

# **BMU-UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM**

## **Abschlussbericht**

### **zum Vorhaben**

Recycling von Abfall-Polyolefinen

### **Zuwendungsempfänger/-in**

Graf Polymers GmbH

### **Umweltbereich**

Abfall, Ressourcen, Klimaschutz

### **Laufzeit des Vorhabens**

15.06.2017 – 31.12.2020

### **Autor/-en**

Jörg Dräger

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare  
Sicherheit**

### **Datum der Erstellung**

18.03.2021

**Berichts-Kennblatt**

<b>Aktenzeichen:</b> UBA: 3221	<b>Projekt-Nr.:</b> NKa3 - 003221
<b>Titel des Vorhabens:</b> Recycling von Abfall-Polyolefinen	
<b>Autor/-en:</b> Dräger, Jörg	<b>Vorhabenbeginn:</b> 15.06.2017
	<b>Vorhabenende:</b> 31.12.2020
<b>Zuwendungsempfänger:</b> Graf Polymers GmbH Otto-Graf-Straße 1 79336 Herbolzheim	<b>Veröffentlichungsdatum:</b> November 2021
	<b>Seitenzahl:</b> 57
<b>Gefördert im BMU-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit</b>	
<b>Kurzfassung:</b> <p>Ziel des durchgeführten Investitionsvorhabens war die Errichtung, Inbetriebnahme und Verifikation eines hochmodernen Kunststoff-Recyclingwerkes als großtechnisches Demonstrationsvorhaben, in dem gemischte PP-PE-Wertstoffströme durch eine neuartige Prozesskette zu Sekundärgranulaten mit Eigenschaftsniveau von Primärrohstoffen aufbereitet werden können, die bisher aufgrund ihrer Eigenschaften (Schwarzanteil, Verschmutzung) keinem hochwertigen werkstofflichen Recycling zugänglich gemacht werden konnten. Als Quellen der Inputströme sollten Gewerbeabfälle, kommunale Abfälle aus Wertstoffhöfen sowie verbleibende Hartkunststofffraktionen aus der Ersatzbrennstoffherstellung herangezogen werden. Dazu wurde eine neuartige Prozesskette etabliert. Schlüsselemente dieser Prozesskette bestehen in einer kontinuierlichen Homogenisierung von Produktionschargen, dem Einsatz von MIR-basierter Trenntechnologie sowie hochmoderner Compoundlinien. Die wichtigsten Ergebnisse bestehen darin, dass die erreichten Sortenreinheiten für die hergestellten PP- und PE-Rezyklate so groß sind, dass neuwareähnliche Eigenschaften erreicht werden und damit künftig Neuware ersetzt werden kann.</p>	
<b>Schlagwörter:</b> Blackscanner, 3 D, Gewerbeabfall, Kreislaufwirtschaft, HDPE, PP, Kunststoff, Kunststoffrecycling	

**Report Coversheet**

<b>Reference-No. Federal Environment Agency:</b> UBA: 3221	<b>Project-No.:</b> NKa3 - 003221
<b>Report Title:</b> Recycling of waste of polyolefines	
<b>Author/Authors:</b> Dräger, Jörg	<b>Start of project:</b> 15.06.2017
	<b>End of project:</b> 31.12.2020
<b>Performing Organisation:</b> Graf Polymers GmbH Otto-Graf-Straße 1 79336 Herbolzheim	<b>Publication Date:</b>
	<b>No. of Pages:</b> 56
<b>Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety.</b>	
<b>Summary:</b> The objective of the investment was the construction, commissioning and verification of a state-of-the-art plastics recycling plant as a large-scale demonstration in which mixed PP-PE material streams can be processed into secondary pellets with the same properties as virgin grade materials by means of a novel process chain. Up until now, this could not be made available for high-quality mechanical recycling due to its properties (black content, contamination). The sources of the input streams were to be commercial waste, municipal waste from recycling centres and left over hard plastic fractions from refuse-derived fuel production. A novel process chain was established for this purpose. Key elements of this process chain consist of continuous homogenization of material lots, the use of MIR-based separation technology, and the use of state-of-the-art compounding lines. The results are that the purities achieved for the PP and PE recyclates produced are such that virgin-like properties can be achieved and virgin material can be substituted in the future.	
<b>Keywords:</b> Blackscanner, 3 D, commercial waste, circular economy, HDPE, PP, plastic, plastic recycling	

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>4</b>
1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens.....	4
1.2. Ausgangssituation .....	5
<b>2. Vorhabenumsetzung</b> .....	<b>16</b>
2.1. Ziel des Vorhabens.....	16
2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten).....	19
2.3. Umsetzung des Vorhabens .....	22
2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen).....	31
2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten .....	32
2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms .....	38
<b>3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung</b> .....	<b>40</b>
3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung .....	40
3.2. Stoff- und Energiebilanz .....	42
3.3. Umweltbilanz .....	45
3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	46
3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren .....	46
<b>4. Übertragbarkeit</b> .....	<b>48</b>
4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung .....	48
4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts) .....	51
<b>5. Zusammenfassung</b> .....	<b>52</b>
<b>6. Summary</b> .....	<b>54</b>
<b>7. Literatur</b> .....	<b>56</b>
<b>8. Anhang</b> .....	<b>57</b>

## **1. Einleitung**

### **1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens**

Die für die Projektdurchführung verantwortliche GRAF Polymers GmbH ist ein Unternehmen der Unternehmensgruppe GRAF. Die GRAF-Unternehmensgruppe befindet sich zu 100 % in Familienbesitz und besteht derzeit aus 23 Unternehmen. Sie verzeichnete im Jahr 2019 gruppenübergreifend einen vorläufigen Gesamtumsatz von ca. 120 Mio. € bei einer Gesamtzahl von aktiv 618 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern.

Seit mehr als 50 Jahren ist das inhabergeführte Familienunternehmen in der Branche der kunststoffverarbeitenden Industrie tätig. Bereits 1974 erkannte das Unternehmen GRAF die Notwendigkeit, sorgsam mit natürlichen Ressourcen umzugehen, und stellte die ersten Regenwasserauffangbehälter her. Seither hat die Unternehmensgruppe GRAF – heute als europaweiter Marktführer bekannt – den Anspruch, für die Umwelt nutzbringende Produkte aus Kunststoffen zu entwickeln, zu produzieren und zu vertreiben. Diese Produktlinien umfassen sowohl den Bereich der Wasserspeicherung und Trinkwassereinsparung, den Gewässer- und Hochwasserschutz in Form von hoch innovativen und großvolumigen Wasserrückhalte- und Versickerungssystemen sowie Kleinkläranlagen als auch verschiedenste Gartenhelfer wie beispielsweise Komposter, Hochbeete etc.

Die Besonderheit der Unternehmensgruppe GRAF liegt im ganzheitlich umweltbewussten Unternehmenskonzept. Das bedeutet, dass die von GRAF gefertigten Produkte zu 80 % aus umweltschonendem Kunststoffzyklat und mittels energetisch hoch effizienter Formgebungsprozesse hergestellt werden. Darüber hinaus lassen sich alle GRAF-Kunststoffprodukte zu 100 % recyceln.

Die Unternehmensgruppe verfügt über eine Vielzahl selbst entwickelter Verfahren und gemeinsam mit spezialisierten Maschinenbauern entwickelten Hochleistungsanlagen, z. B. eine der derzeit größten Spritzgussanlagen der Welt.

Zusätzlich verfügt die GRAF-Gruppe über eine im Hause integrierte Engineering-Abteilung. Für die Entwicklung umweltgerechter und moderner Produkte arbeiten die Ingenieure dabei eng mit den Recyclingspezialisten zusammen. Dadurch können die Rezepturen des Recyclingmaterials sowie die Konstruktionen der Bauteile individuell und exakt aufeinander abgestimmt werden.

Der Umweltgedanke ist zentraler Kern des wirtschaftlichen Modells der Unternehmensgruppe GRAF. Mit diesem Konzept ist das Unternehmen wirtschaftlich außerordentlich erfolgreich und konnte in den letzten 15 Jahren Umsatz und Mitarbeiterzahl mehr als verdoppeln und krisenunabhängig konstante Wachstumsraten von ca. 10 % per anno erreichen.

Die GRAF-Gruppe erarbeitete sich die Technologieführerschaft im Bereich ihrer Produkte für das Wassermanagement sowie Verfahren zur Aufbereitung und Verarbeitung von Sekundärrohstoffen.

So konnte durch die Inbetriebnahme des Kompetenzzentrums Rohstoffe der Kreis eines nachhaltigen Unternehmensmodells geschlossen werden. Das bedeutet, dass bei GRAF der Umweltschutz bereits bei der Herstellung des Rohstoffs beginnt. Das Kunststoffzyklus wird aus Post-Consumer-Kunststoffabfällen (Produktabfälle nach dem Gebrauch) hergestellt: Gebrauchte Kunststoffe finden ihren Einsatz in neuen und langlebigen Produkten. Dadurch werden natürliche Ressourcen wie Gas und Erdöl geschont. Minderwertige Kunststoffabfälle fließen nicht in die Verbrennung, sondern werden in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt. Neue nachhaltige Produkte entstehen und CO<sub>2</sub> wird eingespart.

Im Bereich des integrierten Kunststoffrecyclings und der Kreislaufwirtschaft ist GRAF als deutsches mittelständisches Unternehmen heute einer der weltweiten Technologieführer. Bereits heute deckt GRAF ca. 70 % seines Rohstoffbedarfs aus Recyclingkunststoffen mit weiter steigender Tendenz.

Für das Unternehmen stehen darüber hinaus unter anderem auch Aspekte der Vermeidung von Lärm- und Staubemissionen zum Schutz von Mitarbeitern und Umwelt im Fokus.

## **1.2. Ausgangssituation**

### Ausgangssituation bezogen auf die Rohstoffverfügbarkeit

Zum Zeitpunkt der Planung und zu Beginn des Vorhabens in den Jahren 2015 und 2016 stellte sich die Ausgangssituation wie folgt dar:

Im Kontext einer weltwirtschaftlich stetig steigenden Nachfrage nach den Kunststoffen Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) sowie unter Betrachtung aus Umweltsicht wurde bereits seit längerem eine 100%ige Verwertung möglichst aller Kunststoffabfälle angestrebt. Das bundesdeutsche Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) gab vor, bei der Ausgestaltung der Verwertung Maßnahmen anzustreben, die den Schutz von Mensch und Umwelt sowie eine möglichst hochwertige Verwertung am besten gewährleisten. Diese Vorgabe ist weiterhin gültig.

Bereits damals fanden Überlegungen zur Einführung einer Kunststoffsteuer für nicht recycelte Kunststoffabfälle auf EU-Ebene statt. Auf einem Sondergipfel des Europäischen Rates im Juli 2020 wurde schließlich eine Abgabe auf nicht recycelte Verpackungsabfälle aus Kunststoff mit einem Abrufsatz von 0,80 € pro Kilogramm beschlossen. Auch auf nationaler Ebene werden

konkrete Maßnahmen diskutiert und ergriffen. So bestehen in Italien Überlegungen, Steuern auf Verpackungen zu erheben. Auch die britische Regierung plant für 2022 eine Steuer auf Kunststoffverpackungen. Die anfängliche Besteuerung soll sich für Verpackungen, deren Rezyklat-Anteil weniger als 30 % ausmacht, auf 200 Pfund pro Tonne belaufen [1]. Als Konsequenz ermöglicht dies ggf. die Erschließung und Sicherung weiterer Rohstoffquellen für GRAF.

Viele Recycling-Firmen werben damit, dass sie Abfälle mit hohem Kunststoffanteil, sogenannte Post-Consumer-Abfälle, nicht als Abfall, sondern als Ressource betrachten und werkstofflich verwerten. Zahlreiche Recyclingprozesse sind jedoch bis heute weder in der Lage noch darauf ausgerichtet, die Qualität und Verarbeitbarkeit des Ursprungspolymers (sogenanntes Primärgranulat, im Folgenden synonym mit Primärrohstoff verwendet) zu erreichen. Diese Art des Recyclings wird als Downcycling bezeichnet und nimmt eine zunehmende Degradation der Eigenschaften des aus dem Recyclingprozess hervorgehenden Sekundärrohstoffes in Kauf. Am Ende des Lebenszyklus eines Produktes, das aus Downcycling-Rezyklaten hergestellt worden ist, steht häufig nur noch die energetische Verwertung mit dem Ziel der Energiegewinnung und der gleichzeitigen Reduzierung zu beseitigender Abfälle. Downcycling umfasst beispielsweise die Herstellung qualitativ minderwertiger Rezyklate aus vermischten Kunststoffen. Derartige Rezyklate weisen häufig eine stark erschwerte oder überhaupt keine weitere Recyclingfähigkeit mehr auf, sodass der Lebenszyklus des Materials mit dessen Verbrennung / thermischer Verwertung endet. Somit kann das angestrebte Ziel einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung, möglichst unter Erreichung des Eigenschaftsniveaus von Primärgranulat, und der langkettigen Kaskadennutzung in der Kreislaufwirtschaft durch Downcycling nicht erreicht werden. Um Primärgranulat zu substituieren, bedarf es somit einer prozesstechnisch erheblich herausfordernden Recycling-Strategie, dem Upcycling.

Nur das Upcycling von PE- und PP-Abfällen erlaubt durch das Erreichen hoher Sortenreinheiten bei gleichzeitig gezielter Modifikation der Materialeigenschaften die Erzielung eines Eigenschaftsniveaus von Primärgranulaten und damit eine dauerhaft wiederholbare Rückführbarkeit und somit verlängerte Nutzungskaskade für die umweltschonende Kreislaufwirtschaft. Es bietet damit die maximale Ressourceneffizienz gegenüber anderen Verwertungsformen wie der werkstofflichen Verwertung zu Mischkunststoffen, der rohstofflichen (Definition nach [2]<sup>1</sup>) und der thermischen Verwertung. Bereits zu Projektbeginn wurden nahezu

---

<sup>1</sup> Erläuterung der Verwertungsarten (nach [2])

die gesamten in Deutschland angefallenen Kunststoffabfälle aus dem Post-Consumer-Bereich verwertet. Jedoch war der Anteil der hochwertigen werkstofflichen Verwertung als sortenreiner Kunststoff mit nur ca. 17 % im Bereich HDPE und 13 % im Bereich LDPE (siehe Tabelle 1) sehr gering. Somit bestand dringender Bedarf nach einer Erhöhung des Anteils der werkstofflichen Verwertung. Darüber hinaus existierten noch weitere Abfall- bzw. Wertstoffquellen. Diese waren allerdings weniger überwacht und reglementiert, was eine Wiederverwertung mittels hochwertigen Recyclings zusätzlich erschwerte. Dazu gehört bspw. die bei der Herstellung hochwertiger Ersatzbrennstoffe anfallenden Reststoffströme mit hohem Polyolefinanteil.

GRAF erwartete und erwartet weiterhin steigende Mengen an Kunststoffabfällen zur werkstofflichen Verwertung, da die Müllverbrennungskosten in der Vergangenheit bereits auf bis zu 100 bis 180 €/t im Jahr 2020 gestiegen sind. Damit lohnt sich das Aussortieren der Hartkunststoffe zunehmend.

**Tabelle 1:** Verwertete Kunststoffabfälle (Post-Consumer- und Produktionsabfälle), Deutschland 2007 [3]

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

Neben den wichtigen Umweltaspekten war eine Erhöhung des Anteils sortenreiner Sekundärrohstoffe mit Eigenschaftsniveau von Primärware (PE- und PP-Rezyklate) zu Projektbeginn 2015/2016 auch aus strategischer Sicht der kunststoffverarbeitenden Industrie hinsichtlich einer langfristigen Verfügbarkeit und Liefersicherheit dringend geboten.

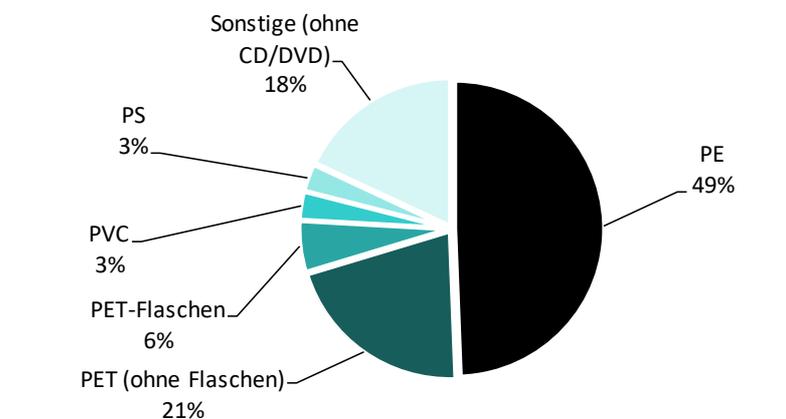
#### Stoffliche, werkstoffliche und rohstoffliche Verwertung

Recycling (stoffliche Verwertung)	Das Recycling (auch „stoffliche Verwertung“) unterteilt sich in die werkstoffliche und rohstoffliche Verwertung.
Werkstoffliche Verwertung	Verarbeitung von spezifizierten Kunststoffabfällen zu Sekundärrohstoffen oder Produkten ohne signifikante Veränderung der chemischen Struktur des Materials.
Rohstoffliche Verwertung	Umwandlung kunststoffhaltiger Abfallfraktionen zu Monomeren oder zur Herstellung neuer Materialien durch Änderung der chemischen Struktur der betreffenden Abfallfraktionen durch Cracking, Vergasung oder Depolymerisation, mit Ausnahme von Energierückgewinnung und Verbrennung.

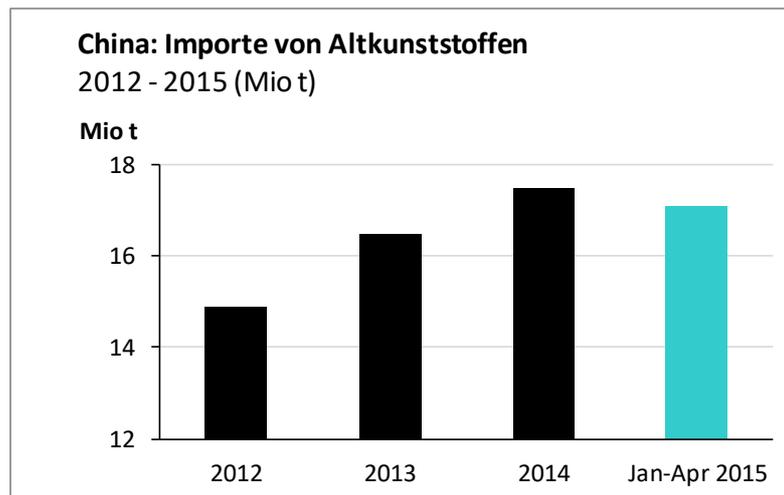
Europaweit herrschte im Jahr 2015 eine zunehmend spürbare Ressourcenknappheit im Bereich der kunststoffverarbeitenden Industrie, insbesondere auch im Bereich von PE- und PP-Werkstoffen. So stiegen die Importe Chinas von Altkunststoffen (insbesondere Polyethylene, siehe Abbildung 1) von 2012 bis 2015 kontinuierlich an. Von rund 14,9 Mio. t im Jahr 2012 erhöhten sich die Einfuhren Chinas auf bereits 17,2 Mio. t in den ersten vier Monaten des Jahres 2015. Die zu erwartende Verdrei- bis Vervielfachung war durch offizielle chinesische Angaben (siehe Abbildung 2) belegt. Post-Consumer-Abfälle minderwertiger Qualitäten verblieben hingegen zunehmend in Deutschland und Europa und stehen dort bis heute zu niedrigen Preisen zur Verfügung. Die Verknappung verfügbarer Recyclingrohstoffe betrifft insbesondere qualitativ hochwertige – d. h. sortenreine und verschmutzungsarme – Wertstoffströme, die verhältnismäßig einfach einem hochwertigen werkstofflichen Recycling zugeführt werden können. Die zunehmende Konkurrenz um bezugsfähige Wertstoffströme mit Eignung für das Upcycling stellte eine stetig wachsende Problematik dar, insbesondere unter Betrachtung des jährlichen Weltwirtschaftswachstums und des „Nachholpotenzials“ der Entwicklungs- und Schwellenländer. Ebenso von Verknappung betroffen waren natürlich auch die Primärgranulate.

#### China: Importe von Altkunststoffen

Januar - April 2015, nach Fraktionen (Gesamt: 17,2 Mio t)



**Abbildung 1:** China – Importe von Altkunststoffen, Januar – April 2015 [4]



**Abbildung 2:** China – Importe von Altkunststoffen, 2012 – 2015 [4]

Die beschriebene Verknappung hochwertiger, einem werkstofflichen Recycling zugänglicher Altkunststoffe und von Primärgranulaten war von zunehmender Kritikalität für die europäische kunststoffverarbeitende Industrie und ist es aus strategischer Sicht auch weiterhin. Teilweise mussten in der Vergangenheit aufgrund von Rohstoffmangel und Lieferengpässen der Primärgranulathersteller komplette Produktionslinien zeitweise angehalten werden; mit allen daraus entstehenden Folgen für Wertschöpfung und Arbeitsplätze. Dazu seien folgende Zitate aus dem Jahr 2015 genannt, welche die damalige hohe Bedeutung der Erschließung neuer Rohstoffquellen für Europa zeigen, die aus heutiger Sicht weiterhin gegeben ist:

1. <http://www.haustechnikdialog.de/News/16893/Hoehere-Gewalt-und-schwacher-Euro-Lieferengpass-und-Preiserhoehung-fuer-Kunststoffrohre> [5]

„Ungewöhnlich viele Kunststoffproduzenten mussten im ersten Quartal dieses Jahres aufgrund technischer Probleme oder höherer Gewalt ihre Produktion vor allem von Polyethylen, aber auch die von Polypropylen und PVC massiv drosseln. Zudem verleitet der schwache Euro dazu, die Kunststoffbestände in den lukrativeren Dollarraum umzuleiten. Das führt in Deutschland zu einer Verknappung des Angebotes an PVC-, PP- und PE-Rohren – also auch beim Material für Trinkwasser- und Flächenheizsysteme – und zu mittelfristig nicht mehr kalkulierbaren Preissteigerungen. Als mögliche Ursachen dieser turbulenten Entwicklung lassen sich ausmachen: Eine ganze Reihe von Polyethylen-Herstellern in Europa und Fernost haben Force Majeure gemeldet, das heißt, teils wegen höherer Gewalt, teils aufgrund technischer Probleme wurden zahlreiche Cracker abgestellt – ein in dieser Häufung ungewöhnlicher Vorgang, der zur Verknappung und zu Lieferausfällen für die Granulathersteller führt. Zudem verleitet der schwache Euro die Rohstoffproduzenten dazu, die Warenströme in den lukrativeren Dollarraum umzuleiten, was dort die Preise fallen lässt.“

2. <http://www.plastverarbeiter.de/50959/rohstoffverknappungen-und-preisexplosionen-gefaehrden-aufschwung/> [6]

„Neben dem Export großer Mengen von Kunststoffen in außereuropäische Regionen wie China, Afrika oder Mittel- und Südamerika liegt der wesentliche Grund für die Rohstoffverknappung in den Force-Majeure-Meldungen, also steigende Kosten verursacht durch höhere Gewalt. In den letzten Wochen meldeten Rohstoffproduzenten in ganz Europa Forces Majeures, bisher aber ohne Details zu liefern. Dadurch erschwert es, den Hintergrund dieser Meldungen zu überprüfen. Die aktuelle Rohstoffverknappung und Preisexplosion bescheren den Kunststoffverpackungsherstellern Probleme. Da in dieser Branche der Rohstoffkostenanteil bis zu 70 Prozent beträgt, schlagen sich die Preise spürbar in den Margen der Hersteller nieder – falls sie höhere Verkaufspreise nicht durchsetzen können. Das Vorliegen eines Force Majeures setzt höhere Gewalt voraus, also ein Ereignis, das von außen kommt und in keinem betrieblichen Zusammenhang steht. Also besonders schwere Unwetter oder Sabotage, aber auch Produktionsstörungen, die der Hersteller weder vorhersehen noch durch Vorsorge abwenden kann. Bloße Störfälle oder technische Probleme reichen hierfür nicht aus. Vielmehr liegen diese in der Risikosphäre des Rohstofflieferanten.“

3. <http://www.euwid-kunststoff.de/news/einzelansicht/Artikel/kunststoffverpackungsmarkt-im-april-von-sorgen-ueber-rohstoffverknappung-gepraegt.html> [7]

„Kunststoffverpackungsmarkt im April von Sorgen über Rohstoffverknappung geprägt. Das Thema, welches den Herstellern von Kunststoffverpackungen zurzeit Kopfzerbrechen bereitet, ist die aktuelle Rohstoffknappheit und die dadurch bedingte massive Steigerung der Kunststoffpreise. Gerade die mittelständischen Verpackungshersteller sehen sich durch die derzeit schlechte Verfügbarkeit, verbunden mit der Explosion der Preise, vor massive Margenverluste gestellt. Während einige EUWID-Gesprächspartner „noch versorgt“ sind, gerne jedoch etwas mehr bestellen würden, sehen sich andere Verpackungshersteller vor die Herausforderung gestellt, das verfügbare Material auf die Kunden zu verteilen, so ein Marktteilnehmer. Gerade bei HDPE-Fassmaterial kommen zwei Produktionsausfälle zum Tragen, so dass sich Einkäufer nach alternativen Bezugsquellen umsehen und entsprechend höhere Preise einkalkulieren müssen.“

Neben dem reinen Umweltaspekt bestand daher zu Projektstart auch aus Sicht der Verfügbarkeit und der preislichen Kalkulationssicherheit dringender Handlungsbedarf zur Etablierung innovativer, hochmoderner und technisch fortschrittlicher Prozessketten, Produktionslinien und Recyclingwerke zur Transformation "schwieriger", bislang nicht wirtschaftlich upcyclebarer PE- und PP-Wertstoffströme in Primärgranulatsubstitute hoher Sortenreinheit.

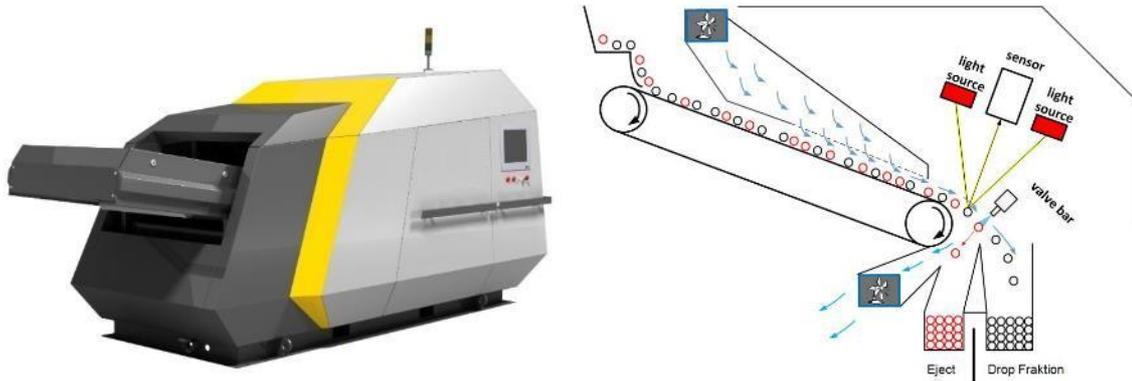
### Technologische Ausgangssituation:

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns ließen sich schwarz eingefärbte/rußgeschwärzte Kunststoffe mit konventionellen NIR-Trenntechnologien (Erkennung mittels Strahlung im nahen Infrarotbereich) nicht erkennen (sogenanntes „**Carbon-black Problem**“). Dies stellte für das hochwertige werkstoffliche Recycling von gemischten PE- und PP-Abfallströmen eine hoch evidente Problematik dar. Der geringe Anteil von PE- und PP-Kunststoffen, die durch Upcycling als Substitutionsgut für Primärgranulate wieder in die kreislaufwirtschaftliche Nutzungskaskade der kunststoffverarbeitenden Industrie zurückgespeist werden können, ist bis heute nicht zuletzt auf diese Problematik (schwarz eingefärbter Fraktionen) zurückzuführen. Der Stand der Technik bzgl. üblicher NIR-Sortiertechnik zu Projektbeginn ist nachfolgend dargestellt:

Die NIR-Sortiertechnik stellte bis dato den aktuellen Stand der Technik bei der Sortierung von Kunststoff dar. Prinzipiell lassen sich damit verschiedenste Kunststoffsorten trennen. Bei diesem Verfahren wird das Material auf einem schnell laufenden Förderband durch ein Sensorsystem erfasst, wobei die von dem Objekt reflektierte Strahlung spektral zerlegt und analysiert wird. Die in Abhängigkeit der Molekülstruktur entstehenden charakteristischen Absorptionsspektren lassen sich den Kunststoffen als Fingerprint zuordnen. Das Verfahren stößt jedoch bei schwarzen Kunststoffen an seine Grenzen. Die starke Absorption von Ruß sorgt dafür, dass eine Klassifikation unmöglich wird. Im Verpackungsbereich ist die dort etablierte NIR-Sortiertechnik gut einsetzbar, da der Anteil schwarzer Objekte unter 5 % liegt. Gewerbeabfälle mit hohem Kunststoffanteil sind aufgrund ihrer Zusammensetzung die substanziiell werthaltigere Fraktion. So tritt dort die beim Verpackungsabfall bekannte Problematik einer Geruchskontamination, die sich bis in die Regranulate fortpflanzt, i. Allg. nicht auf. Problematisch ist bei den Gewerbeabfällen aber der etwa 10-fach höhere Anteil schwarzer Kunststoffe. Dieser führt dazu, dass ein großer Anteil des Mahlgutes in minderwertigen vermischten Fraktionen anfällt.

Alternative Trennverfahren wie die Dichtentrennung bieten die Möglichkeit, zumindest teilweise verwertbare Fraktionen zu erzeugen, die jedoch keinen adäquaten Neuwereersatz darstellen. Um das wirtschaftliche und ökologische Potenzial der Verwertung derartiger Hartkunststoffabfälle zu nutzen, ist zwingend eine stoffliche Sortierung der schwarzen Kunststoffe erforderlich.

Für das Demonstrationswerk wurden neuartige Sortieranlagen, die auf **MIR-Spektroskopie** (mittlerer Infrarotbereich) basieren, angeschafft. Der ausgewählte Anlagenlieferant hat seine Kernkompetenz im Bereich der Sortiertechnik für Kunststoffe über mehr als 20 Jahre lang aufgebaut. Auch dabei spielen spektroskopische Messverfahren die dominierende Rolle. Die vom Lieferanten entwickelten Hyperspectral-Imaging-Systeme bestimmen heute den höchsten Stand der Technik. Mit der Entwicklung und Produkteinführung des BlackEye ist es erstmalig gelungen, die MIR-Spektroskopie als neue führende Technologie für die Sortierung von Kunststoffen nutzbar zu machen. Das Prinzip ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3:** Sortiermaschine (links) und Funktionsprinzip (rechts)

Mit der Einführung dieser Sortiermaschinen war es erstmalig möglich, Kunststoffe unabhängig von ihrer Farbe nach ihrer Polymerklasse, wie PE, PP, PVC und Styrolen, zu trennen. Die Möglichkeit der Sortierung, einschließlich schwarzer Kunststoffe, stellt einen Durchbruch auf dem Weg zu einer profitablen und ressourcenschonenden Circular Economy dar. **Der erstmalige großtechnische Einsatz erfolgte im Zuge des vorliegenden Projektes in der Anlage der Graf Polymers GmbH.** Die MIR-Spektralkameras bauen auf Systemen auf, die ursprünglich aus dem militärischen Bereich stammen. Neben Exportbeschränkungen stellen vor allem relativ hohe Kosten der Systeme bei eingeschränkter Lebensdauer eine Einschränkung dar. Die Kosten der Sensorsysteme sind für die Sortierkosten nicht zu vernachlässigen. Um die spezifischen Sortierkosten/Mahlgutkosten zu reduzieren, finden beim Anlagenlieferanten weiterhin regelmäßige Weiterentwicklungen der Technik statt, die u. a. auf den Erfahrungen aus dem vorliegenden Demonstrationsvorhaben basieren.

Das durchgeführte Vorhaben basierte auf den umfangreichen Erfahrungen der kunststoffverarbeitenden Unternehmensgruppe GRAF, die mittels mehrerer gängiger Formgebungsverfahren (Spritzguss, Spritzprägen, Blasverfahren, Rotationsverfahren etc.) sehr langlebige Kunststoffprodukte (Garantiezeit 20 bis 25 Jahre) herstellt. Bereits vor 2015 hatte GRAF aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus vertiefte Überlegungen und Entwicklungsarbeiten zur Aufbereitung und zum Einsatz von Sekundärrohstoffen im unternehmenseigenen Produktbereich durchgeführt.

Im durchgeführten Vorzeige-/Demonstrationsvorhaben sollte weltweit erstmals die vollwertige werkstoffliche Verwertung mehrerer "schwieriger", bislang nicht wirtschaftlich upcyclebarer PE- und PP-Wertstoffströme (hohe Schwarzanteile) in Primärgranulatsubstitute hoher Sortenreinheit großtechnisch in einem Kunststoff-Recyclingwerk umgesetzt und demonstriert werden. Aus der erfolgreichen Umsetzung der neuartigen und technisch fortschrittlichen Prozesskette in Form des neuen und einzigartigen Kunststoff-Recyclingwerkes sollte eine hohe Hebelwirkung resultieren. Diese sollte in Form eines direkten, erheblichen Zugewinns für Mensch und Umwelt durch

Energie- und Abfalleinsparung entstehen. Für die Gesamtwirtschaft, insbesondere die kunststoffverarbeitende Industrie, sollte durch die Entstehung neuer Recyclingwerke die Rohstoffsituation in Deutschland, Europa und weltweit mittelfristig entspannt werden können.

**Das durchgeführte großtechnische Demonstrationsvorhaben bestand in einem neuen hoch innovativen Kunststoff-Recyclingwerk. Die Umsetzung basierte auf dem innerhalb der Unternehmensgruppe GRAF aufgebauten Know-how in den Bereichen Prozesstechnik zur Aufbereitung polymerer Wertstoffströme zu qualitativ hochwertigen Sekundärrohstoffen sowie der Verarbeitung von Sekundärrohstoffen zu hoch beanspruchbaren und langlebigen Kunststoffprodukten.** Die für das Projekt relevantesten Vorarbeiten von GRAF sind nachfolgend aufgelistet:

- 1) Misch- und Homogenisierungstechnik: Diverse Versuche zur Mischwirkung und Rezeptierfähigkeit mit unterschiedlichster Silotechnik und Mischungskaskaden wurden durchgeführt. Die Misch- und Homogenisierungsvorgänge finden im Prozessablauf (vom Eingang der Stoffströme über die Sortierung und Compoundierung bis hin zur Lagerung in den großvolumigen Mischsilos) wiederkehrend statt, was eine Besonderheit darstellt. In Kombination mit der gezielten und variablen Rezeptierung sowie den weiteren Bestandteilen der angestrebten Prozesskette erlaubt dies in Verbindung mit den weiteren Aufbereitungsschritten weltweit erstmals die Herstellung von PP- und PE-Kunststoff-Rezyklaten mit Eigenschaften von Neuware.
- 2) Reinigungstechnik: Diverse Techniken zur Entstaubung, Trocknung, Siebung und Klassifizierung wurden geprüft und hinsichtlich Aneinanderreihung und Wirksamkeit analysiert. Diese Vorarbeiten sind von hoher Bedeutung, da Kornspektrum und Staubfreiheit die Hauptfaktoren für die optimale Nutzung der neuartigen optischen Trennverfahren bzw. Trennkette sind (Staub belegt die Sensoren, ungünstiges Kornspektrum führt zu Minderleistung im Durchsatz).
- 3) Trenntechnik: Versuche mit einer neuartigen Trenntechnik zur erstmaligen Erkennung und Unterscheidung schwarz eingefärbter Polymere wurden erfolgreich durchgeführt (Lösung des „Carbon-black-Problems“).
- 4) Compoundiertechnik, Filtertechnik, Unterwassergranulierung: Unterschiedliche Compoundieranlagen, Filter und Lieferanten wurden in Versuchen hinsichtlich Leistung und erreichbarer Eigenschaften der Compoundgranulate evaluiert. Weitere erfolgreich abgeschlossene Entwicklungsarbeiten dazu sind:
  - a) HDPE-Compoundierung unter Zusatz von MVR (Melt Volume Rate) Steuerungskomponenten und Additiven. Dabei wurde eine enorme Flexibilität erreichbarer Eigenschaften erzielt.

- b) PP-Compoundierung unter Zusatz von MVR-Steuerungskomponenten und Additiven. Auch für dieses Material wurde eine hohe Flexibilität erreichbarer Eigenschaften erzielt.
- 5) Erfolgreiche Testung von Formgebungsverfahren für die Sekundärwerkstoffe und damit Verifizierung der erzielten Rohstoffeigenschaften: Blasverfahren, Spritzguss, Plattenproduktion, Rohrextrusion.
- 6) Erfolgreicher Lebensdauernachweis an verschiedenen Strukturbauteilen (befahrbare Versickerungsmodule): Lebensdauernachweis über 50 Jahre in beschleunigten Alterungstests.
- 7) Besondere Brandschutztechniken aus dem Bereich Objektschutz: Diese wurden erfolgreich geprüft und verifiziert: Erforderlich war dies z. B. aufgrund der Strahlenquellen in Form von NIR- und MIR-Strahlern (nahes und mittleres Infrarot) mit hoher Wärmeabgabe in den Sortieranlagen.
- Hier besteht eine hohe Brandgefahr bzw. ein hohes Brandrisiko, da die Strahler, speziell bei den MIR-Anlagen, sehr viel Wärme abgeben. Das erhöhte Brandrisiko führte zur Notwendigkeit der Installation einer speziellen CO<sub>2</sub> Löscheinheit und hat in Kombination mit den hohen Brandlasten eines Kunststoffrecyclingbetriebes erheblichen Einfluss auf die Brandschutzversicherung hinsichtlich Kosten und Prüfung durch den Versicherungsgeber.
- 8) Identifizierung und Training einer Rohstoffquelle: Verifikation der dauerhaften Verfügbarkeit eines Wertstoffstroms aus dem Bereich „Ersatzbrennstoffherstellung“ mit geringen Folienanteilen und stabilem Anteil an Schwarzfraktion von 10 bis 20 %.
- Bei der Herstellung hochwertiger, qualitätsgesicherter Ersatzbrennstoffe zum Einsatz in Zementwerken werden bis heute vorrangig flächige, zweidimensionale Materialien/Polymere verarbeitet, da nur mit diesen ein optimaler Verbrennungsvorgang erreicht wird. Hartkunststoffanteile im Ersatzbrennstoff stören die Homogenität der Verbrennung und werden deshalb aussortiert. Diese aussortierten Hartkunststoffe fallen in großen Mengen an (ca. 5 bis 10 % pro Anlage), weisen Schwarzanteile von bis zu 40 % auf, sind stark verschmutzt und ließen sich zum Zeitpunkt des Projektbeginns nicht rentabel weiterverarbeiten. Sie wurden damals direkt einer thermischen Verwertung in der Müllverbrennung zugeführt. Die bei der Herstellung hochwertiger Ersatzbrennstoffe aus den aussortierten Hartkunststofffraktionen gewonnenen Polyolefine können im Demonstrationswerk nun erstmalig einem hochwertigen werkstofflichen Recycling zugeführt werden.
- 9) Fördertechnik: Es erfolgten diverse erfolgreiche Versuche im Technikumsmaßstab zur energiesparenden, verschleiß- und staubarmen Förderung von Materialströmen durch Kettenförderer im Gegensatz zur bislang üblichen Druckluftförderung.

Aufgrund der positiven Ergebnisse der im Vorfeld erfolgreich durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konnten die darin erarbeiteten Ergebnisse und verfolgten Einzelansätze logisch fortgeführt, erstmalig zu einer Gesamtprozesskette verknüpft und im vorliegenden Vorhaben großtechnisch demonstriert werden. Die für den Beginn des großtechnischen Demonstrationsvorhabens notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten waren zu Projektbeginn alle abgeschlossen.

Es standen mehrere Lieferanten für die erforderlichen Abfallströme bereit. Die Inputmengen waren in der beabsichtigten Größenordnung des geplanten Werkes bereits zu Projektbeginn für den Bedarfsfall zugesichert. Bei der Herstellung von Ersatzbrennstoffen fallen bei den Aufbereitungsanlagen, die eine Schwerfraktion zur Qualitätsverbesserung abscheiden, ca. 5 bis 10 % potenziell werkstofflich verwertbarer Hartkunststoffabfälle an. Durchschnittliche Anlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen haben einen Durchsatz von ca. 40.000 bis zu max. 100.000 t/a.

## 2. Vorhabenumsetzung

### 2.1. Ziel des Vorhabens

**Das Ziel des durchgeführten Investitionsvorhabens waren die Errichtung, Inbetriebnahme und Verifikation eines hochmodernen Kunststoff-Recyclingwerkes als großtechnische Demonstration**, in dem gemischte PP-PE-Wertstoffströme, die bisher aufgrund ihrer Eigenschaften (Schwarzanteil, Verschmutzung) keinem hochwertigen werkstofflichen Recycling zugänglich gemacht werden konnten, durch eine neuartige Prozesskette zu Sekundärgranulaten mit Eigenschaftsniveau von Primärgranulaten aufbereitet werden können. Geeignete Quellen der Inputströme sind dabei Gewerbeabfälle, kommunale Abfälle aus Wertstoffhöfen sowie verbleibende Hartkunststofffraktionen aus der Ersatzbrennstoffherstellung.

Der Ort der Investition, an dem das neue Demonstrationswerk errichtet worden ist, ist die Gemeinde Herbolzheim (PLZ 79336) im Bundesland Baden-Württemberg der Bundesrepublik Deutschland. An diesem neuen Standort ist im ländlichen Raum ein komplett neues, auf Hochtechnologie basierendes, industrielles Kunststoff-Recyclingwerk mit weltweit einmaligen Fähigkeiten entstanden.

Hier wurde ein Grundstück mit einer Fläche von 63.000 m<sup>2</sup> erworben. Geplant und realisiert wurde eine auf das anvisierte Rohstoffrecycling hin maßgeschneiderte Gebäudeinfrastruktur mit einer Produktionsfläche von ca. 23.000 m<sup>2</sup>. Die Gebäudeinfrastruktur wurde speziell auf die Bedürfnisse der neuartigen Prozesskette und Branchenspezifika des Kunststoffrecyclings ausgelegt. Dies beinhaltet eine feingliedrige Rasterung spezieller, hochwertiger Baumaterialien und Konstruktionsspezifika, z. B. einer nicht brennbaren Dachstruktur. Die Gebäudeinfrastruktur umfasst funktionelle Bestandteile der Gesamtprozesskette, wie liegende Misch- und Lagersilos zur Vermischung, Rezeptierung und Einspeisung der Rohstoffeingangsströme in die komplexe Gesamtprozesskette.

Das hochmoderne, innovative Kunststoff-Recyclingwerk umfasst sämtliche Infrastrukturen zur Durchführung der Prozesskette und verfügt, wie zu Projektbeginn geplant, in der Sortierung bei einer Fünftageweche in drei Schichten über eine Produktionskapazität von 30.000 t sortenreinem PE- bzw. PP-Sekundärgranulat (mit Eigenschaften von Primärware) pro Jahr. Diese Kapazität war aus wirtschaftlichen Gründen für die großtechnische Demonstration des neuartigen Verfahrens unabdingbar. Bei einer Siebentageweche in fünf Schichten kann die Kapazität des Demonstrationswerkes auf bis zu 50.000 t an sortenreinem Recyclinggranulat pro Jahr erhöht werden. Die Inbetriebnahme des großtechnischen Demonstrationswerkes führte wie vorgesehen zur Neuschaffung und Besetzung von Arbeitsplätzen in Herbolzheim.

Zu berücksichtigen ist auch die angezielte Wirkung der im Vorhaben geschaffenen Recyclingkapazitäten hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Kunststoffherstellung. Die Herstellung von PE- und PP-Primärgranulaten aus Erdöl bringt CO<sub>2</sub>-Emissionen mit sich. Neben der Erdölförderung müssen alle Transportvorgänge und die erforderlichen einzelnen Verarbeitungsschritte des Erdöls bis zur Herstellung des Granulats berücksichtigt werden. Durch Substitution von Primärgranulaten durch Rezyklate können die in Tabelle 2 aufgelisteten Emissionsfaktoren berechnet werden.

**Tabelle 2:** Emissionsfaktoren für Kunststoffgranulate nach Kunststoffarten bzw. pro t Holz-/Betonersatz [8]

<i>Verwertung</i>	<i>EF in kg CO<sub>2</sub>-Äq/t Granulat</i>
<i>Polypropylen</i>	-1998
<i>Polyethylen</i>	-2050
<i>Polystyrol</i>	-3416
<i>PET</i>	-3321
<i>PVC</i>	-1897
<i>Holzersatz</i>	-41
<i>Betonersatz</i>	-265

Angezielt war die Erreichung einer sehr hohen Rezyklatereinheit, die eine 1:1 Substitution von Neuware bei der Herstellung von hochwertigen Kunststoffprodukten ermöglicht. Dieser Fortschritt konnte, wie geplant, durch die neue innovative Prozesskette erreicht werden. Diese erlaubt es, Schwankungen im Inputstrom über mehrstufige Homogenisierungsmöglichkeiten (Lagergassen, Silos nach der Sortierung, Silos vor dem Extruder, Tagessilos, große Lagersilos) zu glätten und damit gleichbleibend hochwertige Ausgangsqualitäten zu erzielen. Auf Basis dieser Zielstellung und der vorangehenden Betrachtungen des Umweltbundesamtes war es Ziel des Vorhabens, nach erfolgreicher Umsetzung bei der angestrebten Produktionskapazität des Demonstrationswerkes von 50.000 t pro Jahr im Vergleich zu Neuware ca. 100.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr direkt einzusparen.

Darüber hinaus war angezielt, dass die 50.000 t Primärgranulatersatz aufgrund der hohen erzielten Sortenreinheit von über 95 % und ihrem Eigenschaftsniveau von Primärware problemlos in die Kreislaufwirtschaft zurückgespeist werden können und dass sich die resultierende Nutzungskaskade erheblich – um mehrere Umläufe – verlängert. Die im Vorhaben realisierte Zielstellung stärkt die Kreislaufwirtschaft durch Verlängerung der Nutzungskaskaden der im neuen Pilotwerk hergestellten Kunststoffwerkstoffe als Sekundäreffekt dauerhaft. Als

Konsequenz entstehen weitere positive, aber nur schwer zu quantifizierende und zu belegende CO<sub>2</sub>-Einsparungen. Sie betragen im besten Fall eine Vervielfachung der erreichten Einsparung von 100.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr und Zyklus in der Kreislaufwirtschaft.

In Summe bewirkt das hier vorliegende Demonstrationsvorhaben ohne Berücksichtigung von Sekundäreffekten, wie zu Projektbeginn geplant, mittel- bis langfristig direkte erhebliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen von mindestens 100.000 t/a. Ebenfalls ermöglicht wurde die zu Projektbeginn angestrebte Schaffung einer signifikanten Anzahl neuer Arbeitsplätze in der neuen, hochtechnologiebasierten Wertschöpfungskette des Kunststoff-Vorzeigewerkes.

Zusätzlich zur Gesamtbetrachtung der positiven Umweltwirkung des Demonstrationswerkes in seiner Gesamtheit wurden durch moderne Anlagen und Komponenten, die den Stand der Technik in der Kunststoffbranche übertreffen, unter anderem folgende Zielstellungen zur Realisierung der gesetzten Ziele hinsichtlich Energie- und Wasserverbrauch sowie im Bereich sonstiger Emissionen verfolgt:

- In den Lastenheften der geplanten Anlagen wurde der zu Projektbeginn neueste Stand der Anlagentechnik hinsichtlich „Energie“ festgeschrieben. Entsprechend wurden, soweit möglich, Elektromotoren der Klasse IE4 eingesetzt.
- Umstellung von bisher üblicher pneumatischer Förderung der Rohstoffe auf eine rein mechanische Förderung: Es wurden die folgenden Einsparungen angezielt und ermöglicht:
  - Pneumatische Förderung mit ca. 6 kWh/t zu mechanischer Förderung mit ca. 1 kWh/t: Es resultiert bei ca. 50.000 t, die dreimal von einem Produktionsschritt in den nächsten gefördert werden (von Einlagerung über die Sortierung über das Compounding), eine Einsparung von ca. 750.000 kWh/a.
  - Geringere Lärmemission der mechanischen Förderung im Vergleich zur pneumatischen Förderung.
  - Erhebliche Minimierung der Staubbelastung durch mechanische Förderung.
- Installation energiesparender LED-Technik auf einer Fläche von 23.000 m<sup>2</sup>.
- Einspeisung von Regenwasser.
- Einführung eines nach ISO 50001 zertifizierten Energiemanagementsystems: Der Verbrauch wird mittels Monitoring-Software überwacht (Strom, Wasser, Druckluft und Gas).
- Automatisierung der Kühlanlage: Einsparung von Strom und Wasser durch gesteuerte Ein-/Ausschaltung.
- Installation elektrischer Kugelhähne in der Sortieranlage: Wenn die Anlage steht, schließen die Kugelhähne automatisch und es entsteht kein unnötiger Druckluftverbrauch. Dies führt zu einer Einsparung von Strom.

- Labor-Spritzgießtechnik für Probekörper unterschiedlichster Strukturbauteile.
- Verflüchtigung von Restfeuchte des Input-Materials in den großen liegenden Mischsilobatterien: Dies ermöglicht die Einsparung von Strom und Gas.

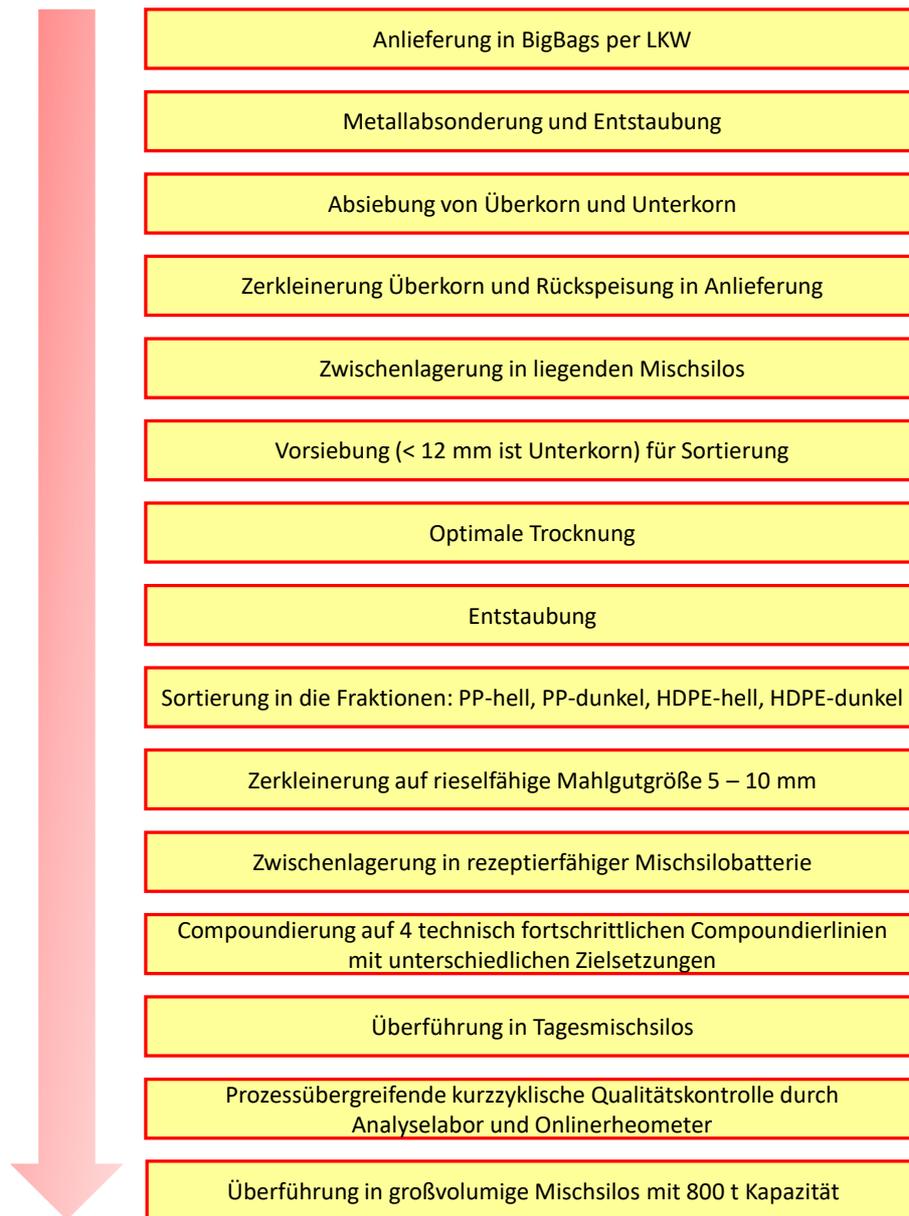
**Als weiterer positiver Effekt für die Bundesrepublik Deutschland ist zu sehen, dass allein mit dem Demonstrationswerk dieses Projektes der deutschen kunststoffverarbeitenden Industrie 50.000 t zusätzlicher, umwelt- und ressourcenschonende PE- und PP-Rezyklate mit Eigenschaftsniveau von Primärware zur Verfügung gestellt werden. Unter Berücksichtigung zu erwartender Hebelwirkungen kann die Rohstoffsituation der europäischen kunststoffverarbeitenden Industrie erheblich entspannt und darüber hinaus eine preisliche Entkopplung von den Primärgranulatpreisen mit höherer Planungssicherheit ermöglicht werden.**

## **2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)**

Die technische Funktionsweise des hier betrachteten innovativen großtechnischen Demonstrationsvorhabens basierte auf der Etablierung einer neuartigen Prozess- und Anlagenabfolge im Bereich des Upcyclings schwer prozessierbarer, gemischter PE- und PP-Abfälle als Eingangsmaterialien.

Die neu etablierte Prozesskette umfasst alle erforderlichen Schritte und Abläufe inklusive der zugehörigen und im Werk installierten Anlagentechnik. Der Ablauf beinhaltet die Anlieferung der gemischten Altkunststoffe, deren Aufbereitung zu sortenreinem Sekundärgranulat mit Eigenschaftsniveau von Primärkunststoffen samt sicherheitstechnischer Überwachung, eine prozessbegleitende Analytik sowie die Zwischenlagerung und den Abtransport der hergestellten Rezyklate. Die Prozesskette bzw. der technische Ablauf über den Materialflusses ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

Für den Materialtransport entlang der Prozesskette kommen für den Bereich Kunststoffrecycling neuartige Kettenförderer zum Einsatz. Diese sind energiesparend, verschleißarm und reduzieren Staub- sowie Lärmemissionen. Der Materialfluss endet in großvolumigen Hochsilos mit Mischfunktion, die eine Chargengröße von bis zu 800 t erlauben. Dies stellt gegenüber dem Stand der Technik zu Projektbeginn (Chargengröße üblicherweise 25 bis 50 t) eine erhebliche Erhöhung dar, und trägt dazu bei, Schwankungen der Materialeigenschaften zu reduzieren.



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung Materialfluss

Die mechanischen Eigenschaften von Hartkunststoffen werden vorwiegend durch zwei Effekte verschlechtert/geschädigt/degradiert. Erstens erfolgt eine Degradation des Materials durch den Bruch von Molekülketten, z. B. durch thermische Belastung oder UV-Einwirkung. Die zweite Ursache für eine Degradation sind Vermischungsschäden, beispielsweise durch zu starke Vermischung (> 5 %) der nicht kompatiblen Polyolefine PP und PE.

Durch eine geeignete Parametrierung der Compoundlinie mit nicht zu langer Verweilzeit der Polymerschmelze im Extruder kann der thermische Abbau der Polymere vernachlässigbar klein gehalten werden. Vermischungsschäden entstehen bei einer zu starken Kontamination > 5 % von PP mit PE oder umgekehrt jedoch zwangsläufig und können nur durch die Sortenreinheit des Eingangsmaterials in die Compoundlinie reduziert werden. Genau diese Fähigkeit weisen

übliche Recyclingwerke bei einer Verarbeitung der anvisierten Rohstoffquellen nicht auf. Üblicherweise sind Vermischungsschäden von 10 bis 20 % normal und werden toleriert. Dies führt zu einer geringen Rohstoffqualität, die sich nur noch für die Herstellung einfacher, minderwertiger Bauteile eignet. Das neue Demonstrationswerk von GRAF verfügt durch die Einzigartigkeit der Prozessabfolge und der neu installierten Anlagentechnik weltweit erstmals über die Fähigkeit, Vermischungsschäden zu vermeiden.

Diese besondere Stärke des neuen Demonstrationswerkes besteht in:

- Erkennung und Sortierung von PP und PE – sowohl bunt als auch schwarz eingefärbt
- Einstellbarkeit der „Trennschärfe“, z. B. bei 95 %: Damit wird eine Sortenreinheit > 95 % systemseitig akzeptiert, eine Sortenreinheit < 95 % dagegen nicht. Beliebige andere Schwellenwerte sind möglich.
- Rezeptierbarkeit / Homogenisierung des Inputstromes in die Compoundlinie durch:
  - Neuartige „liegende“ Wareneingangssilos, die es erstmals erlauben, in der Batterie Mengen von 2.000 bis zu 3.000 t einzulagern. Diese Siloart wurde im neuen Demonstrationswerk erstmals auf eine Höhe von 5 m erweitert; darüber hinaus wurde im Demonstrationswerk die weltweit erste „liegende“ Silomischbatterie eingesetzt. Diese erlaubt durch gezielte Entnahme aus verschiedenen Silos bereits eine Vermischung der eingelagerten Kunststoffabfälle (Eingangsmaterialien) zur Aufgabe in die Reinigungs- und Sortierlinie. Somit können homogenisierte Qualitäten des Zwischenproduktes erzeugt werden, die in der den Compoundlinien vorgeschalteten zweiten Silomischbatterie zwischengelagert werden.
  - Zwischengeschaltete Silomischbatterie: Diese erlaubt eine zweite Rezeptierung/ Homogenisierung für jede Compoundlinie.
- Mischvorgänge an acht Stellen im Prozess (liegende Wareneingangssilos, Sortiertechnik, Mühlen, Silomischbatterie, Compoundierung, Tagesmischsilos, großvolumige Lagerhochsilos, Verladesilos).
- Erreichbarkeit von 800 t Rezyklat-Chargen gleicher Qualität (Stand der Technik im Recyclingbereich sind 25 – 50 t Chargen).

Die weitgehend maximierte Rezeptier- und Homogenisierungsfähigkeit des Demonstrationswerkes ist ein technisch neuer Ansatz. Er bietet neben der reinen Vermeidung einer Materialdegradation durch Vermischungsschäden auch die Möglichkeit, Kunststoffabfälle (Eingangsmaterialien) mit starker Vorschädigung durch Rezeptierung und Vermischung mit relativ sortenreinen Fraktionen wieder aufzuwerten (quasi zu „reparieren“ oder zu „heilen“).

Im Anschluss an die Sortierung und Homogenisierung erfolgt eine Verbesserung der weitgehend sortenreinen Sekundärkunststoffe mit Additiven. Dies dient der Verhinderung von

Degradationseffekten und stellt sicher, dass die Eigenschaften für einen Zeitraum von 50 Jahren definierbar sind.

### 2.3. Umsetzung des Vorhabens

#### Begleitung und Überwachung des Gebäudebaus:

Im August 2017 fand die Grundsteinlegung des Werksgebäudes im Beisein der parlamentarischen Staatssekretärin des Bundesumweltministeriums, Frau Rita Schwarzelühr-Sutter sowie Vertretern von Land und Gemeinde statt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Werksgelände zu unterschiedlichen Zeitpunkten und Bebauungsstadien.



**Abbildung 5:** Baubeginn im Juni 2017 (oben links), offizielle Grundsteinlegung im August 2017 (oben rechts), Zwischenstand des Gebäudebaus im September 2017 (Mitte links), Frontansicht des Gebäudes im März 2018 (Mitte rechts), Übersichtsaufnahmen des Gebäudekomplexes aus unterschiedlichen Winkeln (unten links, unten rechts)

Der Gebäudebau wurde im Jahr 2018 erfolgreich abgeschlossen. Es fand eine permanente Überwachung des Gebäudebaus aus Sicht der später zu installierenden Anlageninfrastruktur statt. Notwendige Modifikationen, die erforderlich waren, um die gesamte Prozesskette in Betrieb zu nehmen, wurden nach Bauende projektbegleitend durchgeführt.

Nachfolgend ist die Umsetzung des Vorhabens entlang der in Kapitel 2.2 dargestellten Prozessabfolge erläutert.

**Wareneingang / BigBag-Anlieferung:**

Die Anlieferung der Ware (gewaschene und vorzerkleinerte PO Mixed Fraktion, Datenblatt siehe Abbildung 6) erfolgt per LKW in BigBags. Die angelieferte Ware wird einer Eingangskontrolle unterzogen und eingelagert.

<b>OPG</b> HOLDING GMBH		<b>PO Mixed</b>	
<b>Product data sheet</b>			
<b>PO Mixed</b>			
This specification is based on the values of previous deliveries.			
Mixed Polyolefins are a fraction of shredded, washed and dried rigid plastic scraps.			
Source of this specific fraction is 100% recycled post consumer polypropylene and polyethylene.			
<b>Properties</b>			
	<b>Test Method</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
<b>Polypropylene proportion</b>	optical analysis	%	≥ 68
<b>Polyethylene proportion</b>	optical analysis	%	≤ 30
<b>Proportion of other polymers and contaminations</b>	optical analysis	%	≤ 1,5
<b>PVC proportion</b>	optical analysis	%	< 0,4
<b>Black Polyolefins proportion</b>	optical analysis	%	≤ 20
<i>Melt Flow Rate (MFR) at 230°C / 2,16 kg (optional)</i>	ISO 1133	g/10 min	> 5
<i>approx. Density (optional)</i>	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	0,93
<b>Flakes diameter</b>		mm	15 - 25
<b>Humidity</b>	DIN 53723	%	< 0,5
<b>Further properties:</b>			
Delivered dry, dedusted (air classification Zig Zag Separator), no undersize flakes			
<b>Not accepted contents:</b>			
Films, pipes (crosslinked products)			
Products such as containers from the chemical industry, IBC's, toxic barrels, oil tanks used for the storage of dangerous liquids and hazardous contents in general			

Abbildung 6: Datenblatt PO Mixed

**Metallabsonderung:**

Da im Materialeingangsstrom immer wieder metallische Verunreinigungen auftraten und dies auch weiterhin zu erwarten ist, wurde eine Fremdstoff- und Metallabscheideeinrichtung (magnetisches Prinzip) in die Rohstoffannahme integriert. Diese reduziert die Brandgefahr durch Funkenschlag sowie die Gefahr von Schäden an Maschinen in der weiteren Verfahrenskette.



**Abbildung 7:** Metallabscheidevorrichtung in der Gesamtansicht (links) – das Material wird aus dem Bunker nach oben in den Metallabscheider (rechts) gefördert, metallische Verunreinigungen werden aussortiert und unten im BigBag gesammelt

**Absiebung von Überkorn und Unterkorn:**

Überkorn, größer 45 mm, und Unterkorn, kleiner 5 mm, stören die Prozesskette hinsichtlich Durchsatz und Sortierung. Aus diesem Grund werden sie in einem Rütteldeck abgesiebt. Das Überkorn wird anschließend zerkleinert und der Prozesskette wieder zugeführt. Das Unterkorn wird getrennt gesammelt und in kleinen Prozentsätzen in spezielle Rezyklatrezepturen zugefahren, aus denen untergeordnete Bauteile hergestellt werden. Nach der Absiebung erfolgt eine Zwischenlagerung der erhaltenen Fraktionen.



**Abbildung 8:** Nach der Fremdstoff- und Metallabscheidung gelangt das Material auf das Rütteldeck zur Absiebung von Über- und Unterkorn – Über- und Unterkorn werden getrennt gesammelt.

#### **Konditionierung für die Sortierung: Vorsiebung (< 12 mm ist Unterkorn)**

Zur Konditionierung des Materials für die Sortierung erfolgt eine Vorsiebung zur Extraktion aller Anteile mit Flockengröße kleiner 12 mm. Diese Fraktion wird als Unterkorn behandelt.



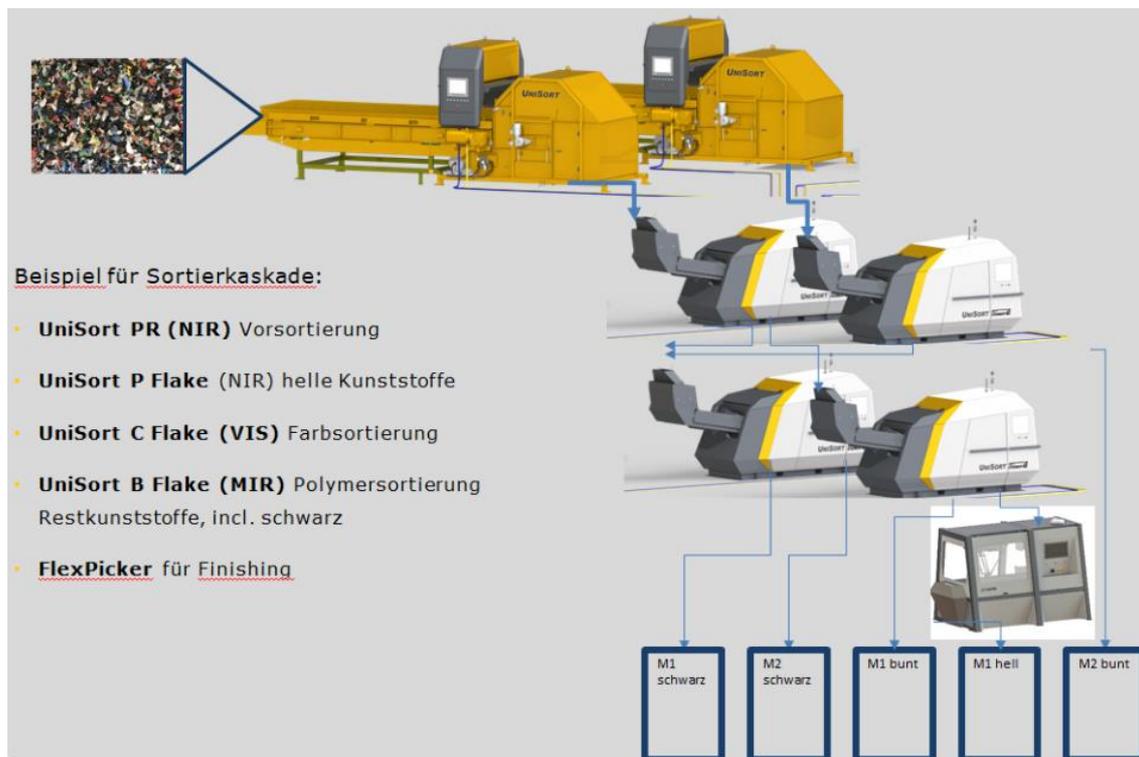
**Abbildung 9:** Anlage zur Vorsiebung

#### **Sortierung in die Fraktionen: PP-hell, PP-dunkel, HDPE-hell, HDPE-dunkel**

Die Sortierstraße bildet eine der technologischen Schlüsselkomponenten des neuen Rohstoffwerkes. Die bei der Firma GRAF Polymers GmbH in Herbolzheim errichtete Sortierlinie

ist für die Sortierung von Kunststoff-Mahlgut im Kornmaßbereich von 12 - 40 mm vorgesehen. Es ist erstmals möglich, Kunststoffgemische aus angereichertem PO mit einem hohen Anteil schwarzer Objekte nahezu vollständig in PE- und PP-Konzentrate zu trennen. Die Linie umfasst die Sortierung des Kunststoff-Mahlguts über acht Sortierstufen und einer zusätzlichen Recovery-Sortierstufe zur Erhöhung der Ausbeute. Kernstück der Sortierkaskade sind die neuen MIR-basierten Trennsysteme, welche auch die Sortierung rußgefärbter Kunststoffe, die für die etablierte Sortiertechnik auf Basis der Nah-Infrarot-Spektroskopie unsichtbar sind, in sortenreine Fraktionen PE und PP ermöglichen. Durch den Einsatz der MIR-Sortiertechnik ist die Aufbereitung von Kunststoffgemischen mit hohem Anteil schwarzer Objekte erstmals großtechnisch umsetzbar. Ein effizienter Aufbereitungsprozess erfordert eine optimale Abstimmung aller Maschinen und Ausrüstungen auf das Eingangsmaterial und vor allem auf das Zielprodukt.

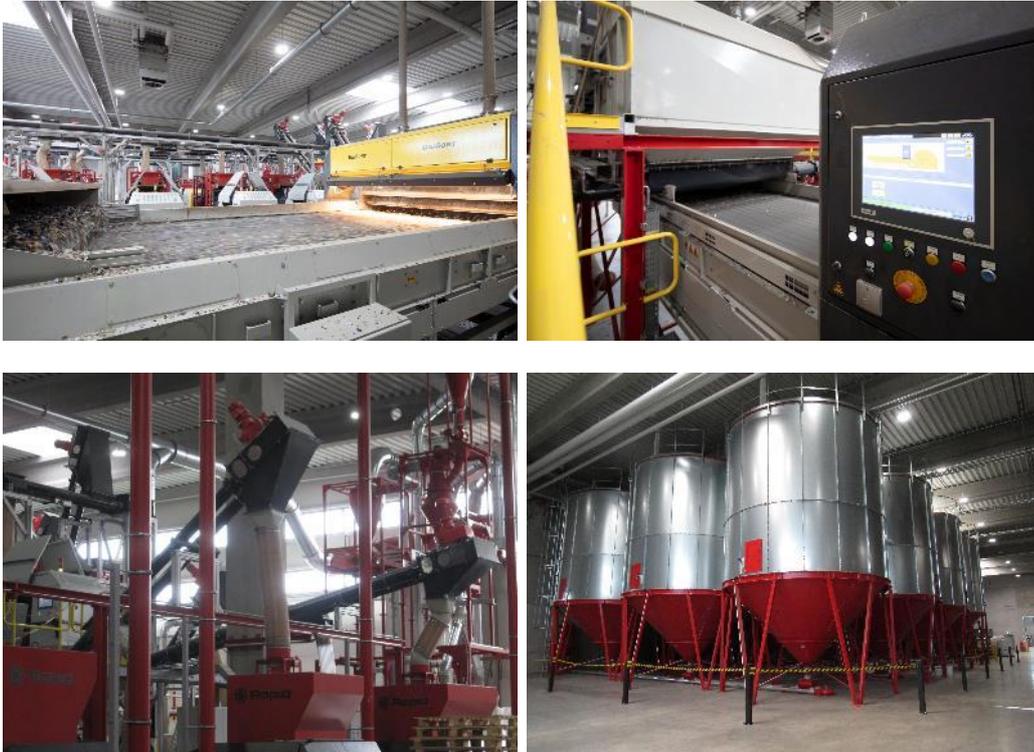
Um die stoffliche Sortierung der Kunststofffraktionen hinsichtlich der Investitionskosten im Rahmen zu halten, weisen die Sortierfraktionen werthaltige Kunststofffraktionen in möglichst hohen Anteilen auf. Eine hohe Diversität erfordert entweder eine hohe Anzahl Sortierstufen oder eine Aufarbeitung im Batch-Betrieb, was zu einer limitierten Kapazität führt.



**Abbildung 10:** Darstellung des bei GRAF eingesetzten Prinzips einer mehrstufigen Sortierkaskade zur werthaltigen Trennung von Kunststofffraktionen

Zunächst wurden die Sortiergeräte geliefert und deren Installation geplant. Die zugehörige Fördertechnik bzw. die technische Einbindung wurden im Detail ausgemessen und angepasst.

Die einzelnen Sortierer wurden in Funktionstests erprobt und die Sortierstraße in Betrieb genommen. Die Sortierstraße wurde bereits in der zweiten Jahreshälfte 2018 installiert. Der Materialstrom wurde mit den liegenden Mischsilos verknüpft. Die vier sortierten Fraktionen werden im Anschluss nochmals zerkleinert (rieselfähige Flockengröße 5 – 10 mm), um die Rieselfähigkeit beim weiteren Materialtransport zu gewährleisten. Danach werden sie in einer Mischsilobatterie eingelagert.



**Abbildung 11:** Aufkonzentration der Kunststoffe zu Beginn der Sortierstraße (oben links), Ansicht einer einzelnen Sortiermaschine (oben rechts), Zerkleinerung auf rieselfähige Flockengröße in Schneidmühlen (unten links), Zwischenlagerung in Mischsilobatterie zur Homogenisierung und optionaler Rezeptierung (unten rechts).

### **Compoundierung auf vier technisch fortschrittlichen Compoundierlinien mit unterschiedlichen Zielsetzungen:**

Bis Ende 2018 wurden die ersten drei Compoundlinien installiert und in Betrieb genommen. Compoundlinie 4 wurde im zweiten Halbjahr 2019 aufgebaut und in den Probebetrieb einbezogen. Die Compoundlinien wurden mit einer zusätzlich installierten und an den Rohstoffstrom angebenen Tagesmischsilobatterie verknüpft. Diese dient einer weiteren Homogenisierung der Produktion. In Summe wurden also vier hochmoderne Compoundierlinien für die Herstellung von HDPE- und PP-Recycling-Granulaten installiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Diese Linien sind:

- Linie für PE + Additive
- Linie für PP + Additive + MVR-Steuerungskomponenten
- Linie mit extrem leistungsfähiger Entgasung
- Linie zur Herstellung von Mikrogranulaten

Sie sind ebenfalls vollständig in den Gesamtrohstoffstrom des Werkes eingebunden.



**Abbildung 12:** Gesamtansicht auf die vier Compoundierlinien (links), Tagesmischsilobatterie (rechts)

#### **Prozessübergreifende kurzzyklische Qualitätskontrolle durch Analyzelabor:**

Die Laborräumlichkeiten wurden sukzessive aufgebaut und um apparatives Equipment erweitert. Sie sind inzwischen vollständig ausgestattet. Die verfügbare Laborausstattung umfasst:

- MFI-Messgeräte (Bestimmung Schmelzflussindex)
- Ofen (Asche/Glührückstand)
- Waagen (Feuchtebestimmer)
- Dichteprüfung (Waagen)
- Titration (Wasserbestimmung)
- Laborspritzgießanlagen mit verschiedenen Schließkräften
- Kniehebelpresse
- Schlagprüfgerät
- Flake-Analyser zur Bestimmung der Kunststoffzusammensetzung
- Zugprüfgerät
- Mühle
- Thermoanalyse
- Rotations-Laborgerät für Sinterversuche
- Bewitterungsanlage mit Reinstwasseraufbereitung
- Laborextruder
- Laborspritzgießmaschine
- Lagerschrank (Klimakammer für Prüfkörper mit Normklima)

- FTIR-Analysegerät (Spektrometer, um Kunststoffe zu identifizieren (auch schwarze Kunststoffe))
- DSC-Analysegerät (Dynamische Differenzkalorimetrie) zur Bestimmung von Schmelz- und Glasübergangstemperatur, Kristallisationsgrad, Zersetzungspunkt, Reinheitsgrad



**Abbildung 13:** Laborextruder (oben links), Rotations-Laborgerät (oben rechts), Pendelschlag- und Zugprüfungsgeräte (Mitte links), Lagerschrank bzw. Klimakammer für Prüfkörper mit Normklima (Mitte rechts), Zugprüfung am Prüfstab (unten links), Analysegerät für dynamische Differenzkalorimetrie (unten rechts).

Mit dem Analyselabor verfügt das Rohstoffwerk über die Möglichkeit einer kurzzyklischen Qualitätskontrolle, sowohl für Zwischenstadien als auch für die erreichbaren Materialausgangsqualitäten. Die Laborausstattung wird in der Zukunft ggf. noch anforderungsabhängig erweitert.

### **Überführung in großvolumige Hochsilos (Mischsilos) mit Kapazität von 800 t pro Charge mit gleichen Materialeigenschaften**

Die großen Granulatmischsilos wurden erfolgreich installiert. Die förderungsseitige Anbindung an die Prozesskette ist ebenfalls erfolgt.



**Abbildung 14:** Talkumsilos und großes Außenmischsilo (links), großvolumige Außenmischsilos mit LKW-Verladestation (Mitte) und großvolumige Außenmischsilos in der Gesamtansicht (rechts)

Die vollständige Inbetriebnahme des Demonstrationswerkes fand offiziell am 14.02.2020 im Beisein des baden-württembergischen Umweltministers, Herrn Franz Untersteller, und des Bürgermeisters der Stadt Herbolzheim, Herrn Thomas Gedemer, sowie zahlreicher weiterer Gäste statt. Im Anschluss wurde die Phase der Erfolgskontrolle eingeleitet.

#### **2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)**

Neben den zu beachtenden baurechtlichen Vorschriften waren folgende Anforderungen für die Genehmigung des Betriebs der Gewerke zu erreichen:

- Brandschutz (betreffend die liegenden Mischsilobatterien)

Der Brandschutzversicherer bestand auf der Umsetzung einer VDI-konformen Anlagentechnik, was die Nachrüstung von zusätzlichen Infrarot-Geräten zur Detektion heißer Gase erforderte. Durch die Erhöhung der Anzahl der Messgeräte und der Installationspositionen kann eine „Schattenbildung“ mit nicht überwachten Bereichen sicher ausgeschlossen werden. Dies machte weitere technische Anpassungen

notwendig. Auch die Sprinkleranlage musste sehr aufwendig angepasst werden, um eine größere Überschneidung zweier unabhängiger Systeme zu erreichen. Dies hat zu einer zeitlichen Verzögerung von über einem ½ Jahr in der Warenannahme geführt. Ebenfalls ist solch eine hochmoderne und besonders leistungsfähige Brandschutzanlage mit deutlich erhöhten Kosten verbunden.

- Brandschutz (betreffend die Sortierung)

Es besteht grundsätzlich ein deutlich erhöhtes Brandrisiko aufgrund der MIR-Erkennung in der Sortierung. Durch die Hitzeentwicklung der Strahler kann durch Staub ein Brand entstehen. Die MIR-Strahler der Sortieranlagen zur Trennung schwarz eingefärbter Kunststoffe weisen gegenüber NIR-Sortiertechnik eine erheblich größere Hitzeentwicklung auf. Auch dieser Umstand führt zu erschwerten Bedingungen beim Abschluss einer entsprechenden Versicherung.

Tatsächlich kam es während der Inbetriebnahmephase auch zu einem Brand in einer der Anlagen, woraufhin der Betrieb zunächst eingestellt wurde. Es musste eine Brandwache eingerichtet werden, bis die Sortierer speziellen Sicherungsmaßnahmen unterzogen waren. Es wurde eine automatische CO<sub>2</sub>-Löschanlage direkt in der Maschine integriert. Das erheblich erhöhte Brandrisiko bei MIR-Sortieranlagen hindert viele Aufbereiter/Recycler daran, solch eine Anlagentechnik zu installieren.

## **2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten**

Durch intensives Mischen in allen Prozessstufen des Demonstrationswerkes können Schwankungen, die über den Inputstrom zwangsläufig auftreten, weitgehend eliminiert werden. Durch die Homogenisierung werden konstante Produktqualitäten erreicht. Das Homogenisieren und Rezeptieren sind Hauptfunktionen des Demonstrationswerkes und ein Schlüsselfaktor für den Erfolg. Die Qualität der Produkte wird über Datenblätter mit technischen Spezifikationen definiert. Hier werden die Toleranzen von Neuwaren angesetzt (Methode: Mittelwert und 2\*Sigma). Das bedeutet, dass die Materialkennwerte der im neuen Recyclingwerk hergestellten Rezyklate einen ebenso geringen Schwankungsbereich aufweisen wie Neuware. Mittels herkömmlicher Technologie hergestellte Rezyklate weisen hingegen höhere Schwankungsbereiche als Neuware auf. Die Toleranzen hängen auch bei Neuware vom Absolutwert des erhaltenen Mittelwertes ab. Je höher der Schmelzflussindex (MFI – melt flow index), desto größer sind die Toleranzen. Das Demonstrationswerk orientiert sich hier an den Werten von Neuware etablierter Lieferanten und Hersteller (z. B. SABIC PP, MFI 4,9 - 7,5 bzw. MFI 12 - 16 (SABIC Petrochemicals B.V.)). Dazu eine kurze Erklärung:

Die Hersteller von Neuware (Chemische Industrie) können durch die Messung des MFI konstante mechanische Eigenschaften garantieren. Dies liegt daran, dass bei der Herstellung von Polymeren in der Raffinerie ein konstanter MFI mit einer gleichbleibenden Verteilung des Molekulargewichtes einhergeht und die zugeführten Rohstoffe konstante Eigenschaften aufweisen. Somit können im Neuwarebereich konstante mechanische Eigenschaften der produzierten Polymere aus einem konstanten MFI abgeleitet werden. Dies ändert sich bei der Herstellung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoffabfällen mittels werkstofflichen Recyclings. Hier belegen interne Messungen, dass trotz eines MFI-Wertes innerhalb der Spezifikation die mechanischen Spezifikationen häufig nicht eingehalten werden können. Dies kann fatale Folgen für die Herstellung langlebiger und hoch belasteter Kunststoffbauteile aus Sekundärrohstoffen haben. Da eine Ableitung der mechanischen Kennwerte aus dem MFI im Recyclingbereich, anders als bei der Neuwareindustrie, nicht zulässig ist, werden bei den neuen Sekundärrohstoffen zusätzlich die erreichbaren mechanischen Eigenschaften geprüft. Daraus resultiert ein sehr hoher Prüfaufwand im Analyselabor, ohne den eine vollständige Qualitätskontrolle nicht möglich ist. Bei konventionell hergestellten Rezyklaten wird i. A. auf eine Prüfung der mechanischen Kennwerte verzichtet. Die zu ermittelnden Werte zur Qualitätsbewertung sind nachfolgend aufgelistet. Sie werden im angegliederten Prüflabor in Anlehnung an die Normen DIN EN15344 (Kunststoff-Rezyklate - Charakterisierung von Polypropylen (PP)-Rezyklaten) und DIN EN15345 (Kunststoffe - Kunststoff-Rezyklate - Charakterisierung von Polyethylen) für jede Charge separat erfasst.

**Tabelle 3:** Eigenschaften und Kennwerte zur Qualitätsbewertung

	Test-Methode	Einheit
<b>Schmelzindex (MFI)</b> bei 230 °C / 2,16 kg <i>oder wahlweise andere Temperaturen und Gewichte</i>	ISO 1133	g/10 min
<b>Dichte</b>	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>
<b>E-Modul (Zug)</b>	ISO 527	MPa
<b>Zugfestigkeit</b>	ISO 527	MPa
<b>Zugdehnung</b>	ISO 527	%
<b>Charpy Schlagzähigkeit gekerbt</b>	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>
<b>Glührückstand</b>	ISO 3451	%
<b>Schüttdichte</b>	ISO 60	g/l
<b>Druck-E-Modul</b>	ISO 604	MPa
<b>Druckfestigkeit</b>	ISO 604	MPa
<b>Biege-E-Modul</b>	ISO 178	MPa
<b>Biegefestigkeit</b>	ISO 178	MPa
<b>Restfeuchte</b>	ASTM 6989	%
<b>Füllstoffanteil/Glührückstand</b>	ASTM D5630	%
<b>OIT (Oxidation-Induktionszeit) 200 °C</b>	ISO 11357	min
<b>DSC-Analyse</b>	ISO 11357	%
<b>FTIR-Analyse</b>	--	Kunststoffarten

Die Zielspezifikationen werden in den erstellten Datenblättern für PP- und HDPE-Recyclinggranulate vorgegeben (Abbildung 15 und Abbildung 16), deren Einhaltung für jede hergestellte Charge überprüft wird.

Ergänzend werden DSC- und FTIR-Analysen chargenweise durchgeführt.

Weiterhin werden die Ergebnisse aus der Sortierung kontinuierlich erfasst. Dies umfasst die prozentualen Anteile der verschiedenen Kunststofffraktionen.

Die Ermittlung der genannten Werte erfolgt nach Prüfplan des dem Demonstrationswerk angegliederten Labors. Dort werden auch prozesskettenübergreifende Analysen vorgenommen.

Auf diese Weise können unerwünschte Abweichungen im Demonstrationswerk schnell erkannt und Gegenmaßnahmen direkt eingeleitet werden, z. B. durch Anpassung der Rezepturen in den jeweiligen Produktionsschritten. Dieser Ansatz einer kontinuierlichen Laborüberwachung im Demonstrationswerk mit closed-loop Regelung der Rezepturen über die Analyseergebnisse ist vollkommen neu. Nach wie vor existiert weltweit kein anderes Recyclingwerk mit dieser Fähigkeit,

die es erlaubt, kontinuierlich Sekundärrohstoffe mit dem Eigenschaftsniveau von Primärware herzustellen.

**Produktdatenblatt**
**PP-Regranulat**
**Upcyclen grau**

Upcyclen ist ein stabilisiertes, homogenisiertes PP Copolymer Regranulat.

Herkunft des Rohstoffes ist zu 100 % post consumer PP.

Eigenschaften	Prüfmethode	Einheit	Wert
Schmelzmassefließrate (MFR) bei 230 °C / 2,16 kg	ISO 1133	g/10 min	> 7
Dichte	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	0,915 ±0,010
E-Modul	ISO 527	MPa	1000 ±100
Streckspannung	ISO 527	MPa	21 ±1,5
Streckdehnung	ISO 527	%	8,5 ±2,5
Charpy Kerbschlagzähigkeit bei +23°C	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	4 ±1,5
Druck-E-Modul *	ISO 604	MPa	1100 ±200
Druckfestigkeit *	ISO 604	MPa	37,0 ±3
Biege-E-Modul *	ISO 178	MPa	1150 ±200
Biegefestigkeit *	ISO 178	MPa	37,0 ±3
Restfeuchte	ASTM 6980	%	< 0,2
Füllstoffanteil / Glührückstand	ASTM D5630	%	< 3
OIT (Oxidation-Induktionszeit) 200°C	ISO 11357	min	> 8

\* Diese Werte werden nicht regelmäßig geprüft

Erstellt: 28.03.2019

Modifiziert: 16.09.2019

Dieses Datenblatt ersetzt alle vorhergehenden Versionen.

Die oben genannten Angaben basieren auf unseren derzeitigen technischen Kenntnissen und Erfahrungen.

Sie befreien den Verarbeiter wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung und Anwendung unserer Produkte nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Eine Garantie bestimmter Beschaffenheiten oder der Eignung für einen bestimmten Einsatzzweck wird hierdurch nicht begründet und kann aus Angaben nicht abgeleitet werden. Gesetze und Schutzrechte sind gegebenenfalls zu beachten.

**Sitz:**  
 OPG Holding GmbH  
 Carl-Zeiss-Straße 4  
 D - 79331 Teningen

**Geschäftsführer:**  
 Dipl. Kfm. Otto P. Graf

**Kontakt:**  
 Telefon +49 / (0) 7643 / 9357-101  
 Fax +49 / (0) 7643 / 9357-111  
 E-Mail: info@opg-holding.de

**Amtsgericht:** HRB Freiburg 261161  
 USt-IdNr. DE 189367097

**Abbildung 15:** Zielspezifikation/Datenblatt für PP-Recyclinggranulate

**Produktdatenblatt**
**PE-HD Regranulat**
**Recylen dunkelgrau**

Recylen ist ein modifiziertes, homogenisiertes PE-HD Regranulat ohne UV Stabilisierung zur Anwendung in der Extrusions- oder Blaufertigung

Herkunft des Rohstoffes ist zu 100 % post consumer PE

Außerdem ist dieser Artikel noch in den Farben hellgrau und schwarz erhältlich

Eigenschaften	Prüfmethode	Einheit	Wert	
Schmelzfließindex (MFR) bei 190 °C / 5 kg	ISO 1133	g/10 min	1,0	±0,4
Schmelzfließindex (MFR) bei 190 °C / 21,6 kg	ISO 1133	g/10 min	35	±5
Dichte	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	0,940	±0,020
E-Modul	ISO 527	MPa	670	±100
Streckspannung	ISO 527	MPa	20	±2
Streckdehnung	ISO 527	%	12	±2
Charpy Kerbschlagzähigkeit bei +23°C	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	30	±4
Restfeuchte bei 110 °C	ASTM 6980	%	< 0,2	
Glührückstand bei 625 °C	ASTM D5630	%	< 2	

Erstellt: 26.08.19

Dieses Datenblatt ersetzt alle vorhergehenden Versionen.

Modifiziert:

06.05.2020

Die oben genannten Angaben basieren auf unseren derzeitigen technischen Kenntnissen und Erfahrungen.

Sie befreien den Verarbeiter wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung und Anwendung unserer Produkte nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Eine Garantie bestimmter Beschaffenheiten oder der Eignung für einen bestimmten Einsatzzweck wird hierdurch nicht begründet und kann aus Angaben nicht abgeleitet werden. Gesetze und Schutzrechte sind gegebenenfalls zu beachten.

**Sitz:**

OPG Holding GmbH  
 Carl-Zeiss-Straße 4  
 D - 79331 Teningen

**Geschäftsführer:**

Dipl. Kfm. Otto P. Graf

**Kontakt:**

Telefon +49 / (0) 7643 / 9357-101  
 Fax +49 / (0) 7643 / 9357-111  
 E-Mail: info@opg-holding.de

Amtsgericht: HRB Freiburg 261161  
 USt-IdNr. DE 189367097

**Abbildung 16:** Zielspezifikation/Datenblatt für HDPE-Recyclinggranulate

## **2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms**

Im Rahmen der Erfolgskontrolle sollten die Einhaltung der angestrebten Zielparameter und des Durchsatzes bei der Herstellung von Polyolefinrezyklaten mit Eigenschaftsniveau und Chargengröße von Primärware nachgewiesen werden. Dieser Nachweis wurde im Versuchsbetrieb während der Kontrollphase erbracht. Dazu wurden interne Messwerte, Bilanzierungen sowie Laboranalysen der veredelten Endprodukte genutzt.

Das Messprogramm zur Erfolgskontrolle wurde wie folgt durchgeführt:

- Massenbilanz der Inputströme (Lager)
  - Es wird erfasst:
    - Liefertermin und -zeit
    - Massenanteil – Liefermenge (LKW-Waage)
- Massenbilanz der Inputströme (Anlagen der Prozesskette)
  - Massenbilanz wird über Summen- und Differenzbildung erfasst
    - Massenanteil – Feuchte
    - Massenanteil – Staub
    - Massenanteil – Unterkorn
    - Massenanteil – Überkorn
    - Massenanteil – Metall
    - Massenanteile der Zuschlagsstoffe
    - Anlagendurchsatz in kg/h
- Massenbilanz der Inputströme (Zwischensilos)
  - Massenbilanz wird über Summen- und Differenzbildung erfasst
    - Massenanteil – Feuchte
    - Massenanteil – Staub
    - Massenanteil – Unterkorn (Unerkannte Anteile / nicht sortierbare Fraktion)
- Massenbilanz der Outputströme (800 t Warenausgangssilos)
  - Massenbilanz wird über Summen- und Differenzbildung erfasst
    - Massenanteil Input Extruder (rechnerisch)
    - Massenanteile der Zuschlagstoffe (aus Anlagensteuerung)
- Qualität und Zusammensetzung der Inputströme (anhand Sortierung)
  - Bei Anlieferung werden jeweils drei Proben genommen
    - Massenanteil – Kunststoffzusammensetzung mittels Flake-Analyser
    - Massenanteil – Dichte-Messung nach Schwimm-Sink-Verfahren
- Qualität und Zusammensetzung der Outputströme (Sortierung)
  - Kontinuierliche Erfassung der Sortiererergebnisse in der Sortierstraße

- Massenanteil – PP – hell
- Massenanteil – PP – dunkel
- Massenanteil – HDPE – hell
- Massenanteil – HDPE – dunkel
- Massenanteil – Rest
- Qualität und Zusammensetzung der Fraktionen in der Silomischbatterie
  - Wird aus den Sortierergebnissen in der Sortierstraße übernommen
- Qualität und Zusammensetzung in Tagesmischsilos der Extrusionslinien gemäß Datenblatt
  - Erfolgt für jede Charge über Probenuntersuchung im Analyselabor
    - Schmelzflussindex (MFR bei 190 °C / 5 kg)
    - Schmelzflussindex (MFR bei 190 °C / 21,6 kg)
    - Dichte
    - E-Modul
    - Streckspannung
    - Streckdehnung
    - Charpy Kerbschlagzähigkeit bei + 23 °C
    - Restfeuchte bei 110 °C
    - Glührückstand bei 625 °C
    - DSC-Analyse
    - FTIR-Analyse
- Qualität und Zusammensetzung der Chargen in den 800 t Warenausgangssilos gemäß Datenblatt
  - Erfolgt für jede Charge über Probenuntersuchung im Analyselabor
    - Schmelzflussindex (MFR bei 190 °C / 5 kg)
    - Schmelzflussindex (MFR bei 190 °C / 21,6 kg)
    - Dichte
    - E-Modul
    - Streckspannung
    - Streckdehnung
    - Charpy Kerbschlagzähigkeit bei + 23 °C
    - Restfeuchte bei 110 °C
    - Glührückstand bei 625 °C
    - DSC-Analyse
    - FTIR-Analyse

### **3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung**

#### **3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung**

Festzuhalten ist, dass die Einbeziehung von Kunststoffabfällen mit schwarz eingefärbten Anteilen in ein hochwertiges werkstoffliches Recycling die Zugänglichkeit von Materialeingangsquellen deutlich erweitert. Dies ist ein signifikanter Vorteil. Aus technischer und kostenseitiger Sicht gehen damit allerdings erhebliche Herausforderungen einher. So steigen die Investitionskosten für Maschinen und Anlagen erheblich, nämlich um einen Faktor von ca. 2. Die erreichbaren Materialdurchsätze / Produktionsvolumina verringern sich dahingegen etwa auf die Hälfte gegenüber Kunststoffabfällen ohne Schwarzanteile. Auch die Wartungskosten der Anlagen steigen erheblich, da z. B. die kostenintensiven Kühleinheiten der MIR-Sortieranlagen nach 8.000 Betriebsstunden ausgetauscht werden müssen. Die Erreichung der zu Projektbeginn angestrebten Sortenreinheiten der Rezyklate ist zwar möglich, jedoch mit erheblichem technischen und personellen Aufwand verbunden. Ebenfalls erwähnenswert sind die unerwartet hohen versicherungsseitigen Anforderungen an den Brandschutz der aufgebauten Verfahrenskette.

Nach wie vor gilt, dass im Hause GRAF durchgeführte analytische Überprüfungen der von verschiedenen Recycling-Unternehmen gelieferten Rohstoffe bzgl. ihrer realen Materialeigenschaften im Vergleich mit den Datenblättern teilweise massive Abweichungen zeigen. Dies war einer der Gründe, die Compoundierung selbst durchzuführen. Exemplarisch können diesbezüglich große Abweichungen der mechanischen Eigenschaften wie z. B. der Zugspannung und des Zug-E-Moduls genannt werden. Bei diesen Kennwerten wurden teilweise Abweichungen von mehr als 20 % festgestellt. Dies hat gravierende Konsequenzen. Derartige Rohstoffe entsprechen nicht mehr den Spezifikationen und können daher für die vorgesehenen Bauteile nicht eingesetzt werden. Mit dieser Problematik ist nahezu jeder kunststoffverarbeitende Betrieb konfrontiert, der Recyclingware zur Herstellung hochwertiger und langlebiger Produkte einsetzt. Teilweise liegen die Ursachen für derartige Spezifikationsabweichungen in einer mangelhaften Anlagentechnik, z. B. einer gravimetrischen Dosierung. Weitere Ursachen sind fehlende Möglichkeiten, die erzeugten Qualitäten kontinuierlich und produktionsnah zu überprüfen. Die Recycling-Unternehmen verfügen meist nicht über eine eigene Spritzgießmaschine zur Herstellung von DIN-konformen Schulterstäben, die für eine Überprüfung der mechanischen Eigenschaften erforderlich sind. Neben der fehlenden Möglichkeit, Probekörper herzustellen, haben die Unternehmen i. Allg. auch keine Möglichkeit, diese mittels mechanischer Laborprüfgeräte zu messen.

Aus den beschriebenen Beweggründen heraus war es für die Unternehmensgruppe GRAF sicher die richtige Entscheidung, das Kunststoffrecycling von Polyolefinabfällen im großtechnischen Maßstab im eigenen Hause umzusetzen.

Allerdings ist festzuhalten, dass während der Vorhabendurchführung eine ganze Reihe teils unerwarteter Schwierigkeiten auftrat. Die wichtigsten der aufgetretenen technischen Schwierigkeiten waren:

- Die Einhaltung der Brandschutzvorgaben stellte sich als große Herausforderung dar und führte zu Verzögerungen bei der Inbetriebnahme der Brandschutzanlage, der liegenden Mischsilos sowie der den Compoundlinien vorgeschalteten Mischsilobatterie. Diese Probleme konnten vollumfänglich behoben werden.
- Aufgrund einer unerwartet hohen Staubbelastung musste die Fördertechnik durch Integration einer weiteren Vorsiebung und Entstaubung modifiziert werden. Auch dieses Problem konnte vollumfänglich behoben werden.
- Aufgrund einer unerwartet hohen Belastung mit metallischen Verunreinigungen musste aus Gründen des Brandschutzes und zur Vermeidung von Maschinenschäden eine zusätzliche Metallabscheidung in die Warenannahme integriert werden. Das Problem wurde durch diese Maßnahme gelöst.
- Die Fundamentauslegung der großen Granulatmischsilos mit einer Kapazität von jeweils 800 t stellte sich bzgl. der Erreichung der notwendigen Statik und Windlastbeständigkeiten als schwieriger heraus als erwartet. Dies führte zu entsprechenden zeitlichen Verzögerungen. Auch diese Probleme konnten vollumfänglich gelöst werden.
- Während der Projektdurchführung zeigte sich, dass die angestrebten Elektromotoren der Klasse IE4 nur in geringem Umfang zur Verfügung standen. Zu dem Zeitpunkt der Umsetzung konnte ein Einbau entsprechender Elektromotoren daher leider nicht immer realisiert werden. Im Zuge zukünftiger Revisionsmaßnahmen wird ein entsprechender Austausch angestrebt.

Während der Laufzeit des Projektes ergaben sich weitere Probleme, die noch nicht vollumfänglich gelöst werden konnten. Sie sollen im Anschluss an das Projekt ab dem Jahr 2021 sukzessive bearbeitet und behoben werden. Diese sind:

- HDPE-Compoundierung von Mikrogranulaten für die Rotationsformgebung:  
Der Lieferant liefert nicht die geforderte Qualität (Korngröße und Fremdstoffanteil). Aufgrund der bislang nicht erreichbaren Kunststoffartenreinheit und des hohen Verschmutzungsgrads ist ein störungsfreier Verarbeitungsprozess noch nicht durchführbar, da die Mikrounterwassergranulierung sofort verstopft (2.800 Löcher / 300 µm). Aus den nach der Sortierung erreichten Qualitäten lassen sich derzeit noch keine Mikrogranulate mit konstanten Eigenschaften herstellen. In Zusammenarbeit findet momentan eine Anpassung der Anlagentechnik der Lieferanten auf das Anforderungsprofil von GRF statt, sodass eine erfolgreiche Umsetzung der Mikrogranulatherstellung für das Jahr 2021 erwartet wird.

- PP-Compounding mit Spezialentgasung:  
Die Spezialentgasung wurde erfolgreich installiert und wird bereits eingesetzt. Damit kann die Produktqualität von stark verunreinigten Kunststoffabfällen erfolgreich erhöht werden. Noch nicht erfolgreich umgesetzt werden konnte hingegen die Einbeziehung von stark verschmutzten Folienmaterialien in die Rezyklatherstellung. Diesbezüglich erfolgt momentan in Zusammenarbeit mit einem Lieferanten von GRAF die Anpassung der dortigen Prozesstechnologie, um geringere Verschmutzungsgrade zu erreichen. Die erfolgreiche Einbeziehung von PP-Folienabfällen in die Rezyklatherstellung wird für das Jahr 2021 erwartet.
- Verwendung der aussortierten Hartkunststofffraktion aus der Ersatzbrennstoffherstellung als Rohstoffinput:  
Schwankungen in der Zusammensetzung und ein unterschiedliches Korngrößenspektrum stehen in einem saisonalen Zusammenhang und können bislang trotz sehr großer Inputmengen nicht vollständig geglättet werden. Als Konsequenz entstehen Qualitätsprobleme in der Sortierung. Dies wiederum führt dazu, dass Lieferanten Anpassungen an ihren Anlagentechniken durchführen müssen, die zum Teil Investitionen im Millionenbereich erfordern. Diese Anpassungen werden bei den Lieferanten derzeit umgesetzt, sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

### **3.2. Stoff- und Energiebilanz**

Das Messprogramm wurde gemäß der Darstellung in Kapitel 2.6 im Rahmen der Erfolgskontrollphase durchgeführt. Die vollständige Inbetriebnahme des Recyclingwerkes fand offiziell am 14.02.2020 im Beisein des baden-württembergischen Umweltministers Franz Untersteller und des Bürgermeisters der Stadt Herbolzheim, Herrn Thomas Gedemer, sowie zahlreicher weiterer Gäste statt. Mit diesem Termin wurde die Phase der Erfolgskontrolle eingeleitet, die bis zum 31.12.2020 dauerte. Aufgrund der Pandemie des SARS-COV-2-Virus im Jahr 2020 und der damit verbundenen Einschränkungen, wie z. B. teilweiser Kurzarbeit und Schwierigkeiten im Bereich der Lieferketten, konnte das Werk im Erfolgskontrollzeitraum noch nicht voll ausgelastet werden. Nachfolgend sind die erzielten Ergebnisse der Erfolgskontrollphase hinsichtlich der Stoff- und Energiebilanz dargestellt.

#### Massenbilanz der Inputströme (Lager)

Während der Erfolgskontrollphase wurden ca. 35.000 t Kunststoffabfälle entgegengenommen und eingelagert. Die Gesamtkapazität im voll ausgelasteten Normalbetrieb beträgt:

- Post-Consumer-Kunststoffabfälle: 35.000 t p. a.
- Hartkunststofffraktion aus Ersatzbrennstoffherstellung: 15.000 t p. a.

### Massenbilanz der Inputströme (Anlagen der Prozesskette)

Die Massenbilanzen wurden über Summen- und Differenzbildung erfasst.

- Massenanteil – Feuchte: < 1 %
- Massenanteil – Staub:  $\geq 2$  %
- Massenanteil – Unterkorn: 5 - 10 %
- Massenanteil – Überkorn: wurde nicht erfasst, sondern zerkleinert und in die Prozesskette zurückgeführt.
- Massenanteil – Metall: ca. 1 %
- Massenanteile der Zuschlagsstoffe zum Erreichen des Eigenschaftsniveaus von Neuware:
  - PE-Rezyklat:
    - Additive: 2 - 8 %
    - Füllstoffe: 10 - 20 %
  - PP-Rezyklat:
    - Additive: 2 - 9 %
    - Füllstoffe: 10 - 20 %
- Anlagendurchsatz in kg/h
  - Compoundierung PP-Rezyklat: bis zu 2.000 kg/h
  - Compoundierung PE-Rezyklat: bis zu 1.200 kg/h

### Massenbilanz der Inputströme (Zwischensilos)

Die Massenbilanzen wurden über Summen- und Differenzbildung erfasst.

- Massenanteil – Feuchte: < 1 %
- Massenanteil – Unterkorn (unerkannte Anteile / nicht sortierbare Fraktionen werden nach der Trocknung ausgesiebt)

### Massenbilanz der Outputströme (800 t Warenausgangssilos + BigBags)

Die Massenbilanzen wurden über Summen- und Differenzbildung erfasst.

- PP-Rezyklat:
  - Compoundierte Gesamtmenge PP: 15.000 t (von 35.000 t in 2020)
  - Filtrat: 2,2 %
- PE-Rezyklat:
  - Compoundierte Gesamtmenge PE: 5.000 t (von 35.000 t in 2020)
  - Filtrat: 2,3 %
- Abfüllung in BigBags verschiedener kleinerer Produktionschargen (15.000 t in 2020)

### Qualität und Zusammensetzung der Inputströme (anhand Sortierung)

- Bei Anlieferung wurden jeweils drei Proben genommen
  - Durchschnittlicher Anteil – Kunststoffzusammensetzung mittels Flake-Analyser
    - PP: 42 %
    - PE: 37,5 %
    - Schwarz: 17,8 %
    - Rest (andere Kunststoffe): 2,7 %
  - Durchschnittlicher Anteil – Dichte-Messung nach Schwimm-Sink-Verfahren
    - Sinkfraktion: bis zu 6,4 %
    - Schwimmfraktion: bis zu 88,9 %
    - Reste in Schwimmfraktion: bis zu 4,7 %

### Qualität und Zusammensetzung der Outputströme (Sortierung)

Kontinuierliche Erfassung der Sortiererergebnisse in der Sortierstraße

- Massenanteil – PP – hell: bis zu 27 %
- Massenanteil – PP – dunkel: bis zu 29 %
- Massenanteil – HDPE – hell: bis zu 11 %
- Massenanteil – HDPE – dunkel: bis zu 22 %
- Massenanteil – Rest: bis zu 10 %

### Qualität und Zusammensetzung der Fraktionen in der Silomischbatterie

- Sortenreinheit – PP – hell: > 96 %
- Sortenreinheit – PP – dunkel: > 87 %
- Sortenreinheit – HDPE – hell: > 95 %
- Sortenreinheit – HDPE – dunkel: > 80 %

### Qualität und Zusammensetzung in Tagesmischsilos der Extrusionslinien gemäß Datenblatt

- Erfolgt für jede Charge über Probenuntersuchung im Analyselabor  
Wenn die nachfolgenden Spezifikationen erfüllt werden, wird das Rezyklat in die Ausgangssilos überführt. Werden die Spezifikationen nicht erfüllt, wird das Material in BigBags abgefüllt und separiert. Dieses Material wird für Bauteile verwendet, welche keine kritischen Spezifikationen einhalten müssen.
  - Schmelzflussindex (MFR bei 190 °C / 5 kg
  - Schmelzflussindex (MFR bei 190 °C / 21,6 kg
  - Dichte
  - E-Modul
  - Streckspannung

- Streckdehnung
  - Charpy Kerbschlagzähigkeit bei + 23 °C
  - Restfeuchte bei 110 °C
  - Glührückstand bei 625 °C
  - DSC-Analyse
  - FTIR-Analyse
- Qualität und Zusammensetzung der Chargen in den 800 t Warenausgangssilos gemäß Datenblatt.

Bei Verladung aus den Warenausgangssilos wird ein individuelles Abnahmeprüfzeugnis erstellt, das die vom Kunden angeforderten Messwerte enthält.

Die Bilanzierung weiterer Maßnahmen ergibt folgende Ergebnisse:

- Automatisierung der Kühlanlage: Aus der gesteuerten Ein-/Ausschaltung resultiert eine Einsparung von 275.000 kWh/a elektrischer Energie.
- Installation elektrischer Kugelhähne in der Sortieranlage: Wenn die Anlage steht, schließen die Kugelhähne automatisch und es entsteht kein unnötiger Druckluftverbrauch. Dies führt zu einer Einsparung von 364.000 m<sup>3</sup> Druckluft. Bei einem Energieverbrauch der eingesetzten Kompressoren von 0,1086 kWh/m<sup>3</sup> ergibt sich demzufolge eine Einsparung von ca. 40.000 kWh/a elektrischer Energie.
- Umstellung von bisher üblicher pneumatischer Förderung der Rohstoffe auf eine rein mechanische Förderung: Es wurden die folgenden Einsparungen erreicht:
  - Pneumatische Förderung mit ca. 6 kWh/t zu mechanischer Förderung mit ca. 1 kWh/t: Daraus resultiert bei ca. 50.000 t, die dreimal von einem Produktionsschritt in den nächsten gefördert werden (von Einlagerung über die Sortierung über das Compounding) eine Einsparung von ca. 750.000 kWh/a.
  - Geringere Lärmemission der mechanischen Förderung im Vergleich zur pneumatischen Förderung.
  - Erhebliche Minimierung der Staubbelastung durch mechanische Förderung.

### **3.3. Umweltbilanz**

Die Umweltbilanz ergibt sich aus den Ergebnissen der Erfolgskontrollphase. Das neue Recyclingwerk hat eine maximale Kapazität von bis zu 50.000 t PE- und PP-Rezyklaten pro Jahr. Die Rezyklate sind sortenrein und weisen die Kennwerte von Neuware auf. Sie können dementsprechend weiter im Recycling-Kreislauf geführt werden.

Bezogen auf die einzelnen Innovationen ergeben sich folgende CO<sub>2</sub>-Einsparungen [9] pro Jahr:

- ca. 100.000 t CO<sub>2</sub> eq (siehe Tabelle 2) durch die hergestellten Rezyklate
- ca. 129 t CO<sub>2</sub> eq durch die Automatisierung der Kühlanlage
- ca. 18 t CO<sub>2</sub> eq durch eingesparte Druckluft
- ca. 352 t CO<sub>2</sub> eq durch eingesparte Energie mittels Einsatz einer mechanischen Fördertechnik.

### **3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse**

Der Ausbruch der SARS-COV-2-Pandemie Anfang des Jahres 2020 und die zum Schutz der Bevölkerung in einer Vielzahl von Ländern durchgeführten Shutdown-Maßnahmen haben zu starken wirtschaftlichen Verwerfungen geführt. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die deutsche Wirtschaft bereits im vierten Quartal 2019 ein negatives Wachstum zu verzeichnen hatte und kurz vor einer technischen Rezession stand. Darüber hinaus haben die moderaten Wachstumsraten der Weltwirtschaft in Kombination mit einem Überangebot an Öl und Erdgas in den vergangenen Jahren zu vergleichsweise niedrigen Weltmarktpreisen dieser fossilen Rohstoffe geführt. In der Folge entstand ein starker Preisdruck auch im Bereich von Kunststoffneuware. Dieser Trend setzte auch die Märkte für Kunststoffrezyklate unter verstärkten Druck und gestaltete die Bildung eines wirtschaftlich tragfähigen Preismodells für die im Demonstrationswerk hergestellte Recyclingware sehr schwierig. Insbesondere im Bereich HDPE war zwischenzeitlich ein nahezu vollständiger Marktzusammenbruch zu verzeichnen. Infolgedessen besteht zum Zeitpunkt der Berichterstellung weiterhin die Gefahr, dass in diesem Bereich ohne das Eingreifen der europäischen und nationalen Legislative eine weitgehende Marktkonsolidierung und -bereinigung stattfinden wird, die auch bereits begonnen hat.

Als integrierter Unternehmensgruppe gelang es GRAF, durch einen weitgehenden Einsatz der in Herbolzheim hergestellten Rezyklate im eigenen Produktportfolio eine profitable Geschäftstätigkeit aufrechtzuerhalten. Jedoch wäre ein profitabler Betrieb des Demonstrationswerkes „stand alone“ im wirtschaftlichen Umfeld der Jahre 2019 sowie 2020 und der in dieser Zeit verzeichneten preislichen Marktlage mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht möglich. Für integrierte Unternehmungen kann jedoch die zukünftige Kalkulationssicherheit und weitgehende Unabhängigkeit vom Weltmarktpreis von PP- und PE-Rohstoffen durchaus ein Vorteil sein.

### **3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren**

Nachfolgende Tabelle beinhaltet einen Vergleich der demonstrierten Prozessfähigkeiten des

neuen Recyclingwerkes gegenüber der konventionellen Rezyklatherstellung.

**Tabelle 4:** Vergleich der demonstrierten Prozessfähigkeiten des neuen Recyclingwerkes gegenüber der konventionellen Rezyklatherstellung

	<b>Neues Demonstrations-Kunststoff-Recyclingwerk</b>	<b>Konventionelles Kunststoff-Recyclingwerk</b>
<b>Durchsatz PP</b>	2.000 kg/h	1.000 – 1.500 kg /h
<b>Durchsatz PE</b>	derzeit ca. 1.200 kg/h, mit geplanten Optimierungen ca. 1.500 kg/h	1.200 – 1.500 kg/h <i>(Anmerkung: Es existieren kaum Recyclingwerke, die HDPE recyclieren)</i>
<b>Sortierung schwarz eingefärbter Abfallfraktionen</b>	Sortierung möglich	nicht möglich
<b>Sortenreinheit PP</b>	> 96%*	70 – 85 %
<b>Sortenreinheit PE</b>	> 95%*	70 – 85 %
<b>Störstoffanteil</b>	< 1 %	3 %
<b>Jahreskapazität</b>	50.000 t	ca. 20.000 t
<b>Chargengröße</b>	800 t	25 – 50 t
<b>Homogenisierung</b>	kontinuierliche Homogenisierung der Chargen	keine kontinuierliche Homogenisierung großer Chargen möglich
<b>Förderung</b>	mechanische Förderung	pneumatische Förderung
<b>Kennwertkontrolle</b>	kontinuierliche Kennwertkontrolle gemäß Datenblatt durch Werkstofflabor	kein Werkstofflabor, nur MFI-Wert-Ermittlung <i>(Anmerkung: Mechanische Prüfungen können i. d. R. nicht selbst durchgeführt werden und müssen oft an externe Dienstleister vergeben werden.)</i>
<b>Schwankungsbreite der Werkstoffeigenschaften</b>	wie Neuware	gegenüber Neuware erheblich größere Schwankungsbreite

\* Die Sortenreinheit ist so groß, dass neuwareähnliche Eigenschaften erreicht werden. Mit dieser Reinheit wird Neuware ersetzt.

## 4. Übertragbarkeit

### 4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

#### Rohstoffsituation und Kalkulationssicherheit

Die Zeit seit Planungsbeginn der Projektierung ab 2015 bis zum Abschluss der Erfolgskontrollphase Ende 2020 war geprägt von starken, teilweise turbulenten Veränderungen der Rohstoffsituation hinsichtlich der Warenströme und der zugehörigen Preisbildung. Diese Entwicklung stellte getätigte Annahmen und Planungen regelmäßig infrage, erforderte Aktualisierungen und erschwerte die praktische Projektumsetzung teilweise erheblich.

Bereits seit dem Beginn der chinesischen Green-Fence-Politik im Jahr 2013 wurden zunehmend große Mengen qualitativ hochwertiger Wertstoffströme, die sich besonders gut für ein werkstoffliches Recycling eignen, von China aus Europa importiert. Dies veränderte die Märkte für Kunststoffabfälle deutlich und trug zu einer erheblichen Rohstoffverknappung auf dem Kunststoffmarkt im Jahr 2015 bei. China und Südostasien gehörten lange Zeit zu den wichtigsten Destinationen für Kunststoffabfälle aus Deutschland. Seit 2016 sind die Exporte in diese Länder jedoch erheblich zurückgegangen. So wurden 2019 nur noch rund 2.600 t Kunststoffabfälle nach China exportiert. Drei Jahre zuvor waren es noch 562.910 t. Der Export nach Südostasien ging in dieser Zeit um rund 58 % auf 374.588 t zurück [10]. Im Rahmen des im Februar 2018 in Kraft getretenen National Sword Programms wurden die Einfuhrbestimmungen durch China weiter verschärft bis hin zur vollständigen Untersagung der Einfuhr einiger Kunststoffabfälle, darunter z. B. aus PE. Außerdem wurden für die noch erlaubten Materialien strengere Standards für den in einer Kunststoffabfall-Lieferung zulässigen Verschmutzungsgrenzwert festgelegt. Der Reinheitsgrad wurde von 90 - 95 % auf 99,5 % erhöht. Aus diesem Grund standen ab diesem Zeitpunkt wieder erhebliche Mengen an Rohstoffen auf dem europäischen Markt zur Verfügung. Gleichzeitig hat die Verwertung der Abfälle innerhalb Europas zugenommen.

Dieser Sachverhalt führte in Kombination mit einer konjunkturellen Abschwächung im Jahr 2019 bereits zu einem zunehmenden Preisverfall, sowohl auf dem Markt für Primärgranulate als auch für Rezyklate. Im Zuge der im Jahr 2020 aufgetretenen Pandemie des Coronavirus SARS-COV-2 zeigten sich zusätzliche Auswirkungen und Verwerfungen auf die Situation des Vorhabens und die gesamte Kunststoffrecyclingbranche. Aufgrund der gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der Coronavirus-Pandemie brachen die Absatzmärkte für Recyclingkunststoffe stark ein. Die Nachfrage sank in einer bislang unbekanntem Intensität. Dies war einerseits durch den niedrigen Ölpreis spürbar. Darüber hinaus sind aber auch die Preise für Kunststoffrohstoffe (Neuware) auf ein seit Langem nicht verzeichnetes Preisniveau gefallen. Der Preisvorteil von Recyclingware gegenüber Primärware fiel weitgehend weg und kehrte sich teilweise sogar ins Gegenteil um. Gegen Ende 2020 zeigte sich – wiederum kurzfristig – eine zunehmende Rohstoffverknappung

mit teils deutlichen Preisanstiegen. Seit dem 1. Januar 2021 gilt nun eine verschärfte Regelung, nach der Kunststoffabfälle, die vermischt oder verschmutzt sind, gar nicht mehr exportiert werden dürfen. Die verschärften Regelungen zum Export von Kunststoffabfällen sind in der europäischen Verordnung über die Verbringung von Abfällen enthalten, die am 22. Dezember 2020 geändert wurde. Sie sind unmittelbar wirksam und bedürfen nicht der Umsetzung in nationales Recht der EU-Mitgliedsstaaten. Sortenreine Kunststoffabfälle hingegen, die sich leicht recyceln lassen, sind ein wertvoller Rohstoff, der weiterhin unter staatlicher Kontrolle gehandelt werden darf. Deutschland geht seit zwei Jahren einen deutlichen Schritt weiter. Das Verpackungsgesetz enthält bereits seit Anfang 2019 verschärfte Regelungen zur Kontrolle der ordnungsgemäßen Verwertung von Kunststoffverpackungen. Demnach ist die zentrale Stelle Verpackungsregister ermächtigt, von den dualen Systemen im Rahmen ihrer jährlichen Mengenstromnachweise den konkreten Nachweis einer ordnungsgemäßen Verwertung auch der exportierten Mengen systembeteiligungspflichtiger Verpackungsabfälle zu verlangen. Diese Sachverhalte werden die zukünftige Angebots- und Nachfragesituation sowie die Preisbildung ebenfalls beeinflussen, jedoch in bislang noch unbekannter Weise.

Nach Betrachtung in den Quartalen 2 bis 4 des Jahres 2020 wurde festgestellt, dass sich der Absatz sowohl von Neuware als auch von Rezyklaten im Bereich von Polyethylen (PE) *extrem schwach* und der Absatz im Bereich von Polypropylen (PP) *schwach* (u. a. Automobilbranche) dargestellt hat. Im Bereich der Rezyklate stellte sich die Absatzsituation als besonders schwierig heraus, da sie preislich an Konkurrenzfähigkeit gegenüber Neuware stark eingebüßt haben. Daraus resultierte einerseits eine große theoretische Bezugsmenge für das Unternehmen GRAF. Wenn jedoch die gesamte Kunststoffrecycling-Branche eklatante Absatzprobleme hat, läuft GRAF in Bezug auf das vorliegende Projekt Gefahr, seine mittelständischen Vorprodukt-Lieferanten der im neuen Kunststoff-Recyclingwerk zu verarbeitenden Kunststoffabfälle (Sammeln, Waschen, Vorzerkleinern) aufgrund wirtschaftlicher Schwierigkeiten zu verlieren. Aktuell hat sich GRAF daher an der Firma Wilken Plastics Energy GmbH (Haren/Emsland) beteiligt. Das Unternehmen beschäftigt sich mit der Vortrennung, dem Waschen und der Vorzerkleinerung von Kunststoffabfällen und liefert Teile seiner Produktion an GRAF. Diese Beteiligung ist ein wichtiger Bestandteil zur Erhaltung und Sicherung der Lieferkette.

Aus der Gewerbeabfallverordnung erwartete GRAF einen Impuls für den zukünftigen Bezug gemischter Polyolefinabfälle in ausreichender Menge. Dies scheint jedoch aus heutiger Sicht gefährdet, da gemäß unseren Beobachtungen Verpflichtungen in der Praxis nicht ausreichend umgesetzt und vollzogen werden. Als Resümee muss gezogen werden, dass Neuware von vielen Produzenten vermutlich noch sehr lange vor dem Einsatz von Recycling-Kunststoffen präferiert wird, solange Recycling nicht günstiger als Neuware ist. Hier sollte zukünftig ein Anreiz bzw. Regularien gefunden werden, um den Absatz von Sekundärrohstoff sicherzustellen und eine

nachhaltige Erhöhung des Rezyklateinsatzes in der Produktion von Kunststoffprodukten zu erreichen. Als zusätzliches Anreizsystem käme z. B. eine länderübergreifende CO<sub>2</sub>-Bepreisung des Rohstoffsektors infrage.

### Praktische Umsetzung des Vorhabens

Im Zuge der Umsetzung des Vorhabens zeigten sich in die Praxis neben den bereits aufgezeigten technischen Problemstellungen teils erhebliche Komplikationen im Bereich der Vorprodukte für das neue Kunststoff-Recyclingwerk. So konnte das in unserem erarbeiteten Datenblatt spezifizierte Anforderungsprofil (siehe Abbildung 6) von den Lieferanten der bei GRAF weiterzuverarbeitenden Kunststoff-Abfälle häufig nicht eingehalten werden. Es wurden PE-Anteile von bis zu 50 % verzeichnet. Darüber hinaus ist dieser Anteil mit teilvernetztem PE kontaminiert, was eine erhebliche Problematik darstellt. Das vernetzte PE verschlechtert die HDPE-Qualität erheblich, da es sich wie ein duroplastischer Fremdkörper im thermoplastischen PE verhält. Der Anteil an teilvernetztem PE erzwingt den Einsatz einer Feinfiltrierung, mit der die Festanteile zumindest teilweise ausgefiltert werden können. Jedoch finden sich teilweise dennoch Restanteile im granulierten Rezyklat, was zu mechanischen Schwachstellen und Qualitätseinbußen in den daraus hergestellten Produkten führen kann (z. B. bei der Rohrherstellung). Da der HDPE-Anteil im angelieferten Material höher ist als geplant und der Eigenbedarf der GRAF-Gruppe unterhalb dieser Menge liegt, muss HDPE an Dritte verkauft werden. Hierzu wurde an anderer Stelle bereits über niedrige Neuwarenpreise und den Preisverfall im Bereich der Recyclingware berichtet. Teilweise konnte bei HDPE-Rezyklat auch über sehr niedrige Preise keine Nachfrage generiert werden. Darüber hinaus entspricht die mit den Lieferanten vereinbarte Korngrößenverteilung im Wareneingang häufig nicht dem Anforderungsprofil der Sortieranlage. Um im notwendigen Kornspektrum arbeiten zu können, müssen Unterkorn und Überkorn zunächst abgesiebt werden, was mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist. Diese Ströme bewegen sich in einer Größenordnung bis 10 %, können aber im Moment nur bis zu 5 % als Beilaufware in bestehende Spezial-Rezepturen eingearbeitet werden. Alle Lieferanten haben derzeit noch erhebliche technische Probleme, das benötigte Band an Korngrößen zur Verfügung zu stellen. Daher zeichnet sich ab, dass ein neuer Schredder angeschafft werden muss, mit dem die benötigte Korngrößenverteilung des Input-Materials selbst erzeugt werden kann. Dies geht wiederum mit einem erheblichen Kapitalbedarf für die entsprechende Investition einher.

Ebenfalls problematisch stellte sich die Arbeitskräftesituation während des Projektes dar. Personal für die zu besetzenden Stellen zu finden, war außerordentlich schwierig. Dies sind Erfahrungen, die von anderen Unternehmen der Recyclingbranche bestätigt werden können.

#### **4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)**

In Bezug auf die erreichbaren Eigenschaften und die Erschließung neuer Stoffströme zur Herstellung von PP- und HDPE-Rezyklaten mit Neuwarecharakter hat das Demonstrationswerk mit dem verfolgten technischen Konzept sicher starken Modellcharakter.

Nach den gemachten Erfahrungen ist die Eignung zur Übertragbarkeit aufgrund einer stark fluktuierenden Marktsituation, der hohen benötigten Investitionssummen und teilweise erheblicher Problematiken bei der praktischen Einführung aus unserer Sicht allerdings momentan vorwiegend für integrierte Unternehmen gegeben. Diese können neben dem Rohstoffrecycling die dabei hergestellten Rezyklate gleichzeitig auch in ihre interne Produktion einbinden und sind daher in der Lage, äußere Faktoren besser auffangen zu können. Für Unternehmen, die einen langfristig gesicherten Absatzmarkt mit einer entsprechenden Preisakzeptanz vorweisen können, mag eine nutzbringende Übertragbarkeit zum heutigen Zeitpunkt ebenfalls bereits gegeben sein.

Darüber hinaus haben sicher Teilaspekte der Prozesskette und der eingesetzten Anlagentechnik Modellcharakter und können auch heute bereits sinnvoll auf andere Vorhaben übertragen werden.

Die dargestellten Sachverhalte machen eine Abschätzung des derzeitigen Übertragungs- und Multiplikationspotenzials ausgesprochen schwierig. Mengenmäßig entstehen in Europa pro Jahr genug Kunststoffabfälle, die sich mit der neu demonstrierten Prozesskette sinnvoll verarbeiten ließen, um damit theoretisch bis zu 100 weitere Kunststoff-Recyclingwerke ähnlicher Kapazität zu versorgen / zu betreiben. Ob dies unter den derzeitigen Bedingungen wirtschaftlich möglich ist, muss zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch stark hinterfragt werden.

## 5. Zusammenfassung

Die für die Projektdurchführung verantwortliche GRAF Polymers GmbH ist ein Unternehmen der inhabergeführten Unternehmensgruppe GRAF mit derzeit ca. 600 Mitarbeitern. Die Besonderheit der Unternehmensgruppe GRAF liegt im ganzheitlich umweltbewussten Unternehmenskonzept. Das bedeutet, dass die von GRAF gefertigten Produkte zu 80 % aus umweltschonendem Kunststoffrecyclat und mittels energetisch hoch effizienter Formgebungsprozesse hergestellt werden. Darüber hinaus lassen sich alle GRAF-Kunststoffprodukte zu 100 % recyceln.

Das vorliegende Demonstrationsvorhaben wurde durchgeführt, um die Unternehmensgruppe unabhängiger vom Rohstoffmarkt zu machen, die Einsatzquote von Rezyklaten weiter zu steigern und neue Rohstoffquellen nachhaltig zu erschließen. Zum Zeitpunkt vor dem Projekt war es nicht möglich, Kunststoffabfälle (Polyolefine) mit schwarz eingefärbten Anteilen wirtschaftlich sinnvoll und sortenrein zu trennen und zu hochwertigen Rezyklaten mit Eigenschaftsniveau von Neuware zu verarbeiten.

Ziel des durchgeführten Investitionsvorhabens war die Errichtung, Inbetriebnahme und Verifikation eines hochmodernen Kunststoff-Recyclingwerkes als großtechnisches Demonstrationsvorhaben, in dem gemischte PP-PE-Wertstoffströme, die bisher aufgrund ihrer Eigenschaften (Schwarzanteil, Verschmutzung) keinem hochwertigen werkstofflichen Recycling zugänglich gemacht werden konnten, durch eine neuartige Prozesskette zu Sekundärgranulaten mit Eigenschaftsniveau von Primärgranulaten aufbereitet werden können. Als Quellen der Inputströme wurden Gewerbeabfälle, kommunale Abfälle aus Wertstoffhöfen sowie verbleibende Hartkunststofffraktionen aus der Ersatzbrennstoffherstellung herangezogen. Dazu wurde eine neuartige Prozesskette etabliert. Schlüsselemente dieser Prozesskette bestehen in einer kontinuierlichen Homogenisierung von Produktionschargen, dem Einsatz von MIR-basierter Trenntechnologie sowie dem Einsatz hochmoderner Compoundlinien.

Die wichtigsten Ergebnisse bestehen darin, dass die erreichten Sortenreinheiten für die hergestellten PP- und PE-Rezyklate so groß sind, dass neuwareähnliche Eigenschaften erreicht werden und damit künftig Neuware ersetzt werden kann. Im Gegensatz zu herkömmlichen Recyclingwerken können erheblich größere Chargen von bis zu 800 t mit homogenisierten Eigenschaftsprofilen erreicht werden. Durch den Betrieb eines eigenen Werkstofflabors ist eine Vielzahl von Materialcharakterisierungen möglich, die an herkömmlichen Rezyklaten nicht durchgeführt werden. Dies ermöglicht eine Aussonderung von Produktionschargen, welche die im Datenblatt vorgegebenen Spezifikationen nicht erfüllen. Diese Chargen werden für Bauteile verwendet, welche keine kritischen Spezifikationen erfüllen müssen.

Bei Verladung aus den Warenausgangssilos wird ein individuelles Abnahmeprüfzeugnis erstellt, das die vom Kunden angeforderten Messwerte enthält.

Bezogen auf die Gesamtkapazität wird das neue Kunststoff-Recyclingwerk die Umwelt künftig mit über 100.000 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Jahr entlasten. Die große Fluktuation der Marktpreise sowie nicht unerhebliche technische Hürden bei Umsetzung der Verfahren erschweren einen wirtschaftlichen Betrieb des neuen Werkes. In einer integrierten Unternehmensgruppe mit hoher Wertschöpfungstiefe wie GRAF ist der wirtschaftliche Betrieb jedoch trotz Schwierigkeiten möglich.

In Bezug auf die erreichbaren Eigenschaften und die Erschließung neuer Stoffströme zur Herstellung von PP- und HDPE-Rezyklaten mit Neuwarecharakter hat das neue Werk mit dem verfolgten technischen Konzept sicher starken Modellcharakter.

Aufgrund der hohen benötigten Investitionssummen, einer stark fluktuierenden Marktsituation und teilweise erheblicher Problematiken bei der praktischen Einführung ist die Eignung zur Übertragbarkeit des Demonstrationsprojektes aus unserer Sicht momentan vorwiegend für integrierte Unternehmen gegeben. Neben dem reinen Rohstoffrecycling können solche Unternehmen die dabei hergestellten Rezyklate gleichzeitig auch in ihre Produktion einbinden. Dies versetzt sie in die Lage, äußere Faktoren besser auffangen zu können. Bei einem langfristig gesicherten Absatzmarkt mit einer entsprechenden Preisakzeptanz, ist eine nutzbringende Übertragbarkeit bereits zum heutigen Zeitpunkt gegeben.

## 6. Summary

GRAF Polymers GmbH, which is responsible for the project implementation, is a company of the owner-managed GRAF group with currently approx. 600 employees. The special feature of the GRAF group lies in its holistic ecological corporate concept. This means that 80% of the products manufactured by GRAF are made from environmentally friendly recycled plastics by means of highly energy-efficient molding processes. In addition, all GRAF plastic products are 100% recyclable.

The present goal of the project was to make the group more independent of the raw materials market, to further increase the rate of recycle-based materials used and to sustainably develop new raw material sources. Previous to the project, it was impossible to separate plastic waste (polyolefins) with black coloured components in an economically viable manner and to recycle them into high-quality recycle-based materials with the property level of virgin material.

The objective of the project was the construction, commissioning and verification of a state-of-the-art plastics recycling plant as a large-scale demonstration, in which mixed PP-PE material streams can be processed into recycle-based materials with the property level of virgin grade raw materials by means of a novel process chain. Up until now, this could not be made available for high-quality material recycling due to their properties (black content, contamination). The sources of the input streams were to be commercial waste, municipal waste from recycling centres and hard plastic fractions left over from refuse-derived fuel production. A novel process chain was established for this purpose. Key elements of this process chain consist of continuous homogenization of material lots, MIR-based separation technology, and state-of-the-art compounding lines.

The key results are that the purities achieved for the PP and PE fractions produced are sufficient to achieve virgin grade-like properties, allowing virgin material to be substituted in the future. In contrast to conventional recycling plants, significantly larger batches of up to 800t with homogenized property profiles can be achieved. By operating our own laboratory, a large number of material characterizations are possible which are not carried out on conventional recycling materials. This allows to identify production batches that do not meet the specifications given in the data sheet. These production batches will be used for plastic parts that do not have to meet any critical specifications.

When shipping from loading silos, an individual certificate of analysis is generated, which contains the measured values requested by the customer.

In terms of total capacity, the new plastics recycling plant will reduce the impact on the environment by more than 100,000t of CO<sub>2</sub> equivalents per year in the future.

The large fluctuation in market prices and complex technical obstacles in implementing the processes make it difficult to operate the new plant economically. Nevertheless, the operation is possible in an integrated group of companies with a value chain such as GRAF.

With regard to the obtainable properties and the development of new material inputs for the production of PP and HDPE recycle-based materials with virgin grade material character, the new plant with the implemented technical concept certainly has a convincing model character. However, due to the strongly fluctuating market situation, high investments required and the sometimes considerable problems with the practical implementation, a meaningful transferability is, in our experience, currently mostly given for integrated companies. This, in addition to the raw material recycling, can simultaneously integrate the products manufactured in the process into their internal production. For companies that can demonstrate a long-term market with a corresponding price acceptance, the transferability may also be given at the present time.

## 7. Literatur

- [1] *RECYCLING magazin*, Ausgabe 11, 2020.
- [2] „Conversio Studie 2020“.
- [3] J. Wagner, K. Heidrich, J. Baumann, T. Kügler und J. Reichenbach, „Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung,“ in *Texte | 14/2012*, Umweltbundesamt, 2012.
- [4] „China Entry-Exit Inspection and Quarantine Association Reused and Recycling Branch (CIQAR)“.
- [5] „HaustechnikDialog.de,“ 02.06.2015. [Online]. Available: <http://www.haustechnikdialog.de/News/16893/Hoehere-Gewalt-und-schwacher-Euro-Lieferengpass-und-Preiserhoehung-fuer-Kunststoffrohre>. [Zugriff am 16.08.2016].
- [6] „Plastverarbeiter.de,“ 10.04.2015. [Online]. Available: <http://www.plastverarbeiter.de/50959/rohstoffverknappungen-und-preisexplosionen-gefaehrden-aufschwung/>. [Zugriff am 16.08.2016].
- [7] „EuwidKunststoff.de,“ 22.04.2015. [Online]. Available: <http://www.euwid-kunststoff.de/news/einzelansicht/Artikel/kunststoffverpackungsmarkt-im-april-von-sorgenueber-rohstoffverknappung-gepraegt.html>. [Zugriff am 16.08.2016].
- [8] R. Vogt, C. Derreza-Greeven, J. Giegrich, G. Dehoust, A. Möck und C. Merz, „Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft,“ in *Texte | 46/2015*, Umweltbundesamt, 2015.
- [9] P. Icha, T. Dr. Lauf und G. Kuhs, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid - Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020,“ in *Climate Change | 45/2021*, Umweltbundesamt, 2021.
- [10] BMU - Pressemitteilung Nr. 001/21, „BMU.de,“ 04.01.2021. [Online]. Available: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/europaeische-union-beschraenkt-export-von-plastikmuell/>. [Zugriff am 18.03.2021].

**8. Anhang**

CIQAR	China Entry-Exit Inspection and Quarantine Association Reused and Recycling Branch
DSC	Differential scanning calorimetry / Dynamische Differenzkalorimetrie
EBS	Ersatzbrennstoff
EUWID	Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH
FTIR	Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer
HDPE	High-Density Polyethylen / Polyethylen mit hoher Dichte
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LDPE	Low-Density Polyethylen / Polyethylen mit niedriger Dichte
MFI	Melt Flow Index / Schmelzflussindex
MFR	Melt Mass-Flow Rate / Schmelzmassefließrate
MIR	Mittleres Infrarot
MVA	Müllverwertungsanlage
MVR	Melt Volume Rate / Schmelze-Volumenfließrate
NIR	Nahes Infrarot
OIT	Oxidation Induction Time / Oxidation-Induktionszeit
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PO	Polyolefin
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid