



Abschlussbericht

zum Vorhaben

RecyPrime® Kunststoffgranulate aus Post-Consumer Abfällen

Projektnummer: NKa3 – 003524

Zuwendungsempfängerin

Kunststoff Recycling Grünstadt GmbH

Umweltbereich

Abfall, Ressourcen, Klimaschutz

Laufzeit des Vorhabens

29.01.2021 – 30.04.2023

Autoren

Dr.-Ing. Torben Krafczyk – Geschäftsführer KRG GmbH ab März 2023

Jörg Berbalk – Geschäftsführer KRG GmbH bis Februar 2023

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

Datum der Erstellung

Februar – April 2023

Berichts-Kennblatt



Aktenzeichen UBA: NKa3 – 003524	Projekt-Nr.: NKa3 – 003524
Titel des Vorhabens: RecyPrime® Kunststoffgranulate aus Post-Consumer-Abfällen	
Autor/-en (Name, Vorname): Dr.-Ing. Torben Krafczyk Geschäftsführer KRG GmbH ab März 2023 Jörg Berbalk Geschäftsführer KRG GmbH bis Februar 2023	Vorhabenbeginn: 29.01.2021 Vorhabenende (Abschlussdatum): 30.04.2023
Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift): Kunststoff Recycling Grünstadt GmbH Nassaustraße 13-15 65719 Hofheim am Taunus	Veröffentlichungsdatum: 30.04.2023 Seitenzahl: 34
Gefördert im BMU-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz	
Kurzfassung (max. 1.500 Zeichen): Das werkstoffliche Recycling von Kunststoffen aus dem „Gelben Sack“ ist in Deutschland etabliert. In Leichtverpackungssortieranlagen (LVP-Sortieranlagen) werden verschiedenste Kunststofffraktionen wie HDPE, PP oder PS, etc. aufkonzentriert und in technisch etablierten Recyclinganlagen zu Mahlgütern und Regranulaten verarbeitet. Die Aufgabenstellung im Projekt RecyPrime® bestand für die Kunststoff Recycling Grünstadt GmbH (KRG) darin, eine Anlagentechnik so auszulegen und in Betrieb zu nehmen, dass aus dem Recyclinggut der LVP-Sortieranlagen ein werkstofflich und farblich einwandfreies, hochwertiges Regranulat entsteht, welches für die Produktion neuer Verkaufsverpackungen im Kosmetiksektor o.ä. eingesetzt werden kann. In der Zusammenführung etablierter bester verfügbarer Techniken ist es der KRG als Letztempfänger von gebrauchten Kunststoffen gelungen, am Standort Grünstadt, Rheinland-Pfalz, eine der modernsten europäischen Anlagen für das Recycling von HDPE- und PP-Kunststoffen aus dem Post-Consumer-Abfallsegment zu errichten und im Jahr 2023 in Betrieb zu nehmen.	
Schlagwörter: RecyPrime®, Kosmetik, Kunststoffe, PCR, Kunststoffveredelung, Mahlgüter, Regranulate, Mechanisches Recycling	
Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: 2 Elektronischer Datenträger: 1	Veröffentlichung im Internet geplant auf der Webseite: www.krg.center

Report Coversheet



Reference-No. Federal Environment Agency:	Project-No.: NKa3 – 003524
Report Title: RecyPrime® Kunststoffgranulate aus Post-Consumer-Abfällen	
Author/Authors (Family Name, First Name): Dr.-Ing. Torben Krafczyk Geschäftsführer KRG GmbH ab März 2023 Jörg Berbalk Geschäftsführer KRG GmbH bis Februar 2023	Start of project: 29.01.2021
	End of project: 30.04.2023
Performing Organisation (Name, Address): Kunststoff Recycling Grünstadt GmbH Nassaustraße 13-15 65719 Hofheim am Taunus	Publication Date: 30.04.2023
	No. of Pages: 34
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection	
Summary (max. 1.500 characters): Mechanical recycling of plastics from the „Dual System“ is an established business in Germany. A variety of plastic waste components such as HDPE, PP or PS, etc. is being processed and agglomerated in a number of large light packaging sorting plants. Their polymeric output fractions are then again selectively converted into flakes and regranulates using basic cold washing and extruding technologies. The scope of the RecyPrime®-Project in Grünstadt, Rheinland-Pfalz however lay in the engineering and design of a recycling process for regranulates with highest material and colour specifications, targeting the sales packaging production for the beauty care and cosmetics industry. By combining established best available technology in an innovative plant, Kunststoff Recycling Grünstadt GmbH has built one of the most modern plants in Europe for HDPE and PP recycling from post-consumer packaging waste, which has gone into operation in early 2023.	
Keywords: RecyPrime®, Cosmetics, Plastics, PCR, Polymere-Refining, Regrinds, Regranulates	



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Betriebsgelände der KRG	Seite 6
Abbildung 2	3D-Modell dreistufige Recyclinganlage	Seite 8
Abbildung 3	RecyPrime®-Mahlgüter PP-Weiß und PP-Natur	Seite 9
Abbildung 4	RecyPrime®-Regranulat HDPE-Weiß	Seite 10
Abbildung 5	Aufbereitungsprozess KRG	Seite 13
Abbildung 6	Intensivwäscher	Seite 14
Abbildung 7	Dichtentrenner	Seite 15
Abbildung 8	Auszug BI-Tool Betriebsstundenauslastung	Seite 17
Abbildung 9	Auszug BI-Tool Mengenbilanzen	Seite 17
Abbildung 10	Outputstatistik HDPE-Ballenware der Stufe 1	Seite 22
Abbildung 11	Inputstatistik Stufe 2 Nassgranulierung	Seite 22
Abbildung 12	Outputstatistik Waschanlage	Seite 23
Abbildung 13	RecyPrime® Output Extrusion Stufe 3	Seite 24
Abbildung 14	Abfallstatistik Recyclingprozess Stufe 1 bis 3	Seite 24
Abbildung 15	Produktivitätskennzahlen der Prozesstechnik	Seite 25
Abbildung 16	Energie- und Leistungskennzahlen der Prozesstechnik	Seite 26
Abbildung 17	Scope 1 und 2 Berechnung für das Geschäftsjahr 2022 auf Basis der PCC 2006	Seite 27
Abbildung 18	Datenbasis der Umweltbilanzierung der KRG	Seite 28

Abkürzungsverzeichnis

BI	Business-Intelligence
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMU	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BHKW	Blockheizkraftwerk
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent
ERP	Enterprise Resource Planning
Ex	Extruder
Fe	Ferrum (Eisen)
HDPE	High-Density Polyethylen
LDPE	Low-Density Polyethylen
NE	Nicht-Eisen (Metalle)
NIR	Nahinfrarot
OPP	Orientierte Polypropylen Folie
PC(R)	Post Consumer (Recycling/Recyclates/Recycled)
PET	Polyethylenterephthalat
PI(R)	Post Industrial (Recycling/Recyclates/Recycled)
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PV	Photovoltaikanlage
PVC	Polyvinylchlorid
SGD Süd	Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd
WL	Waschlinie



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	
1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens	Seite 6
1.2. Ausgangssituation	Seite 6
2. Vorhabensumsetzung	
2.1. Ziel des Vorhabens	Seite 8
2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	Seite 8
2.3. Umsetzung des Vorhabens	Seite 17
2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)	Seite 18
2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	Seite 18
2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms	Seite 19
3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung	
3.1. Bewertung der Vorhabensdurchführung	Seite 20
3.2. Stoff- und Energiebilanz	Seite 21
3.3. Umweltbilanz	Seite 26
3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse	Seite 28
3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	Seite 29
4. Übertragbarkeit	
4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung	Seite 31
4.2. Modellcharakter / Übertragbarkeit	Seite 31
4.3. Kommunikation der Projektergebnisse	Seite 31
5. Zusammenfassung / Summary	Seite 33
6. Literatur	Seite 34
7. Anhang	Seite 34

1. Einleitung

1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die Kunststoff Recycling Grünstadt GmbH ist ein Joint-Venture der Firmen Meinhardt Entsorgung Beteiligung GmbH, Hofheim am Taunus und der PreZero Deutschland KG, Porta Westfalica. Die KRG wurde im Jahr 2018 gegründet, ist eingetragen im Handelsregister des Amtsgerichts Frankfurt am Main (HRB 111619) und betreibt in Grünstadt, Rheinland-Pfalz, ihren Recyclingstandort. Die Geschäftsaufnahme fand zum 01.05.2018 statt. Die Gesellschaft beschäftigt derzeit rund 60 Mitarbeiter/innen. Die genehmigte Gesamtkapazität aus Post-Consumer- (PC)- und Post-Industrial- (PI) Kunststoffabfällen beträgt über 50.000 Jahrestonnen. Die KRG ist beim Einkauf von Altkunststoffen und bei der Vermarktung ihrer Produkte europaweit tätig.



Abbildung 1: Betriebsgelände der KRG

- Standort der Investition: Obersülzer Straße 45, 67269 Grünstadt
- Größe des Standortes: 31.500 m²
- Inputmenge PC-Abfälle aus Sortieranlagen: ca. 35.000 Tonnen/Jahr
- Inputmenge PI-Abfälle: ca. 15.000 Tonnen/Jahr
(Verarbeitung in der Trockenvermahlung)
- Kapazität der Sortieranlage: ca. 10 Tonnen/Std. (Betriebszeiten: 2 Schicht Betrieb)
- Kapazität der Heißwäsche: ca. 5 Tonnen/Std. (Betriebszeiten: 3 Schicht Betrieb, 7 Tage/Woche)
- Kapazität der Extruder: ca. 2,5 Tonnen/Std. je Extruder (Betriebszeiten: 3 Schicht Betrieb, 7 Tage/Woche)
- Gesamtinvestitionsvolumen: ca. 22. Mio. Euro

1.2. Ausgangssituation

In Deutschland werden Stand September 2018 rund 4.378 Mio. Tonnen Kunststoffe für die Herstellung von Verpackungen eingesetzt. Davon ca. 3,14 Mio. Tonnen für Verpackungen



von kurzlebigen Produkten. Von diesen 3,14 Mio. Tonnen werden mehr als 95 % (3,08 Mio. Tonnen) zu Abfall [Conversio; 2018].

Die für Verpackungen genutzten Kunststoffmengen sind im Jahr 2017 zu über 90 % aus Neuware hergestellt. Lediglich 9,1 % werden aus Rezyklaten beigesteuert. Diese Rezyklatmengen werden allerdings überwiegend aus Produktionsabfällen und somit sauberen, sortenreinen Kunststofffraktionen hergestellt [Recyclingmagazin; 2022]. Die im Rahmen der Sammlung und Sortierung von Kunststoffverpackungen aus privaten Haushalten anfallenden Kunststoffe werden aktuell zu über 80 % im Bereich der Bau-, Verpackungs- und landwirtschaftlichen Anwendungen eingesetzt. PP (Polypropylen), HDPE (High-Density Polyethylen), LDPE (Low-Density Polyethylen) und PET (Polyethylenterephthalat) sind die im Verpackungsbereich mengenmäßig größten Kunststoffarten. Diesen folgen auf Platz 5 PVC und auf Platz 6 PS [Conversio; 2022].

Mit der Verarbeitung von HDPE-, PP- und PS-Kunststoffen (Polystyrol) schließt die KRG Wertstoffkreisläufe und leistet damit einen wichtigen Beitrag zum Ressourcenschutz. Die Kunststoffarten werden technologisch auf einer einzigen Recyclinganlage sortiert, aufbereitet und zu Rezyklaten verarbeitet. Dadurch werden Recyclingvorgaben erfüllt. Die bei der KRG produzierten Regranulate bedienen darüber hinaus den notwendigen Anteil an recyceltem Kunststoff zur Verwendung in neuen Kunststoffprodukten (vorzugsweise hochwertigen Verpackungen).

Die KRG trägt dazu bei, dass ein Teil der 500.000 Tonnen Kunststoffabfälle (die Menge HDPE, PP, PS welche in Deutschland nach der Sortierung des „Gelben Sackes“ zur Verfügung steht) einer qualifizierten werkstofflichen Verwertung zugeführt werden. Die KRG setzt dabei stark auf das Thema regionale Zirkularität und bindet in den Feldern Beschaffung, Absatz und bei der Betriebsführung primär lokale Recycler und Ressourcen ein. Zulieferer wie die MEILO Gesellschaft zur Rückgewinnung sortierter Werkstoffe mbH & Co. KG in Gernsheim, Hessen sowie Kunden aus dem Bereich der Konsumgütererzeugung, wie die Werner & Mertz GmbH in Mainz, sind beispielhafte Erfolgsgrößen der regionalen Recyclingstrategie, die maßgeblich dabei unterstützen, die Vision der geschlossenen Kreislaufwirtschaft in Deutschland voranzutreiben.

Der Einsatz der RecyPrime®-Produkte führt im Vergleich zur Verwendung von Neuware in der Herstellung von Neuverpackungen zu einer theoretischen Einsparung von bis zu 33.100 Tonnen CO₂. Das entspricht überschlägig 1,39 kg CO₂ pro Kilogramm Neuware bei HDPE [Kunststoffverpackungen; 2021].

2. Vorhabenumsetzung

2.1. Ziel des Vorhabens

Ziel des Projektes RecyPrime® ist die Herstellung von Kunststoffregranulaten aus Verpackungskunststoffen aus den Dualen Systemen (haushaltsnahe Erfassung von Kunststoffverpackungen) und die Wiederverwendung dieser Regranulate in Verpackungsapplikationen.

Die Ziele des Vorhabens waren und sind seit Beginn der Planung die Folgenden:

- Schaffung eines industriellen Veredelungsprozesses für Verpackungskunststoffe aus den Dualen Systemen oder vergleichbaren Quellen
- und Rückführung dieser als Regranulate in die Herstellung von neuen Verkaufsverpackungen.
- Der Anwendungsbereich der Regranulate soll für Verpackungen im Kosmetiksegment als auch für Reinigungsmittel etc. liegen. Eine Anwendung der Regranulate für Verpackungen, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, ist möglich, aber derzeit noch nicht gesetzlich zugelassen.
- Einsparung von CO₂ durch den Einsatz der RecyPrime®-Produkte an Stelle von Neuware (Virgin).
- Darstellung des gesamten Veredelungsprozesses an einem Standort, von der vorsortierten Ballenware bis hin zum einsatzfähigen Regranulat ohne Additivierung.
- Schaffung und Erhalt von neuen Arbeitsplätzen.
- Unterstützung der regionalen Kreislaufwirtschaft.
- Umsetzung der europäischen Kreislaufstrategie.

2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

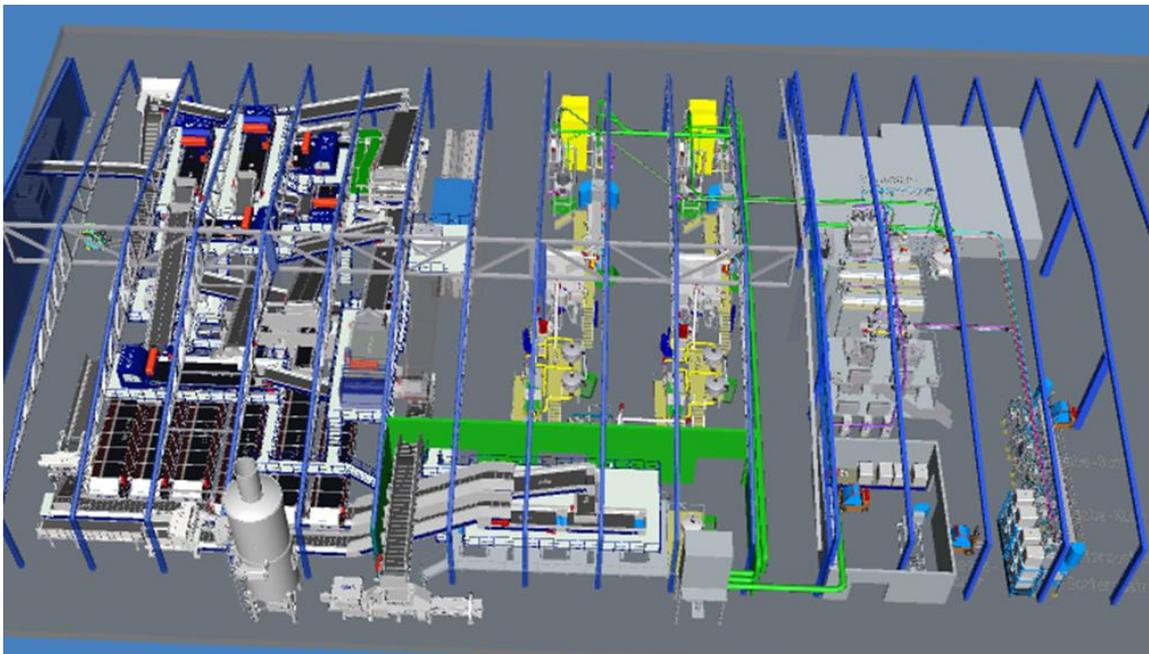


Abbildung 2: 3D-Modell dreistufige Recyclinganlage



Die aus LVP-Anlagen stammenden Kunststofffraktionen sind auf Grund ihrer abgestuften Sortenreinheit (Vermischung von farblichen Kunststoffen und Kunststoffarten) im Zuge eines zweistufigen Recyclingprozesses aus Mahlguterzeugung und Regranulierung durch Extrusion eher für minderwertigere Produkteinsätze geeignet und werden dem Qualitätsanspruch der RecyPrime®-Anwendung so nicht gerecht.

Aus diesem Grund werden die von LVP-Sortieranlagen erworbenen Ballenwaren bei der KRG erneut sortiert (siehe Abbildung 2 linker Teil), um anschließend einen Materialstrom mit einer Farb- und Materialreinheit von größer 94 % zu erhalten. Zielkunststoffe aus der nachsortierten HDPE-Ballenware sind bspw. HDPE-Flaschen und Gebinde in den Farbabstufungen Bunt, Weiß und Natur (Transparent). Mit dieser primär sensorgestützten Nachsortierung (Nahinfrarottechnik (NIR) und Bilderkennung) wird die erste Veredelungsstufe der PC-Kunststoffabfälle aus der überwiegend haushaltnahen Erfassung erreicht (siehe auch Abbildung 5 zur weiteren Erläuterung der Outputfraktionen).

Im nächsten Veredelungsschritt werden die nachsortierten Kunststoffe HDPE, PP oder PS, nicht wie heute üblich mit kaltem Wasser, sondern in heißem Wasser unter Zugabe von Waschmittel und Lauge gereinigt. Der vom PET-Recycling adaptierte Heißwaschprozess ist seit vielen Jahren ein bekanntes und erfolgreiches Verfahrensmittel. Für die oben genannten Kunststoffarten ist diese Prozessanwendung aber etwas Neues. Erst durch die richtige Kombination aus Wassermenge, Reinigungsmittel, Rheologie, Prozesszeit und Temperatur werden zerkleinerte, verschmutzte und bedruckte Kunststoffflakes effektiv gereinigt, so dass daraus hochwertige Regranulate im Industriestandard hergestellt werden können. Die nach dem Heißwaschprozess entstandenen Mahlgüter werden intensiv mit Frischwasser abgespült und mechanisch als auch thermisch getrocknet. Nach dem Trocknungsprozess wird mittels einer Windsichtung eine Trennung der Etiketten, Labels und Folien vom Flake vorgenommen.



Abbildung 3: RecyPrime®-Mahlgüter PP-Weiß und PP-Natur

Die auf diese Weise gewonnenen Mahlgüter (Abbildung 3) werden in einem nachgeschalteten Sortierschritt mittels NIR und Farberkennung auf eine farbliche und werkstoffliche Reinheit von über 99,6 % weiter aufkonzentriert. Nur so kann eine kontinuierliche, dauerhafte, gleichbleibende Materialqualität im Regranulat sichergestellt werden. Über eine maximal digitalisierte Massenbilanzierung kann bereits zu Beginn des Gesamtprozesses ausgerechnet werden, welche Qualität in den einzelnen Fraktionen



entstehen wird. Dies ist aktuell einmalig in der Kunststoffveredelung von PC-Input- bzw. Abfallfraktionen (weitere Erläuterungen dazu finden sich unter der Auflistung wesentlicher Innovationen im Abschnitt Produktionscontrolling dieses Kapitels).



Abbildung 4: RecyPrime®-Regranulat HPDE-Weiß

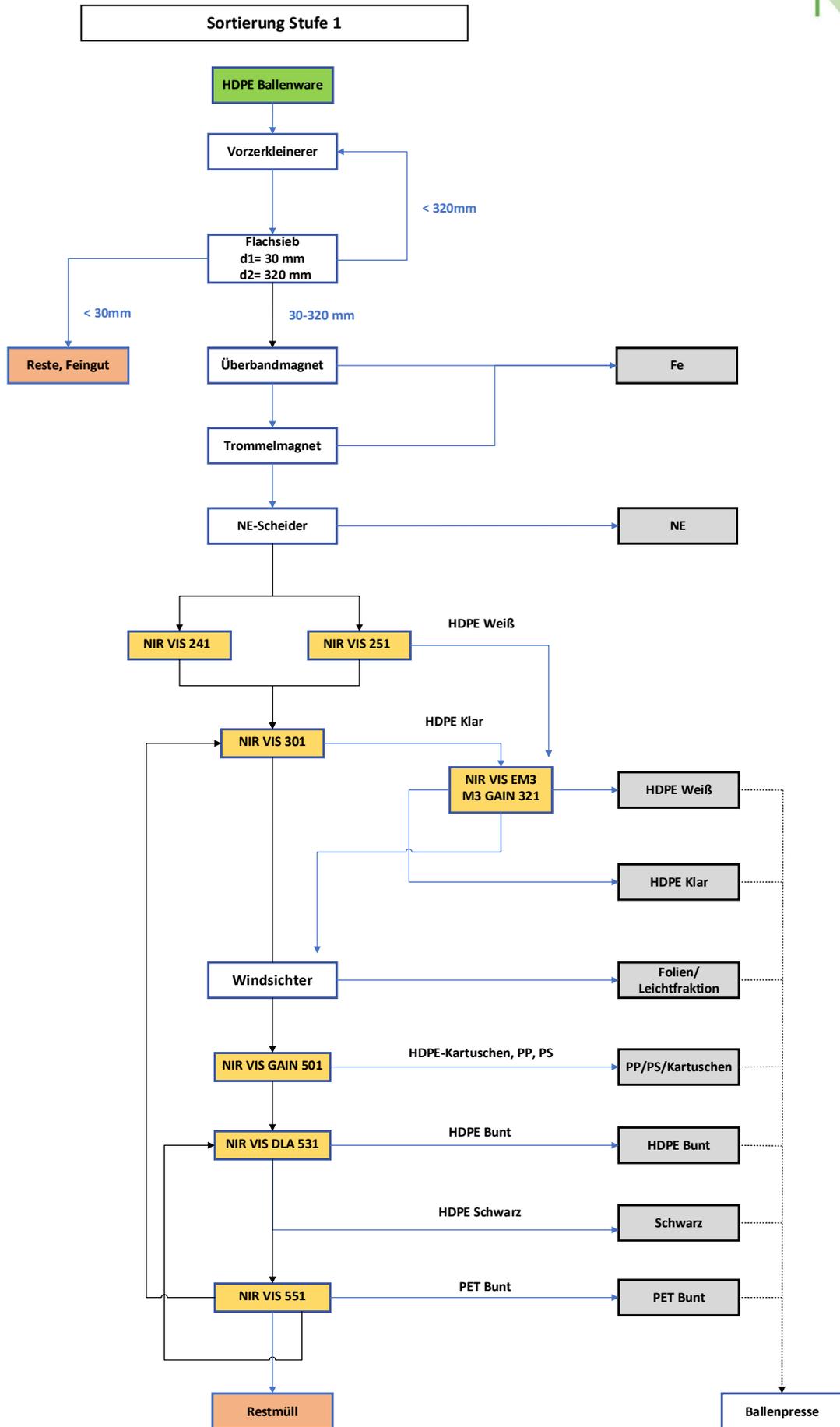
Die HDPE- oder PP-Mahlgüter werden im letzten Verfahrensschritt erhitzt, verflüssigt, gefiltert und mittels Unterwassergranulierung in ihre finale Granulatform (siehe Abbildung 4) gebracht. Zwei im Extruder integrierte Vakuumstufen und die nachgeschaltete Geruchsneutralisation, sorgen für die gleichbleibend hochwertige Qualitäten bei großer Qualitätsschwankungsbreite im Input.

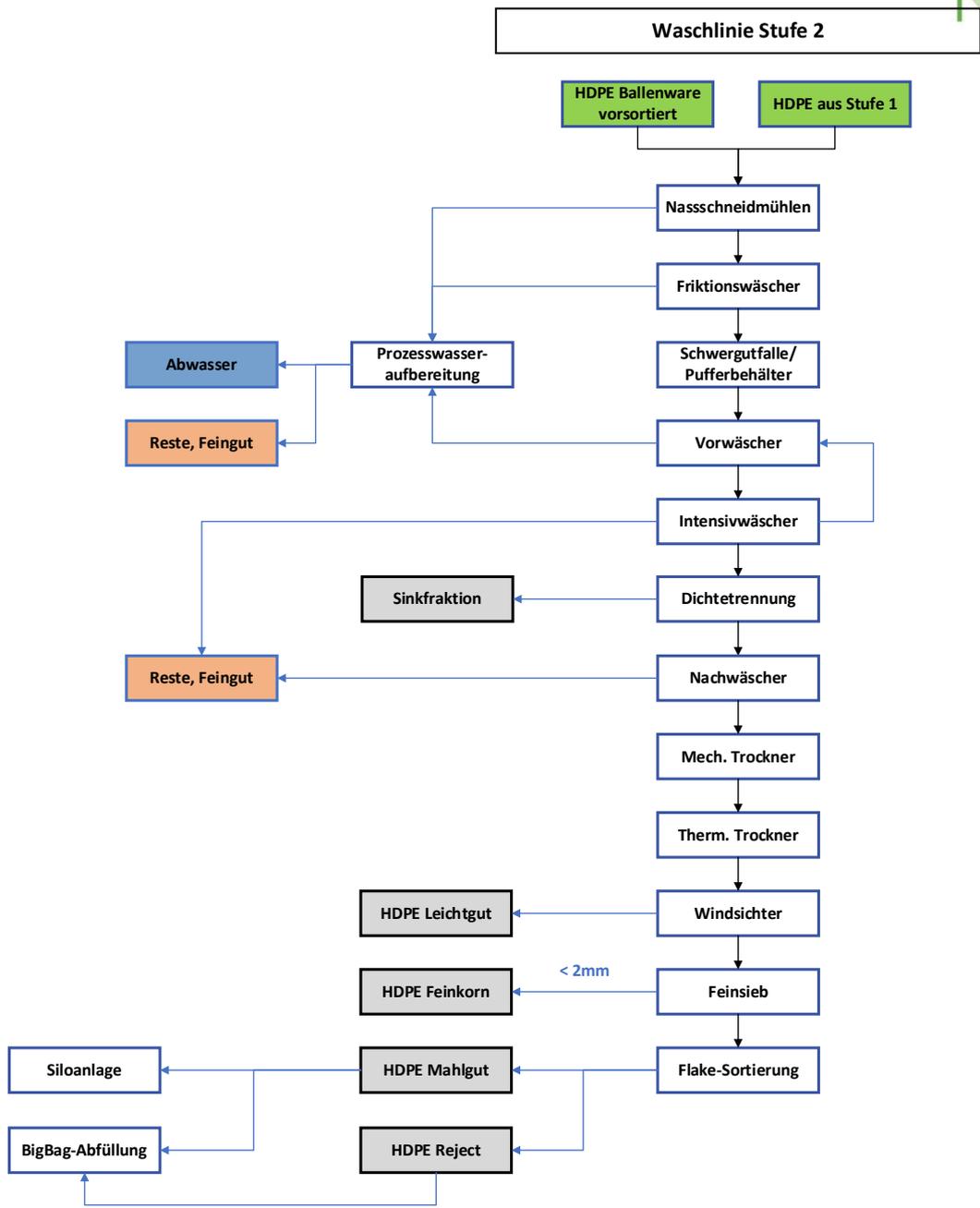
Zusammenfassend gliedert sich die in Grünstadt installierte Anlagentechnik in drei Systemstufen:

Stufe 1: Vorsortierung (der Ballenwaren (i.d.R. LVP) aus dem Dualen System und/oder vergleichbaren europäischen Sammelsystemen/Erzeugerquellen)

Stufe 2: Heißwäsche inkl. optischer Nachsortierung (Zerkleinerung und Wäsche der vorsortierten Ballenware zu Mahlgütern bzw. Zudosierung von bereits gewaschenen Mahlgütern oder vorgereinigten Mahlgütern aus dem PIR)

Stufe 3: Extrusion inkl. Desorption (Verarbeitung der Mahlgüter aus der prozessinternen BigBag-Verladung oder dem Sammelsilo zu Regranulaten)





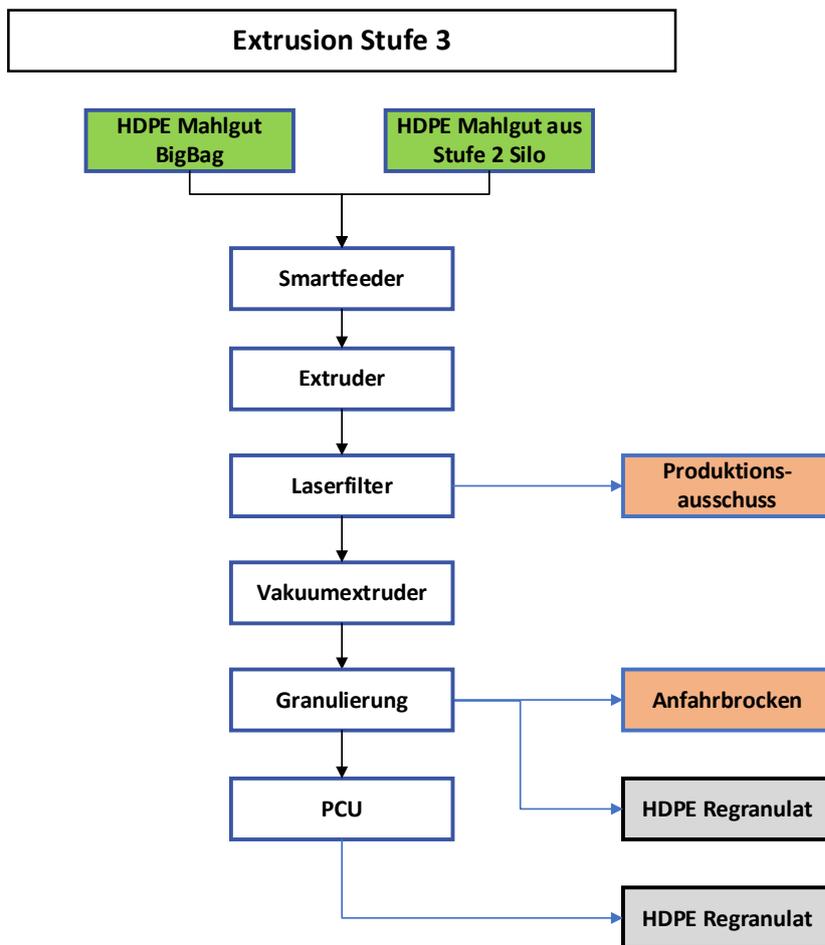


Abbildung 5: Dreistufiger Aufbereitungsprozess der KRG am Beispiel von HDPE

Diese prozesstechnische Auslegung basiert auf vorhandenen Recyclingtechniken, die in einer neuen Art und Weise kombiniert wurden, ergänzt durch eigens entworfene innovative Elemente. Diese sind u.a.:

1. Das Heißwaschmodul
2. Das Osmosewassermodul
3. Die Trennstufe mit Trennbecken
4. Die Reinigung des Prozesswassers/Flotationsstufe
5. Die Fördertechnik
6. Das energetische Gesamtkonzept
7. Das digitalisierte Produktionscontrolling

Im Detail ist zu den einzelnen Innovationen Folgendes auszuführen:

1. Das Heißwaschmodul

Das Heißwaschmodul unterscheidet sich von anderen Heißwaschmodulen, die in der Praxis zum Teil für PP und HDPE eingesetzt werden, in der Art der Wäsche bzw. Reinigung der Kunststoffmahlgüter. Konventionelle Heißwaschmodule halten die in das Wasserbad eingebrachten Kunststoffe mittels Propellern oder ähnlichen Bauteilen in Rotation. Die Kunststoffteile schwimmen in diesen Heißwaschmodulen auf und berühren sich nur zufällig. In der Regel ist der Materialfluss durch diese Module horizontal.



Abbildung 6: Intensivwäscher

Das bei der KRG aufgebaute Heißwaschmodul ist vertikal ausgeführt. Es ist so konzipiert, dass die Kunststoffmahlgüter am oberen Teil des Waschmoduls eingeführt werden und im System eine Materialsäule bilden. Durch diese Materialsäule entsteht ein Druckgefälle im Behälter, das über den Befüllungsgrad gesteuert wird und mit zunehmender Schüttdichte im unteren Teil des Behälters zunimmt. Das Mahlgut wird im Waschmodul mittels eines Rührarms in Bewegung gehalten, sodass die Oberflächen der Kunststoffteilchen mechanisch gegeneinander arbeiten. Diese sanfte Reibungswirkung eröffnet die Möglichkeit der materialschonenden, intensiven Reinigung und führt zu geringeren Materialverlusten im Feinkornbereich als dies bei einer horizontalen Ausführung der Fall ist. Der Gesamtprozess wird mit Lauge und Reinigungsmittel angereichertem heißem Wasser in einem Temperaturspektrum von bis zu über 80°C durchströmt.

2. Das Osmosewassermodul

In Europa ist offiziell noch keine Kunststoffwaschanlage für Polyolefine bekannt, die in der Nachwäsche mit Osmosewasser arbeitet. Osmosewasser ist in seiner reinen Form ungesättigt und dadurch in der Lage feine Partikel besser aufzunehmen. Der Einsatz von Osmosewasser führt zu einem effizienteren Nachspüleffekt der Mahlgüter. Weiter ist eine Querkontamination der gewaschenen Kunststoffmahlgüter mit verunreinigtem Prozesswasser durch die prozesstechnische Anordnung der Nachwäsche ausgeschlossen.

3. Die Trennstufe mit Trennbecken



Abbildung 7: Dichtentrenner

Die Trennstufe zur Trennung von schwimm- und sinkfähigen Kunststoffen erfüllt mehrere Funktionen. Einerseits werden hier die diversen Kunststoffe (bspw. PET-Reste aus der Kappenware oder PS, welches in der Sinkfraktion landet) und Metalle sowie Verunreinigungen (mit einer Dichte größer 1 g/cm^3) von der Zielfraktion getrennt, andererseits erfolgt dort die Pufferung der von den Kunststoffmahlgütern abgewaschenen Reinigungsmitteln und der Lauge.

Die Mahl Güter werden mit einer Entwässerungsschnecke aus der Trennstufe herausgefördert, was eine geringe Verschleppung der an den Kunststoffmahlgütern anhaftenden Lauge und Reinigungsmittelbestandteilen mit sich bringt und so eine effiziente Rückgewinnung der Reinigungsmittelzusätze ermöglicht. Die verringerte Querkontamination führt des Weiteren zu einer deutlichen Reduzierung des Frischwassereinsatzes im Nachreinigungsprozess und hebt sich damit von herkömmlichen Fließbettflotationen ab.

Die aktive Steuerung der Trennstufe ermöglicht einen Wechsel in der Festlegung der weiterzuverarbeitenden Zielfractionen (Schwimm-Fraktion oder Sink-Fraktion). Damit verfügt das Verfahren über die notwendige bauliche Flexibilität, die zur Verarbeitung von HDPE, PP, PS und PET notwendig ist. Eine reine Verarbeitung von PET-Inputware, Mahl Gütern und Granulaten ist bei der KRG jedoch nicht vorgesehen.

4. Die Reinigung des Prozesswassers/Flotationsstufe

Die Reinigung des Prozesswassers in einer systemgekoppelten Flotation ermöglicht der KRG, ein sehr sauber aufbereitetes Wasser in den Prozess (in die Nassschneidmühlen) zurückzuführen. Nicht gelöste Bestandteile werden nahezu zu 100 % über die Flotation ausgeschieden.

Die Innovation des Herstellers liegt in der Auslegung der Blasengeometrie und -menge, um die Flocken und damit die freien Schmutzpartikel effizient auszutragen. Die eingesetzte Technik ermöglicht die Rückführung von stündlich bis zu 50 m^3 aufbereitetem Prozesswasser, ohne die Qualität der Mahl Güter negativ zu beeinflussen. Der Anteil an



gereinigtem Prozessabwasser, der stündlich dem Entsorgungskreislauf als Abwasser zugeführt wird, beträgt lediglich 6,4 % (ca. 5 m³/h).

5. Die Fördertechnik

Die Fördertechnik der Gesamtanlage ist so geplant und ausgelegt, dass der Transport der Kunststoffmahlgüter zwischen den Aggregaten mit Schnecken erfolgt. Der Einsatz von Schneckentechniken ermöglicht die Einsparung von Zentrifugen, die ansonsten die Materialien zwischen den jeweiligen Aggregaten abtrocknen müssten.

Die Schneckentechnologie reduziert die Feinkorn- bzw. Kleinstpartikelentstehung im Mahlgut (Feinabrieb) und Verschleppung von Verunreinigungen zwischen den Aggregaten.

Der feine Kunststoffabrieb ist derzeit nur für die thermische Verwertung (Ersatzbrennstoffherstellung) geeignet und ein Verlust in der Ausbringungsquote der Kunststoffe. Die nach dem Trocknungskreislauf in der Zielfraktion verbleibende Feinkornfraktion (0 – 2 mm) beträgt etwa 6 % des Waschlinseninputs (Stufe 2) und wird vor der Flakesortierung abgesiebt (Kapitel 3.2 zu Thema Stoff und Energiebilanzen). Diese Fraktion wird einer stofflichen Letztverwertung zugeführt und mindert damit den prozentualen Anteil der Nebenströme, welche in die thermische Verwertung verbracht werden, um ca. 1.600 t/a bei Volllast (siehe auch Abbildung 12 zur Erläuterung der prozentualen Aufteilung).

Des Weiteren ist der Einsatz der Schneckentechnik gegenüber dem herkömmlichen Zentrifugalförderern aus energetischer Sicht nachhaltiger.

6. Das energetische Gesamtkonzept

Das energetische Gesamtkonzept des Recyclingstandorts fußt auf der Einbindung eines mit Erdgas betriebenen Blockheizkraftwerks (BHKW). Die Betriebsweise der RecyPrime[®] Produktionslinie benötigt unter Volllast ganzjährig Wärme für die Heißwaschanlage und elektrische Energie in der Prozesstechnik. Beide Energieformen werden durch das BHKW abgedeckt, so dass nur Stromspitzen oder Unterbrechungszeiten im BHKW mit einem separaten Gasbrenner abgedeckt werden müssen.

Im Rahmen der Energiebilanzierung und Wirtschaftlichkeitsevaluation von alternativen Energieträgersystemen wurde festgestellt, dass das BHKW für den Anwendungsfall in Grünstadt um den Faktor Sechs günstiger ist, als eine Heizkesselanlage mit Biobrennstofffeuerung.

Der Aufbau einer Photovoltaikanlage (PV) zu Beginn des zweiten Quartals 2023 hilft des Weiteren bei der Eigenstromabdeckung und trägt zur Verbesserung der CO₂-Bilanz des Produktionsstandortes bei.

Das Unternehmen hat ein Energiemanagementsystem nach DIN EN ISO 50001 und ein Umweltmanagementsystem nach DIN EN ISO 14001 zertifiziert.

7. Produktionscontrolling

Die Branche investiert kontinuierlich in neue Technologien und Fachpersonal, um die stetig wachsenden Standards im Kunststoffrecycling zu erfüllen und zu verbessern [Hans Böckler Stiftung; 2020]. Eine mit diesem Fortschritt einhergehende Notwendigkeit ist die vollständige Erfassung und Operationalisierung der im Kunststoffrecycling vorhandenen



Prozesse. Die Digitalisierung von Aufbereitungsschritten und deren Nacherfassung im Enterprise Resource Planning (ERP)-System sind heute wesentliche Größen, die zur effizienten Unternehmenssteuerung beitragen.

Operative Kennzahlensysteme bieten die Basis für kontinuierliche, nachhaltige Verbesserungen in der Maschinenteknik, den Betriebsabläufen (Lager, Logistik, Produktion) und schaffen eine logische Rückkopplung zwischen den operativen Einheiten, auch in Richtung Stoffstrom und Vertrieb.

Im Bereich der systematischen Operationalisierung der im Unternehmen vorhandenen Prozesse liegt die Kunststoffrecyclingbranche noch weit hinter ihrem Potenzial, weshalb Kennzahlenerhebungen oder Kalkulationen auf Produkt-, Produktgruppen- oder Unternehmensebene in den meisten Unternehmen der Branche kaum bis gar nicht vertreten sind [Plastverarbeiter; 2022].

Die KRG hat ein volldigitalisiertes Business-Intelligence-System (BI) etabliert, welches eine transparente Erfassung und Bewertung der unternehmensinternen Prozessschritte ermöglicht (Auszug siehe Abbildungen 8 und 9).

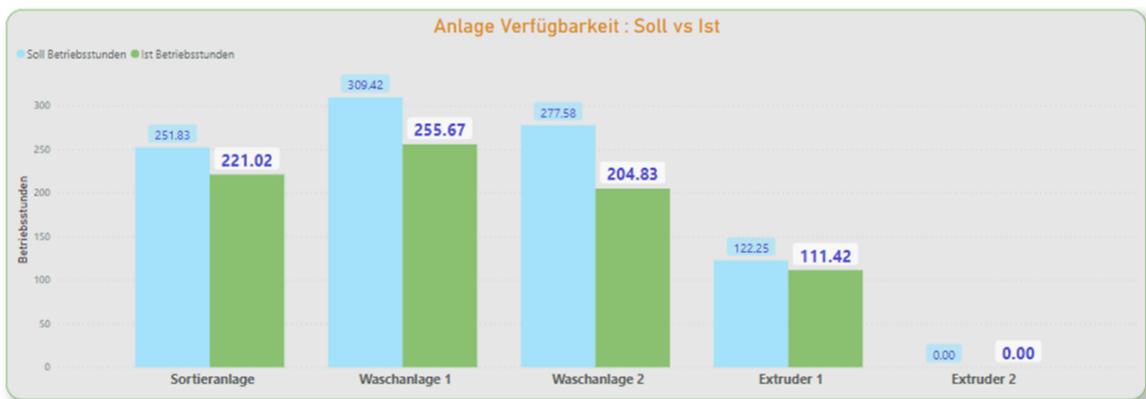


Abbildung 8: Auszug BI-Tool Betriebsstundenauslastung



Abbildung 9: Auszug BI-Tool Mengenbilanzen

2.3 Umsetzung des Vorhabens

Die wesentlichen Arbeitsschritte von der Planungsphase bis zur Inbetriebnahme lassen sich in die nachfolgenden Abschnitte unterteilen:



1. Formulierung des Projekt-Scopes
2. Marktrecherche zur Detektion von potentiellen Maschinenlieferanten im Hochqualitätssektor des Kunststoffrecyclings
3. Einholung von ersten indikativen Angeboten für die jeweiligen Anlagenteile und Anlagenkomponenten
4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Machbarkeitsstudie
5. Erster Meilenstein: Freigabe der Gesellschafter zur weiteren Bearbeitung des Projektes auf Basis der Wirtschaftlichkeitsanalyse
6. Beginn der Ausarbeitung der Antragsunterlagen zur Einreichung eines Antrags auf Erteilung einer Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) für den Bau und den Betrieb der geplanten RecyPrime®-Anlagentechnik
7. Versuchsführung bei unterschiedlichen Anlagenlieferanten und Allokation der besten verfügbaren Technik
8. Technische Detailplanung
9. Festlegung der finalen Anlagenlieferanten (technisches Portfolio)
10. Verhandlung von entsprechenden Lieferverträgen
11. Sichtung und Bewertung der Auflagen der erteilten Genehmigung nach BImSchG
12. Finale Beauftragung der einzelnen Anlagenlieferanten
13. Festlegung eines Zeitplans zum Aufbau der einzelnen Gewerke mit den jeweiligen Lieferanten und Abstimmung der zeitlichen Rahmenbedingungen mit diesen
14. Montage der Anlagentechnik
15. Inbetriebnahme der Anlagentechnik
16. Technische Leistungsfahrten
17. Abnahme der Anlagentechnik

2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Um einen Aufbau und den Betrieb einer Anlage zur Herstellung von Kunststoffregranulaten betreiben zu dürfen, ist es notwendig, eine Genehmigung nach BImSchG zu erwirken. Für die KRG wurde die Genehmigung nach §§ 12, 13, 16 und 19 des BImSchG in Verbindung mit den Ziffern 8.11.2.4 und 8.12.2 der 4. BImSchV erteilt.

Die Unternehmung führt darüber hinaus ein Zertifikat für den Letztempfängerstatus von gebrauchten Kunststoffen.

2.5. Erfassung und Aufbereitung von Betriebsdaten

Zur Prüfung der Einhaltung der vertraglich vereinbarten Parameter wurden für die einzelnen Gewerke mit dem jeweiligen Anlagenlieferanten unterschiedliche Leistungswerte fixiert, die nach Übernahme der Anlagentechnik vom Betreiber weiterhin kontrolliert werden und Teil der technischen Abnahme sind.

a. Sortieranlage:

- a. Qualitäten der Inputmaterialien (Ballenware) auf die die Anlagentechnik ausgelegt wurden, namentlich DSD 324-1, 324-0 und 329-0
- b. Menge in Form des Nenndurchsatzes, hier 9,5 t/h bei kontinuierlicher, gleichbleibender Beschickung der Anlagentechnik



- c. Schüttgewicht der Inputware $\geq 55 \text{ kg/m}^3$
 - d. Trockensubstanz $> 80 \%$
 - e. Verfügbarkeit von mindestens 92% bei 250 Arbeitstagen pro Jahr, Zweischichtbetrieb und acht Stunden Arbeitszeit je Schicht
- b. Waschanlage:
- a. Produktionsdauer: 50 Wochen pro Jahr, 350 Tage pro Jahr, sieben Tage pro Woche, 24 Stunden pro Tag
 - b. Technische Verfügbarkeit für den Produktionszeitraum $\geq 94 \%$
 - c. Garantierte Outputmenge an Mahlgut $> 1,94 \text{ t/h}$
 - d. Inputqualitäten
 - e. Outputqualität der Mahlgüter in Bezug auf Restfeuchte, Oberflächenanhaftungen und Korngröße
- c. Extruder:
- a. Inputspezifikation
 - b. Verarbeitungsmenge pro Stunde in Bezug auf den Schmelzflussindex des Inputs
 - c. Filtrationsfeinheit

2.6. Konzeption und Durchführung von Messprogrammen

Die Erfassung und Bewertung der Qualitäts- und Leistungskennzahlen erfolgten durch das implementierte BI-System und das labortechnische Qualitätscontrolling. Ein Auszug der Ergebnisse und eine entsprechende Evaluation der Erfolgsrechnung finden sich auszugsweise in den Unterkapiteln 3.2 – 3.4 dieses Abschlussberichts.



3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1. Bewertung der Vorhabensdurchführung

Nach Erteilung des Genehmigungsbescheids der Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd (SGD) am 15.02.2021 konnte auf Basis der Zustimmung des BMU zum vorzeitigen Vorhabensbeginn (Datum 29.01.2021) unmittelbar mit der Beauftragung der einzelnen Gewerke begonnen werden. Die Tiefbaumaßnahmen begannen am 01.03.2021. Ebenfalls wurde unmittelbar mit der Ertüchtigung der Hallen, in welche die RecyPrime®-Anlagentechnik eingebaut wurde, begonnen. Die Tiefbaumaßnahmen, der Aufbau der Sortieranlage, die Installation der Heißwaschanlage sowie der gesamte Aufbau der Energieversorgung nebst BHKW verliefen reibungslos. Nach Baubeginn am 01.03.2021 konnten die ersten heißgewaschenen Mahlgüter am 30.11.2021 zur Beprobung entnommen werden. Der Laborbericht 370-027 (Anhang 1) vom 17.12.2021 von Firma MAKSC GmbH in Barleben zeigt, dass die Anlage ein Mahlgut mit einer Materialreinheit > 99 % HDPE erzeugt.

Somit konnte bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Projektverlauf festgestellt werden, dass die Sortierung der Ballenware und die Heißwäsche den Qualitätsanforderungen entsprechen. Die Anpassung der Sortierprogramme in der Stufe 1 gehören zu einem laufenden Verbesserungsprozess. Saisonal- und regionalbedingte Qualitätsschwankungen in der Zusammensetzung der Ballenware bedingen eine stetige programmtechnische Optimierung der NIR-Technik. Die Verarbeitung von lieferantengebundenen Monochargen können helfen, kundenbedingte Sortierprogramme zu entwickeln und die Reinheit in den Ausgangsfraktionen für die Stufe 2 zu steigern. Auch Schwankungen der Sortierqualitäten auf Ebene der Mahlgüter mussten über einen längeren Zeitraum verbessert werden. Hierzu gehörten u.a. das inputabhängige Anpassen des Zerkleinerungsgrades in den Nassschneidmühlen, das Einstellen der Waschmittelzusätze und der Waschtemperatur, die Optimierung der Wasseraufbereitung durch Additivierung (die bspw. zu einer Reduzierung von Entschäumermengen von mehr als 30 % geführt haben), die Intensivierung des Trocknungszyklus durch Temperaturerhöhung und/oder Änderung der Verweilzeiten, das Variieren der Durchsatzleistung in der Waschlinaie sowie die programmtechnische Überarbeitung der optischen Nachsortierung.

Die Inbetriebnahme des ersten Extruders verlief ebenfalls planmäßig, wobei hier auf Grund der mangelnden Verfügbarkeit elektronischer Bauteile bereits deutliche Lieferverzögerungen zu verzeichnen waren. Dieses Problem der Verfügbarkeit von Bauteilen nebst einigen personellen Ausfällen durch die Pandemie, haben den Aufbau der zweiten Extrusionslinie deutlich verzögert. Bunte Mahlgüter verhalten sich unterschiedlich zu weißen oder transparenten Mahlgütern. So werden heute unterschiedliche Programme auf den Extrudern gefahren, die sowohl Plastifikationstemperaturen als auch Förderdruck- und Geschwindigkeitsmechanismen etc. adaptieren. Besonders am Anfang der Unternehmung war es kritisch herauszufinden, mit welcher Anfangstemperatur im Smartfeeder gearbeitet wird, um einem Verklumpen des Materials vor der Einzugsschnecke entgegenzuwirken. Die Anpassung der Laserfiltermaschengröße gehört heute immer noch zu den gängigen Anpassungsgrößen in der Verarbeitung von Kunststoffen mit unterschiedlichem Fließverhalten.



Zu Beginn des Jahres 2023 wurde darüber hinaus die zweigängige Schnecke im Vakuumextruder durch ein Eingangssystem ersetzt, mit dem Ergebnis eines verbesserten Löseverhaltens der Kunststoffkomponenten.

In der Zwischenzeit lagen die durchgeführten Ergebnisse der Migrationstests der Produkte RecyPrime® HDPE 002 100 natur und RecyPrime® HDPE 006 200 weiß vor. Ein möglicher Einsatz der Regranulate in „Leave-On“ und „Rinse-Off“ Anwendungen des Kosmetikbereichs wurde vollumfänglich labortechnisch bestätigt.

Bei einem Anstreben des erneuten Einsatzes der hergestellten Produkte „RecyPrime HDPE, RecyPrime PP oder auch RecyPrime PS“ in Verpackungen mit unmittelbarem Lebensmittelkontakt, ist eine Zulassung der EFSA notwendig und bedingt einer umfassenden Machbarkeitsstudie. Eine Verwendung in Verpackungen, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, wäre gemäß den vorliegenden Ergebnissen der Migration für HDPE heute schon möglich, ist gesetzlich jedoch derzeit noch eingeschränkt und bedarf der weiteren Beobachtung.

Der Einsatz von RecyPrime in Verpackungen, die nicht mit Lebensmittel in Kontakt kommen (z.B. RecyPrime HDPE zur Herstellung von neuen Verpackungen für Waschmittel, Weichspüler oder Reinigungsmitteln) ist unbedenklich und unmittelbar möglich.

Im Laufe der kommenden Monate werden weitere Untersuchungen zum Migrationsverhalten von PP und PS vorgenommen. Weiter soll analysiert werden, in welche hochwertigen Anwendungen diese beiden Kunststofffraktionen der KRG nachhaltig gebracht werden können, nachdem auch beim PP-Regranulat mittlerweile der Nachweis über eine werkstoffliche Reinheit von größer 99,6 % vorliegt. Ähnliche Ergebnisse sind beim PS zu erwarten.

3.2. Stoff- und Energiebilanz

Anbei finden sich diverse Auszüge aus der Produktionsstatistik. Seit Produktionsbeginn bzw. im Geschäftsjahr 2022 wurde zu 97,25 % HPDE-Ballenware verarbeitet. Auch weiterhin wird der Fokus der Unternehmung auf diesem Polyolefin liegen, weil zum einen ein entsprechender Wertstoffanteil/Bedarf in dem genannten Verpackungsmarkt existiert, zum anderen die Auslegung und Optimierung des Aufbereitungsprozesses auf einen Kunststoff wesentlich effizienter ist.

Aus dieser Prämisse heraus liegt der Fokus der folgenden Auswertung auf dem genannten Inputmaterial. Die folgenden Abbildungen fassen die statistische Bewertung aller Produktionsstufen zusammen und geben einen Eindruck über die Stoffstromverteilung zwischen den Aufbereitungsverfahren sowie den gewichteten Anteil der Ausschussfraktionen (Abbildungen 10 bis 14).

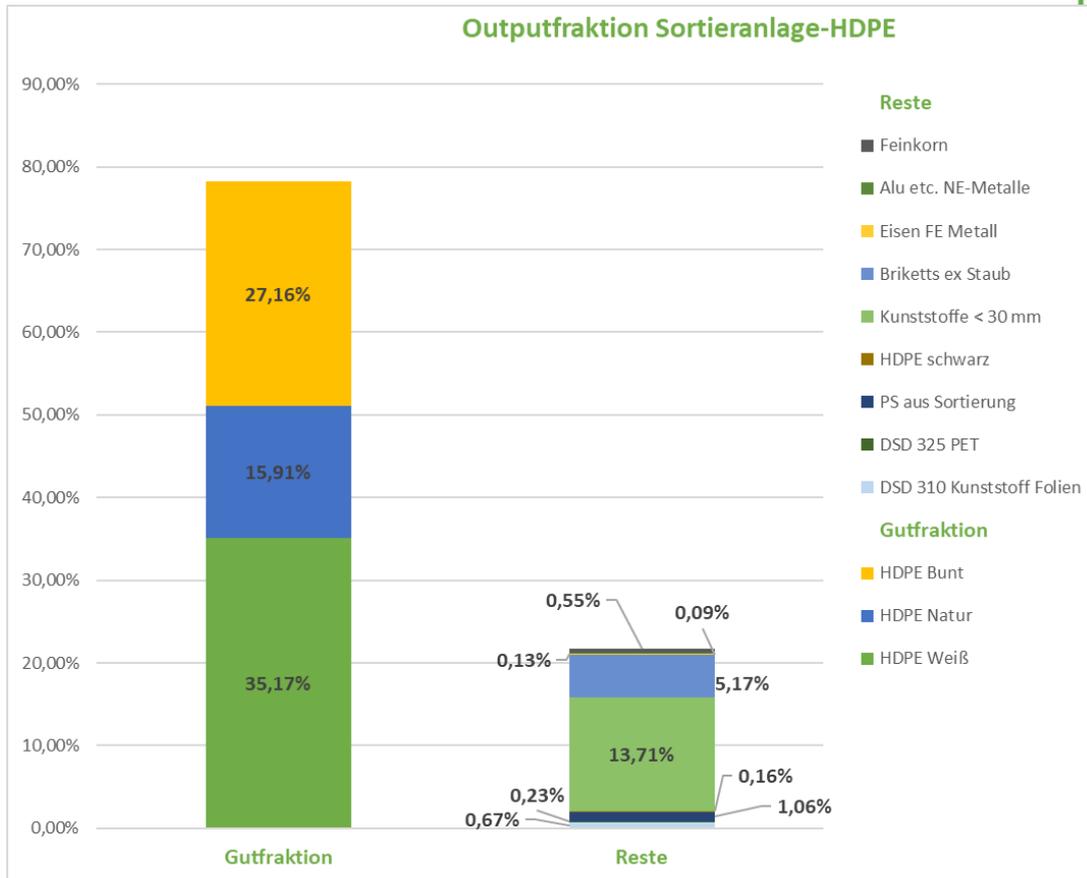


Abbildung 10: Outputstatistik HDPE-Ballenware der Stufe 1

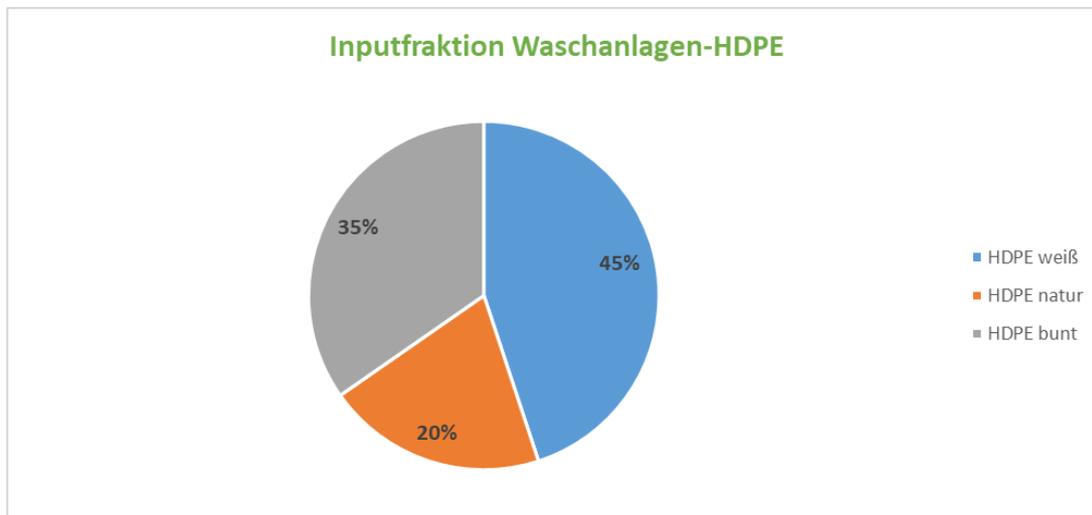


Abbildung 11: Inputstatistik Stufe 2 Nassgranulierung

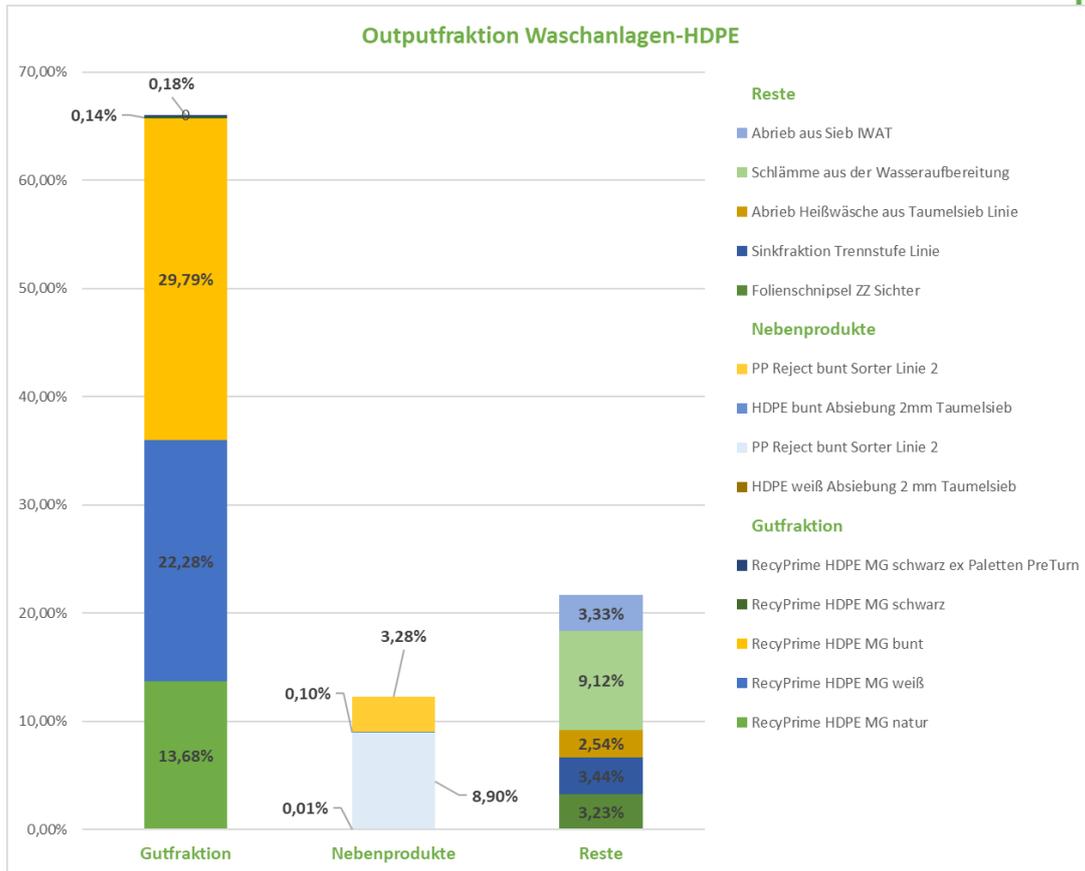


Abbildung 12: Outputstatistik Waschanlage

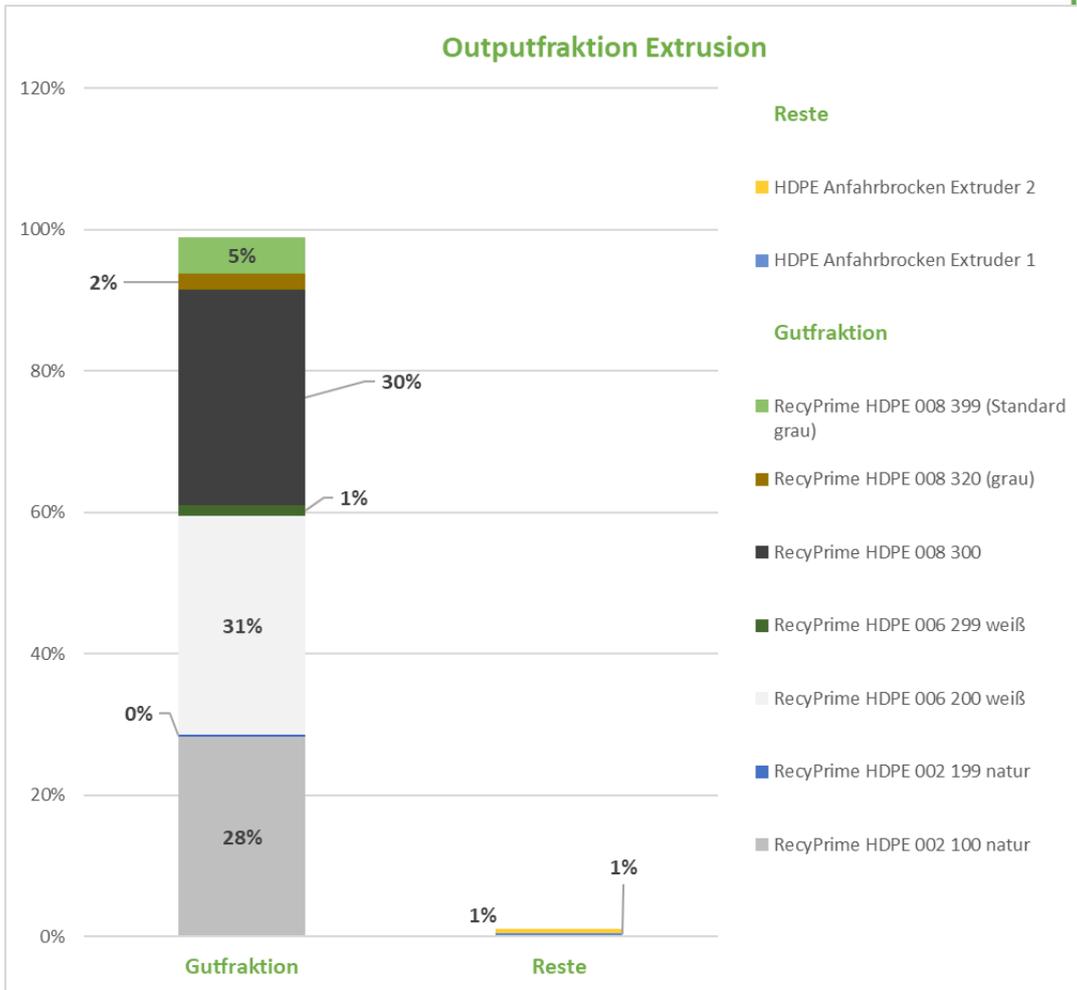


Abbildung 13: RecyPrime® Output Extrusion Stufe 3

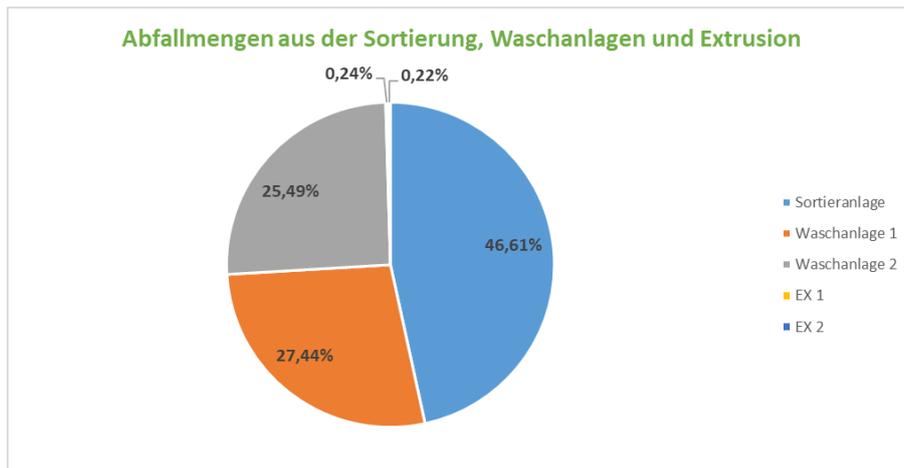


Abbildung 14: Abfallstatistik Recyclingprozess Stufe 1 bis 3

Die nachstehend gelieferten Energie- und Leistungskennzahlen (Abbildungen 15 und 16) sind ein erster Auszug der Anlagenbilanzierung und dienen lediglich der Darstellung der gemessenen bzw. überwachten Verbrauchsgrößen im kumulierten Mittel als Monatsauszug.



Anlage	kategorie	Wert	Einheit
Sortieranlage			
Sortieranlage	Inputmengen Ballenware in die Sortieranlage	8	Tonnage/Stunde
Sortieranlage	Abfallmengen aus der Sortierung	0,45	Tonnage/Stunde
Sortieranlage	Inputmengen sortierte Kunststoffe in Zwischenlager	4,13	Tonnage/Stunde
Sortieranlage	Inputmengen aus Zwischenlager in Waschanlage	0,8	Tonnage/Stunde
Sortieranlage	Inputmengen aus Sortieranlage in Waschanlage	2,12	Tonnage/Stunde
Sortieranlage	Eisen aus der Sortierung	0,004	Tonnage/Stunde
Sortieranlage	Aluminium etc. NE Metall aus der Sortierung	0,01	Tonnage/Stunde
Sortieranlage	Feinkorn Bürstenabstreifer aus der Sortierung	0,06	Tonnage/Stunde
Sortieranlage	Kunststoffe < 30 mm aus der Sortierung KRG	0,87	Tonnage/Stunde
Wasseraufbereitung			
Wasseraufbereitung	Verbrauchsmengen Lauge	33	kg/Stunde
Wasseraufbereitung	Verbrauchsmengen Entschäumer (Vorlage Tank 1+2)	1,5	Litre/Stunde
Wasseraufbereitung	Verbrauchsmengen Entschäumer (Prozess Wassertank 1)	1,1	Litre/Stunde
Wasseraufbereitung	Verbrauchsmengen Entschäumer (Prozess Wassertank 2)	1,1	Litre/Stunde
Wasseraufbereitung	Verbrauchsmengen Waschmittel	4,5	Litre/Stunde
Wasseraufbereitung	Einsatz Menge Frisschwasser, anfallende Abwassermengen	1,7	m ³ /Stunde
Wasseraufbereitung	Einsatz Menge anfallende Abwassermengen	1,85	m ³ /Stunde
Erfassung aller Nebenprodukte in Waschanlage und Extrusion (Etiketten aus Entstaubung, Feinabrieb aus Zentrifuge), Gewicht Fertige Produkte			
WL 1	RecyPrime HDPE MG natur	0,3	Tonnage/Stunde
WL 1	RecyPrime HDPE MG weiß	0,65	Tonnage/Stunde
WL 2	RecyPrime HDPE MG Bunt	0,9	Tonnage/Stunde
WL 1	RecyPrime PP MG weiß	0,16	Tonnage/Stunde
WL 2	RecyPrime PP MG Bunt	0,15	Tonnage/Stunde
WL 1	HDPE Reject bunt Sorter Linie 1	0,022	Tonnage/Stunde
WL 2	HDPE Reject bunt Sorter Linie 2	0,011	Tonnage/Stunde
WL 1	PP Reject bunt Sorter Linie 1	0,44	Tonnage/Stunde
WL 2	PP Reject bunt Sorter Linie 2	0,097	Tonnage/Stunde
WL 2	RecyPrime HDPE MG bunt ex IBC / Fässer	0,13	Tonnage/Stunde
WL 1+2	Folienschnipsel aus ZZ-Sichter 1+2	0,14	Tonnage/Stunde
WL 1	Sinkfraktion Trennstufe Linie 1	0,065	Tonnage/Stunde
WL 2	Sinkfraktion Trennstufe Linie 2	0,05	Tonnage/Stunde
WL 1+2	Abwasser aus der Aufbereitung von Kunststoffen	6,29	m ³ /Stunde
WL 1+2	Schlämme aus der Wasseraufbereitung	0,28	Tonnage/Stunde
WL 1+2	Abrieb aus Sieb Wasseraufbereitung	0,09	Tonnage/Stunde
WL 1	Abrieb Heißwäsche aus Taumelsieb Linie 1	0,04	Tonnage/Stunde
WL 2	Abrieb Heißwäsche aus Taumelsieb Linie 2	0,09	Tonnage/Stunde
EX 1	RecyPrime HDPE 002 100 (natur)	1,91	Tonnage/Stunde
EX 2	RecyPrime HDPE 008 300 (standard grau)	2,05	Tonnage/Stunde

Abbildung 15: Produktivitätskennzahlen der Prozesstechnik



Energieverbräuche der Prozessschritte		
Sortieranlage	Sortierung Verbrauch	169 KW/Stunde
Sortieranlage	Absaugung Sortierung	84,52 KW/Stunde
Sortieranlage	Peripherie Sortierung	122,06 KW/Stunde
Sortieranlage	Ballenpresse	35 KW/Stunde
Sortieranlage	Schredder	32 KW/Stunde
WL 1	Mühle 1	60 KW/Stunde
WL 1, WL 2	Mühle 2	80 KW/Stunde
WL 2	Mühle 3	80 KW/Stunde
WL 1	WL 1	80 KW/Stunde
WL 2	WL 2	77 KW/Stunde
WL 1+2	Absaugung Waschlinien	38 KW/Stunde
EX 1	EX 1	750 KW/Stunde

Abbildung 16: Energie- und Leistungskennzahlen der Prozesstechnik

Die KRG hat es sich zur Aufgabe gemacht die Nebenströme, welche der thermischen Verwertung zugeführt werden, weiter zu reduzieren. Neben der Optimierung der Sortiertechnik werden kontinuierlich neue Verwertungswege erprobt und aufgemacht. So konnte zwischenzeitlich auch die Leichtfraktion (Folienschnipsel ZZ Sichter) aus der Waschlinie (Abbildung 12) in den stofflichen Verwertungskreislauf für die Herstellung von Paletten gebracht werden.

Weiter sorgen die kontinuierlich laufenden Programmoptimierungen an der Stufe 1 Vorsortierung dafür, dass Haupt- und Nebenströme schärfer in die Spezifikation gebracht werden. So kann auch die im Polyolefin-Inputstrom noch enthaltene PET-Fraktion mittlerweile einer stofflichen Verwertung zugeführt und die <30 mm Siebreste um 46% mehr HDPE-Gutmaterial befreit werden, die sonst in den Abfall zur Verwertung gefahren worden sind.

Mit finaler Technikadaption und Abnahme der Gewerke durch entsprechende Leistungstestung im ersten Halbjahr 2023 ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes ein stabiler Anlagenbetrieb gewährleistet.

Eine abschließende Stoff- und Energiebilanz wird derzeit im finalen Regelbetrieb aufgesetzt und im Rahmen des Energie- und Umweltmanagementsystems weiter gepflegt (Ergebnisse siehe auch Kapitel 3.3).

Die Echtzeitanalyse der Verbrauchskennwerte bestätigt bereits heute, dass sich die Verbrauchsgrößen und Leistungskennwerte (vertraglich vereinbarte Prozesswerte und Durchsatzleistungen) im Rahmen der Planung bewegen.

3.3. Umweltbilanz

Das finale Datenmodell zur Erfassung der relevanten Daten für eine CO₂-Bilanzierung weist deutliche CO₂-Einsparungen durch die Erzeugung von RecyPrime®-HDPE aus (s.u.). Das Geschäftsjahr 2022 dient als Datenbasis für die energetische Gesamtbilanzierung des Standortes und liefert eine valide Aussage über das eingesparte CO₂-Äquivalent der Unternehmung.

Die Bewertung der Umweltperformance der Produktion von Mahlgütern und Regranulaten aus Kunststoff- und LVP-Abfällen der KRG resultiert in folgendem Ergebnis für das Geschäftsjahr 2022. Die Berechnung der Einsparung des CO₂-Äquivalents (CO₂e) erfolgt an Hand von



Literaturwerten von Virgin HDPE und r-HDPE [Ecoinvent HDPE-Market; 2023], [Ecoinvent HDPE; 2023]. Bei der Literaturquelle handelt es sich um die weit verbreitete und anerkannte LCA-Datenbank Ecoinvent. Durch die Verrechnung (HDPE – r-HDPE = Einsparung) ergibt sich eine Einsparung von -1,656 kg CO₂-Äquivalent pro kg Granulat verglichen mit Virgin Material.

- Insgesamt ergibt sich durch die Produktion von 12.819 t Mahlgütern und Regranulaten eine CO₂-Einsparung in Höhe von 21.267 t CO₂e (Mahlgüter werden in der hier dargestellten CO₂-Bilanzierung mit demselben CO₂-Fußabdruck wie das Regranulat bewertet. Allerdings ist zu vermerken, dass Mahlgüter auf Grund der Einsparung von mindestens einem Verfahrensschritt (Extrusion) in der Praxis weniger Ressourcen als Regranulat benötigen.
- Insgesamt ergibt sich durch die Produktion von 12.819 t Mahlgütern und Regranulaten eine Materialeinsparung von 0,1421 PJ fossiler Ressourcen gegenüber Virgin HDPE [JRC Technical Report; 2023].
- Die produzierten Regranulate bestehen zu 100 % aus Kunststoffabfällen. Durch die Vermeidung von Additivierung (Compounding) in der Extrusion, wird eine weitere Entlastung der Umweltauswirkungen dargestellt, weil eben nicht zusätzliche Virgin-Masterbatches zum Einsatz kommen, die einen höheren CO₂-Fußabdruck besitzen als das r-HDPE in Reinform.
- Die Energieintensität der produzierten Produkte beträgt durchschnittlich 389,1 kWh/t, unter Vollaustattung kann der Wert aktuell jedoch auf mindestens 282 kWh/t reduziert werden.

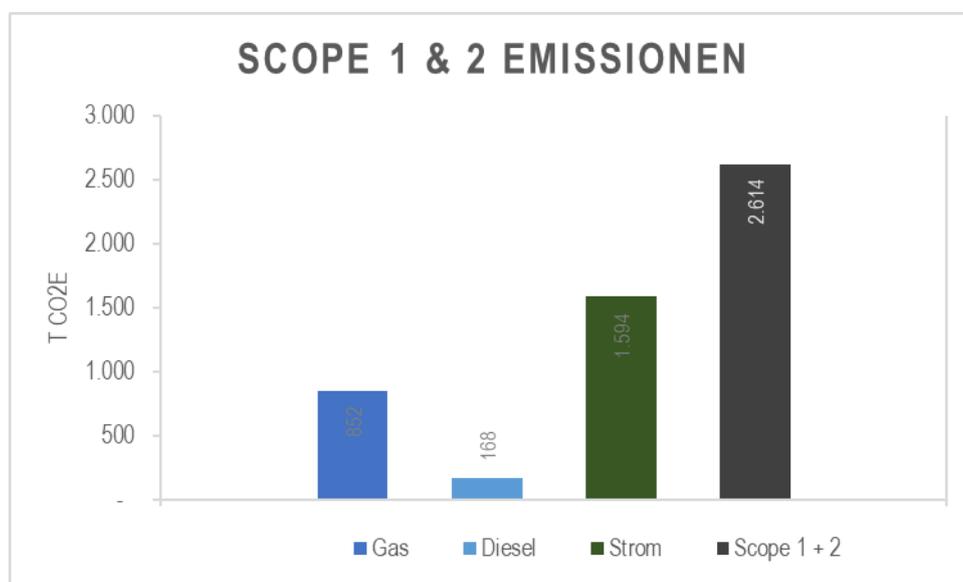


Abbildung 17: Scope 1 und 2 Berechnung für das Geschäftsjahr 2022 auf Basis der IPCC 2006

- Um einen unternehmerischen CO₂-Fußabdruck abzubilden, wird meist die Methodologie des Green House Gas Protocols (GHGP) verwendet. Dieses unterscheidet zwischen Scope 1, 2 und 3. Bei Scope 1 handelt es sich um direkte Emissionen, die durch Verbrennungsreaktionen oder fugitiven Emissionen entstehen. Bei Scope 2 handelt es sich um indirekte Emissionen aus der Erzeugung von Energie (Energieversorger). Bei Scope 3 handelt es sich um indirekte Emissionen aus der vor-



und nachgelagerten Lieferkette. Die Erfassung der Scope 3 Emissionen ist bei der KRG zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes noch in Ausarbeitung.

- Die Scope 1 und 2 Emissionen beliefen sich im Geschäftsjahr 2022 auf ca. 2.614 t CO₂e, wobei aktuell ein Potential von 1.594 t CO₂e auf Grund der nicht vollständig in Betrieb genommenen Photovoltaik-Anlage nicht berücksichtigt ist.
- Zusätzlich ist zu vermerken, dass damit gerechnet wird, dass die potenziell produzierte Strommenge nur zu 80% durch den Eigenbedarf ausgelastet sein wird und damit noch weiterer erneuerbarer Strom ins Netz eingespeist werden kann.

KPI	Thema	Quelle	Wert	Einheit
Vermiedene CO ₂ e-Emissionen	Klima	Literatur	-1,65559	tCO ₂ e/t
Eingespartes Primärmaterial	Ressourcen	Literatur	-11085	MJ/t
Anteil Input Kunststoff-Abfälle von produziertem Rezyklat	Ressourcen	Erhebung	100	%
Anteil Input Additive (Chemicals) von produziertem Rezyklat	Ressourcen	Erhebung	0	%
Energieintensität Mittelwert	Energie	Erhebung	389,1	kWh/t
Energieintensität Näherung Vollast	Energie	Erhebung	281,69	kWh/t
Wasserintensität	Umwelt	Erhebung	1,61674078	m ³ /t
Materialeffizienz	Ressourcen	Erhebung	1,49421874	t/t
Anteil Input/Output Produktionslinie Mahlgut	Ressourcen	Erhebung	67,58	%
Anteil Input/Output Produktionslinie Regranulat	Ressourcen	Erhebung	25,4	%
Anteil Stromverbrauchsabdeckung durch Eigenproduktion	Energie	Erhebung	100	%
CO ₂ Emissionen Stromverbrauch GJ22	Klima	Berechnung	2295,41015	tCO ₂
Scope 1 & 2 Bilanz			2.614	tCO ₂ e

Abbildung 18: Datenbasis der Umweltbilanzierung der KRG

3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Das beschriebene Recycling ist hochenergetisch und damit vergleichsweise kostenintensiv. Die Veränderung der Energiekosten in Deutschland, bedingt durch die politische Lage in den Jahren 2022 und 2023, haben den Einstieg in den Absatzmarkt dadurch wenig positiv beeinflusst.

Der internationale Preisverfall im Rohöl hat darüber hinaus zu einer Vergünstigung der Primärkunststoffe geführt. Die Neuware steht in direkter Konkurrenz zu Regranulaten, was den Preisdruck im Recyclingsektor maßgeblich erhöht hat. Die Branche durchläuft derzeit ein marktwirtschaftliches Tief.

Unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Multiplikatoren aus Finanzkrise und politischem Weltgeschehen lässt sich für den Einstieg der hier beschriebenen Recyclingaktivitäten im Kunststoffsektor festhalten, dass die Amortisationsrechnung - gebunden an Produktionsmenge und Absatz - auszudehnen ist.

Unter Bedingung einer normalen Dreischichtauslastung im Vollbetrieb, berechnet sich der Return of Invest auf 6,8 Jahre. Diese Erfolgsaussichten sind durch die Krisenlage der aktuellen Entwicklungsperiode getrübt, so dass mit einer Verlängerung der wirtschaftlichen Planungsprämisse zu rechnen ist.



3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

- a. LVP-Sortieranlagen liefern Ballenware (Input), in der anteilig Fehlwürfe, Fremd- bzw. Störstoffe enthalten sein können. Die Technik konventioneller Anlagenbetreiber zur Veredelung von HDPE/PP aus der haushaltsnahen Erfassung von Kunststoffen sieht vor der Wäsche keine Sortierung der Ballenware (nach Kunststoffarten) vor. Eine werkstoffliche Reinheit von > 99 % nach dem Waschprozess und folglich der Extrusion, ist damit also ausgeschlossen.
- b. Konventionelle Techniken zur Veredelung von HDPE/PP führen vor der Wäsche keine Sortierung der Ballenware auf Basis von Farben (Natur, Weiß, Bunt) durch. Die Herstellung eines Regranulats mit einer hohen Farbreinheit und Farbkonstanz ist nur durch die vorgeschaltete Nachsortierung möglich. Konventionelle Anlagen liefern eher ein weißes oder hellgraues Regranulat, da in der nachgelagerten Sortierung der Mahlgüter nur helle Komponenten ausgeschleust werden. Die Konsequenz ist, dass hier keine Regranulate in der Farbe Natur produziert werden und die prozentualen Anteile der hellen Mahlgüter im Gesamtproduktstrom geringer sind, als bei der KRG.
- c. Konventionelle Techniken zur Veredelung von HDPE/PP verfügen nicht über einen Heißwaschprozess. Durch diese Form der Dekontamination ist die Reinigung der Kunststoffe an den Oberflächen einzigartig. Druckfarben, Etiketten, Labels jeder Art, werden entfernt und gelöst und sind somit im Nachgang abtrennbar. Diese erhöhte Reinheit an der Oberfläche der Kunststoffmahlgüter führt zu drei Effekten:
 1. erhöhte Farbreinheit,
 2. verstärkte Geruchsreduzierung und
 3. Vermeidung von kunststofftechnischen Querkontaminationen (z.B. Label OPP, Flasche HDPE).
- d. Konventionelle Techniken zur Veredelung von HDPE/PP verfügen nur teilweise über eine Flakesortierung nach dem Waschprozess. Bei der KRG ist die Flakesortierung zur Herstellung der Farbreinheit und der Kunststoffreinheit unumgänglich.
- e. Konventionelle Techniken zur Veredelung von HDPE/PP verfügen nicht über eine Osmoseanlage zur Aufbereitung von Stadtwässern vor deren Einsatz im Waschprozess. Im innovativen Prozess der KRG ist nach dem Heißwäscher und dem Dichtentrennbecken ein dreistufiger Nachwäscher installiert, welcher ausschließlich nur mit Osmosewasser gespeist wird. Das Osmosewasser hat zwei wesentliche Eigenschaften:
 1. es möchte die ihm entzogenen Komponenten zurückerhalten (Untersättigung) und
 2. es unterstützt bei der Trocknung der Mahlgüter durch den Perleffekt an den Kunststoffoberflächen.

So wird abschließend gewährleistet, dass alle hergestellten Mahlgüter 100 % frei von Querkontaminationen aus eventuell verschmutztem/belastetem Prozesswasser sind.



- f. Über den Einsatz von Wärmetauschern, dem Betrieb des mit Gas betriebenen BHKW und der PV-Anlage, werden die für den Heißwaschprozess benötigte Wärme und gleichzeitig Strom für die installierten Aggregate erzeugt. Konventionelle Anlagen greifen weniger auf diese Form des Energiemixes zurück.



4. Übertragbarkeit

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Hochtechnologisierte Recyclingprozesse bedürfen besonders in der Anlaufphase und dem Probetrieb einer engen Abstimmung zwischen den Einzelgewerken. Eine Liste an Beispielen für die technischen Herausforderungen findet sich auch in Kapitel 3.1.

Jeder Qualitätsverlust in vorgelagerten Prozessen hat einen exponentiellen Einfluss auf die Ausbringungsquote in den Wertstofffraktionen am Ende der Verfahrenskette. Die optimale Abstimmung der Einzelprozesse aufeinander und die Reduzierung von Abfallfraktionen (Wertstoffverlusten) in der Gesamtbilanz ist sehr zeitaufwändig.

Weiter bedarf es vielen Schulungszyklen und Prozessen der Fehlerfindung, um die Betriebsmannschaft operativ auf die moderne Technik einzufahren.

Der Einstieg in den Kosmetiksektor ist darüber hinaus an lange Vorlaufzeiten und umfängliche Prüfverfahren sowie Bemusterungen gebunden, die dafür sorgen, dass operativ und monetär zusätzliche Ressourcen eingeplant werden müssen.

Die Vorlaufzeiten im Recyclateinkauf betragen zwischen 12 und 18 Monaten. Somit kam es zunächst in der Anlaufphase der Unternehmung zu einer Verschiebung im Absatz, die durch gutes Marketing und die zusätzlichen Anstrengungen im Vertrieb und der Entwicklungsabteilung aufgeholt werden konnte.

Die transparente Ergebniskommunikation bei den Regranulatqualitäten und Spezifika bildet heute die Basis einer guten Zusammenarbeit mit den genannten Endverpackungssektoren.

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

Die installierte Anlagentechnik lässt sich prinzipiell in ihrer technischen Grundauslegung auf die nachfolgenden Kunststofffraktionen HDPE/PP/PS und PET anwenden und für den PCR-Bereich von Kunststoffabfällen übertragen.

Betrachtet man das Potential der gesamten Menge an Verpackungskunststoffen (aus den Dualen Systemen und aus alternativen Bezugsquellen wie Abfälle aus der kunststoffverarbeitenden Industrie und gewerbliche Kunststoffverpackungen sowie der thermischen Behandlung) für die Fraktionen HDPE/PP und PS, so könnten in Deutschland zur stofflichen Verwertung dieser Mengen weitere RecyPrime®-Anlagen errichtet werden. Unter Berücksichtigung des eigentlichen Marktpotentials auf der Absatzseite für den Reinigungs- und Kosmetiksektor, reichen jedoch zwei dieser Anlagen allein in Deutschland aus, um den derzeitigen selbstbestimmten Bedarf an Rezyklaten in der genannten Branche zu decken.

Mit der auf europäischer Ebene vorgesehenen Vorgabe zum Einsatz von Rezyklaten in Kunststoffverpackungen und Kunststoffprodukten (Neuware) wächst das Potential für die Errichtung weiterer Anlagen perspektivisch.

4.3. Kommunikation der Projektergebnisse

Zur Kommunikation der Projektergebnisse und der Präsentation der RecyPrime®-Produkte wurden bis dato folgende Aktivitäten durch die KRG durchgeführt:

- 13. - 15.09.2022 – AMI Plastic Recycling Technologie, Vortrag in Wien (Anlage 4)
- 19. - 26.10.2022 – Messe K in Düsseldorf, eigener Stand mit Mitarbeiter/innen der KRG



- Bewerbung für den Plastics Recycling Award Europe 2023
Gewinner in der Kategorie: Plastic Packaging Product
- Diverse Besichtigungen mit Hochschulen und Universitäten vor Ort in Grünstadt
- 16.02.2023 – Definitionsworkshop im geplanten Kooperationsnetzwerk
„Kunststoffrecycling & Ökobilanzierung“ Hochschule Darmstadt
- 10. -11.05.2023 – Teilnahme an der Plastics Recycling Show Europe in Amsterdam
- diverse Pressemeldungen und Veröffentlichungen im Jahr 2022 und 2023

KIWEB: PREZERO – Kunststoff Information (kiweb.de)

*Recyclingmagazin: Grünstadt startet ausgebaute Aufbereitungsanlage - RECYCLING
magazin*

Plastverarbeiter:

In Grünstadt werden in großem Maßstab Kunststoffe recycelt (plastverarbeiter.de)

Ludwigshafener Rundschau: Recycling: Grünstadt erhält Großprojekt

Unterhaardter Rundschau: Ein großer Wurf in Grünstadt

Imagefilm auf youtube: <https://youtu.be/DChAcFro-Yg>

Credum (Unternehmenszeitschrift der Commerzbank): Neues Leben für altes Plastik

Fachverband Kunststoffrecycling:

bvse - Kunststoff Recycling Grünstadt startet ausgebaute Aufbereitungsanlage

*Euwid: Prezero und Meinhardt starten neue Kunststoffaufbereitung (euwid-
recycling.de)*

*STADLER and KRONES close the circular economy loop at the Kunststoff Recycling
Grünstadt plant in Germany - recovery (recovery-worldwide.com)*

Weitere Kommunikationswege/Aktivitäten sind wie folgt geplant:

- Gremienarbeit im DIN-Ausschuss der Abt. Leben und Umwelt (LUW)/Gruppe
Lebensmittel, Verpackungen, Kunststoffe (LVK)
- 10. -12.10. – Teilnahme an der Plastics Recycling Technology, Wien
- 17. - 21.10.2023 – Teilnahme an der Fakuma, Friedrichshafen
- Bewerbung für den Plastics Recycling Award Europe 2024



5. Zusammenfassung

Das werkstoffliche Recycling von Kunststoffen aus dem „Gelben Sack“ ist in Deutschland etabliert. Die in den sogenannten LVP-Sortieranlagen über NIR-Technik aussortieren Kunststofffraktionen HDPE, LDPE, PP, PS, etc., werden derzeit primär in konventionell massenleistungsfähigen Recyclinganlagen zu Mahlgütern und Regranulaten verarbeitet. Das in diesen Anlagen produzierte Regranulat eignet sich auf Grund der olfaktorischen und chemischen Eigenschaften zum Großteil für Anwendungen im Bereich der Bauindustrie und/oder Agrarwirtschaft sowie in Verpackungen mit geringeren Anforderungen an die Rezyklatqualität.

Die Aufgabenstellung im Projekt RecyPrime® bestand für die KRG darin, die Anlagentechnik so zu planen, technisch zu konfigurieren und in Betrieb zu nehmen, dass aus dem Recyclinggut der LVP-Sortieranlagen ein hochwertiges Regranulat entsteht, welches für die Produktion neuer Verpackungen im Kosmetik- und ggf. Nahrungsmittelsektor eingesetzt werden kann. Die Innovationskraft im Projekt „RecyPrime®“ lag nicht darin, ein neues Recyclingverfahren zu entwickeln, sondern vielmehr in der Modifikation und Adaption marktgeläufiger Technologien und infolgedessen die Integration dieser in einen gänzlich neuen Recyclingprozess für HDPE, PP und PS. Die vor dem Beginn des Vorhabens durchgeführten zahlreichen Tests bei Anlagenherstellern, unter Einbindung eines unabhängigen Labors, zeigten auf, dass die gestellten Anforderungen an das Endprodukt im Projekt RecyPrime® erfüllt werden.

Diese lassen sich nachfolgen zusammenfassen:

- RecyPrime® Regranulate sind nach deren Herstellungsprozess nahezu geruchsneutral
- RecyPrime® Regranulate werden in den Farben Natur und Weiß hergestellt, nicht nur in Grau
- RecyPrime® Regranulate sind nutzbar, um aus ihnen Verpackungen herzustellen
- RecyPrime® Regranulate werden im Hochqualitätssektor der Verpackungsmanufaktur eingesetzt
- RecyPrime® Regranulate ermöglichen die Erschließung neuer Anwendungen, Märkte und Kundenstrukturen
- RecyPrime® Regranulate sind in Ihren funktionalen Eigenschaften ähnlich Neuware

Die Produkte RecyPrime® HDPE 002 100 natur, RecyPrime® HDPE 006 200 weiß, sowie RecyPrime® HDPE 008 300 Standard grau (Anhang 2 bis 4) begeistern die Hersteller von neuen Verpackungseinheiten und Endverpackungen durch ihre stabile und gleichbleibende Produktqualität. Die veredelten Kunststoffe (speziell HDPE) sind qualitativ auf einem so hohen Niveau, dass sie auch in komplexen Anwendungen, wie im Blasverfahren oder der Bauteilextrusion, eingesetzt werden können. Es kann abschließend festgehalten werden, dass die Anlagentechnik RecyPrime® die Erwartungen in vollstem Umfang erfüllt.



6. Literatur

Conversio; 2018: Kurzfassung Stoffstrombild in Deutschland 2017, https://www.bvse.de/images/news/Kunststoff/2018/181011_Kurzfassung_Stoffstrombild_2017.pdf, [Abruf: 11.10.2023].

Recyclingmagazin; 2022: Handreichung zum Rezyklateinsatz, <https://www.recyclingmagazin.de/2022/11/03/handreichung-zum-rezyklateinsatz/>, [Abruf: 11.10.2023].

Conversio; 2022: Kurzfassung der Conversio Studie, Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen, https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf, [Abruf: 11.10.2023].

Kunststoffverpackungen; 2021: Mehr Recycling für Kunststoffe aus dem Gelben Sack durch neues Wasch- und Sortierverfahren, <https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/2021/07/19/mehr-recycling-fuer-kunststoffe-aus-dem-gelben-sack-durch-neues-wasch-und-sortierverfahren/>, [Abruf: 11.10.2023].

Hans Böckler Stiftung; 2020: Branchenanalyse kunststoffverarbeitende Industrie 2020, https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-007691/p_fofoe_WP_186_2020.pdf, [Abruf: 11.10.2023].

Plastverarbeiter; 2022: Wo die Digitalisierung die Kunststoffindustrie befeuert, <https://www.plastverarbeiter.de/automation/wo-die-digitalisierung-die-kunststoffindustrie-befeuert-562.html>, [Abruf: 11.10.2023]

Ecoinvent HDPE-Market; 2023: Ecoinvent market for polyethylene, high density, granulate, GLO, EF 3.0, cutoff.

Ecoinvent HDPE; 2023: Ecoinvent polyethylene, high density, granulate, recycled to generic market for high density PE granulate; EU without CH; EF 3.0; cutoff.

JRC Technical Report; 2023: Environmental and economic assessment of plastic waste recycling; p.43 - MPO Flexible Packaging Waste -11085 MJ/t.

7. Anhang

Anhang 1: Laborbericht RecyPrime® MG HDPE natur.pdf

Anhang 2: RecyPrime HDPE 002 100 DB

Anhang 3: RecyPrime HDPE 006 200 DB

Anhang 4: RecyPrime HDPE 008 300 DB