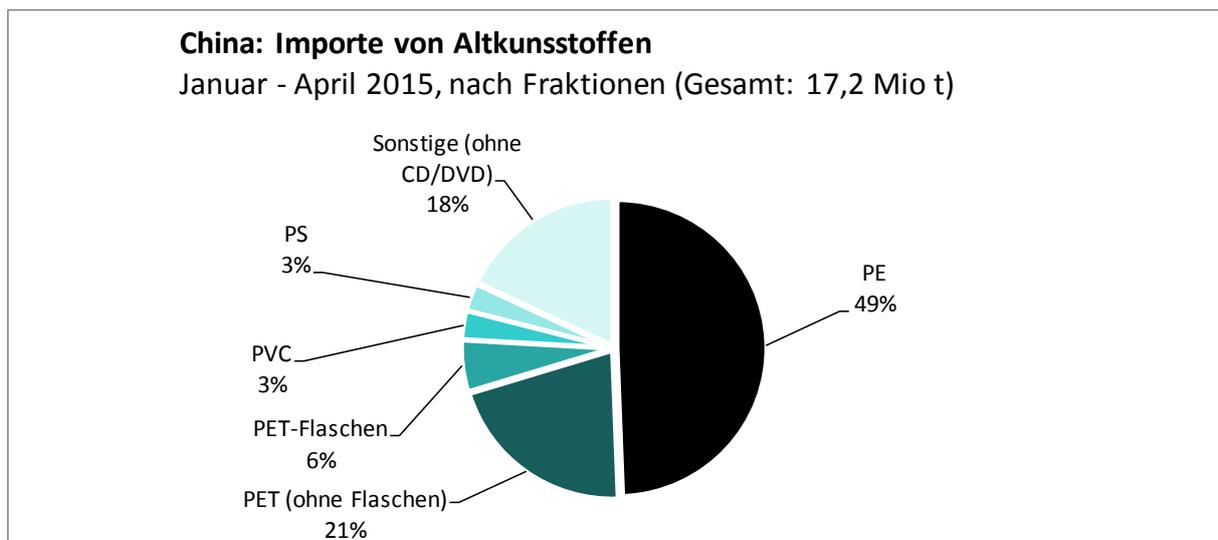


Abbildung 1: China – Importe von Altkunststoffen, Januar – April 2015, Quelle: China Entry-Exit Inspection and Quarantine Association Reused and Recycling Branch (CIQAR)

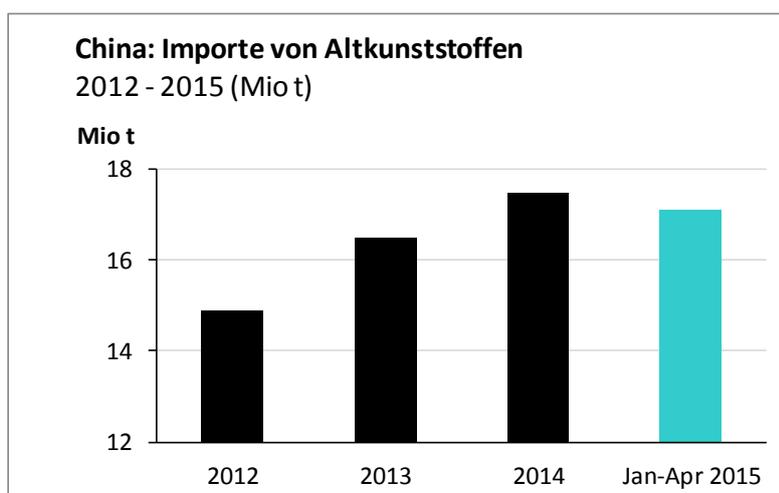


Abbildung 2: China – Importe von Altkunststoffen, 2012 – 2015, Quelle: China Entry-Exit Inspection and Quarantine Association Reused and Recycling Branch (CIQAR)

Eine detaillierte Betrachtung der Importe von Altkunststoffen ergibt, dass vor allem hohe Qualitäten der Post-Consumer Abfälle von China importiert werden. Im Jahr 2013 führte Beijing zur Qualitätssicherung der Abfall-Einfuhren die sog. „Green Fence“ Politik ein. Die Post-Consumer-Abfälle werden vorsortiert nach Grad der Verschmutzung, Größe der Stücke, Art der enthaltenen Polymertypen und enthaltene Farben. Daraus ergeben sich die unterschiedlichen Qualitätsstufen. Für niedrige Qualitäten hat die chinesische Kunststoffrecycling-Industrie keinen Bedarf, da diese für ein werkstoffliches Recycling derzeit nicht infrage kommen. Diese Verknappung hochwertiger, einem werkstofflichen Recycling zugänglicher Altkunststoffe ist von zunehmender Kritikalität für die gesamte europäische kunststoffverarbeitende Industrie. Durch die Kombination dieser Verknappung mit Lieferengpässen von Primärgranulatherstellern mussten bereits ganze Produktionslinien aus Rohstoffmangel zeitweise angehalten werden.

Post-Consumer Abfälle minderwertiger Qualitäten verbleiben in Deutschland und Europa und stehen dort zu niedrigen Preisen zur Verfügung. Das Potenzial für Recycling ist zwar riesig, die in Europa verbleibenden Post-Consumer Kunststoffabfälle können bisher jedoch häufig aufgrund mangelnder Sortenreinheit und zu hoher Verschmutzung nicht dem umweltschonenden, wirtschaftlich sinnvollen und zunehmend notwendigen Upcycling zugeführt werden. Ebenfalls stellen rußgeschwärmte Polyolefine eine starke Problematik dar, die als sogenanntes „Carbon-black-Problem“ seit Jahrzehnten besteht und bislang ungelöst war. Die Problematik besteht darin, dass die im Kunststoff enthaltenen Kohlenstoffe nahinfrarotbasierte Sortiersensoren stören, sodass eine Materialzuordnung nicht möglich ist und daher rußgeschwärmte Kunststoffe mittels etablierten NIR-Trennverfahren nicht sortenrein sortiert werden konnten. Den limitierenden Faktor bezüglich des Upcyclings stellt nach wie vor die Qualität des Ausgangsmaterials dar. Kunststoffabfälle fallen als Gemische verschiedener, teils stark verunreinigter Kunststoffarten an. Daher definiert sich die Qualität der Kunststoffabfälle (Flaschen, Becher, Folien etc.) sehr stark darüber, wie gut es gelingt, diese in sortenreine Kunststoffarten für die Weiterverarbeitung zu trennen, sodass nur wenige Abfälle in einer Mischkunststoff (MKS)-Fraktion verbleiben. Umso höher der durch die Trennverfahren erzielbare Reinheitsgrad ist, umso höherwertiger können die aus der Aufbereitung erzeugten Granulate wieder in Herstellungsprozessen zur Substitution von Primärgranulaten eingesetzt werden.

Für die Weiterverarbeitung bis hin zur Granulierung ist es außerdem von entscheidender Bedeutung, wie groß der Störstoffanteil bezüglich öligem, wässrigem und partikelbasierter Verschmutzung ist. Gelingt es durch die zwischengeschalteten Reinigungs- und Aufbereitungsverfahren nicht, diesen Störstoffanteil zu minimieren, kann keine hochwertige, werkstoffliche Verwertung stattfinden. Derzeit erfüllen Gemenge sogenannter Hartkunststoffe aus kommunalen Sammelstellen die vorgegebenen Kriterien für die werkstoffliche Verwertung größtenteils nicht.

Weiterhin kann aktuell zwar davon ausgegangen werden, dass nahezu die gesamten Kunststoffabfälle, die in Deutschland anfallen, verwertet werden. Jedoch ist der Anteil der hochwertigen, werkstofflichen Verwertung mit nur ca. 17 % (siehe Tabelle 1) sehr gering, obwohl sich nur durch diese Verwertungsform das maximale ökologische Potenzial des Kunststoffrecyclings entfaltet.

Tabelle 1: Verwertete Kunststoffabfälle (Post-Consumer- und Produktionsabfälle), Deutschland 2007, Quelle: Studie Umwelt Bundesamt „Beitrag der Abfallwirtschaft zur Ressourcenproduktivität“ (Forschungskennzahl 3709 33 316)

Verwertung	HDPE [Mg]	LDPE [Mg]	PET [Mg]
<i>werkstofflich, hochwertige Verwertung</i>	63.748 <b>17%</b>	105.282 <b>13%</b>	60.491 <b>19%</b>
<i>werkstofflich, Verwertung Mischkunststoff</i>	19.868 <b>5%</b>	39.689 <b>5%</b>	60.567 <b>19%</b>
<i>rohstofflich</i>	13.546 <b>4%</b>	26.988 <b>3%</b>	11.042 <b>3%</b>
<i>energetisch in der MVA</i>	232.234 <b>61%</b>	516.504 <b>64%</b>	152.331 <b>48%</b>
<i>energetisch im EBS-Kraftwerk</i>	33.986 <b>9%</b>	75.586 <b>9%</b>	22.292 <b>7%</b>
<i>energetisch im Zementwerk</i>	16.993 <b>4%</b>	37.793 <b>5%</b>	11.146 <b>4%</b>

Das hier beschriebene, geplante FuE-Vorhaben basiert auf eigenen Vorarbeiten sowie Vorarbeiten mit unserem externen Entwicklungspartner hinsichtlich:

1. Identifikation für ein werkstoffliches Recycling infrage kommender „neuer“ Wertstoffströme.
2. Kooperation mit unserem externen Entwicklungspartner zur weltweit erstmaligen Trennung rußgeschwärzter PP- und PE-Kunststoffe im mittleren Maßstab auf Basis einer prototypischen Sortiertechnik, die im mittleren infraroten Wellenlängenbereich (MIR) arbeitet.

Zur Identifikation potenziell geeigneter Wertstoffströme hat die OPG Holding im Zuge der Vorstudie umfangreiche Evaluationen im Bereich von Mischkunststofffraktionen aus dem Post-Consumer-Bereich durchgeführt. Die getätigten Untersuchungen fokussierten sich auf derzeit unerschlossene, großvolumige Märkte aus dem Bereich Post-Consumer-Mischkunststoffe und umfassten Analysen der morphologischen, farblichen und stofflichen Zusammensetzung sowie des Verunreinigungsgrades. Sie zeigten eine zunächst nicht tolerierbare Schwankungsbreite der Inhalte hinsichtlich der Zusammensetzung mit einem hohen Folienanteil. Durch Trainingsmaßnahmen konnte eine Inputselektion erreicht werden, durch die der Folienanteil reduziert und der Hartkunststoffanteil deutlich erhöht wurde. Insbesondere wurde ermittelt, dass im

Mittel ca. 30 % schwarz gefärbter Kunststoffe darin enthalten waren; dies jedoch mit immensen Schwankungen mit bis zu 60 % innerhalb einzelner Chargen. Die dauerhaft vorhandenen rußgeschwärzten Anteile erfordern für die wirtschaftliche Umsetzung der zu entwickelnden Verfahrens- bzw. Prozesskette zur Herstellung hochwertiger Rezyklate als Primärgranulateratz aus derzeit dafür ungeeigneten, nicht erschlossenen Stoffströmen zwangsläufig die Entwicklung eines oder mehrerer Prozessschritte zur definierten Sortierung der rußgeschwärzten Polyolefine in PP- und PE-Anteile.

Das hier beschriebene Projekt hat das Upcycling bisher nicht verwertbarer, minderwertiger Post-Consumer Abfälle, zunächst kommunaler Sammelstellen aus dem europäischen Ausland, die derzeit einer Deponierung zugeführt werden, ermöglicht. Die Materialstrominhalte umfassten Hartkunststoffabfälle aus dem häuslichen und gewerblichen Bereich. Dieser Materialstrom hatte an der Anfallstelle zu Projektbeginn die folgende Beschaffenheit:

- Stoffinhalte: Max. 50 % Polyolefine (PP und PE); ca. 10 % Nichtkunststoffanteil (organische, mineralisch); Rest andere Hartkunststoffe (z. B. PVC, PMMA, PC etc.)
- 40 % Stoffstrominhalte umfassten teils stark verschmutzte, kritische Abfälle (Chemikalienbehälter aus Landwirtschaft, Kanister, Farbeimer, Bauzubehör, Gartenzubehör, Autoreifen, Renovierungsabfälle)
- Polyolefinanteil lag auch nach Vorprozessierung derzeit teilweise stark verschmutzt vor (Öle, Chemikalien, organische und mineralische Feststoffe)

Das mittels der im vorliegenden Projekt entwickelten Prozesskette hergestellte Rezyklat ist zur Substitution von Primärgranulat geeignet. Durch unsere Entwicklung und Demonstration kann der Anteil der hochwertigen, werkstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland signifikant gesteigert werden.

### 3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

#### 3.1. AP 1 - Definitionsphase:

Zu Beginn von Arbeitspaket 1 erfolgte eine grundlegende Spezifikation der zu erreichenden Anforderungen an den im Projekt zu erreichenden Materialausgangsstrom. Die spezifizierten Anforderungen betreffen die zu erreichende Trenngüte für den Materialeingangsstrom, dessen Aufteilung in verschiedene Teilströme sowie die Eigenschaften des zum Primärgranulatersatz veredelten Polymermaterials. Die vorgenommenen Spezifikationen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Vorgenommene Zielspezifikationen

Zu spezifizierende Größe	Vorgenommene Spezifikation																																												
<b>Separationsgüte</b>	PP Reinheit 95 %																																												
<b>Aufteilung in Teilströme</b>	Mindestens zu erreichen: - Aufteilung PP, PE - Aufteilung bunt/hell, schwarz																																												
<b>Eigenschaften des Primärgranulatersatzes</b>	PP bunt/hell: <table border="1" data-bbox="641 1151 1385 1545"> <thead> <tr> <th></th> <th>Prüfmethode</th> <th>Einheit</th> <th>Wert</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Schmelzindex (MFR) bei 230 °C / 2,16 kg</td> <td>ISO 1133</td> <td>g/10 min</td> <td>6 - 10</td> </tr> <tr> <td>Dichte</td> <td>ISO 1183</td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>&gt; 1,01</td> </tr> <tr> <td>E-Modul (Zug)</td> <td>ISO 527</td> <td>MPa</td> <td>&gt; 1650</td> </tr> <tr> <td>Zugfestigkeit</td> <td>ISO 527</td> <td>MPa</td> <td>&gt; 23</td> </tr> <tr> <td>Zugdehnung</td> <td>ISO 527</td> <td>%</td> <td>&gt; 4,5</td> </tr> <tr> <td>Charpy Schlagzähigkeit gekerbt bei +23°C</td> <td>ISO 179</td> <td>kJ/m<sup>2</sup></td> <td>&gt; 3</td> </tr> <tr> <td>Restfeuchte</td> <td>DIN 53723</td> <td>%</td> <td>&lt; 0,1</td> </tr> <tr> <td>Glührückstand</td> <td>ISO 3451</td> <td>%</td> <td>&gt; 15 %</td> </tr> <tr> <td>Schüttdichte</td> <td>ISO 60</td> <td>g/l</td> <td></td> </tr> <tr> <td>OIT (Oxidative Induktionszeit)</td> <td>DSC (200 °C)</td> <td>min</td> <td>&gt; 8</td> </tr> </tbody> </table>		Prüfmethode	Einheit	Wert	Schmelzindex (MFR) bei 230 °C / 2,16 kg	ISO 1133	g/10 min	6 - 10	Dichte	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	> 1,01	E-Modul (Zug)	ISO 527	MPa	> 1650	Zugfestigkeit	ISO 527	MPa	> 23	Zugdehnung	ISO 527	%	> 4,5	Charpy Schlagzähigkeit gekerbt bei +23°C	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	> 3	Restfeuchte	DIN 53723	%	< 0,1	Glührückstand	ISO 3451	%	> 15 %	Schüttdichte	ISO 60	g/l		OIT (Oxidative Induktionszeit)	DSC (200 °C)	min	> 8
	Prüfmethode	Einheit	Wert																																										
Schmelzindex (MFR) bei 230 °C / 2,16 kg	ISO 1133	g/10 min	6 - 10																																										
Dichte	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	> 1,01																																										
E-Modul (Zug)	ISO 527	MPa	> 1650																																										
Zugfestigkeit	ISO 527	MPa	> 23																																										
Zugdehnung	ISO 527	%	> 4,5																																										
Charpy Schlagzähigkeit gekerbt bei +23°C	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	> 3																																										
Restfeuchte	DIN 53723	%	< 0,1																																										
Glührückstand	ISO 3451	%	> 15 %																																										
Schüttdichte	ISO 60	g/l																																											
OIT (Oxidative Induktionszeit)	DSC (200 °C)	min	> 8																																										

Darüber hinaus wurden die Kernanforderungen an die einzelnen Prozessschritte und Prozessschnittstellen projektbegleitend parallel zu den jeweiligen Arbeitspaketen definiert.

#### 3.2. AP 2 - Konzeption und Pflichtenheft:

In diesem Arbeitspaket wurden grundlegende Grobkonzepte für die Adaptierung des Materialeingangsstroms und die Verfahrenstechnik parallel zu den jeweiligen folgenden Arbeitspaketen erarbeitet und in einem Pflichtenheft festgehalten. Ebenso wurde im Rahmen dieses Ar-

beitspaketes die Versuchsplanung bedarfsgerecht und projektbegleitend auf Basis der erhaltenen Zwischenergebnisse systematisiert. Das Pflichtenheft wurde projektbegleitend aktualisiert und fortgeschrieben.

### 3.3. AP 3 - Adaption/Parameterentwicklung Materialeingangsströme:

Zu Beginn dieses Arbeitspaketes wurden unterschiedliche Materialeingangsströme aus dem Bereich kommunaler Abfallsammlungen von Hartkunststoffen zunächst in ausreichender Menge beschafft und anschließend untersucht. Diese zeigten allesamt einen hohen Störstoffanteil an organischen, fremdpolymeren und anorganischen Störstoffen von bis zu 15 %. Erschwerend kam hinzu, dass der Störstoffanteil je nach Lieferung starken Schwankungen unterliegt. In extremen Einzelfällen wurden Störstoffanteile und Verschmutzungen von bis zu 50 % nachgewiesen. Die Beschaffenheit dieser nur schwer weiterzuverarbeitenden Materiallieferungen ist in nachfolgenden beispielhaften Fotografien visualisiert.



Abbildung 3: Fotografien eines Materialeingangs aus kommunalen Sammlungen von Hartkunststoffen mit hohem Störstoffanteil.



Abbildung 4: Fotografie des Materialeingangs aus kommunalen Sammlungen in vermahlener Form, starke Verschmutzung sichtbar.

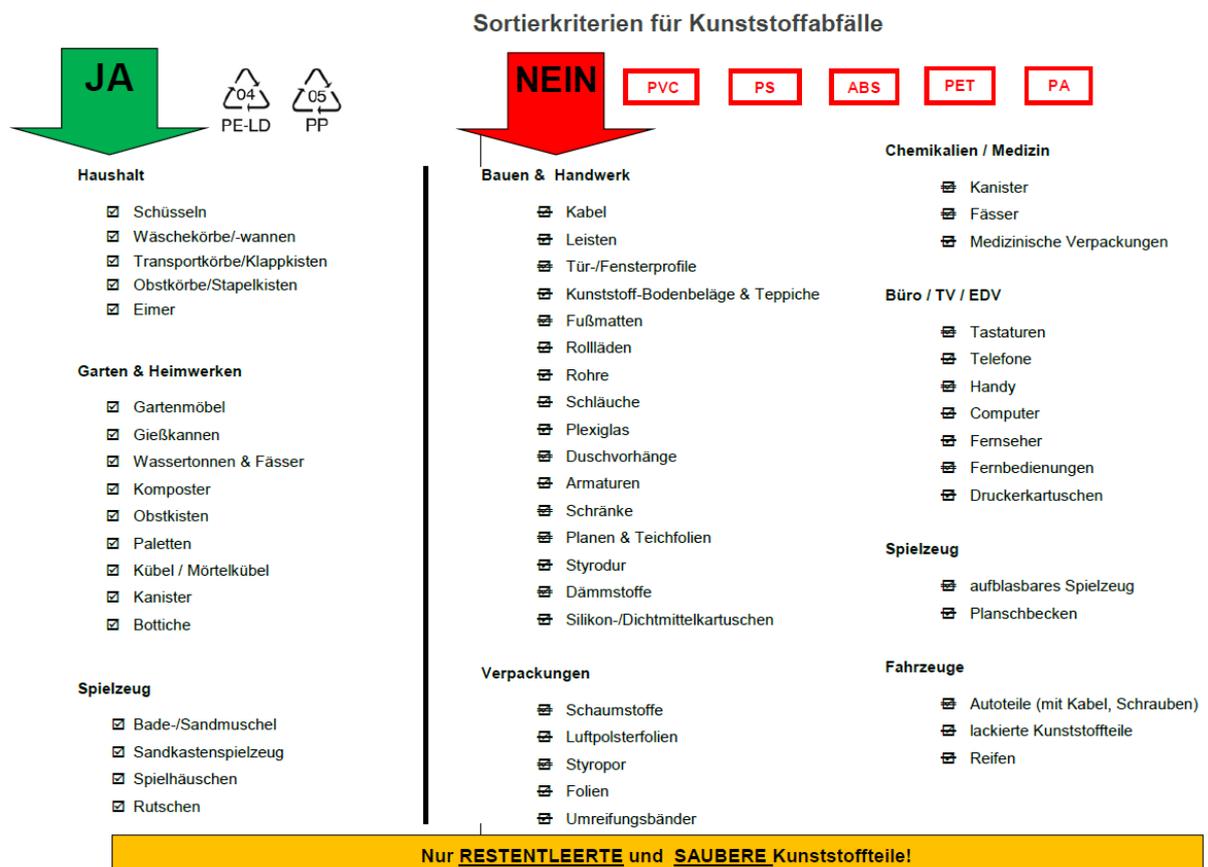


Abbildung 5: Sortiervorschrift für die Kunststoffvorsortierung im Kommunalbereich

Um der Störstoffproblematik bereits an der Rohstoffquelle zu begegnen, wurde eine Vorschrift für die Kunststoffvorsortierung erarbeitet, mit der umfangreiche Trainingsmaßnahmen bei den Rohstoffzulieferern aus dem Kommunalbereich durchgeführt wurden. Nach den Trainingsmaßnahmen stellte sich eine leichte Verbesserung ein. Die erarbeitete Vorschrift zur Kunststoffvorsortierung in Abbildung 5.

Darüber hinaus wurden zusätzliche Problemstellungen zur Verarbeitung der Materialeingangsströme in hochwertige Rezyklate identifiziert. Diese sind:

1. Die Korn-/Partikel-/Flockengrößenverteilungen:

Die geplante Trennung, auch der bunten (nicht schwarzen) Bestandteile der Materialströme, funktioniert erst ab einer Korngröße von über 5 mm. Für die Separation schwarz eingefärbter Bestandteile des Materialstroms sind nach gegenwärtigem Stand der Technik Korngrößen von über 15 mm notwendig; durch weiteren technischen Fortschritt ist hier in den kommenden Jahren eine Reduktion auf ebenfalls ca. 5 mm zu erwarten. Aus diesem Grund wurde zunächst das „Unterkorn“ mit Größen kleiner 5 mm abgesiebt. Dabei stellte sich heraus, dass dauerhaft Unterkornanteile von knapp unter 10 % in den Materialeingangsströmen enthalten sind, die selbst mittels standardmäßig verfügbarer NIR-Trenntechnik nicht in PP und PE separiert werden können. Dieser Anteil ist sehr hoch und spricht dafür, dass die Vorzerkleinerung bei potenziellen Materialzulieferern momentan ein großes Problem darstellt. Als Haupteinflussgröße wurde hier die Maschenweite des Siebkorb eines Schredders (Lindner Meteor 1750) identifiziert. Durch die Vergrößerung der Maschenweite reduziert sich die Verweilzeit des zu zerkleinernden Mahlgutes im Zerkleinerungsprozess und somit auch der Unterkornanteil. Darüber hinaus konnte durch die Vergrößerung der Siebkorbmaschenweite der Materialdurchsatz des Schredders um 25 % von 3 t/h auf bis zu 4 t/h (siehe Abbildung 6) erhöht werden.

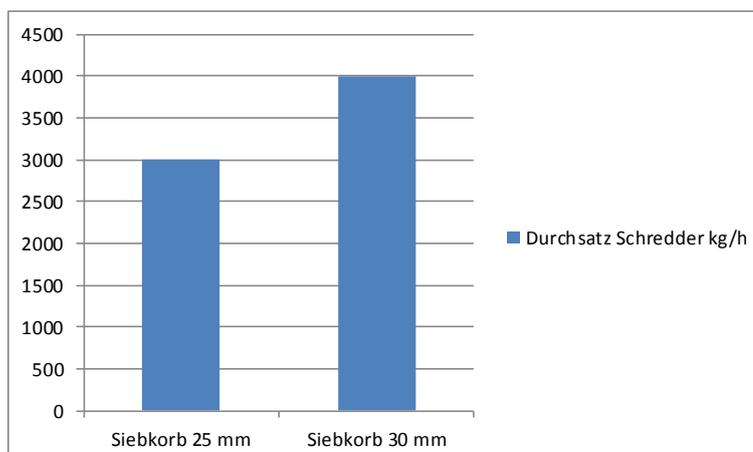


Abbildung 6: Erreichbarer Materialdurchsatz eines Schredders (Lindner Meteor 1750) bei Einsatz von Siebkörben mit 25 und 30 mm Maschenweite

Ein weiterer Befund zeigte einen, gegenüber der Zusammensetzung der Materialeingangsströme, überproportional hohen PP-Anteil von ca. 70 % als Durchschnittswert über die Projektlaufzeit. Dass PP eine stärkere Tendenz zur Ausbildung von Unterkornanteilen aufweist, wurde auf die gegenüber PE größere Materialsprödigkeit zurückgeführt.



material	Ø grain size [mm]	%
PA	22	0,07
POM	23	0,18
CELL	26	1,35
PET	21	1,12
PC	20	0,27
ABS	25	0,86
PS	27	9,83
PVC	19	0,83
SILICONE	14	0,03
PUR	18	0,36
PP	53	73,02
PE	38	8,17
BLACK	17	3,91

Abbildung 7: Gemessene Bestandteile der Unterkornfraktion

Die ermittelten Schwankungsbreiten sowie der Verschmutzungsgrad des Unterkornanteils erlauben voraussichtlich nach einer entsprechend aufwendigen Rezepturanpassung die werkstoffliche Verwertung als dosierte Beimischung bei der Compoundierung von PP-Regranulat.

## 2. Die Beschaffenheit der Außenkontur/-kante der Flocken (Rieselfähigkeit):

Der Grobanteil der Körner/Flocken im Materialeingangsstrom wies zu Projektbeginn eine Vielzahl „ausgefranster/unscharfer“ Kanten auf. Diese stellen eine Begrenzung der Rieselfähigkeit des Materials durch „Brückenbildung“ zwischen den Flocken und somit ein verfahrenstechnisches Problem dar. Die Folge ist ein nicht-konstanter Anlagendurchsatz in den Sortierern (RTT Steinert Typenbezeichnungen: UniSort Modell P750 NIR und UniSort Modell B750 Blackscanner) in niedriger Höhe. Durch gezielte Modifikation des Zerkleinerungsprozesses beim Zulieferer konnte das Kantenprofil der Flocken verbessert, und damit die Neigung zur Brückenbildung verringert werden. Dies wirkt sich in Form einer Verdopplung des Materialdurchsatzes im Sortierprozess aus (siehe Abbildung 8)

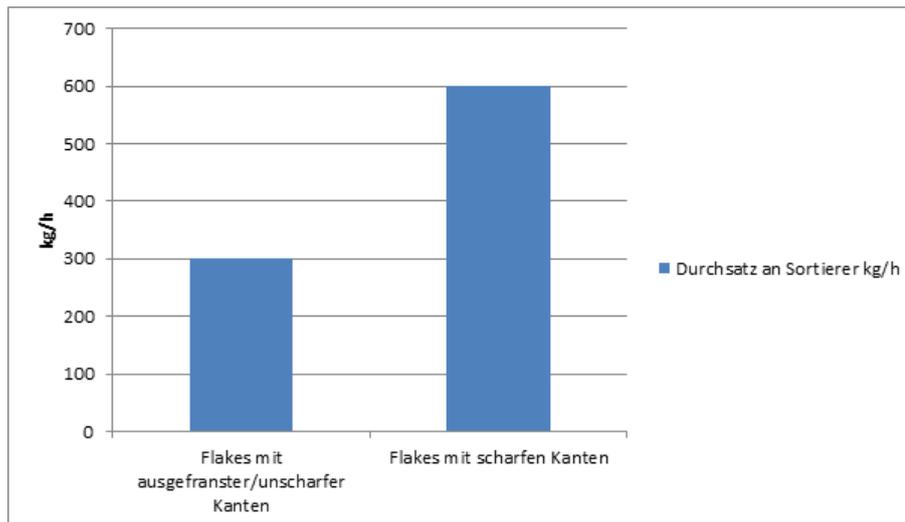


Abbildung 8: Erreichter Materialdurchsatz in den Sortierern (RTT Steinert UniSort Modell P750 NIR und UniSort Modell B750 Blackscanner) mit Flocken, die eine zerklüftete Außenkontur und eine scharf umrissene Außenkontur aufweisen.

3. Verschmutzungen/Kontaminationen, die bei der weiteren Verarbeitung Emissionen (im vorliegenden Fall Geruchsemissionen in Form von Dieselgeruch) verursachen:  
Zu Projektbeginn wurden bei < ca. 10 % der Lieferungen während der Prozessierung der Materialeingangsströme im Compoundierwerk störende, nicht akzeptable Dieselgeruchsemissionen verzeichnet. Diese wurden kategorisiert in die Kategorien „emissionsfrei“, „mittlere Emission“ und „starke Emission“. Nachfolgend wurden infrage kommende Emissionsquellen im Wertstoffstrom bei der OPG analysiert und die Theorie abgeleitet, dass es sich bei der Quelle mit hoher Wahrscheinlichkeit um geschredderte Heizöltanks aus Kunststoffen handelt. Auf Basis dieser Theorie wurde ein gezieltes Training der Zulieferer durchgeführt, in dessen Folge die Häufigkeit von < ca. 10 % auf näherungsweise 0 % reduziert werden konnte, womit die postulierte Theorie weitestgehend bestätigt wurde.
4. Kontaminationen mit einer weiteren, unerwünschten PE-Fraktion (quervernetztes PE):  
Eine weitere Kontaminationsquelle, in Form von quervernetztem PE (sogenanntes PEx) mit einem Vernetzungsgrad von ca. 70 % konnte bei der Bearbeitung dieses Arbeitspaketes ermittelt werden. Nennenswerte Kontaminationen an PEx in den PE-Materialströmen führten bei den nachfolgend durchgeführten Versuchen zu drastischen Qualitätsabwertungen des daraus hergestellten PE-Regrenulates. Es wurden verschiedene Ansätze zur Lösung dieser Problematik erarbeitet. Diese bestehen aus derzeitiger Sicht in der Entwicklung einer neuen automatischen Trenntechnik mit der Fä-

higkeit, PEx zu erkennen und aus dem PE-Materialstrom zu separieren, einer zu untersuchenden Rezeptierung und Beimischung in sehr geringen Dosierungen oder aber der Verarbeitung in „minderwertigen“ Produktanwendungen. Ebenfalls ein Ansatz ist die Verwendung feinerer Filter während der Compoundierung zur Abtrennung des PEx-Anteils; dieser Ansatz muss jedoch mit einer Schmelzepumpe zur Steigerung des Druckaufbaus kombiniert werden. Vor einer entwicklungstechnischen Lösung dieser Problematik gestaltet sich die Verwertung des Gesamtmaterialeingangsstroms unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten als schwierig, da die Kontamination den gesamten PE-Teilstrom betrifft.

Als abschließendes Ergebnis wurden die in Tabelle 3 dargestellten Anteile am Wertstoffeingangsstrom statistisch ermittelt und quantifiziert:

Tabelle 3: Durchschnittliche Stoffanteile an Materialeingangsströmen aus dem Bereich kommunaler Hartkunststoffsammlungen

Anteil „hell/bunt“ am Materialeingangsstrom		Anteil „schwarz“ am Materialeingangsstrom	
Summe PE/PP	60 bis 95 %	Summe PP+PE	5 bis 40 %
Davon PP	20 bis 80 %	Davon PP	20 bis 80 %
Davon PE	20 bis 70 %	Davon PE	20 bis 70 %
Davon HDPE	Nahezu 100 %	Davon HDPE	Nahezu 100 %
Davon PEx	> 5 % (Vermutung)*	Davon PEx	> 5 % (Vermutung)*

\*aber selbst kleine Mengen führen zu großen Verarbeitungsproblemen. Über die Analyse der Stoffströme kommunaler Hartkunststoffe hat sich gezeigt, dass sich vernetzte Rohre, auch wenn sie teilweise mit PEx gekennzeichnet waren, durch das Personal nicht aussortiert wurden. Fazit: Um den Prozess der Sortierung zu vereinfachen, dürfen keine Rohre enthalten sein.

Die erreichten Sortenreinheiten der vier Materialteilströme PP-bunt, PE-bunt, PP-schwarz und PE-schwarz betragen jeweils mehr als 95 %.

#### 3.4. AP 4 - Adaption der Trenntechnologie an Materialeingangsströme:

Durch die Prozesskette sind folgende Trennvorgänge durchzuführen:

- Staub vom Verarbeitungsgut
- farbige Anteile von schwarzen Anteilen
- Polyolefine PP und PE in separate Stoffströme

Die zu adaptierende Trenntechnologie/Prozesskette bestand zunächst aus der Prozesskette:

1. Siebung
2. Sortierung bunt
3. Sortierung schwarz

Eine wichtige Adaption der Trenntechnologie bestand in der Einführung zusätzlicher Teilprozesse zur Vorbereitung des Materialeingangsstromes. In der Prozesskette wurde die Trocknung sowie Entstaubung vorgeschaltet, sodass sie nun wie folgt aufgebaut ist:

1. Trocknung
2. Entstaubung
3. Siebung
4. Sortierung bunt
5. Sortierung schwarz

Feuchtigkeit im Materialeingangsstrom führt in Kombination mit anhaftenden Staubpartikeln zu einer stark haftenden Masse, welche sich problematischer Weise im Detektionsbereich der Sortieranlagen (RTT Steinert UniSort Modell P750 NIR und UniSort Modell B750 Blackscanner) anlagert, das Sortierergebnis verfälscht und schlussendlich zu einer erheblichen Verkürzung der Reinigungsintervalle und somit Verringerung der Anlageneffizienz führt. Der Einfluss der Trocknung auf die Reinigungsintervalle der Sortieranlagen ist in Abbildung 9 dargestellt.

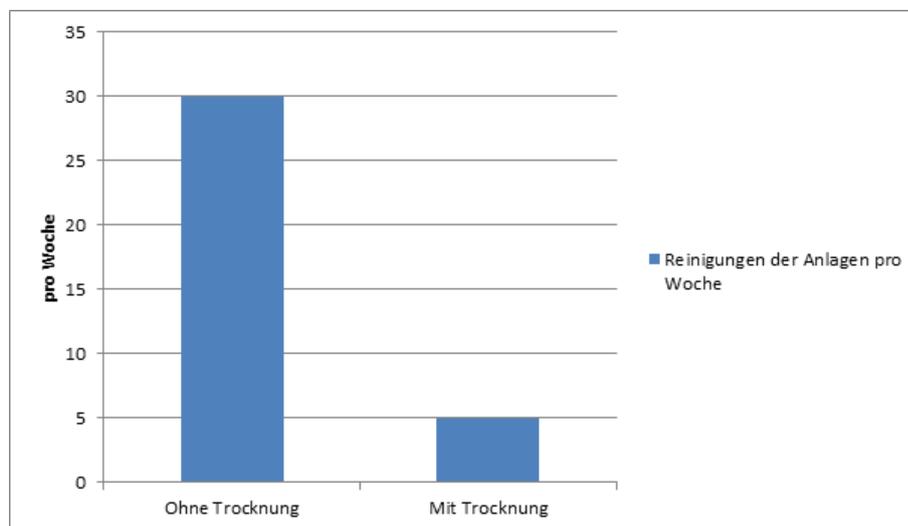


Abbildung 9: Einfluss der vorgeschalteten Materialtrocknung auf die Reinigungsintervalle der Sortieranlagen (RTT Steinert UniSort Modell P750 NIR und UniSort Modell B750 Blackscanner)

Zur gezeigten Reduzierung der Reinigungsintervalle muss das zu sortierende Material eine Restfeuchte  $< 0,5\%$  aufweisen. Erreicht wurden im Projekt Restfeuchtigkeitsgehalte von maximal  $0,25\%$ .

Weiterhin zeigte sich, dass Staubanteile im Trenngut die Sortierergebnisse verfälschen, konkret den gemessenen Schwarzanteil erhöhen. Dies ist in Abbildung 10 exemplarisch gezeigt.

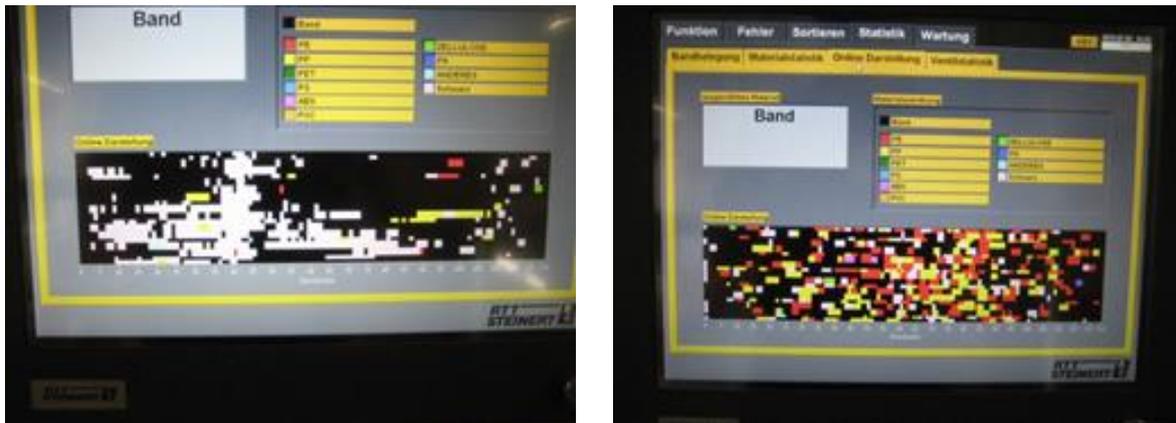


Abbildung 10: Screenshots der Betriebssoftware der Sortieranlage im Sortierbetrieb von stark verstaubtem Trenngut (links) und entstaubtem Trenngut (rechts); die detektierten Schwarzanteile sind von der Software in Weiss dargestellt.

Durch die verbesserte Entstaubung des Trennguts wurde eine weitere Problematik behoben. Das Auftreten verkohlter Partikel (siehe Abbildung 11); es beruht auf der Einschleusung leicht entflammbarer Störstoffe in die Anlage zur Trennung des Schwarzanteils und stellte im Projekt sowohl aus Qualitäts- aber insbesondere auch aus Sicherheitsaspekten eine erhebliche Problematik dar. Mit Anpassung der Entstaubung ist kein weiterer Fall der Entflammbarkeit aufgetreten. Die akute Brandgefahr im Prozess wurde gelöst.



Abbildung 11: Fotografie von verbrannten Störstoffpartikeln im Materialstrom nach Durchlauf der MIR-Sortierung für den Schwarzanteil.

Eine weitere verfahrenstechnische Verbesserung betraf den Verteilschieber des Lagertrichters des Schwarzsor-tieres. Dieser wurde von pneumatisch geregelter Aktuation auf elektrisch ge-regelte Aktuation umgerüstet. Dadurch wurde die Bandbelegung (siehe Abbildung 12 ) und damit auch der Materialdurchsatz (siehe Abbildung 13) erheblich verbessert.

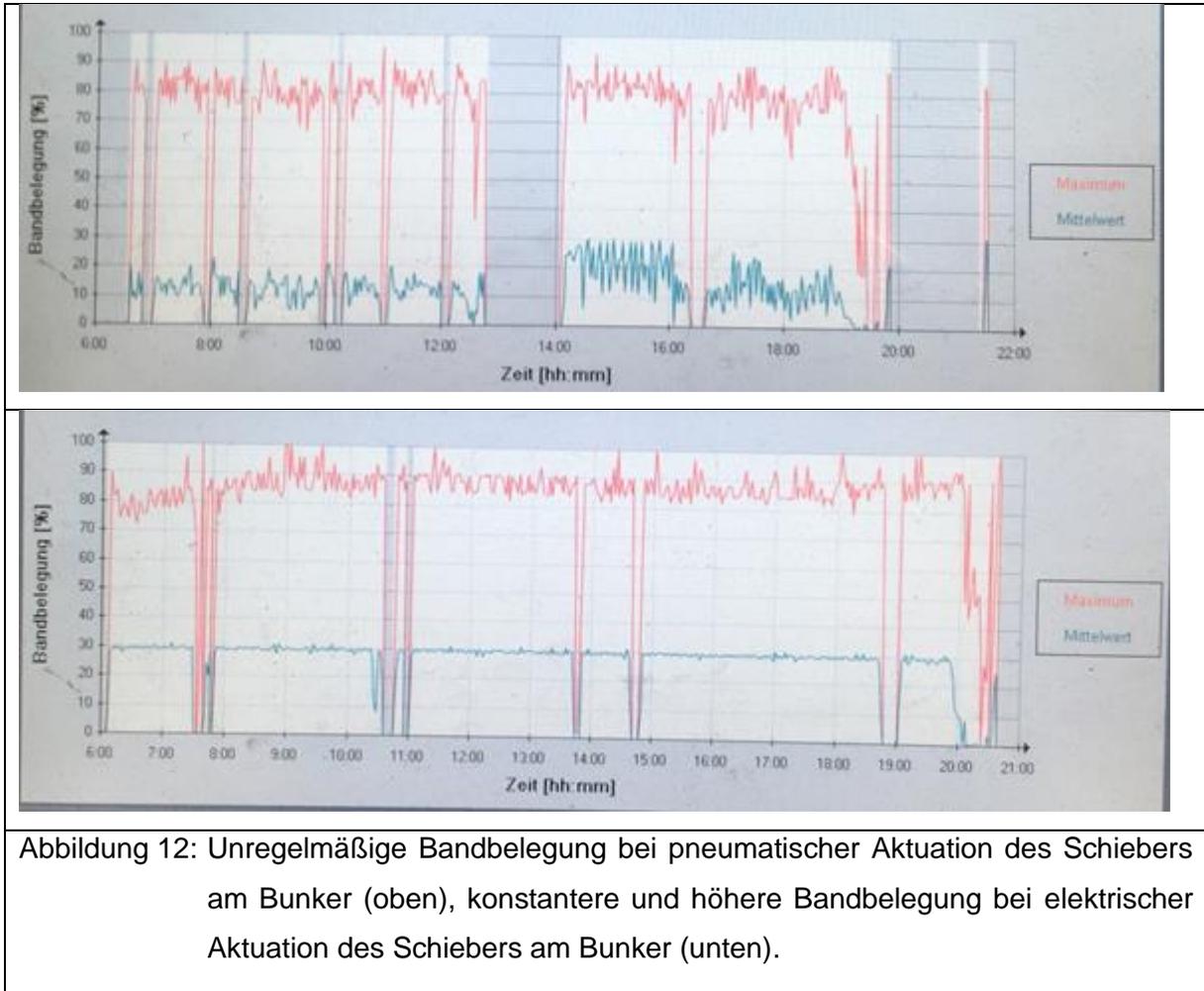


Abbildung 12: Unregelmäßige Bandbelegung bei pneumatischer Aktuation des Schiebers am Bunker (oben), konstantere und höhere Bandbelegung bei elektrischer Aktuation des Schiebers am Bunker (unten).

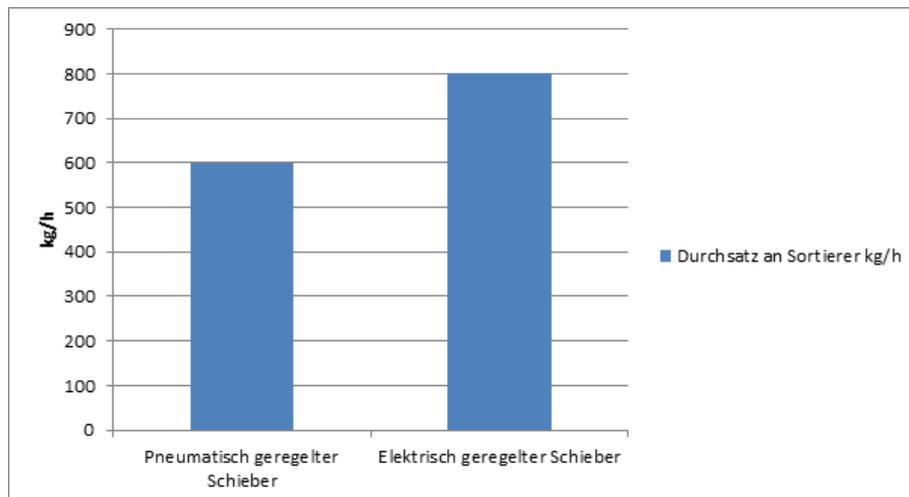


Abbildung 13: Materialdurchsatz der Sortieranlage bei pneumatischer und elektrischer Aktuation des Schiebers am Bunker.

### 3.5. AP 5 - Entwicklung der Qualitätsabstufung des Recyclingguts:

Im Zuge der Bearbeitung dieses Arbeitspaketes wurde die folgende Qualitätsabstufung, für eine möglichst hochwertige und vollständige Weiterverarbeitung des im fokussierten Materialeingangsstrom enthaltenen Polyolefinanteils aus dem Bereich kommunaler Hartkunststoffsammlungen erarbeitet. Auszüge der separierten Materialteilströme sind nachfolgend exemplarisch als Fotografien gezeigt.

#### 1. Hauptströme:

##### a. PP-bunt/hell



Abbildung 14: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms PP (bunt/hell)

##### b. PE-bunt/hell



Abbildung 15: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms PE (bunt/hell)

## c. PP-schwarz



Abbildung 16: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms PP (schwarz)

## d. PE-schwarz



Abbildung 17: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms PE (schwarz)

## 2. Nebenströme:

## a. Unterkornanteil



Abbildung 18: Fotografie des aussortierten Materialteilstroms Unterkornanteil

b. PEx – bunt

Noch ungeklärt.

Eine Aufteilung des untersuchten Materialeingangsstroms in diese Teilströme stellt aus heutiger Sicht die Mindestnotwendigkeit zur Erreichung hochwertiger Regranulateigenschaften, möglichst auf dem Niveau von Neuware für die vier Hauptströme dar.

### **3.6. AP 6 - Entwicklung Veredelungsrezeptur (Maßschneiderung MFIs):**

Dieses Arbeitspaket umfasste umfangreiche Untersuchungen zu erreichbaren Melt Flow Indizes (MFI) am Teilstrom „PP-bunt“ mittels Durchführung eines reaktiven Compoundierprozesses. Zunächst einmal konnte nachgewiesen werden, dass der Teilstrom PP-bunt mit hinreichender Reproduzierbarkeit mittels zuvor entwickelter Compoundierparameter zu einem hochwertigen Regranulat mit MFI 8 bis 12 (230°C/2,16 kg ISO 1133) verarbeitet werden kann. Dieses Regranulat ist in der Folge ideal für die Formgebung mittels gängiger Spritzgussprozesse geeignet. Durch den reaktiven Compoundierprozess – hierzu wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt – kann der MFI unter noch vertretbaren Verfahrensparametern in der Grenze auf bis zu 30 erhöht werden. Dies stellt dahin gehend ein interessantes Ergebnis dar, dass mittels PP mit MFI 30 ggf. neue Spritzgussprozesse, z. B. im Bereich dünnwandiger Großbehälter entwicklungstechnisch erschlossen werden können.

Neben der Beeinflussung des Melt Flow Index (MFI) durch einen reaktiven Compoundierprozess wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes auch eine ganze Reihe von Untersuchungen zum Bedarf und der Wirkung weiterer Additive, wie beispielsweise von Antioxidantien und/oder Additiven zum UV-Schutz, durchgeführt. Diese Arbeiten wurden notwendig, nachdem an den unbehandelten Regranulaten durchgeführte Bewitterungstests eine gegenüber Neuware erheblich höhere Anfälligkeit gegenüber Oxidation und Versprödung aufwiesen. Diese Neigung kann durch den längeren Lebenszyklus der Rezyklate gegenüber Neuware erklärt werden; es liegen durch den vorangehenden Lebenszyklus bereits Vorschädigungen vor, die die Anfälligkeit des Materials gegenüber schädigenden Einflüssen verstärken. Daher wurde für den Teilstrom PP-bunt im Rahmen dieses Arbeitspaketes ebenfalls ein Additivpaket höherer Konzentration entwickelt, mit dem die Langzeiteigenschaften des Regranulates unter realitätsnahen Bewitterungsbedingungen auf das Niveau von Kunststoffneuware gehoben werden können.

### 3.7. AP 7 - Entwicklung Compoundierung und Extrusionsparameter:

Dieses Arbeitspaket wurde parallel zu den Arbeitspaketen 6 und 8 durchgeführt.

Die Extrusionsparameter bei der Compoundierung von Kunststoffneuware unterscheiden sich von den möglichen Prozessparametern zur Compoundierung von Regranulaten. Einerseits müssen die im zu verarbeitenden Materialstrom noch enthaltenen Störstoffe größtenteils ausgefiltert werden. Darüber hinaus unterscheiden sich die zu verarbeitenden Viskositäten sich von Neuware und schwanken stark. In der Folge waren Verarbeitungsparameter zu identifizieren, die es einerseits ermöglichen, hohe Durchsätze unter schwankenden Zähigkeiten in der Anlage zu fahren und weiterhin teilweise hohe Störstoffanteile bei gleichbleibend hohem Durchsatz auszufiltern. Zweites stellt eine hohe Herausforderung dar, da bei verringerten Filterdurchmessern erheblich erhöhte Drücke an die Schmelze anzulegen sind, um industriell vertretbare Durchsätze zu erreichen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass hierzu u. U. zusätzliche Schmelzepumpen an den Extrusionsanlagen erforderlich sind, um den Schmelzedruck zu erhöhen. Weiterhin stellte sich ein großer Einfluss der Flockengrößenverteilung auf den Extruderdurchsatz heraus. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 19 gezeigt. Zu beachten ist dabei jedoch, dass die vorgeschaltete Sortierung Flockengrößen von über 15 x 15 mm benötigt. Daher wurde der Prozesskette nach der Sortierung eine Zerkleinerung mittels Schneidmühle nachgeschaltet, um den Extruderdurchsatz zu maximieren.

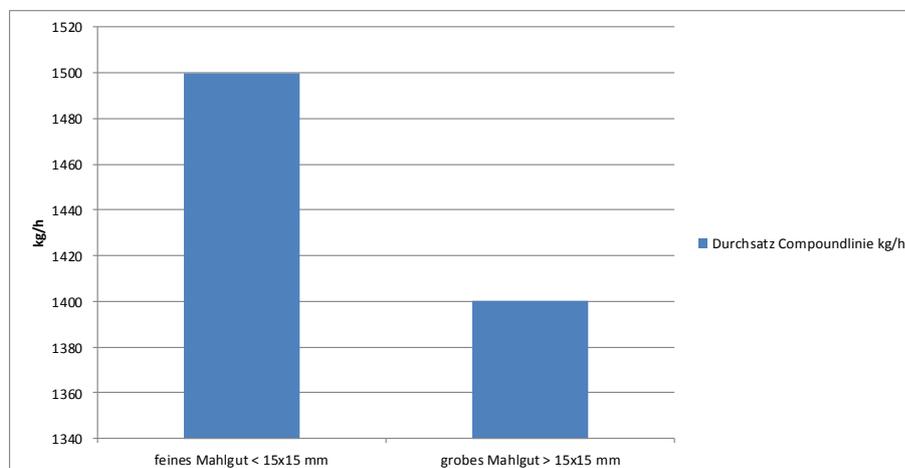


Abbildung 19: Extruderdurchsatz bei der Compoundierung von Mahlgut mit Flockengrößen kleiner 15 x 15 mm und Flockengrößen größer 15 x 15 mm

Bei der Verarbeitung von Materialeingangsstömen (PP-bunt) unter Zusatz von reaktiver Compoundings sowie antioxidativen und UV-schützenden Additiven konnte eine hinreichend gute Durchmischung erreicht werden, sodass gute Homogenitäten der hergestellten Regranulate erreicht wurden. Als besonders schwierig stellte sich die Verarbeitung von mit PEx kontaminierten PE-Materialströmen dar. Trotz unterschiedlicher Filter, die aus dem Schmelzestrom

des Extruders vernetztes PE austragen, zeigen sich an extrudierten Bauteilen deutliche Verschmutzung, die nach Analyse vernetzte PEs darstellen.

Hierzu konnte im Verlauf des Projektes noch keine befriedigende Lösung als Kombination aus zielführender Trenntechnik, Rezeptierung, Extrusion und Filtertechnik entwickelt werden. Die Lösung dieser Problematik bedarf weiterführender, vertiefender Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten.

### **3.8. AP 8 - Entwicklung Filtertechnik:**

Dieses Arbeitspaket befasste sich mit der Auslegung einer für die Verarbeitung von Materialeingangsströmen aus dem Bereich kommunaler Hartkunststoffsammlungen passenden Filtertechnik. Im Gegensatz zu Materialeingangsströmen aus dem Post-Consumerbereich enthalten Materialeingangsströme aus kommunalen Hartkunststoffsammlungen nur vernachlässigbare Anteile an Aluminiumkontamination. Stattdessen sind vermehrt mineralische Kontaminationen aus dem Materialstrom auszufiltern.

Hierzu wurden drei grundsätzlich verschiedene Filtersysteme experimentell evaluiert und bzgl. der mit dem eingesetzten Materialstrom hinsichtlich ihrer Leistungsparameter charakterisiert. Diese drei Filtersysteme sind:

- Siebfiltersystem
- Bandfiltersystem
- Scheibensfiltersystem

Abbildung 20 zeigt die ermittelten Leistungscharakteristika der untersuchten Filtersysteme unter Einsatz einer zusätzlichen Schmelzepumpe. Die Schmelzepumpe ist bei der Compoundierung zäher Materialströme wie HDPE zwecks zusätzlichem Druckaufbau unerlässlich.

Die kurzen Filterstandzeiten des Bandfilters sind auf dessen Funktionsweise zurückzuführen und lassen sich nicht direkt mit den Standzeiten der beiden anderen Filtersysteme vergleichen. Beim Bandfiltersystem wird die vom Extruder geförderte Schmelze kontinuierlich durch das bandförmige Sieb gedrückt. Durch die Ausfilterung von Störstoffen verringert sich dann kontinuierlich die Porenfläche und ab einem individuell einstellbaren Grenzdruck wird ein vollautomatischer Siebwechsel eingeleitet. Diese Funktionsweise führt teilweise zu starken Produktionsschwankungen.

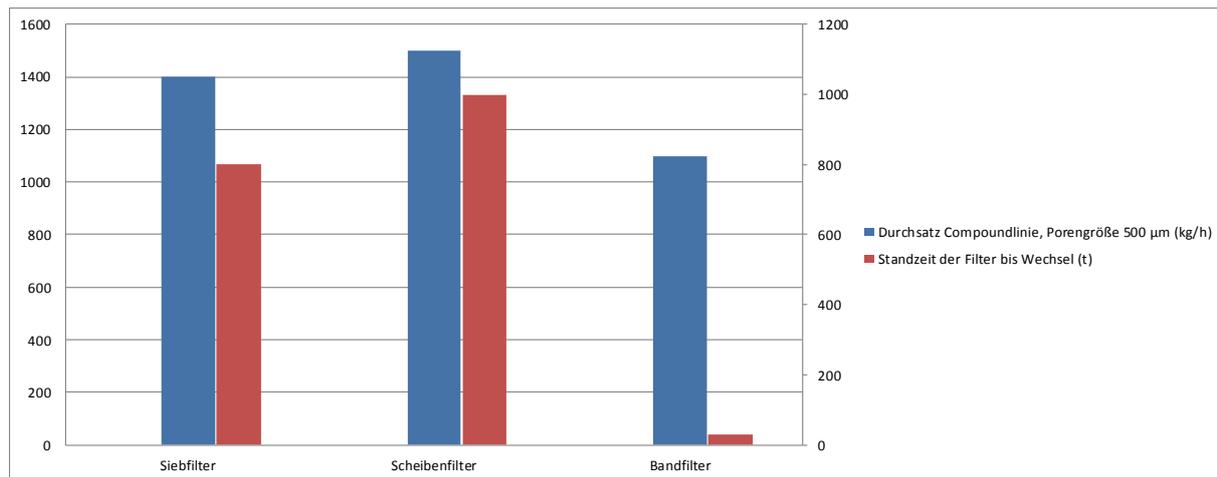


Abbildung 20: Leistungscharakteristika (Durchsatzleistung und Filterstandzeit bis zum Wechsel) der eingesetzten Filtersysteme mit Einsatz einer zusätzlichen Schmelzepumpe

Es ist zu konstatieren, dass das Scheibenfiltersystem für die zu prozessierenden Materialströme am besten geeignet ist. Sowohl Durchsatz, als auch erreichbare Standzeit sind am höchsten. Ebenfalls ist der auf die offene Filterfläche bezogene, spezifische Schmelzefluss beim Scheibenfiltersystem am höchsten.

Nach Festlegung der Filterart wurde untersucht, welche Filterfeinheit für die Verarbeitung des Materialstroms erforderlich ist; hier galt es, den besten Kompromiss aus Durchsatz und Filterleistung zu erzielen. Für die PP-Teilströme wurde hierzu eine optimale Porengröße von 500 µm identifiziert.

Versuchsweise wurden diese Filterparameter auf die PE-Teilströme mit scheinbar guten Ergebnissen übertragen. Jedoch zeigte sich bei der Bearbeitung von Arbeitspaket 9, dass die daraus hergestellten Testkörper von sehr schlechter Qualität waren (siehe Abbildung 22). Dies konnte auf quervernetzte PE-Bestandteile im PE-Regranulat zurückgeführt werden. Die Kontamination der PE-Teilströme mit quervernetzten PE-Bestandteilen stellt ein großes Problem und eine entsprechend große Herausforderung dar, da die Bauteileigenschaften dadurch drastisch verschlechtert werden. Daher wurden Untersuchungen dazu durchgeführt, ob auch quervernetzte Partikel mittels geeigneter Filter abgefiltert werden können. Mit einer Porengröße von 500 µm funktioniert dies nicht. Erste noch im Projekt durchgeführte Versuche mit reduzierten Filtergrößen zeigten, dass sich die PEX-Bestandteile in den PE-Teilströmen verringern lassen. Jedoch bedarf dieser Lösungsansatz erheblich vergrößerter Schmelzdrücke und lässt sich daher ohne eine Anpassung der Extrusionsanlage nicht beliebig fortführen. Durch die zukünftig geplante Nachrüstung der Anlage mit einer Schmelzepumpe lässt sich der Druckaufbau steigern, sodass die Porengrößen weiter reduziert werden können. Eine endgültige

Aussage zur Abtrennung von PEx durch eine geeignete Schmelzfilterung steht daher noch aus. Ebenfalls hervorzuheben ist, dass die bisherigen Versuchsmengen von ca. 5 t noch zu klein waren, um unter Berücksichtigung der Schwankungen in der Zusammensetzung des POMixed Materialeingangsstroms dauerhaft übertragbare Aussagen zu tätigen.

### 3.9. AP 9 - Testkörperfertigung und Charakterisierung:

In diesem Arbeitspaket wurden aus den hergestellten Regranulaten Testkörper hergestellt und charakterisiert. Die gefertigten Testkörper und die daraus erhaltenen Untersuchungsergebnisse wurden ausgewertet und analysiert. Auf Basis der erhaltenen Versuchsergebnisse wurde ein vorläufiges Datenblatt für das aus dem Teilstrom PP-bunt hergestellte Regranulat erstellt. Dieses ist nachfolgend in Abbildung 12 dargestellt.

<b>Vorläufiges Produktdatenblatt</b>			
<b>PP-bunt</b>			
<b>Eigenschaften</b>			
	<b>Prüfmethode</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>
<b>Schmelzindex (MFR)</b> bei 230 °C / 2,16 kg	ISO 1133	g/10 min	> 5
<b>Dichte</b>	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	> 1,02
<b>E-Modul (Zug)</b>	ISO 527	MPa	> 1500
<b>Zugfestigkeit</b>	ISO 527	MPa	> 25
<b>Zugdehnung</b>	ISO 527	%	> 5
<b>Charpy Schlagzähigkeit gekerbt</b>			
bei +23°C	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	> 2,5
<b>Restfeuchte</b>	DIN 53723	%	< 0,1
<b>Glührückstand</b>	ISO 3451	%	> 15 %
<b>OIT (Oxidative Induktionszeit)</b>	DSC (200 °C)	min	> 8

Abbildung 21: Vorläufiges Datenblatt für das aus dem Teilstrom PP-bunt hergestellte Regranulat

Die Aussichten zur erfolgreichen Verarbeitung des Teilstromes PP-schwarz zu einem hochwertigen Regranulat werden als sehr positiv eingeschätzt.

Eine belastbare Prognose zu den erreichbaren Materialeigenschaften mit den Teilströmen PE-bunt und PE-schwarz gestaltet sich nach derzeitigem Stand aufgrund der unerwartet aufgetretenen Kontamination mit quervernetzten PE-Bestandteilen als schwierig. Abbildung 13 zeigt zur Verdeutlichung dieser Problematik ein mittels Blasverfahren gefertigtes Bauteil aus PEX kontaminierten PE-Regranulat. Die erreichbaren Bauteileigenschaften lassen die Verwendung des kontaminierten Materials derzeit nicht zu.



(mikroskopische Auflösung)

Abbildung 22: Fotografie (in mikroskopischer Auflösung) der Oberfläche eines mittels Blasverfahren gefertigten Bauteils aus PE (mit PEX kontaminiert)

Dennoch wurden bereits Entwicklungsansätze zur Lösung des vorliegenden Problems erarbeitet, die ggf. in einer zweiten Projektphase verfolgt werden sollen. Diese betreffen:

- Die Entwicklung einer Trenntechnologie zur Erkennung und Separation von PEX
- Die Entwicklung einer potenten Filter- und Anlagentechnik zur Abfilterung verbleibender PEX-Bestandteile aus den PE-Teilströmen unter Wahrung des erforderlichen Anlagendurchsatzes und der Prozessstabilität
- Die Erforschung der Materialdegradation von HDPE in Abhängigkeit der PEX-Konzentration und daraus die Ableitung der maximalen Beimischgrenze in der Rezeptierung

**3.10. AP 10 - Projektdokumentation und Optimierung:**

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden sämtliche Versuchsbedingungen, Versuchsumgebungen, Untersuchungsergebnisse und -auswertungen der OPG Holding und der Graf Plastics GmbH dokumentiert, analysiert und potenziell verbleibendes Optimierungspotenzial daraus abgeleitet.

## Fazit

Das Projektziel, einen neuen Materialeingangsstrom aus Polyolefinen (PO), die aus kommunalen Hartkunststoffsammlungen stammen, in seine Hauptbestandteile PE, PP, Buntanteil, Schwarzanteil zu separieren wurde erreicht, indem in der Trennlinie eine NIR-Trennanlage die Buntanteile in PE und PP auftrennt und der verbleibende Schwarzanteil danach einer MIR-Trennanlage zugeführt wird. Jedoch wurden im Projektverlauf auch zusätzlich auftretende Nebenströme ermittelt (z. B. Unterkornanteil).

Darüber hinaus zeigte sich, dass die Zusammensetzung kommunaler Hartkunststoffsammlungen starken Schwankungen unterliegt, denen durch eine robuste Prozessführung zu begegnen ist. Die Korngrößenverteilung und Kornbeschaffenheit des zerkleinerten PO-Wertstoffstromes stellen eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche und effektive Verarbeitung zum Regranulat mittels industrieller Prozesse dar.

Das Projektziel, den qualitativ hochwertigsten Teilstrom (PP-bunt) mittels einer im Projekt zu entwickelnden Additivierung und Prozessierung zu einem Regranulat mit den vollwertigen Eigenschaften von Kunststoffneeware zu verarbeiten, wurde ebenfalls voll erreicht.

Jedoch wurde auch ein unerwartetes und in der Zukunft dringend zu bearbeitendes Problem identifiziert. Dieses besteht in der Kontamination der PE-Teilströme mit quervernetzten PE-Bestandteilen (PE<sub>x</sub>). Diese PE<sub>x</sub>-Bestandteile sind mit derzeit marktverfügbarer NIR-Trenntechnologie nicht erkennbar, lassen sich dementsprechend nicht separieren und verschlechtern die Materialgüte des PE<sub>x</sub>-kontaminierten PE-Teilstromes drastisch. Im Projektverlauf wurden technische Lösungsansätze zur Überwindung dieser Problematik erarbeitet, die ggf. in einem Folgeprojekt umgesetzt werden sollen. Die vorliegende Problematik behindert die wirtschaftliche Verwertung des Gesamtmaterialstroms derzeit noch erheblich.

Nach Überwindung dieser Problematik können pro Tonne aus dem neuen Materialstrom hergestellten Regranulat ca. 2 t CO<sub>2</sub> dauerhaft durch Recycling eingespart werden.

## **Danksagung**

Die OPG Holding GmbH, ihr Kooperationspartner Graf Plastics GmbH und das beteiligte Projektteam bedanken sich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und ihrem Ansprechpartner, Herrn Dr. Michael Schwake für die Förderung und Betreuung des vorliegenden Entwicklungsprojektes.