

Bewilligungsempfänger



Abschlussbericht zum Förderprojekt:

Hoch performante PET-Sortieranlage zur Realisierung einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft für Lebensmittelverpackungen – PETSORT

Art des Berichtes:

Abschlussbericht zum Vorhaben mit dem Aktenzeichen 38278/01-21/2, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch




Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Verfasser: Andreas Schmolt

Roetgen, März 2026

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	38278/01- 21/2	Referat	Fördersumme		399.000
Antragstitel		Hoch performante PET-Sortieranlage zur Realisierung einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft für Lebensmittelverpackungen			
Stichworte					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
30 Monate		09.07.2023			
Zwischenberichte		19.01.2024 20.08.2025		05.08.2024 05.02.2025	
Bewilligungsempfänger				Tel	
TETRALOG upcycling GmbH & Co. KG Am Münsterwald 1 52159 Roetgen				Fax	
				Projektleitung Patric Hermassi	
				Bearbeiter Andreas Schmult	
Kooperationspartner					
Roskopf Maschinen- und Metalltechnik GmbH					

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Der Kunststoff Polyethylenterephthalat (PET) wurde hauptsächlich in der Lebensmittelindustrie für die Herstellung von Getränkeflaschen eingesetzt. Die daraus resultierenden Kunststoffabfälle aus dem gelben Sack und dem Pfandsystem wurden in industriellen Anlagen sortiert, zu Flakes gemahlen und anschließend zu Granulat verarbeitet, um eine erneute Verwendung zu ermöglichen. Allerdings produzierten die damaligen Sortieranlagen ein beständiges Nebenprodukt mit einem PET-Sortenreinheitsgrad von weniger als 95 %. Für die Wiederverarbeitung zu neuen Flaschen war dies nicht ausreichend, da eine Sortenreinheit von über 99,99 % erforderlich gewesen ist. Infolgedessen wurde dieser sogenannte Restnebenstrom, der bislang etwa 36.000 Tonnen pro Jahr in Deutschland umfasste, einem Downcycling oder einer energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen (MVA) bzw. Ersatzbrennstoffkraftwerken (EBS) zugeführt und trug somit zur Umweltbelastung bei. Nach dem Beschluss zum neuen Pfandsystem konnte zudem beobachtet werden, dass der beschriebene Restnebenstrom signifikant angestiegen ist: Seit dem 01.01.2022 wurden die Warenströme des ehemaligen Pfandsystems aus klaren Wasserflaschen und Teile der Warenströme, die zuvor im Hausmüll landeten, zusammengeführt. Dadurch wurde die ursprünglich gute klare Qualität nun mit opaken, weißen, Multilayer- und anderen Materialien verunreinigt. Unsere Beobachtungen zeigten einen Restnebenstrom von aktuell etwa 48.000 Tonnen pro Jahr in Deutschland. Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt eine neuartige Anlage zur hoch sortenreinen Aufbereitung der beschriebenen Reststromfraktionen erforscht und entwickelt. Die Anlage setzte sich aus einer neuartigen Kaskadierung und Optimierung von modernen Sortiereinheiten (Farbsorter, Magnettrommel, Windsichter usw.) sowie Dosierungs- und Reinigungsstufen zusammen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Rahmen des Projekts wurden die Arbeitsschritte sorgfältig geplant und nach einem strukturierten Vorgehen umgesetzt. Zu Beginn erfolgte eine detaillierte Analyse der Ausgangssituation, um die Anforderungen und Ziele klar zu definieren. Anschließend wurde ein Konzept für die Umsetzung entwickelt, das sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte berücksichtigte. Die praktische Durchführung gliederte sich in mehrere Phasen: In der ersten Phase wurden Materialien und Ressourcen identifiziert, die für das Upcycling geeignet sind.

Darauf folgte die Entwicklung und Erprobung verschiedener Methoden zur Wiederverwertung und Verarbeitung, wobei innovative Techniken wie mechanische und thermische Verfahren angewandt wurden. Die Ergebnisse wurden regelmäßig dokumentiert und bewertet, um eine kontinuierliche Verbesserung zu gewährleisten. Parallel dazu fanden regelmäßige Abstimmungen im Projektteam sowie mit den Kooperationspartnern statt, um den Fortschritt zu überprüfen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. Die angewandten Methoden umfassten sowohl klassische Projektmanagement-Instrumente wie Meilensteinplanung und Risikoanalyse als auch moderne Ansätze wie agile Arbeitsmethoden und iterative Entwicklungsschritte. Abschließend wurden die erzielten Fortschritte und Erkenntnisse in einem Abschlussbericht zusammengefasst und einer kritischen Reflexion unterzogen, um die Übertragbarkeit der Methoden auf zukünftige Projekte zu gewährleisten.

Ergebnisse und Diskussion

Als Ergebnis des Vorhabens wurde eine Anlage entwickelt, die es ermöglicht PET-Restnebenströme hin zu einem Sortenreinheitsgrad > 99,99 % aufzubereiten und damit horizontal zur Lebensmittelverpackung zu verwerten. Durch die Entwicklung des Demonstrators als neuartiger High Performance Sortieranlage für aktuell nicht auf wirtschaftlichen Zeitskalen sortierbare PET-Restnebenströme und die Generierung neuen Wissens, Erfahrungen und Daten über den Betrieb der neuen Anlage innerhalb dieses Projektes sowie die Weiterentwicklung dieses Demonstrators zur Marktreife und die Markteinführung der neuen Anlage im Anschluss an dieses Projekt können 90 % der Restnebenströme im Kreislauf gehalten werden und damit 243.000 Tonnen an CO₂-Emissionen jährlich in Deutschland eingespart werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Zur Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation werden die bei TETRALOG upcycling GmbH & Co KG. firmenüblichen Maßnahmen durchgeführt. Das betrifft zum einen Werbung mittels Flyer und Broschüren. Andererseits wird die neue Anlage nach der weiteren Entwicklung zur Marktreife auch im Internet auf den Firmenhomepages beworben. Des Weiteren werden Social-Media-Kanäle wie LinkedIn und XING zur Veröffentlichung von Produktdetails verwendet. Weitere beabsichtigte Maßnahmen betreffen auch die Direktwerbung (über Direktmailings und Kampagnen) sowie Produktpräsentationen auf den relevanten Fachmessen. Dies sind v. a. die Fakuma in Friedrichshafen, K in Düsseldorf, Kuteno in Rheda-Wiedenbrück, Chinaplas mit Ort variierend, demnächst in Shanghai. Die Marketingmaßnahmen werden durch entsprechendes Promotionsmaterial (siehe oben: Flyer, Broschüren, Demonstrationsvideos) begleitet.

Fazit

Im Rahmen des Projektes hat die Firma TETRALOG eine neuartige Anlage mit neuartigen Verfahren zur Verwertung von PET-Restnebenströmen entwickelt. Dadurch hat sich das Unternehmen erfolgreich ein neues Alleinstellungsmerkmal erarbeitet, das dem inhabergeführten Unternehmen einen erheblichen technologischen Vorsprung zu internationalen Marktbegleitern verschafft. Dadurch verspricht sich das Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil, der zukünftig zu neuen Umsätzen führen soll.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt2

1. Zusammenfassung7
2. Einleitung9
3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse11
4. Fazit19
5. Literaturverzeichnis22

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung Nr.:	Unter- bzw. Überschrift	Seitenzahl
1	Beispiel für einen ausgewählten und beschafften kapazitiven Sensor.	11
2	Beispielhafte Darstellung der aufgebauten Anlage in Technikumsmaßstab.	12
3	Darstellung des neuartigen Trocknungsverfahrens.	13
4	Beispiel für einen entwickelten und aufgebauten By-Pass.	14

1. Zusammenfassung

Der Kunststoff Polyethylenterephthalat, kurz PET, wird vorwiegend in der Lebensmittelindustrie für Getränkeflaschen verwendet. Die resultierenden Kunststoffabfälle aus dem gelben Sack und dem Pfandsystem werden in industriellen Anlagen sortiert, zu Flakes gemahlen und schließlich für eine erneute Verwendung zu Granulat verarbeitet. Allerdings produzieren heutige Sortieranlagen ein beständiges Nebenprodukt mit einem PET-Sortenreinheitsgrad $< 95\%$. Dies ist für eine Wiederverarbeitung zur Flasche nicht ausreichend. Hier ist eine Sortenreinheit von $> 99,99\%$ erforderlich. In der Folge wird dieser sog. Restnebenstrom von bisher etwa 36.000 Tonnen pro Jahr in Deutschland einem Downcycling oder einer energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen (MVA)/ Ersatzbrennstoffkraftwerken (EBS) zugeführt und trägt somit zur Umweltbelastung bei.

Durch den Beschluss zum neuen Pfandsystem ist zudem zu beobachten, dass der beschriebene Restnebenstrom signifikant angestiegen ist: Seit dem 01.01.2022 werden die Warenströme des ehemaligen Pfandsystems aus klaren Wasserflaschen und Teile der Warenströme, welche ehemals in den Hausmüll gingen, zusammengefasst. Dadurch wird die ursprünglich gute klare Qualität nun mit Opak, Weiß, Multilayer usw. verunreinigt. Unsere Beobachtungen gehen von einem Restnebenstrom von aktuell etwa 48.000 Tonnen pro Jahr in Deutschland aus.

Vor diesem Hintergrund soll in diesem Projekt eine neuartige Anlage zur hoch sortenreinen Aufbereitung der beschriebenen Reststromfraktionen erforscht und entwickelt werden. Die Anlage soll aus einer neuartigen Kaskadierung und Optimierung von State-of-the-Art Sortiereinheiten (Farb-Sorter, Magnettrommel, Windsicher usw.) sowie Dosierungs- und Reinigungsstufen aufgebaut werden. Zusätzlich sollen zwei zentrale Elemente integriert werden: 1) Eine Analyseeinheit zur voll-automatisierten Bewertung der Verunreinigung der Materialströme zu Beginn, während und zum Ende der Aufbereitung. 2) Eine intelligente Anlagensteuerung, welche mit Hilfe von KI-Algorithmen darauf trainiert werden soll, die Materialströme durch die Anlage in Abhängigkeit der Ergebnisse aus der Analyseeinheit zu optimieren. Die Optimierung soll dabei hinsichtlich der resultierenden Sortenreinheit, aber auch bezüglich des Durchsatzes sowie Energieeffizienz der Anlage erfolgen, wodurch ein weiterer Beitrag zur Umweltentlastung geleistet wird.

Der beschriebene Ansatz stellt ein grundlegend neues Anlagenkonzept dar, da in heutigen Anlagen keine laufende Analyse der Materialstromqualität erfolgt und grundsätzlich alle vorhandenen Sortiereinheiten mit nicht oder kaum dynamisch verändertem Setting angefahren werden. Diese sind jedoch oft nicht optimal aufeinander abgestimmt, so dass die angestrebte Sortenreinheit am Stand der Technik nicht in wirtschaftlicher Zeit erzielt werden kann.

Mit der neuen Anlage soll es erstmals möglich werden, mindestens 90 % der anfallenden Reststromfraktionen in einer horizontalen Verwertung wieder zur Flasche zu machen. Mit dem Projekt soll somit ein wesentlicher Beitrag zur Realisierung einer vollständig geschlossenen Kreislaufwirtschaft für PET-Lebensmittelverpackungen und damit einer signifikanten Reduktion der Umweltbelastung geleistet werden: 1) Zum einen können die energetische Verwertung der Restnebenströme und die damit verbundene Schadstoffemission signifikant reduziert werden. Hier rechnen wir mit einer Einsparung an CO₂-Emissionen von etwa 75.000 Tonnen jährlich in Deutschland. 2) Zum anderen ermöglicht eine horizontale Verwertung der Restnebenströme zur Flasche eine entsprechende Reduktion der Produktionsmenge an neuem PET, was ebenfalls in einer wesentlichen Einsparung an CO₂-Äquivalenten resultiert. Hier gehen wir von einem eingesparten CO₂-Äquivalent von etwa 195.000 Tonnen pro Jahr in Deutschland aus.

2. Einleitung

In heutigen Sortieranlagen findet keine Analyse der Zusammensetzung der zu sortierenden Flake-Fraktionen statt. Es werden grundsätzlich alle vorhandenen Sortiereinheiten mit nicht oder kaum dynamisch verändertem Setting angefahren. Diese sind jedoch oft nicht optimal aufeinander abgestimmt: In der Praxis werden bei der Inbetriebnahme einer Anlagenkomponente einige wenige auswählbare Qualitätsbehandlungs-Rezepturen vom Maschinenhersteller voreingestellt. Dies hat erfahrungsbedingt den Schwachpunkt, dass Eingangsqualitäten nicht immer homogen sind und auf Ausreißerstoffe, die in Lagen in einem Big Bag (Sack mit typischerweise 1 Tonne zu sortierendem Material) mitunter auftauchen, nicht oder nur begrenzt reagiert werden kann. Dies hat zur Folge, dass nicht für die gesamte Flake-Fraktion die geforderte Sortenreinheit erzielt werden kann und stets die beschriebenen Restnebenströme abfallen. Letztere werden insbesondere aufgrund von ökonomischen Gesichtspunkten mit den bestehenden Anlagenkonzepten nicht weiter aufbereitet: Zwar ist es prinzipiell auch mit bestehenden Sortieranlagen möglich, die Restnebenströme weiter aufzubereiten, dazu wäre jedoch eine Vielzahl von Durchläufen durch die gesamte Anlage oder bestimmte Anlagenkomponenten notwendig. Eine solch lange Anlagenbelegung zur Sortierung einer verhältnismäßig geringen Menge an PET (etwa 4 % des Gesamtaufkommens, vgl. Umweltproblematik) ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll, so dass die Restnebenströme am Stand der Technik als Ausschussprodukte nicht weiter im Kreislauf gehalten werden.

Hier setzte unsere Projektidee an: Wir möchten bestehende Systemtechnik, d. h. State-of-the-Art Sortier-, Dosier- und Reinigungseinheiten, auf eine grundlegend neuartige Art und Weise kombinieren und insb. kommunizierend aufeinander abstimmen, so dass ein fundamental neues Konzept für eine Gesamtanlage entsteht, welche sich hinsichtlich ihrer Performance (Sortierqualität, Sortierdauer & Energieeffizienz) derart stark vom Stand der Technik abhebt, dass auch die Restnebenströme ökonomisch sinnvoll aufbereitet werden können. Bspw. sollen an Stellen, an denen heute verhältnismäßig langsame Förderbänder bzw. stromintensive Pneumatikförderungen zum Einsatz kommen, Fallelelemente integriert werden, um einerseits den Durchsatz zu erhöhen und andererseits die Energieeffizienz der Anlage zu verbessern. Darüber hinaus soll neben der optimierten Kaskadierung der einzelnen Module eine intelligente Automatik entwickelt werden, die sich von vorneherein mehr auf einen größeren Störstoffanteil konzentriert als auf einen maximalen Durchsatz, wie es bei derzeitigen Anlagen mit statisch hoher Geschwindigkeit der Fall ist. Hierfür sind u. a. auch die Auslegung und Integration einer abgestimmten, größeren Sensordichte nötig.

Konkret soll erstmals eine laufende Analyse der zu sortierenden Flake-Fractionen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung integriert werden. Diese Analyse soll am Anfang, zum Ende sowie an relevanten Stellen während des Sortiervorgangs (bspw. am Ende der mechanischen Aufreinigungskette, d. h. unmittelbar vor den Farbsortern) stattfinden und in eine online Anpassung der Sortierstrategie einfließen. Die Anlagensteuerung und damit die online Optimierung der Sortierstrategie soll durch eine innerhalb des Projektes zu entwickelnde intelligenten Anlagensteuerung realisiert werden. Auf diese Weise soll eine grundlegend neuartige, sich automatisiert auf die individuellen Bedingungen hoch flexibel anpassende Gesamtanlage entwickelt werden.

3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Projektkonzeptionierung

In diesem Arbeitspaket wurde die grundlegende Anlagenarchitektur erarbeitet und mit dem Stand der Technik abgeglichen. Die Prüfung möglicher zu berücksichtigender Patente und Schutzrechte ergab keine Treffer, so dass weiterhin freedom-to-operate besteht.

Nach der Definition der grundlegenden technischen Anforderungen an die neue Anlage wurde begonnen die Schnittstellen zur Anbindung der intelligenten Anlagensteuerung festzulegen. Aufgrund des Ausscheidens des Kooperationspartners Quality Automation GmbH wurden übliche Schnittstellen, wie die OPCUA des Laborgerätes ausgemacht bzw. Adapter zur Erweiterung des Systems festgelegt.

Das Arbeitspaket 1.2 wurde soweit möglich von meinem Unternehmen bearbeitet, konnte allerdings unter den ungeplant erschwerten Bedingungen, die in dem Ausscheiden des bisherigen Projektpartners QA liegen, nicht vollständig abgeschlossen werden. Alternative Bemühungen mit einem Ersatzpartner laufen bereits – vgl. Punkt 2.

Arbeitspaket 2: Auswahl Hardwarekomponenten

In diesem Arbeitspaket wurden die einzelnen Hardwarekomponenten hinsichtlich ihrer Eignung zur Integration in die Gesamtanlage erforscht und ausgewählt. Dies umfasste sowohl die Aufbereitungsstufen als auch die benötigte Sensorik (Abbildung 1).



Kapazitiver Sensor

KI6000 KI-3250NFPKG/PL/2P/US/IO

- Komfortabel einstellbarer Schaltabstand
- Mit Signalanzeige für den perfekten Schaltpunkt
- Hohe Schutzart für die Anforderungen rauer Industrieumgebungen
- Einsatz in hoher Mediumtemperatur
- Für Positionserfassung oder Füllstandüberwachung

Listenpreis: **114,00 €**

Ihr Preis: [Bitte anmelden](#)

[Verfügbarkeit prüfen](#)

Abbildung 1: Beispiel für einen ausgewählten und beschafften kapazitiven Sensor.

Im Folgenden wurden die notwendigen Leistungsklassen und Spezifikationen für die einzelnen Aufbereitungsstufen untersucht, um den Durchsatz von 1 t/h für die Gesamtanlage sicherstellen zu können. Konkret wurden die Aufbereitungsstufen Trockner, NIR-Sortierer,

Farbsortierer, Wirbelstromscheider, Sieb, ZickZack Sichter und Mischsole untersucht, die Anlage im Technikumsmaßstab aufgebaut und die Teilkomponenten beschafft (Abbildung 2).

Weitere Ergebnisse dieses Arbeitspaketes sind teilweise in AP 3 dargestellt.



Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung der aufgebauten Anlage in Technikumsmaßstab.

Arbeitspaket 3: Hardwareseitige Integration

Neben der grundlegenden Integration der ausgewählten Hardwarekomponenten entsprechend der in AP 2 ausgearbeiteten Anforderungen, wurden in AP 3 vor allem Modifikationen an der Hardware auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse der Inbetriebnahme und durchgeführter Versuche durchgeführt. Dabei hat es sich im Projektverlauf als praktikabel erwiesen die Teilarbeitspakete 3.1 bis 3.7 parallel zu bearbeiten. Konkret wurden die Teilkomponenten in die Gesamtanlage integriert und im Betrieb modifiziert und kalibriert. Die wichtigsten gelösten Herausforderungen sind nachfolgend dargestellt:

Silo (AP 3.7): Eine Herausforderung bestand darin, eine kontinuierliche Materialversorgung aus dem Silo sicherzustellen. Während der Inbetriebnahme stellte sich heraus, dass sich das Material verhakte und zum Stillstand der Anlage führte. Als wesentliche Ursache wurde, die nicht lineare Krafteinwirkung des Materials auf die Förderschnecke identifiziert (Große Krafteinwirkung beim vollen, und nahezu keine Krafteinwirkung beim leeren Silo). Als Lösung wurden der Durchmesser des Auslasses am Silo vergrößert und eine dosierbare Schieberluke integriert, um auf sich verändernde Füllstände reagieren zu können.

Sieb (AP 3.5): Bei ersten Versuchen zeigte sich eine erhebliche Emissionsbelastung mit Staub, so dass zusätzliche Absauganlagen installiert wurden.

Trockner (AP 3.1): Üblicherweise werden zur Trocknung der Materialien Wasserkammerfilter eingesetzt, um nasses Material trocken zu rütteln. Bei unserem Prozess zeigte sich, dass das Material nur Kondensfeuchtigkeit aufweist, was im Prozess zu Schwierigkeiten führte. Daher

wurde ein völlig neuer Trocknungsprozess entwickelt. Statt das Wasser unterhalb des Siebes aufzufangen, wird die warme Prozessabwärme von Kompressoren wiederverwertet und das Kondenswasser mit warmer Luft abgeblasen (Abbildung 3). Mit der Entwicklung des neuen Trocknungsprozesses wurde bereits zu einem frühen Zeitpunkt im Projekt ein wichtiges Ergebnis erzielt, mit dem der Aufbereitungsprozess effizienter ist und das Material erstmals auf $< 0,5\%$ Oberflächenfeuchtigkeit getrocknet wird, was die Produktqualität des Rezyklates steigert.



Abbildung 3: Darstellung des neuartigen Trocknungsverfahrens.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass erhebliche Prozesszeit- und Effizienzinsparungen durch den sequenziellen Betrieb der Stationen aus AP 3.1 - 3.7 erzielt werden können. Der Grund ist, dass häufig zum Rezyklieren des Ausgangsmaterials nicht der vollständige Aufbereitungsprozess, sondern nur Teile durchgeführt werden müssen. Zur Realisierung dieser neuen Anforderung wurde ein By-Pass-System mit eingebauten Schleifen und regelbaren Klappen entwickelt und aufgebaut (Abbildung 4).

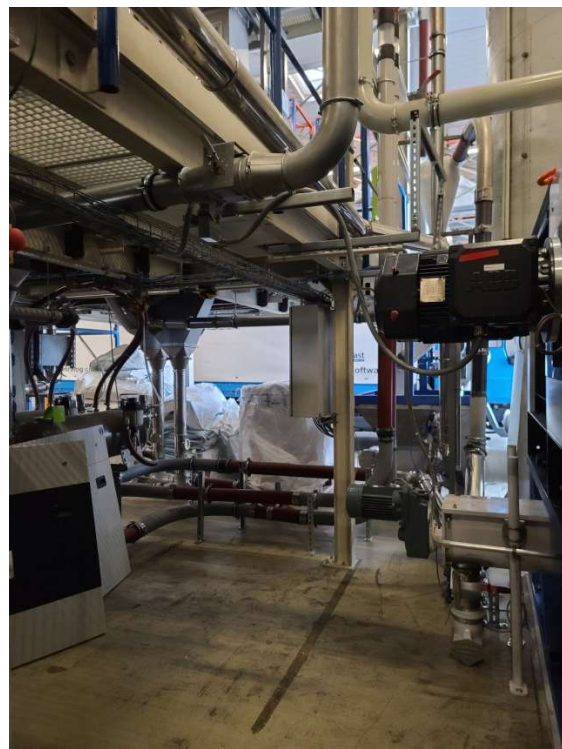
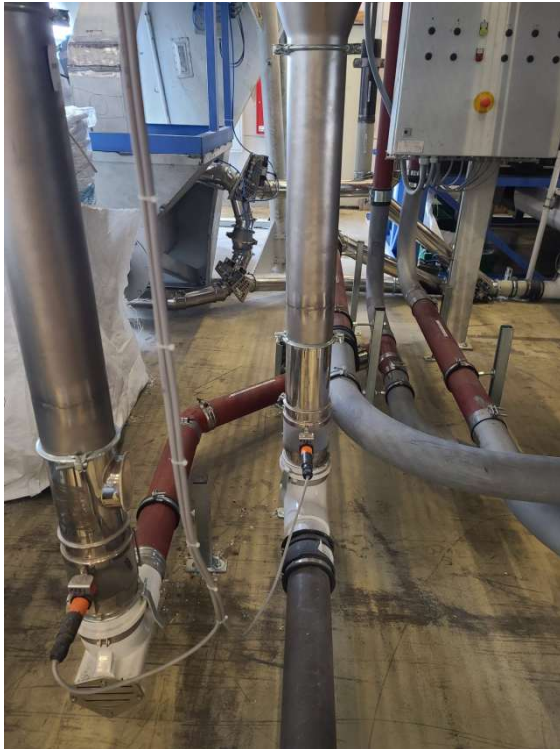


Abbildung 4: Beispiel für einen entwickelten und aufgebauten By-Pass.

Zum Berichtszeitpunkt wurden bereits 6 Loop - Varianten installiert:

- | | | |
|---------------|-----------------------------|------------------------|
| 1) komplett | 2) komplett ohne Misch Silo | 3) Nur WSA |
| 4) nur Sorter | 5) Nur WSA + Sorter | 6) WSA / Silo / Sorter |

Es konnten Prozessgeschwindigkeiten von 500 kg bis 1.000 kg pro Stunde gefahren werden. Die Integration der Software, sowie des automatisierten Flake Scans erfolgte im weiteren Projektverlauf.

Im Folgenden wurde festgestellt, dass beim initial eingesetzten Fischgrätsieb des Sorters, zu viel gut Korn ausgesiebt wurde, weswegen wir auf 2 mm Rundsieb umgestellt haben. Bei der Durchführung von Untersuchungen stellte sich allerdings heraus, dass die Siebeinstellung mit 2 mm Rundsieb zu klein ist. Der Schwellenwert für die Aussortierung von schlecht Körnern beträgt 4 mm, um die effektive Sortierung zwischen gut- und schlecht Korn sicherzustellen. Daher wurde das Sieb erneut angepasst und auf ein 4 mm Rundsieb modifiziert, um in den Messbereich der Sortiereinheit abzudecken.

Um die Ausbeute vom „Gut“ Material zu erhöhen, wurde neue Sortierstrategien entwickelt. In Untersuchungen haben wir festgestellt, dass es nicht sinnvoll ist, zwei auf Farbe und Material fokussierte Sorter in Reihe zu schalten. Diese Sortierstrategie kann dazu führen, dass ein Sorter im Leistungsmaximum fährt. Dadurch entstehen beim „rausschießen“ des schlecht Kornes Verwirbelungen, was zum überproportionalen Aussortieren von Gutmaterial führen kann (Übersortierung). Analog wird der andere Sorter im Leistungsminimum betrieben. Durch die Adaption des Sorters an die Messergebnisse des Input Materials wird sichergestellt, dass der Sorter auch bei stark schwankenden Zusammensetzungen des Input Materials im Optimum fährt.

Im weiteren Projektverlauf stellte sich heraus, dass eine Herausforderung in der sicheren Selektion von „weiß“ und „klar“ liegt. Als wesentliche Ursache hierfür wurde die Auflicht Reflektion identifiziert. Diese Herausforderung wurde durch neue Beleuchtungskonzepte gelöst. Bei der Selektion von nicht transluzienten Materialien kann z. B. die Durchlichttechnik eingesetzt werden. Dabei wird das Material mit Licht bestrahlt. In der Bilderkennung werden dann Materialien, die nicht Lichtdurchlässig sind als „schwarz“ identifiziert und aussortiert.

Weiterhin stellte die klare Weißabgrenzung sowie die Sortierung heller Farben, wie hellblau, hellgrün oder hellpink eine große Herausforderung hinsichtlich des sicheren Aussortierens dar. Diese Farben wurden tendenziell eher als „klar“ eingestuft. Zur Lösung der dargestellten Herausforderung wurde die sog. Pixelanalyse erarbeitet. Dabei wird im Pixel-Bereich analysiert, in welchem Farbbereich das Störmaterial vom Sorter am Besten erkannt wird. Ferner werden Farbfilter eingesetzt, um derart herausfordernde Materialien eindeutig zu identifizieren. Dabei werden die Farbfilter und die Schwellenwerte der Farbsortiereinheit adaptiert und Farbcodes zugeordnet. Als Schwellenwerte kann vor allem die Sensitivität hinsichtlich des Minimums an zusammenhängend erkannten Pixeln (z. B. 3, 5, 8) eingestellt werden, um ein Fehlteil einer Farbe eindeutig zu bestimmen.

Arbeitspaket 4: Analyse Input-Produktströme in die Anlage

Erste Untersuchungen ergaben, dass die Ausgangsstoffe stark heterogen sind und in der Kontaminierung wie z. B. mit PVC, PE, PP, ABS, PC und PS zum Teil deutlich > 1.000 ppm variieren.

Im Projektverlauf haben wir durch umfangreiche Untersuchungen festgestellt, dass der Wert PET-G entgegen den Herstellerangaben nicht zuverlässig gemessen werden kann. Der Nachweis, dass dieser PET-G Wert nicht zuverlässig gemessen werden kann, hat bei uns zu erheblichem Mehraufwand geführt. Die Ursache bestand darin, dass die durchgeführten Analysen dieses Messwertes für uns nicht nachvollziehbar waren. Inzwischen hat der Hersteller unsere Versuchsergebnisse mündlich bestätigt. Der PET-G Wert wird zukünftig als Konsequenz nicht mehr berücksichtigt.

Weiterhin haben wir die Mustermenge auf 1 kg standardisiert, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Zudem haben wir eine Zahlencodierung der Analysen für die eindeutige Klassifizierung einer Probe auf Metadatenebene erarbeitet und eingeführt.

Weitere erhebliche Aufwände fielen im Rahmen der Identifizierung und der Verhandlungen mit der Fa. Roskopf als neuen Projektpartner an. Hierbei wurde das Unternehmen auf den aktuellen Projektstand gebracht und die Anlage im Ganzen erläutert, um zukünftig die Softwareentwicklung der Fa. Roskopf effizient durchführen zu können. Weiterhin hat die Auslegung und Abstimmung des aktualisierten Lasten- und Pflichtenhefts erhebliche Aufwände verursacht, um die ursprünglich für QA geplante Projekthinhalte auf die bestehende Softwarestruktur von Roskopf zu übertragen. Dabei wurden vor allem die relevanten Softwareschnittstellen an der Sortieranlage definiert sowie das aktuelle Softwaresystem analysiert.

Arbeitspaket 5: Entwicklung intelligente Anlagensteuerung zur automatisierten Optimierung der Anlagenperformance

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Umsetzung der Unteraufträge. Zusammengefasst wurde die KI durch den Unterauftragnehmer IconPro eingangs soweit vorbereitet, dass Daten erfasst werden können. Die Integration von Infrastruktur und Systemadaption wurden von der Fa. Muon durchgeführt. Bei Sesotec wurden Dateninterface bezogene vor Ort Einsätze nebst Spezialschulung gehalten.

In Eigenleistung wurde eine Schnittstelle zur Datenbereitstellung an IconPro entwickelt und integriert und erste Datenproben durchgeführt. Ungeplant war in diesem Zusammenhang der Aufbau eines Schaltschranks.

Zum Einbinden der drei Weichen in den Prozessablauf wurde die dezentrale Peripherie beschafft und installiert. Nach erfolgter Einbindung in den Schaltplan wurde das System erfolgreich in die Software und das HMI integriert. Die Verkabelung wird kurzfristig abgeschlossen.

Für den Antrieb der Förderschnecke bei der Nebenentsackung wurde ein Frequenzumrichter beschafft, installiert und verkabelt. Die Einbindung in den Schaltplan und das HMI ist noch ausstehend.

Im Bereich der Probeentnahme wurden notwendige Änderungen in die Planung integriert. Ferner wurden weitere technische Details hinsichtlich neuer Anforderungen erarbeitet.

Im Bereich des Stahlbaus wurden tragende Elemente der Maschine konstruiert und Entwürfe erstellt.

Ferner wurden die statischen Voraussetzungen für den Stahlbau geprüft, um die Belastbarkeit im Hinblick auf die Änderungen und Positionierung der Stützen sicherzustellen. Hiervon wurden detaillierte Fertigungszeichnungen und Montageunterlagen erstellt. Die Umsetzung des Stahlbaus erfolgt im kommenden Berichtszeitraum.

Projektbegleitend wurden Meetings zwischen den Gewerken zur frühzeitigen Identifikation und Lösung von Schnittstellenproblemen durchgeführt und die Ressourcen geplant.

Arbeitspaket 6: Iterative Optimierung der Demonstratoranlage

Im Rahmen des Arbeitspakets 6 lag die Zielsetzung darin, die Funktionalität der entwickelten Demonstratoranlage sowie der eingesetzten Optimierungsalgorithmen in einer industrienahen Umgebung zu bewerten und potenzielle Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Der Fokus lag dabei auf den drei zentralen Kriterien Sortierqualität, Durchsatz und Energieverbrauch, die umfassend evaluiert wurden.

Zu Beginn wurde ein Versuchsplan nach dem Prinzip „Design of Experiments“ (DoE) erstellt, um eine effiziente Bewertung der Anlagensteuerung und des Gesamtkonzepts zu ermöglichen. In gezielt ausgewählten Experimenten wurden typische Materialschwankungen wie unterschiedliche Flake-Größen, Feuchtigkeitsgrade, Metallanteile oder variierende Farbstoffgehalte in das System eingebracht. Die Reaktion des Systems wurde unter Prozessoptimierung durch die regelbasierte Steuerung und die KI-Adaption analysiert. Ein wesentlicher Aspekt war der Vergleich des Systemverhaltens bei rein regelbasierter Steuerung mit dem Verhalten bei Hinzunahme der KI-basierten Steuerung. Dadurch konnten sowohl der Nutzen als auch die Grenzen der KI-basierten Steuerung unter verschiedenen Betriebsbedingungen ermittelt werden.

Ergänzend zu den Versuchsreihen wurden parallellaufende Langzeitversuche durchgeführt. Dabei wurde regelmäßig die gleiche Materialkombination verarbeitet, um schleichende Veränderungen im Prozess oder an der Maschine, die durch die Optimierungszyklen verursacht wurden, zu erkennen. Die Materialchargen im Langzeitversuch deckten möglichst viele Eigenschaften aus dem Bereich der Input-Analyse ab. Idealerweise zeigte sich bei den wiederholt aufbereiteten Chargen eine Qualitätsverbesserung durch die kontinuierlich trainierten Algorithmen.

Die im Rahmen der Unterarbeitspakete gewonnenen technischen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für eine abschließende Bewertung der Entwicklungen. Falls erforderlich, wurde ein Re-Design des KI-Moduls sowie des regelbasierten Steuerungsmoduls vorgenommen. Ebenso konnte die hardwareseitige Anlagenarchitektur inklusive Sensorik überarbeitet werden, um den Anforderungen optimal zu entsprechen.

4. Fazit

Es ist eine hochmoderne, innovative PET-Sortieranlage entstanden, welche auf großes internationales Interesse gestoßen ist. Ein Erstkontakt mit einem indischen Großunternehmen ist bereits entstanden und ein Besuchstermin in Roetgen ist geplant.

Durch die Weiterentwicklung zur Marktreife und anschließende Vermarktung dieses neuartigen Anlagenkonzeptes strebt der Antragsteller TETRALOG eine Vorreiterrolle für die hoch sortenreine Aufbereitung rieselfähigen Schüttgütern an. Dabei soll zunächst der in diesem Projekt beschriebene Anwendungsfall der Aufbereitung von PET-Reststromfraktionen adressiert werden. Mittel- bis Langfristig ist jedoch eine Übertragung des Konzeptes auf weitere Anwendungsbereiche geplant (PVC, Mais, Nüsse, usw.) geplant.

Mit den Ergebnissen dieses Vorhabens werden zwei wesentliche Zielgruppen adressiert:

- Recycling-Werke, welche in ihren Sortieranlagen den beschriebenen PET-Restnebenstrom produzieren. Die Betreiber unserer neuen Anlage können die Restnebenströme aufkaufen und aufbereiten.
- Produzenten von PET-Lebensmittelverpackungen, die aufbereiten PET-Fraktionen aufkaufen, verarbeiten und somit im Stoffkreislauf halten.

Zudem wird unsere Lösung einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele liefern, so dass zudem die Politik sowie Umweltorganisationen als Interessensgruppen für die Ergebnisse dieses Vorhabens zu nennen sind.

Zur Vermarktung werden die bei TETRALOG upcycling GmbH & Co. KG firmenüblichen Maßnahmen durchgeführt. Das betrifft zum einen Werbung mittels Flyer und Broschüren. Andererseits wird die neue Anlage nach der weiteren Entwicklung zur Marktreife auch im Internet auf den Firmenhomepages beworben. Des Weiteren werden Social-Media-Kanäle wie LinkedIn und XING zur Veröffentlichung von Produktdetails verwendet. Weitere beabsichtigte Maßnahmen betreffen auch die Direktwerbung (über Direktmailings und Kampagnen) sowie Produktpräsentationen auf den relevanten Fachmessen. Dies sind v. a. die Fakuma in Friedrichshafen, K in Düsseldorf, Kuteno in Rheda-Wiedenbrück, Chinaplas mit Ort variierend.

Wirtschaftliche- und Umweltaspekte des Verfahrens

Die Anlage wird im Zweischicht Betrieb betrieben und erzielt eine Brutto-Produktionskapazität von 250 t überarbeitete Flakes pro Monat. Die Anlage wird aktuell mit einer Effizienz von 85 % betrieben, sodass die Netto-Kapazität aktuell 212,5 t beträgt. Der aktuell erzielte Stoffstrom gliedert sich dabei wie folgt:

- 76,5 % PET Flakes
- 14 % Fines, die in den Vorstufen sortiert und daher nicht thermisch verwertet werden
- 8,5% NIR (Fremdpolymere) sind ein Gemisch aus vielen verschiedenen Kunststoffsorten.
- < 1 % ist Abfall, für den eine Lösung erarbeitet wird

In Konsequenz werden ausgehend von der aktuellen Netto-Kapazität von dem Zielprodukt PET-Flakes pro Monat 162,56 t produziert bzw. sortiert. Bezogen auf einem durchschnittlichen Verkaufspreis von 1.050 bis 1.120 € pro Tonne für klare, lebensmitteltaugliche Flakes im März 2026 besteht ein monatliches Umsatzpotenzial von mindestens 170.625 €. In der Folge kann mit der Anlage ein Umsatz von ca. 2,0 Mio. € pro Jahr erzielt werden (Ohne Berücksichtigung der Fines und weiterer Nebenprodukte). Auf dieser Grundlage gehen wir davon aus, dass wir in den kommenden drei Jahren in Summe einen Umsatz von 6,0 Mio. € mit klaren Flakes erzielen können. Im Produktionsmix 50%/50% mit bunten PET Flakes, deren Preis bei 700-750 €/t liegt, würde ein Umsatz von bis zu 122.000 € im Monat erzielt werden. Das entspräche einem Umsatz von knapp 4,4 Mio. € in drei Jahren.

Ferner können durch die Nutzung und das Recycling eines bisher ungenutzten Nebenstroms, der bisher einem Downcycling oder einer energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen / Ersatzbrennstoffkraftwerken zugeführt wird, erhebliche Umweltpotenziale gehoben werden. Ausgehend von der aktuell abbildbaren Netto-Sortiermenge von 2.550 t Flakes pro Jahr werden 1.950,75 t bisher ungenutzte PET Flakes gewonnen. Die daraus resultierenden Umweltaspekte in einer vereinfachten Berechnung sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Bezeichnung	PET-Recycelt	Virgin PET
Tonnen pro Jahr	1.950 t	1.950 t
Anlagenverbrauch	Max. 600 kWh pro Tag	
CO ₂ -Äquivalente	363 g CO ₂ pro Kilowattstunde (kWh) im deutschen Strommix (2024)	~ 2.400 kg CO ₂ /t
Tagesverbrauch	217,8 kg CO ₂	
Ergebnis	Max. 80.000 kg CO ₂	4.680.000 kg CO ₂

Ergänzend zur obigen Darstellung, die den maximalen Energieverbrauch der Anlage adressiert, kann der Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Verunreinigung durch die verschiedenen Loop Varianten, um bis zu 50% reduziert werden.

Das CO₂ Einsparungspotenzial, mit der neuartigen Sortieranlage liegt bei knapp 4.600.000 kg CO₂ pro Jahr, gegenüber Virgin PET. Durch die Nutzung der Loop Varianten kann, bei einfacheren Verunreinigungen, weitere 40.000 Kg CO₂. eingespart werden.

5. Literaturverzeichnis

Keine Literatur vorhabenden.