

Abschlussbericht BWPLUS

RohWerKBaWü: Roh- und werkstoffliche Kreislaufführung bisher nur thermisch verwerteter Abfallfraktionen in Baden-Württemberg

von

Rainer Golle, KORN Recycling GmbH
Stephan Aschauer, carboliq GmbH / CARBOWEST GmbH
Markus Reisacher, Polysecure GmbH

KORN Recycling GmbH – im folgenden KORN
carboliq GmbH – im folgenden carboliq
CARBOWEST GmbH – im folgenden CARBOWEST
Polysecure GmbH – im folgenden Polysecure genannt

Förderkennzeichen: BWCE 24511 & BWCE 24512 & BWCE 24513 & BWCE 24514

Laufzeit: 15.03.2024 – 31.07.2025

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

August 2025



Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Kurzfassung

Im vorliegenden Projekt wurden in Baden-Württemberg anfallende Abfallströme für die roh- und werkstoffliche Nutzung qualifiziert, die bislang nur thermisch verwertet werden. Dabei würden die innovativen Sortiertechnologien von Polysecure und das neue Recyclingverfahren von CARBOWEST (Carboliq-Prozess) angewendet und demonstriert.

Ziel des Vorhabens war es, existierende Ersatzbrennstoffe so vorzukonfektionieren, dass eine neue Ersatzbrennstoffqualität gewonnen wurde, die dann einer mechanischen und/oder rohstofflichen Verwertung unterzogen werden konnte. Im Projekt wurde dabei ein markerbasierter Sortieransatz für spezifische Sortierung, die bisher nicht separierbarer Verbundmaterialien ermöglichen, getestet. Womit dann ebenfalls eine werkstoffliche und/oder rohstoffliche Verwertung ermöglicht werden könnte. Die erzeugte EBS++ Qualität wurde erfolgreich auf der CARBOWEST-Pilotanlage gefahren und ein marktfähiges, Drop-in fähiges Erdölersatzprodukt hergestellt. Als **Abschluss des Vorhabens** erfolgte eine Technologie- und Geschäftsanalyse für die Umsetzung entsprechender resilienter Closed-Loop Recyclingprozessen. Mit diesen Erkenntnissen wurde nicht nur konkret die Basis für eine kommerzielle Applikation bei KORN evaluiert, sondern auch ein entsprechender Show-Case zur Vermarktung an andere Recycling-Unternehmen mit ähnlichen Einsatzstoffqualitäten in Baden-Württemberg aufgebaut werden. Hierfür soll bereits im Projekt Akzeptanz bei den relevanten Zielgruppen geschaffen werden, um die zirkuläre Transformation und Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen in Baden-Württemberg weiter voranzutreiben.

Wir bedanken uns beim Land Baden-Württemberg für die Bereitstellung der Mittel. Beim Projektträger Karlsruhe (PTKA), insb. bei Herrn Decker für die ausgezeichnete Inhaltliche Betreuung und Führung, als auch dem Umweltministerium für die Prüfung und Unterstützung.

Inhalt

Kurzfassung.....	ii
Inhalt.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	viii
Tabellenverzeichnis.....	ix
Abkürzungsverzeichnis.....	x
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehen.....	2
1.4 Konsortium.....	4
1.5 Arbeitsplan (Struktur des Projektes, Aufgaben und Arbeitspakete).....	7
2 Analyse der Ausgangslage und bestehender Anforderungen.....	9
2.1 Analyse der Ausgangsstoffströme.....	9
2.1.1 Probenanalyse bei CARBOWEST.....	10
3 Entwicklung des Detailkonzepts der Sortier- und Recyclingprozesse.....	14
3.1 Einleitung.....	14
3.2 Ableitung von Prozessspezifikationen.....	14
3.2.1 Materialaufbereitung.....	14
3.2.2 NIR-Sortierung.....	14
3.2.3 Röntgen-Sortierung.....	14
3.2.4 FE- und NE Abscheider.....	14
3.3 Relevante Key Performance Indicators (KPIs).....	14
3.3.1 Qualitäts-KPIs.....	14
3.3.2 Prozess-KPIs.....	15
3.4 Entwicklung eines Detailkonzepts.....	15
3.4.1 Prozesslinienführung für Gewerbeabfall.....	15
3.4.2 Qualitätssicherung.....	15
3.4.3 Ergebnisbewertung.....	15
3.4.4 Fazit.....	15
4 Validierung der TBS-Light Technologie zur präzisen Sortierung markierter Verbundverpackungen und Validierung der SORT4CIRCLE Technologie als alternative Lösung zur spezifischen Sortierung von Gewerbeabfall und anderen Abfallströmen unter Erzeugung eines neuen EBS++ Produktes.....	16
4.1 Strang A: Sort4Circle.....	16
4.1.1 Motivation.....	16
4.1.2 Versuchsziele.....	16

4.1.3	Versuchsmaterial	16
4.1.4	Prinzip des Sort4Circle-Prozesses	16
4.1.5	Aufbau und Eigenschaften der S4C-Versuchsanlage	17
4.1.6	Messkampagnen	19
4.1.7	Ergebnisanalyse	28
4.1.8	Weiterentwicklung der Messtechnik – MIR-Reflexionsspektroskopie ..	29
4.1.9	Sort4Circle-Brennwertanalyse	32
4.2	Strang B: TBSlight	34
4.2.1	Versuchsziel	34
4.2.2	Vorgesehener Versuchsablauf	34
4.2.3	Herstellung markierter Testfolien	35
4.2.4	TBSlight-Upgrade der KORN-Sortieranlage	36
4.3	Strang C: Optimierung TOMRA und Nachzerkleinerung	38
4.4	Problembeschreibung	38
4.5	Problembeschreibung	38
4.6	Anlagenbeschreibung (flächiger Sortierstrom)	39
4.6.1	Überblick	39
4.6.2	Ballistikseparator (Hersteller Fa. Stadler)	39
4.6.3	TOMRA-NIR-Sorter (erste Stufe)	39
4.6.4	Zweiter NIR-Sorter (Polishing-Stufe)	40
4.6.5	Nachzerkleinerung (Lindner Komet)	40
4.6.6	Eisen-/FE-Abscheidung	40
4.6.7	Schematischer Materialfluss	41
4.7	Versuchsablauf am Ballistikseparator	41
4.7.1	Zielstellung	41
4.7.2	Untersuchte Einstellgrößen	42
4.7.3	Versuchsaufbau und Probenahme	42
4.8	Versuchsablauf am TOMRA-NIR-Sorter	43
4.8.1	Zielstellung	43
4.8.2	Untersuchte Parameter	43
4.8.3	Versuchsablauf	43
4.8.4	Temporäre Nachzerkleinerung (Mobiler Zerkleinerer Fa. Arjes) im Versuch 44	
4.8.5	Serienmäßige Nachzerkleinerung (Lindner Komet)	44
4.8.6	Bewertungsgrößen	45
4.9	Ergebnisse und Auswertung	45
4.9.1	Ergebnisse der Ballistikseparator-Versuche	45
4.9.2	Ergebnisse der TOMRA-NIR-Versuche	45

4.9.3	Einfluss der Vorzerkleinerung (Arjes im Versuch)	46
4.10	Gesamtbewertung der Versuchsergebnisse	47
5	Anwendung der entwickelten Sortierprozesse zur Erzeugung der EBS++ und PA-PE-Verbundfolien Fraktion.....	48
5.1	Vorbereitung der Feedstock-Auswahl bei KORN	48
6	Fahren der EBS++ Fraktion von KORN bei CARBOWEST	50
6.1	Ziel des Versuchs.....	50
6.2	Feedstock-auswahl und -anlieferung / Schreddern bei der GRE	50
6.3	Vorcharakterisierung des Feedmaterials im Labor	51
6.3.1	Grundcharakterisierung.....	51
6.4	Bilanzfahrt der Anlage	52
6.5	Analysen und Messergebnisse.....	54
6.5.1	Prüfmethoden.....	54
7	Bewertung der Ergebnisse, Erstellung von Investitionsplanung (KORN)	56
7.1	Einleitung und Allgemeines	56
7.1.1	Problemstellung und Motivation	56
7.1.2	Zielsetzung der Analyse	56
7.1.3	Methodisches Vorgehen	56
7.2	Markt- und Umfeldanalyse	56
7.2.1	Makrotrends und regulatorischer Rahmen	56
7.2.2	Limitierungen des mechanischen Recyclings.....	56
7.2.3	Potenzial und Wachstumsperspektiven des chemischen Recyclings .	57
7.2.4	Wettbewerb und Positionierung	57
7.2.5	Zusammenfassung.....	57
7.3	Unternehmensstrategie	57
7.3.1	Strategische Ausgangslage.....	57
7.3.2	Zielbild und Vision	57
7.3.3	Wettbewerbsvorteile und Differenzierungsmerkmale	58
7.3.4	Wachstumsstrategie.....	58
7.3.5	Beitrag zum Unternehmenswert.....	58
7.4	Technologie und Prozesskette	58
7.4.1	Einsatzstoff (Feedstock).....	58
7.4.2	Das carboliq® -Verfahren (Direct Liquefaction).....	58
7.4.3	Prozessintegration	58
7.4.4	Endprodukte und Absatzmärkte	59
7.5	Business Model Canvas	59
7.6	Finanzmodell und Profitabilität	60
7.6.1	Umsatz- und Kostenpotenzial	60

7.6.2	Betriebsergebnis (EBITDA/EBIT)	61
7.6.3	Cashflow-Projektion (10 Jahre)	61
7.6.4	Kapitalwert (NPV) und interne Rendite (IRR)	61
7.6.5	Sensitivitätsanalyse	61
7.6.6	Zusammenfassung	61
7.7	Investment-Readiness	61
7.7.1	Skalierbarkeit	62
7.7.2	Technologierisiken	62
7.7.3	Markt- und Kundenrisiken	62
7.7.4	Renditepotenzial	62
7.7.5	Finanzierungsbedarf und Investitionsvolumen	62
7.7.6	Exit-Optionen	63
7.7.7	Zusammenfassung	63
7.8	Risiken und Mitigation	63
7.8.1	Technische Risiken	63
7.8.2	Wirtschaftliche Risiken	63
7.8.3	Regulatorische Risiken	63
7.8.4	Stakeholder-Risiken	64
7.8.5	Zusammenfassung	64
7.9	Roadmap und Implementierungsplan	64
7.9.1	Projektphasen	64
7.9.2	Zeitplan	64
7.9.3	Erfolgsfaktoren in der Umsetzung	65
7.9.4	Zusammenfassung	65
7.10	Finanzmodellübersicht	65
8	Zusammenfassung	67
8.1	Sortierversuche	67
8.1.1	Strang A: Sort4Circle-Technologie	67
8.1.2	Strang B: TBSlight-Addon	67
8.1.3	Strang C: Alternative NIR Sort-Route	67
8.2	Bilanzfahrt bei CARBOWEST	68
8.3	Ökonomische Analyse	69
9	Verwertung	70
10	Ausblick	73
	Literaturverzeichnis	A
11	Literaturverzeichnis	A

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Verwertung von Post-Consumer Kunststoffverpackungsabfällen in der EU27+3 2020, Zielquoten nach EU-Verordnung über Verpackungen und Verpackungsabfälle	1
Abbildung 2 Zusammenfassung Vorhaben im Projekt RohWerKBaWü	2
Abbildung 3 Probe F1.2/F2.2	11
Abbildung 4 Probe G1	11
Abbildung 5 Probe F2.1	11
Abbildung 6 Probe F2.4	11
Abbildung 7 Probe F2	11
Abbildung 8 Probe F1.1	11
Abbildung 9 Probennahme und Probenerzeugung zur Bestimmung von Brennwert, Asche und Wassergehalt	12
Abbildung 10: Verwendeter TOMRA-NIR Sorter	40
Abbildung 11 Prozesskette der 2D-Fraktion (Serienbetrieb)	41
Abbildung 12: Arbeitsvorbereitung zur Aufgabe der Proben	42
Abbildung 13: Mobiler Arjes VZ 950 Titan-Nachzerkleinerer	44
Abbildung 14 EBS-Lager bei KORN mit Radlader zur Beladung des LKW (HN-FK-450)	48
Abbildung 15 Wiege und Lieferschein der KORN-Kampagne (EBS++ (A+B))	49
Abbildung 16 Anlieferung des KORN EBS++ Materials bei GRE Fr. 21.02.2025, morgens 8:30	50
Abbildung 17 KORN EBS++-Material nach dem Lohnschreddern (vgl. Dichten)	51
Abbildung 18 Darstellung der stündlich geförderten Mengen (ohne Absolute Einheit)	53
Abbildung 19 Zeiträume und Brennwerte des Einsatzmaterials und des CLR-Produktes (linke Achse, rechte Achse: Inertstoffgehalt)	53
Abbildung 20: Business Model Canvas	60
Abbildung 21: Finanzmodellübersicht für eine 45.000 t/a Anlage (Quelle: Eigene Berechnungen von KORN)	66
Abbildung 22: Dokumentation des Projektfortschritts und der Projekttreffen durch Dr. Marc König	70
Abbildung 23: Veranstaltungshinweise und Eindrücke zum 7. Technology Arts Evening mit mehr als 150 Teilnehmern in Karlsruhe	71
Abbildung 24: Impact-Investments - Erfassung von Stakeholder-Perspektiven zu kapitalintensiven Impact-Projekten	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Spezifikationen CARBOWEST	9
Tabelle 2: Monatsübersicht der Proben von KORN von Juni bis November 2024	13
Tabelle 3: Einfluss von Neigungswinkel und Schlagfrequenz auf Reinheit und Ausbringung der 2D-Fraktion.....	45
Tabelle 4: Einfluss des Confidence-Levels auf Reinheit und Ausbringung (PE-Folie)	46
Tabelle 5: Ergebnisse mit Vorzerkleinerung (PE-Folie)	47
Tabelle 6: Analysen verschiedener EBS-Proben bei KORN.....	49
Tabelle 7 Vergleich der Proben des KORN EBS++-Materials mit den Werten des typischen Feedstocks	52
Tabelle 8 Brennwert, Schüttdichte, Asche- und Wassergehalt des F2 Feedstocks während der Bilanzfahrt.....	54
Tabelle 9 Prüfparameter und Prüfmethoden der Firma ASG	54
Tabelle 10: Zusammenfassung der Aufgaben und Ergebnisse	74

Abkürzungsverzeichnis

EBS
CLR
NIR
NE
OS
FTIR
S4C

Ersatzbrennstoff
Circular Liquid Resource
Nahinfrarotspektroskopie
Nichteisen
Orginalsubstanz
Fourier-Transformierte Infrarot
Sort4Circle

1 Einleitung

1.1 Motivation

Kunststoffe sind als vielseitiger, leistungsstarker und bei vielen Anwendungen CO₂-effizienter Werkstoff aus unserer Welt nicht wegzudenken. Leider sind die meisten Kunststoffanwendungen noch nicht kreislauffähig. Die Europäische Union will das ändern. Mit dem European Green Deal und zahlreichen neuen Regularien soll die Kreislaufwirtschaft auch für Kunststoffe vorangetrieben werden. Das Ziel: Ausgehend von 4,6 Mio. Tonnen sollen bereits 2025 10 Mio. Tonnen Rezyklate statt neuer Kunststoffe eingesetzt werden. Damit einhergehend soll die werkstoffliche EU-Recyclingquote für Kunststoff-Verpackungen von aktuell rund 20 % auf 55 % (EU) gebracht werden.

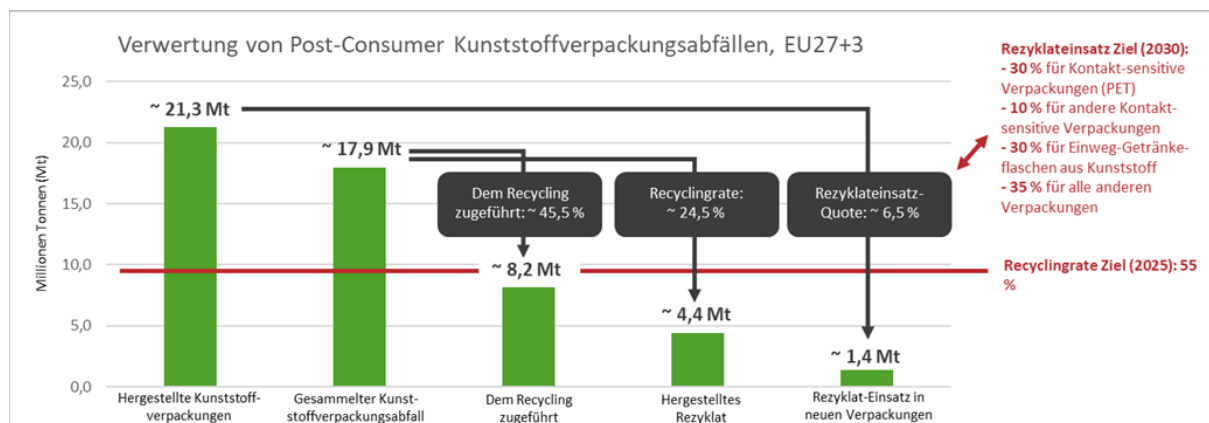


Abbildung 1 Verwertung von Post-Consumer Kunststoffverpackungsabfällen in der EU27+3 2020, Zielquoten nach EU-Verordnung über Verpackungen und Verpackungsabfälle

Betrachtet man diese Zahlen für Deutschland, so wurden 2021 von rund 6,57 Mio. Tonnen gesammelter Kunststoffabfällen mehr als die Hälfte einer energetischen Verwertung und nur etwa 2,64 Mio. Tonnen einer stofflichen Verwertung zugeführt. Daraus resultierten lediglich 1,65 Mio. Tonnen Rezyklat, die in neuen Kunststoffprodukten Einsatz gefunden haben. Bezogen auf Kunststoffverpackungen erreichen dabei selbst mit den modernsten deutschen LVP-Sortieranlagen (Leichtverpackungen) nur eine Recyclingquote von rund 30%, wenn man die tatsächliche recycelte Menge durch den tatsächlichen Input an Verpackungs-Kunststoff in den Sortieranlagen betrachtet. Eine Erhöhung auf wirkliche 55 % (EU) oder gar auf die durch das Verpackungsgesetz in Deutschland vorgegebenen 63% erfordern demnach eine wesentlich bessere Sortiertechnik.

Dem aktuellen Stand der Technik entsprechend werden sensorgestützte, optische Verfahren am häufigsten zur Sortierung von Kunststoffabfällen verwendet. In diesem Kontext ist vor allem die Nahinfrarot (NIR) Spektrometrie im Einsatz. Hierzu wurde in aneinandergereihten NIR-Sortern jeweils eine Kunststofffraktion identifiziert und pneumatisch vom Reststrom getrennt. Die zu sortierende Objekte werden dabei mit Halogenlampen beleuchtet und die für das jeweilige Polymer charakteristischen Absorptionsbanden im Reflexionsspektrum erfasst. Die Spektren können in der Praxis jedoch durch bspw. Additive oder Formulierungsabweichungen maskiert werden, was die Verlässlichkeit der Detektion beeinträchtigt. Folglich ist die NIR-Technik praktisch auf die Erkennung der Hauptpolymere (z.B. PE, PET, PS, PP) beschränkt, sodass wichtige Unterklassen oder anwendungsrelevante Spezifikationen nicht unterschieden werden. So werden beispielsweise Polymere mit unterschiedlichen Additiven nicht differenziert, eine verwendungsspezifische Differenzierung (z.B. Food vs Non-Food) nicht abgebildet oder Verbundmaterialien fehlerhaft nur einem Polymertyp zugeordnet. Letztgenannter Fall wurde dabei konkret im vorliegenden Projekt betrachtet. Im Endeffekt verbleibt ein erheblicher Anteil der Kunststoffe in der minderwertigen Mischfraktion oder im Sortierrest, es kommt auch zu entsprechenden Verunreinigungen der wertstoffangereicherten

Verwertungspotenziale, weil insbesondere die Aufbereitung durch chemische und auch physikalische Verfahren jedes Mal entwickelt und validiert werden müssen.

Auf der anderen Seite wurde im Projekt ausgelotet, wie ein EBS++ hergestellt und kommerziell verwertet werden kann. Durch die anschließende Markttätigkeit wurde gewährleistet, dass das Produkt auch den Qualitätsanforderungen der Abnehmer entspricht. Die CARBOWEST besitzt hier langjährige Erfahrung im Betrieb und Vertrieb von Pyrolyse-Ölen auf Basis unterschiedlicher abfallstämmiger Sekundärrohstoffe. Durch die Ergebnisse können von 3 bis 6 Mio. Tonnen bisher nicht roh oder werkstofflich verwerteter Abfälle Rohstofflich verwertet und CO₂-Emissionen gespart werden. (Weppel, Ufermann, & Aschauer, 2023)

Auf Basis der Massen, Energie, Stoff und Erlösen/Kosten kann eine erste Investitionsabschätzung für eine mögliche Anlage am Standort von KORN in Albstadt durchgeführt werden. Auch können durch die generierten Zahlen Genehmigungsanträge erstellt werden, da auf reale Daten zurückgegriffen werden kann. Durch die Länge des Betriebsversuches können zudem mögliche und notwendige Verfahrensgarantien ausgesprochen werden, die das Risiko einer Investition in BaWü deutlich senken. Für CARBOWEST bietet es zudem die Möglichkeit der verarbeitbaren Stoffklassen um weitere EBS-Qualitäten zu ergänzen und zu erweitern.

Hinsichtlich des Wissenstransfers wurden im Rahmen des Projektes zwei wissenschaftliche Publikationen, sowie mind. eine praxisorientierte Publikation durchgeführt, die gemeinsam vom Projektkonsortium erarbeitet wurde. Bei letztgenannter handelt es sich um eine Art White Paper zur Anwendung der Verfahren inkl. wirtschaftlichem Hintergrund. Die Projektergebnisse wurden dabei zielgruppenspezifisch aufbereitet, wobei es sich bei den fokussierten Zielgruppen um Anwender der Technologie, Fachpublikum in den adressierten Fachdisziplinen, Politik und Gesetzgebung und die allgemeine Öffentlichkeit handelte. In Ergänzung dazu sind mehrere Events und Projekttreffen zur Ergebnispräsentation durchgeführt worden, in denen die Projektergebnisse vorgestellt und diskutiert wurden. Die Events wurden dabei zielmarktspezifisch vorbereitet, wobei mindestens ein Event als Vor-Ort-Transfer-Workshop vor Ort bei Korn oder Polysecure durchgeführt. In Ergänzung hat Polysecure über den firmeneigenen Social Media Auftritt (Linked-In und Twitter) zum Projekt berichtet.

1.4 Konsortium

Unternehmen	Korn Recycling GmbH
Anschrift	Unter dem Malesfelsen 35 - 45 72458 Albstadt www.korn-recycling.de
Ansprechpartner (Kontaktdaten)	Wolfgang Kowalczyk Wolfgang.Kowalczyk@korn-recycling.de Tel.: 07431/94929-102
Kompetenzen	KORN ist ein Recyclingunternehmen mit Hauptsitz in Albstadt. Schon seit jeher gelten die Menschen von der Schwäbischen Alb als besonders begabte Tüftler und Erfinder. Berühmte Technikpioniere und Ingenieure stammen von hier. KORN betreibt eine der europaweit modernsten Gewerbeabfallsortier- & Ersatz-brennstoff-aufbereitungs-anlagen. Die Kernkompetenz ist die Entsorgung von Abfall von Industrie-, Gewerbe- und Handelsunternehmen, sowie von privaten Haushalten. Ganz besonders das Recycling und die Nutzbarmachung von Abfällen stehen hier im Zentrum ständiger Innovation. So produziert KORN seit 2002 hochwertige Ersatzbrennstoffe für die Zement- und Kraftwerksindustrie.
Projektspezifische Referenzen	• Industrielle zertifizierte Sortieranlage für Haus- und gewerbemüllstämmige Abfälle • Hochmoderne Gewerbeabfallsortier- & Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen (10 NIR-Sensoren, 3 Röntgensortierer, 3 Ballistikseparatoren, Bandwaage, etc.) • Zertifizierter Entsorgungsfachbetrieb • 75.000 Tonnen Inputmenge pro Jahr für die Ersatzbrennstoffaufbereitung • Energiemanagement nach 50001:2018

Unternehmen	Polysecure GmbH
Anschrift	St. Georgener Str. 19 79111 Freiburg www.polysecure.eu
Ansprechpartner (Kontaktdaten)	Markus Reisacher, markus.reisacher@polysecure.eu Tel.: +49 761 5579 785 20
Kompetenzen	Polysecure gilt als Spezialist im Bereich der Markierungs- und Detektionstechnologien mit einer seit 12 Jahren stetig wachsenden innovativen Technologieplattform. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf fluoreszierenden Partikeln, die bereits im Tonnen-Maßstab zur Produktauthentifizierung kommerziell verkauft werden. Als weitere Anwendungsfelder können diese Tracer zur individuellen Produktverfolgung oder durch unsere Sortiertechnologien TBS-light oder SORT4CIRCLE® zur effizienten und verlässlichen Sortierung von Material- und Abfallströmen in gewünschte Fraktionen verwendet werden. Die Markierungs-, Detektions- und Sortierlösungen von Polysecure sind dabei durch ~30 Patentfamilien geschützt und werden u.a. in Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen (z.B. KIT) und strategischen Partnern (z.B. ZEISS, Evonik, Röchling) stetig weiterentwickelt und verbessert.
Projektspezifische Referenzen	• Kompetenzfeld des interdisziplinären Teams umfasst u.a. anorganische und organische Chemie, optische Physik, Kunststofftechnik, Elektronik, Automatisierung, Hardware- und Softwareentwicklung • Relevante Infrastruktur: Chemie-Labor (inkl. Festkörperchemie, Nasschemie, Partikelcharakterisierung), Produktionsinfrastruktur zur Tracerherstellung im Tonnenmaßstab, Detektionslabor, Kunststoff-Applikationslabor, Sortiertechnikum • TBS wurde und wird in mehreren baden-württembergischen, deutschen und europäischen Forschungsprojekten weiterentwickelt und ergänzt: Tasteful, proViTASK, MaReK, CircularFoodPack • Mit und für REHAU entwickelte Polysecure ein TBS-Verfahren, um glasfaserhaltige PVC-Flakes von Standard-PVC-Flakes zu trennen. Dabei wurde die erste TBS-Flake-Sortiermaschine gebaut und industriell validiert.

Unternehmen	CARBOWEST GmbH
Anschrift	Westring 10 59320 Ennigerloh
Ansprechpartner (Kontaktdaten)	Dipl.-Ing Olivier Inhoff oinhoff@carbowest.de Tel.: 02524 9307-0
Kompetenzen	Die CARBOWEST betreibt im westfälischen Ennigerloh eine Direkt-Verölungs/Verflüssigungsanlage nach der patentierten Technologie der carboliq. In dieser Anlage können industrielle Abfälle zu einem ISCC+ Zertifizierten Erdölersatzprodukt umgewandelt werden (CLR). Das Produkt wird über Tankwagen an Raffinerien und die Petrochemie im Markt vertrieben.
Projektspezifische Referenzen	• BlmSchG Genehmigung als chemisch-physische Behandlungsanlage • Betrieb im 3-Schicht-System (24/7) seit 2021, mehr als 20.000 h Betriebsstunden • Verarbeitung von Multilayer-Folien, Hochkalorischen Ersatzbrennstoffen, Off-spec Sortierfraktionen aus Sortieranlagen • Kapazität: Input bis zu 1.500 t/a; Output bis zu 1.000 t/a • Bestätigung des End-of-Waste-Status • Zertifizierung des Betriebs nach Entsorgungsfachbetrieb, ISO 9001 und ISCCplus, Apparate nach AD2000 • Industrielle Rahmenbedingungen (Realabfälle, World-Scale-Equipment) • Qualifizierung von Abfällen nach RAL724, als Labormessungen Brennwert nach DIN 51900-3 - 2005-01

Unternehmen	carboliq GmbH
Anschrift	Karlstraße 8b 42897 Remscheid
Ansprechpartner (Kontaktdaten)	Dr.-Ing Stephan Aschauer Saschauer@carboliq.com Tel.: +49 176 24724579
Kompetenzen	Die carboliq ist das Technologieunternehmen das die Technologie zur Verflüssigung von gemischten Kunststoffabfällen aus unterschiedlichen Quellen entwickelt, verwertet und kommerzialisiert
Projektspezifische Referenzen	• Verfahrenstechnische Entwicklung • Drei Patente zur Verflüssigung von Kunststoffabfällen • Business-Cases • Tiefe Marktkenntnisse • Scale-Up Fluidodynamik Prozess Design • Anlagenbetrieb • Qualitätsmanagement nach ISO 9001 • Abnahmeverträge mit Raffinerie und Petrochemie

	Marc König Unternehmensberatung
Anschrift	Wilhelm-Schickard-Straße 9 76131 Karlsruhe www.marckoenig.info
Ansprechpartner (Kontaktdaten)	Dr. Marc König beratung@marckoenig.inf
Kompetenzen	Die Marc König Unternehmensberatung ist eine inhabergeführte Beratung, die sich auf die Begleitung von Deep-Tech Unternehmen spezialisiert hat. Dabei steht im Fokus die Unterstützung bei der Produktentwicklung, die Begleitung von Unternehmen bei Finanzierungen und Förderungen, Kundenakzeptanzforschung sowie die Entwicklung von Geschäftskonzepten. Die Begleitung basiert dabei auf einen durch Dr. Marc König entwickelt spezifischen Ansatz für schnell wachsende KMUs.
Projektspezifische Referenzen	Dr. Marc König konnte schon über 50 F&E-Projekte erfolgreich auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene durchführen. Zudem konnte er über 1200 Geschäftspläne analysieren und die wesentlichen Learnings daraus in mehr als 15 internationalen Veröffentlichungen publizieren. Dabei beschäftigt sich Herr König aktuell insbesondere mit nachhaltigen Geschäftskonzepten der zirkulären Wirtschaft. Er hält hier unter anderem ein Ethikum für Nachhaltigkeit der UNESCO.

1.5 Arbeitsplan (Struktur des Projektes, Aufgaben und Arbeitspakete)

AP	Arbeitspaket / Monat 1-18	2024								2025			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Anforderungsanalyse		M1										
2	Detaillkonzeption des Sortier- und Recycling-Prozesses			M2									
3	Entwicklung von Sortiertechniken für Ersatzbrennstoffe und PA-haltige Mehrschichtfolien				M3								
4	Qualifizierung und Vorsortierung von EBS und PA-Folien auf der industriellen Kern-Anlage					M4							
5	Anlagenfahrt mit vorkonfektioniertem Korn-EBS++ bei Carbowest						M5						
6	Bewertung der Ergebnisse und Investitionsplanung										M6		
7	Projektmanagement & Kommunikation der Ergebnisse in relevanten Zielgruppen												
	Summe PM												

Meilensteine:

- **MS 1:** Aufgaben in MS1 (Ende Februar 2024): Anforderungsdokument
- **MS 2:** Aufgaben in MS2 (Ende Mai 2024): Konzept für den Close Loop-Prozess

- **MS 3:** Aufgaben in MS3 (Ende Oktober 2024) : Ergebnisdokumentation Abfallstrom und Sortierkonzept für Korn-Anlage zur Gewinnung von EBS++
- **MS 4:** Aufgaben in MS4 (Ende Oktober 2024): Ergebnisdokumentation Qualifizierung – Erzeugung von bis zu 20 Tonnen EBS++ ; Sortierung von bis zu 20 Tonnen Multilayer Folien
- **MS 5:** Aufgaben in MS5 (Ende März 2025): Ergebnisbericht zum Output aus der Direkt-Verflüssigung des EBS++
- **MS 6:** Aufgaben in MS6 (Ende Juni 2025) : Geschäftskonzept & Investitionsanalyse

2 Analyse der Ausgangslage und bestehender Anforderungen

2.1 Analyse der Ausgangsstoffströme

Zu Beginn wurde eine Ist-Analyse durchgeführt. Dazu wurde die Spezifikation der CARBOWEST herangezogen, siehe Tabelle 1. Außerdem wurden die Korn-Anlage besichtigt und die Anlagenflussbilder studiert. Das vorhandene EBS von KORN musste analysiert werden. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden sechs Ausschleuspunkte an der EBS-Anlage von Korn definiert, an denen über fünf Monate, jeweils einmal im Monat Proben gesammelt wurden und zur Analyse an CARBOWEST geschickt wurden. Diese können der Tabelle 1 entnommen werden. CARBOWEST hat im Labor folgende physikalische Eigenschaften getestet: Brennwert, Feuchte, Asche, Chlorgehalt.

Tabelle 1 Spezifikationen CARBOWEST

Bezeichnung	Einheit	min.	max.
Brennwert	MJ/kg	24	
Heizwert (TS)	MJ/kg	23	
Siebgröße	mm	30	
Schüttdichte	kg/m ³	80	
Keramik, Steine, Porzellan	Masse-%		< 0,1
Glas	Masse-%		< 0,1
FE-Metalle	Masse-%		< 0,1
NE-Metalle	Masse-%		< 0,1
Holz	Masse-%		< 0,1
Gummi	Masse-%		< 0,1
Polyurethan (PU, Schaumstoff)	Masse-%		< 0,1
Chlor	Masse-%		<0,4
Fluor	Masse-%		<0,01
Biogener Anteil	Masse-%		20
Aschegehalt	Masse-%		10
Wassergehalt	Masse-%		10

Brennwert: Er dient dazu zu prüfen, wie hoch der Kunststoffanteil im Material ist; je höher der Brennwert, desto höher der Kunststoffanteil.

Feuchte: Das Material muss beim Einführen in die CARBOWEST-Anlage so trocken wie möglich sein. Ein zu hoher Wasseranteil erhöht die Nebenprodukte, und Wasser bzw. Dampf können Anlagenteile beschädigen.

Asche: Der Aschegehalt (Inertanteil) ist ein Maß, wie viel nicht verflüssigbares Material enthalten ist. Überschreitet dieser Wert einen bestimmten Schwellenwert, wird das Verfahren unwirtschaftlicher, da mehr Nebenprodukte erzeugt werden, die vom Kunden abgenommen und entsorgt werden müssten.

Chlorgehalt: Er sollte niedrig gehalten werden, da Chlor einerseits zu Korrosion in der Anlage führen kann und andererseits im Erdölersatzprodukt landet, was nicht zu den Spezifikationen der Petrochemie passt.

Zusätzliche Anforderungen von CARBOWEST waren, dass der hohe Anteil an Aluminium, Staub, Kupfer und Keramik im EBS reduziert werden muss

2.1.1 Probenanalyse bei CARBOWEST

Die zuvor definierten Proben wurden über 5 Monate von KORN gesammelt und an die CARBOWEST zur weiteren Analyse geschickt (Ergebnisse vgl. Tabelle 2) um einen zeitlichen Überblick über das Stoffstromverhalten zu bekommen. Durch die Langzeit Sammlung konnte sichergestellt werden, dass möglichst verschiedene Proben in die Analyse mit einbezogen werden, da die Zusammensetzung von Abfall stark Jahreszeitabhängig ist. So fällt im Juni ein anderer Abfall an als im November, was sich in der Qualität des EBS widerspiegelt.

Nachfolgend sind einige Beispielbilder (Abbildung 3 bis Abbildung 8) der Proben dargestellt, wie sie bei CARBOWEST angekommen sind:



Abbildung 3 Probe F1.2/F2.2



Abbildung 4 Probe G1



Abbildung 5 Probe F2.1



Abbildung 6 Probe F2.4

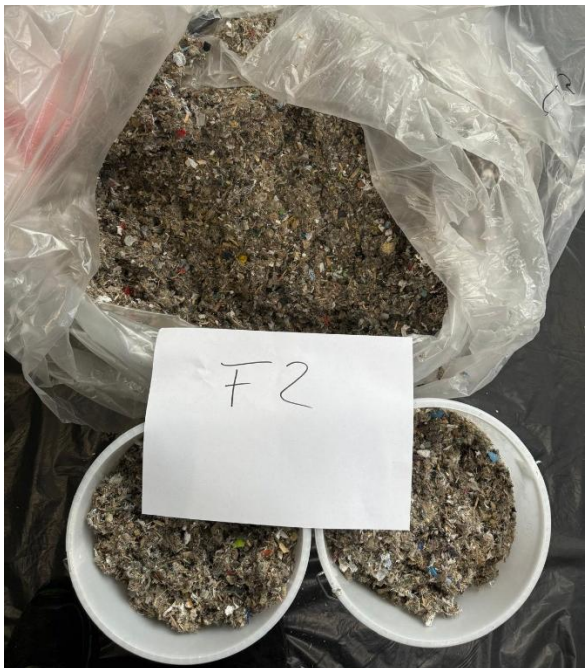


Abbildung 7 Probe F2

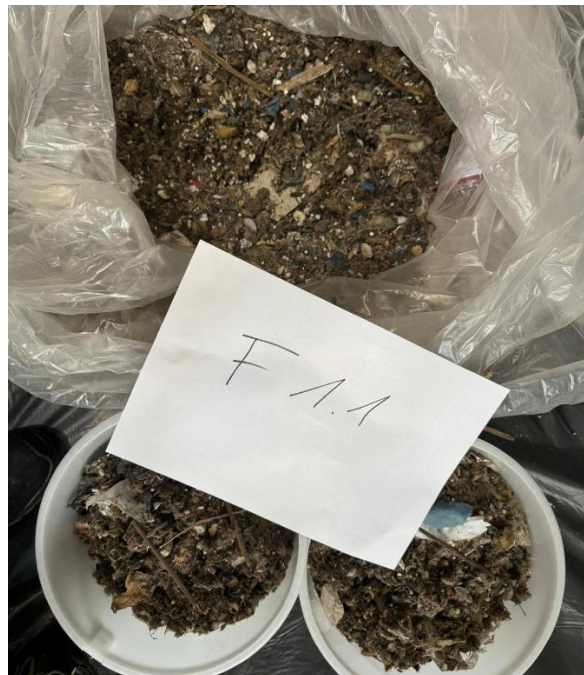


Abbildung 8 Probe F1.1

Die Proben wurden in dem Labor auf dem Standort der CARBOWEST der Ecowest analysiert. In nachfolgender Abbildung ist die Vorgehensweise dargestellt:

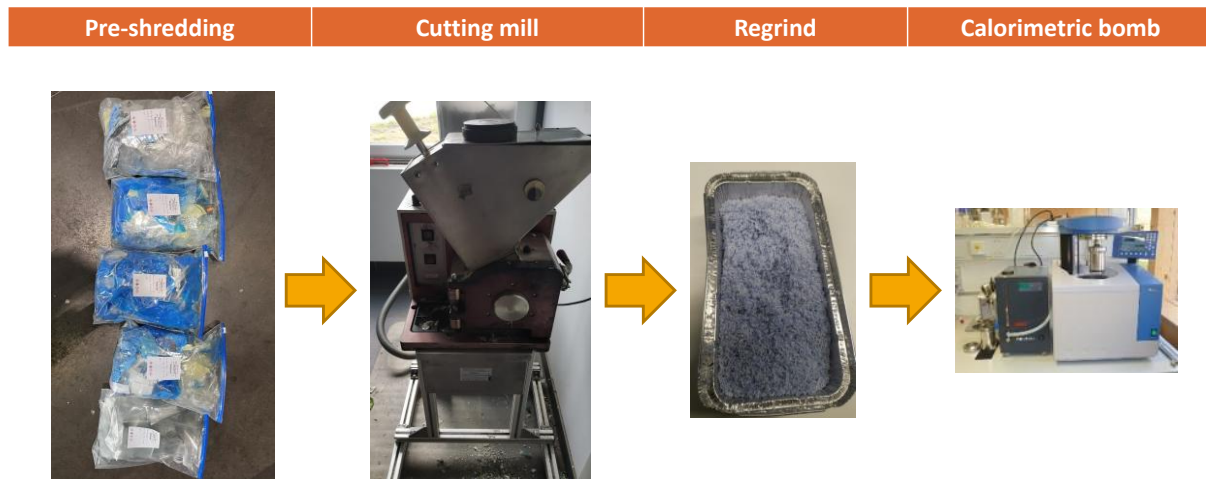


Abbildung 9 Probennahme und Probenerzeugung zur Bestimmung von Brennwert, Asche und Wassergehalt

Aus Tabelle 2 ist ersichtlich das sich die Fraktionen F2 gut für eine weitere Bearbeitung und weitere Nachsortierung / Nachbearbeitung eignen.

Tabelle 2: Monatsübersicht der Proben von KORN von Juni bis November 2024

		Feuchte in OS	Schneidbarkeit	Brennwert	Aschegehalt in OS	Chlorgehalt in OS
		%	-	MJ/kg	%	%
		1...15	gut - schlecht	24...40	max. 10	0,4
F1.2; F2.2	Juni	8,8	mittel	27,4	10	2,51
	Juli	12,58	mittel	20,2	26	0,12
	Aug	6,59	mittel	24	22	-
	Sep	7,06	mittel	18,5	25	0,66
	Nov	9,15	zu grob für Mühle	-	-	-
	Ø	8,836	mittel	22,53	20,75	1,10
G1	Juni	16,02	mittel	18,6	3	0,21
	Juli					
	Aug	12,11	mittel	16,1	1	-
	Sep	16,82	mittel	18,7	17	1,03
	Nov	17,5	schlecht	18,2	6,00	-
	Ø	15,6	mittel	17,90	6,75	0,62
F2.1	Juni	10,36	mittel	17,4	31	1,8
	Juli	12,44	mittel	19,8	4	0,12
	Aug	4,17	mittel	23,5	10	-
	Sep	5,79	mittel	21,7	35	1,69
	Nov	4,21	gut	23	23	-
	Ø	7,4	mittel	21,08	20,60	1,20
F2.4	Juni	21,71	mittel	19,7	10	0,63
	Juli	18,9	mittel	18,9	15	0,14
	Aug	4,73	mittel	24,2	2	-
	Sep	13,24	mittel	30,5	11	0,36
	Nov	17,96	gut	23,3	10	-
	Ø	15,31	mittel	23,32	9,60	0,38
F2	Juni	13,83	gut	22,3	18	0,47
	Juli	9,78	gut	24,2	11	1,28
	Aug	6,25	gut	25,5	13	-
	Sep	0,76	gut	27,2	8	0,26
	Nov	13,6	gut	21,9	18	-
	Ø	8,8	gut	24,22	13,60	0,67
F1.1	Juni	24,19	gut	18	24	0,33
	Juli	21,99	gut	18,7	24	0,49
	Aug	22,98	gut	16,8	24	-
	Sep	16,03	gut	21,2	3	1,43
	Nov	20,59	gut	16,9	23	-
	Ø	21,2	gut	18,32	19,60	0,75

3 Entwicklung des Detailkonzepts der Sortier- und Recyclingprozesse

3.1 Einleitung

Ziel war die Bereitstellung eines heizwertreichen, störstoffarmen Ersatzbrennstoffs (EBS ++), der insbesondere für chemisches Recycling-Prozesse geeignet ist. Hierbei stellen Polyolefine – insbesondere PE-Folien, HD-PE und PP – attraktive Zielpolymere dar. Parallel ist eine Minimierung unerwünschter Stoffe wie PVC (Chlorträger), fluorhaltiger Kunststoffe, Inertmaterialien (z. B. Glas, Keramik), Metalle und biogener Anteile zwingend erforderlich. Nur durch eine präzise und anpassbare Prozessführung lassen sich die erforderlichen Produktqualitäten und Vorgaben aus dem patentierten carboliq-Verfahren erreichen. Zentrale Steuerungsgrößen stellen prozessbezogene Spezifikationen sowie messbare Qualitäts- und Prozess-KPIs dar.

Aus der Gegenüberstellung der Meßwerte vom aktuellen Ersatzbrennstoff (EBS) und den vorgegebenen Soll-Werten haben sich Abweichungen ergeben. Diese wurden analysiert und daraus Produktionsprozessalternativen und Handlungsoptionen erarbeitet.

3.2 Ableitung von Prozessspezifikationen

3.2.1 *Materialaufbereitung*

Die Aufbereitung beginnt mit der lose angelieferten Gewerbeabfallfraktion. In einem ersten Schritt erfolgte die Vorzerkleinerung, mit dem Ziel einer gezielten Korngrößenverteilung. Anschließend wurde mittels Siebung ein Feinanteil <10–20 mm separiert. Dieser enthielt typischerweise hohe Anteile an Staub und Inertstoffen und wurde aus dem Prozess ausgeschleust. Die nachgeschaltete 2D/3D-Trennung erfolgt über einen Ballistikseparator.

3.2.2 *NIR-Sortierung*

Die sortierte Fraktion wurde über Nahinfrarot(NIR)-Sensorik nach polymerer Zusammensetzung aufgeteilt. Hier ist entscheidend, dass die Ausblassteuerung optimiert erfolgt, um eventuelle Fehlwürfe weitestgehend zu reduzieren.

3.2.3 *Röntgen-Sortierung*

Die Mineraliksortierung wurde über Röntgengeräte sichergestellt, welche Rückschlüsse auf die Dichte und chemischen Zusammensetzung des Materials gibt und somit zuverlässig Mineralik aus dem Stoffstrom trennte.

3.2.4 *FE- und NE Abscheider*

Zur Störstoffreduktion wurden metallische Bestandteile durch FE- und NE-Metallabscheider entfernt.

3.3 Relevante Key Performance Indicators (KPIs)

3.3.1 *Qualitäts-KPIs*

Die wichtigsten Qualitäts-Kennzahlen (KPIs) zur Bewertung des EBS++-Produkts umfasste:

- PVC/Chlor: < 0,4 m-%
- Fluorhaltige Kunststoffe: < 0,01 m-%
- Inertstoffe gesamt: ≤ 0,5 m-% (je Komponente < 0,1 m-%)
- FE-/NE-Metalle: jeweils < 0,1 m-%
- Aschegehalt: ≤ 10 m-%
- Wassergehalt: ≤ 10 m-% (operativ < 5 %)
- Biogene Anteile: ≤ 20 %

- Heizwert: ≥ 24 MJ/kg

3.3.2 Prozess-KPIs

Die Überwachung der Betriebsparameter erfolgte über folgende Prozess-KPIs:

- Bandbelegung: 60 bis 80 %
- Monolayer-Rate: > 85 %
- Regelmäßige Kalibrierung von Blow-Time und Verzögerung
- Tägliche Reinigung der Kameras und Beleuchtungseinheiten
- Überwachung der Düsenteilung, Druckluftregelung und Objekterkennung

3.4 Entwicklung eines Detailkonzepts

3.4.1 Prozesslinienführung für Gewerbeabfall

Nach zahlreichen Versuchen über unterschiedliche NIR-Einstellungen und auf welche Materialien negativ aussortiert wurde, konnte eine optimale Prozesslinienführung erarbeitet werden.

3.4.2 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung ist integraler Bestandteil des Betriebs. Pro Schicht wurde eine repräsentative 1-kg-Probe analysiert. Täglich erfolgen Laboranalysen zur Bestimmung des Heizwertes, des Chloranteils, des Wasser- und Aschegehaltes. Zusätzlich wurden die eigenen Laboranalysen, wöchentlich durch externe Laboruntersuchungen, bei denen die Schwermetalle untersucht wurden, ergänzt.

3.4.3 Ergebnisbewertung

Die gewählte Kombination aus Ballistiktrennung, optimierter NIR-Parametrisierung sowie metallischer und feinkörniger Abscheidung gewährleistete eine hohe Ausbringung sortenreiner Polyolefine bei gleichzeitiger Einhaltung aller Grenzwerte. Der Zielheizwert von ≥ 24 MJ/kg wurde somit erreicht. Der Feuchtegehalt ist stark von der Jahreszeit abhängig. Hier gibt es Überlegungen, inwieweit eine Vortrocknung integriert werden kann, um die Grenzwerte dauerhaft einzuhalten.

3.4.4 Fazit

Die Kombination aus verfahrensspezifischen Anpassungen, definierter KPI-Struktur und kontinuierlicher Qualitätssicherung gewährleistet die Prozessstabilität und Produktqualität, eines hochwertigen EBS++ aus gemischten Gewerbeabfällen.

4 Validierung der TBS-Light Technologie zur präzisen Sortierung markierter Verbundverpackungen und Validierung der SORT4CIRCLE Technologie als alternative Lösung zur spezifischen Sortierung von Gewerbeabfall und anderen Abfallströmen unter Erzeugung eines neuen EBS++ Produktes

4.1 Strang A: Sort4Circle

4.1.1 Motivation

Der Verflüssigungsprozess stellt bestimmte Mindestanforderungen an die Qualität des Eingangsmaterials, die für einen technisch stabil funktionierenden Prozessablauf erfüllt sein müssen. Insbesondere sind der Chlorgehalt des Materials und der Inertstoffanteil relevant. Bei der Verwendung von EBS als Rohstoff ist die Einhaltung dieser Mindestanforderungen wegen der großen Heterogenität des Materialstroms eine besondere Herausforderung. Die Zusammensetzung des Materials kann im Zeitverlauf stark variieren – je nach Quelle des Abfalls – und die Vorsortierung ist möglicherweise nicht unter allen Umständen in der Lage, chlorhaltige Kunststoffe und Inertstoffe mit ausreichend hoher Effizienz aus dem Strom zu entfernen, um die für die Verflüssigung benötigte Reinheit zu garantieren. Deshalb sollte in den im Folgenden beschriebenen Versuchen untersucht werden, welcher Art die verbleibenden Verunreinigungen im EBS-Materialstrom sind, und ob eine zusätzliche (oder alternative) Sortierung mit dem Sort4Circle-Prozess ein besseres Eingangsmaterial für den Verflüssigungsprozess erzeugen kann als auch Reinstoffe identifiziert werden können, die direkt mechanisch weiterverarbeitet werden könnten.

4.1.2 Versuchsziele

Aus der Sortieranlage bei Korn Recycling wurden im Verlauf von 4 Monaten Materialproben gezogen, die in der Sort4Circle-Versuchsanlage bei Polysecure nachsortiert wurden. Die Sortierversuche wurden mit folgenden Zielen durchgeführt:

1. einen Überblick über die Zusammensetzung des Materialstroms und deren Schwankungen zu gewinnen
2. die Sortiereffizienz der vorhandenen Messtechnik für den Gewerbemüll-Strom zu charakterisieren
3. Besonderheiten und Spezialfälle im Materialstrom vorkommender Objekte zu erkennen, notwendige Verbesserungen und Erweiterungen der Messtechnik im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen des Materials zu identifizieren
4. ggf. identifizierte Erweiterungen umzusetzen und direkt zu testen

Die Versuche wurden mit Fokus auf die Ebene des einzelnen Objekts durchgeführt, um spezifische Zusammenhänge zwischen Objekteigenschaften und Messsignal zu untersuchen und ein genaues Verständnis der mess- und analysetechnischen Anforderungen bei diesen Objekten zu gewinnen. Es war nicht Ziel der Versuche eine repräsentative Statistik über die Materialzusammensetzung in der Korn-Sortieranlage zu erhalten oder einen Feldversuch in industrieüblichem Umfeld zu fahren.

4.1.3 Versuchsmaterial

Die Proben wurden in der Korn-Anlage an zwei ausgewählten Stellen gezogen, die unterschiedliche Spezifikationen bereitstellen. Dieser Strom ist bereits vorverarbeitet (Vorzerkleinerer, Ballistikseparator, Eisenmetall-Abscheidung, Vibrosichter/Zick-Zack-Sichter), aber noch nicht final vermahlen. Im Ergebnis enthält das Material Teile der rollenden/schweren Fraktion. Diese wurden vom Vorzerkleinerer grob zerkleinert (auf <250 mm), wobei kleine Teile oft vollständig bleiben. Die Fraktion F1.2 enthält größere Teile im Größenbereich 85 bis 250 mm, die Fraktion F2.2 kleinere Teile im Bereich 20 bis 85 mm.

4.1.4 Prinzip des Sort4Circle-Prozesses

Der von Polysecure entwickelte Sort4Circle®-Prozess basiert auf dem Grundgedanken, die in Sortierprozessen erzielbare Reinheit und Ausbeute zu verbessern, indem die in der

Abfallsortierung bisher meist eingesetzte kaskadische Sortierung (eine Sortierstufe pro ausgeschleuste Fraktion) durch eine Einzelobjektsortierung ersetzt wurde. Bei der kaskadischen Sortierung wurde bei jeder Sortierstufe eine einzige Fraktion bestimmt und ausgeschleust. Deshalb wurde für jede Fraktion ein separates Detektionssystem, eine pneumatische Düsenleiste zum Ausblasen und das dazugehörige Steuerungssystem benötigt. Dieser Prozess skaliert schlecht mit zunehmender Anzahl von Fraktionen, wodurch eine möglichst vollständige Auftrennung von Abfallströmen in verschiedene Rezyklatspezifikationen behindert wurde.

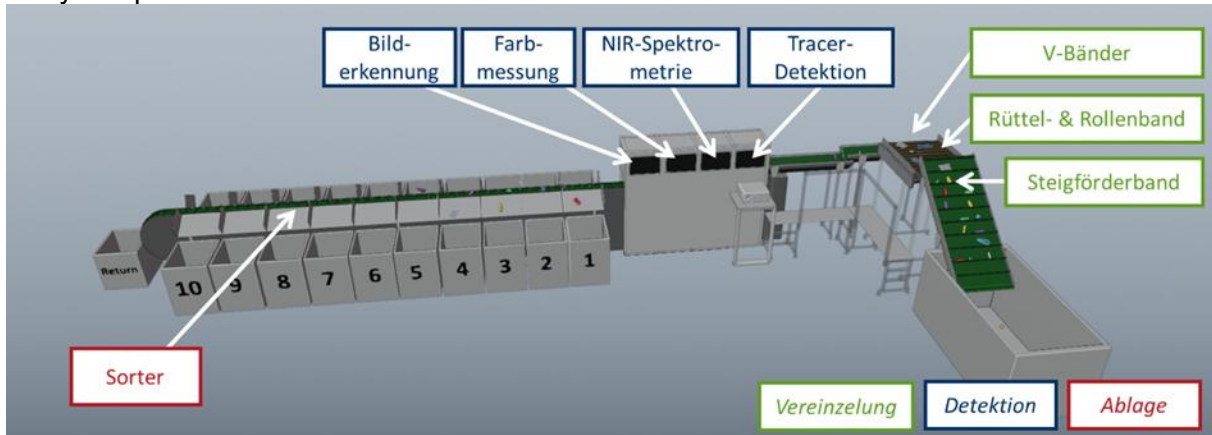


Abbildung 12: Prinzipschaubild einer Sort4Circle®-Anlage bestehend aus Vereinzelungsstrecke, Detektionskammern und Ablagevorrichtung

Der S4C-Prozess beginnt stattdessen mit einer einmaligen Trennung (Vereinzelung) der Objekte. Ab diesem Punkt kann dann die Position jedes Objekts separat nachverfolgt werden. An jedem Objekt werden nacheinander alle erforderlichen Messungen durchgeführt, z.B. Nahinfrarotspektroskopie, Farbmessung, KI-gestützte Objekterkennung, Lesen von Barcodes, LIBS, etc. Optional kann auch die von Polysecure entwickelte Technologie des Tracer-Based-Sorting (Markierung mit fluoreszierenden Markerpartikeln) eingesetzt werden, um anderweitig nicht messbare Spezifikationen zu unterscheiden. Die Kombination verschiedener Messverfahren kann bei diesem System für die Gewinnung zusätzlicher Informationen genutzt werden. Schließlich erfolgt die kontrollierte Ablage des Objekts an einer Endstelle gemäß der aus den Messergebnissen bestimmten Fraktion.

Die mechanische Ausgestaltung der Vereinzelungsstrecke muss zu einem gewissen Grad an den konkreten Materialstrom (Größenspektrum, Gewicht, Form) angepasst werden, um eine optimale Vereinzelungsrate zu erzielen. Eventuelle verbleibende Vereinzelungsfehler können anhand des Detektionsergebnisses erkannt und die Teile zurückgeschleust oder aussortiert werden.

4.1.5 Aufbau und Eigenschaften der S4C-Versuchsanlage

Die für die Versuche in diesem Projekt verwendete Versuchsanlage befindet sich im Technikum von Polysecure und dient zur Demonstration der kombinierten Detektion mittels NIR-Spektroskopie und Messung von Marker-Codes. Sie bildet somit den mittleren Teil einer vollständigen S4C-Anlage ab.



Abbildung 13: Detektionskammern der S4C-Versuchsanlage. Links: VIS- und NIR-Kammer, rechts: Markerdetektion (im Versuch nicht verwendet)



Abbildung 14: Aufbau der Ablagebehälter für die Sortierversuche. In der Bildmitte das Bandende zur Abnahme der detektierten Teile. Die Teileaufgabe erfolgt an der gegenüberliegenden Seite.

Über einem Förderband mit aufgesetzten Stollen befinden sich zwei Messkammern: Die erste Kammer beinhaltet eine Halogen-Beleuchtungseinheit, eine Farbkamera und eine NIR-Hyperspektralkamera zur Aufzeichnung von Reflexionsspektren. Dieses Messsystem dient zur Bestimmung von Polymerarten. Die zweite Kammer enthält einen Infrarotlaser zur Anregung der Marker und ein empfindliches optisches Detektorsystem für die charakteristische Fluoreszenzemission. Für die folgenden Versuche wurde nur die erste Kammer verwendet. Die zu vermessenden Objekte werden einzeln in ein Fach des Stollenbandes eingelegt. Nach Betätigen der Schaltfläche für die Einzelmessung auf der Benutzeroberfläche wurde das

Objekt durch beide Kammern transportiert, die Messergebnisse werden angezeigt und das Teil kann am anderen Ende entnommen und entsprechend abgelegt werden. Die Ergebnisanzeige enthält neben dem Endergebnis (der ermittelten Polymerart) auch ein Bild des Objekts und zur internen Auswertung diverse orts aufgelöste Informationen zur Detektionsgüte und anderen Kriterien (Abbildung 15).

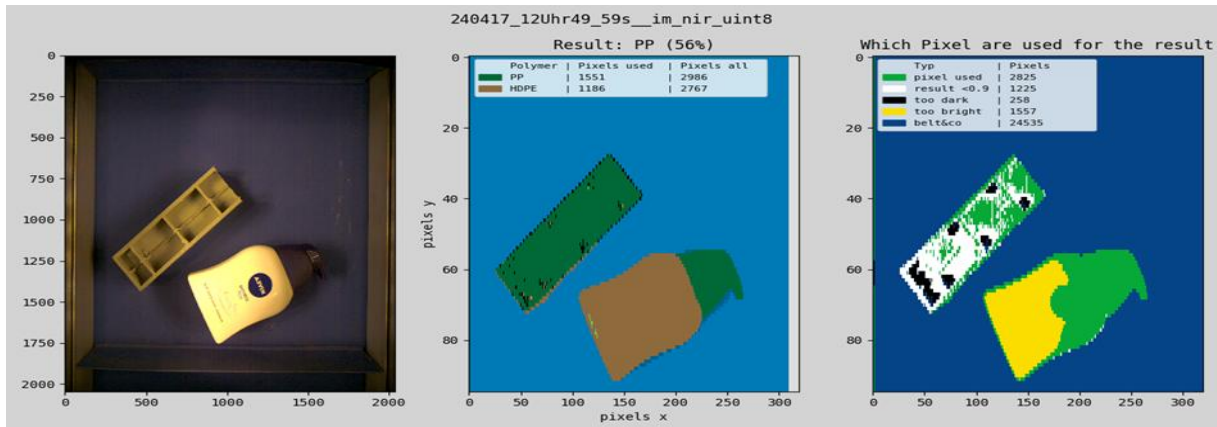


Abbildung 15: Darstellung des Analysebildschirms der Versuchsanlage. Links: Foto der Messkammer, Mitte: Klassifikationsergebnis der NIR-Messung, rechts: Darstellung von Kennwerten zur Detektionsqualität

Anhand dieser zusätzlichen Informationen können z.B. bei als „nicht erkannt“ klassifizierten Objekten noch Hinweise auf die tatsächliche Materialzusammensetzung erhalten und für eine manuelle Klassifikation genutzt werden.

4.1.6 Messkampagnen

4.1.6.1 Run 1

Der Sortieralgorithmus erkennt in der in diesem Run verwendeten Version 12 Polymere (Liste siehe Tabelle 4). Für die Versuche in RohWerKBaWü wurden dem Algorithmus außerdem die Materialklassen Holz und Holzwerkstoffe sowie Papier hinzugefügt. Zusätzlich wurden die Fraktionen „Keramik, Stein, Beton“, „Metalle“ und „Mischmaterialien/Sonstiges“ definiert. Keramische Materialien und Metalle sind jedoch mit der NIR-Messtechnik prinzipbedingt nicht messbar und wurden deshalb bei der manuellen Sortierung nach Augenschein bestimmt. Auch schwarze Objekte, die meist Ruß enthalten, sind im NIR-Bereich nicht detektierbar. Deshalb existiert auch eine Fraktion „zu dunkel/nicht messbar“.

Der Sortierablauf war wie folgt:

1. Auswertung des Ergebnisses der Sortieranlage. Bei einem eindeutigen Ergebnis wurde demgemäß sortiert. Bei einem Ergebnis „zu dunkel“ wurde entsprechend in die „zu dunkel“ Fraktion abgelegt.
2. Erkannte die Anlage bei einem Kunststoffobjekt valide mehrere Polymere, wurde es in die Fraktion „Mischmaterialien/Sonstiges“ abgelegt.
3. Lieferte der Algorithmus kein Ergebnis, z.B. aufgrund eines nicht eingelernten Materials oder eines nicht auswertbaren Signals, wurde das Material nach Möglichkeit per Augenschein bestimmt. Dies war insbesondere bei Metallen und keramischen Materialien immer der Fall.
4. Konnte auf keine Weise ein sicheres Ergebnis ermittelt werden oder bestand das Objekt aus mehreren verschiedenen Materialien (zu einem nicht vernachlässigbaren Anteil) oder zum Teil aus unbestimmbaren Komponenten, wurde es der Fraktion „Mischmaterialien/Sonstiges“ zugeordnet.

Jedes ermittelte Ergebnis inkl. Quelle der Information und ggf. Anmerkungen zum Objekt wurde notiert. Alle Messdaten und Bilder wurden für zukünftige Auswertungen gespeichert.

Nach der Sortierung wurden die Ergebnisfraktionen gewogen und die verflüssigbaren Fraktionen an den Projektpartner carbolig für weitere Laboruntersuchungen versandt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Als nicht verflüssigbar definiert wurden die Chlor und

Fluor enthaltenden Kunststoffe PVC, PVDF und PTFE sowie alle Nicht-Kunststoff-Fractionen und Materialgemische. Abbildung 16 zeigt das nach dieser Regel in Gut- und Schlecht-Fraktion getrennte Sortiergut. Insgesamt wurden 21,9 kg Material aus F1.2 und 5,6 kg aus F2.2 sortiert.



Abbildung 16: Sortiertes Material aus Run 1. a) F1.2, Gut-Fractionen, b) F1.2, Schlecht-Fractionen, c) F2.2, Gut-Fractionen, d) F2.2 Schlecht-Fractionen

Tabelle 4: Massenverteilung der sortierten Fraktionen, Run 1. Die grün markierten Fraktionen wurden als für die Verflüssigung geeignet klassifiziert.

	F1.2 (groß)		F2.2 (klein)	
Fraktion	Masse / kg	Anteil	Masse / kg	Anteil
PP	0,28	1%	0,176	3%
PE	0,16	1%	0,134	2%
PET	0	0%	0,057	1%
PVC	0	0%	0,162	3%
PVDF	0	0%	0,018	0%
PC	0,12	1%	0	0%
PA	0,06	0%	0,065	1%
PEEK	0	0%	0	0%
PS	0,2	1%	0,063	1%
PMMA	0	0%	0,019	0%
PTFE	0	0%	0	0%
POM	0	0%	0	0%
zu dunkel/nicht messbar	0,82	4%	0,261	5%
Holz	10,1	46%	1,629	29%
Papier/Pappe	1,56	7%	0,126	2%
Keramik/Stein/Beton	3,3	15%	1,192	21%
Metalle	0,14	1%	0,213	4%
Mischmaterialien/Sonstiges	5,16	24%	1,486	27%
Summe	21,9	100%	5,601	100%

Der Anteil der verwertbaren Kunststoffe an dem Material war mit ca. 4% (F1.2) bzw. 8% (F2.2) sehr gering. Viele Kunststofffraktionen waren mit nur einem Teil oder gar nicht befüllt. Für belastbare Aussagen zu den Kunststoffanteilen reicht demnach die Statistik nicht aus. Den mit Abstand größten Anteil bildeten Holz und Holzwerkstoffe mit 46% bzw. 29%, gefolgt von der Fraktion „Mischmaterialien/Sonstiges“ (24% bzw. 27%). Keramik, Stein und Beton nehmen allein wegen der hohen Dichte einen relativ großen Massenanteil ein.

Einen erheblichen Anteil an der Fraktion „Mischmaterialien/Sonstiges“ bildeten große Garnrollen, die in diesem Batch sehr zahlreich vorkamen. Das Garn wurde als PET identifiziert, die Rolle als Papier. Auch viele Holz- und Pressspanstücke waren mit anderen Materialien wie Gaze, Kunststofffäden, Styropor oder Schaumstoff verunreinigt und wurden deshalb unter „Sonstiges“ abgelegt. Solche Materialverbünde können prinzipiell auch dem verflüssigbaren Material zugeordnet werden und müssten nicht zwingend aussortiert werden. Um dies abzubilden wurden in Run 2 die Fraktionsdefinitionen angepasst.

4.1.6.2 Run 2

Der Sortierablauf entsprach demjenigen in Run 1, es wurden jedoch Veränderungen am Algorithmus und an der Definition der Fraktionen vorgenommen. Generell wurde mehr Wert

auf eine Erhöhung des verflüssigbaren Materialanteils gelegt und ein höherer Grad von Verunreinigungen in Kauf genommen. So wurden Teile mit geringen Anhaftungen von Inertstoffen oder kleinen Metallanteilen (z.B. einzelnen Schrauben) eher der Gut-Fraktion zugeschlagen als den Mischmaterialien.

Der Algorithmus wurde weiterentwickelt. In der neuen Version sind 13 Polymere erkennbar. ABS und PUR wurden neu hinzugefügt, dafür wurde PTFE entfernt, da die Erkennungsqualität nicht ausreichend war. PTFE war in Run 1 nicht vorgekommen.

Es wurden zwei neue Ablagefraktionen definiert: „Kunststoffgemische“ und „sonstige Materialgemische, verflüssigbar“. Die bisherige „Materialgemische/Sonstiges“ Fraktion wurde auf Teile beschränkt, die keiner anderen Fraktion zugeordnet werden können und mit „Rest“ bezeichnet. Diese Änderung sollte es ermöglichen, verwertbare Teile aus mehreren Kunststoffsorten oder aus anderen erkennbar verflüssigbaren Komponenten (z.B. Bitumen/Dachpappe) der Verflüssigung zugänglich zu machen anstatt sie der aussortierten Rest-Fraktion zuzuordnen. Dieser Fall war bei Run 1 mehrfach aufgetreten. Objekte mit nicht bestimmbar Kunststoffkomponenten wurden nach wie vor in „Rest“ sortiert, um Verunreinigungen der Gut-Fraktionen mit PVC oder PVDF auszuschließen. Außerdem wurde eine kleine Zusatzfraktion „Aussortiert zur Aufbewahrung“ definiert, um Entnahmen von einzelnen besonders interessanten oder speziellen Teilen für spätere Untersuchungen zu ermöglichen und zu dokumentieren.

Nicht-erkannt-Fälle wurden genauer ausgewertet als zuvor. Bei einem Analyseergebnis mit niedriger Konfidenz, aber trotzdem deutlicher Übereinstimmung mit einem Material, wurde nun das Ergebnis manuell auf Plausibilität überprüft. Hierzu wurden das optische und haptische Erscheinungsbild sowie, sofern vorhanden, eingeprägte oder aufgedruckte Materialkennzeichnungen herangezogen. Bei plausiblen Ergebnis wurde das Objekt in die ermittelte Fraktion abgelegt, ansonsten unter „Rest“. Das sortierte Material ist in Abbildung 17 gezeigt, die Sortiierungsergebnisse in Tabelle 5.

In Run 2 wurde nur die große Input-Fraktion (F1.2) sortiert, jedoch eine größere Menge von 48,9 kg.

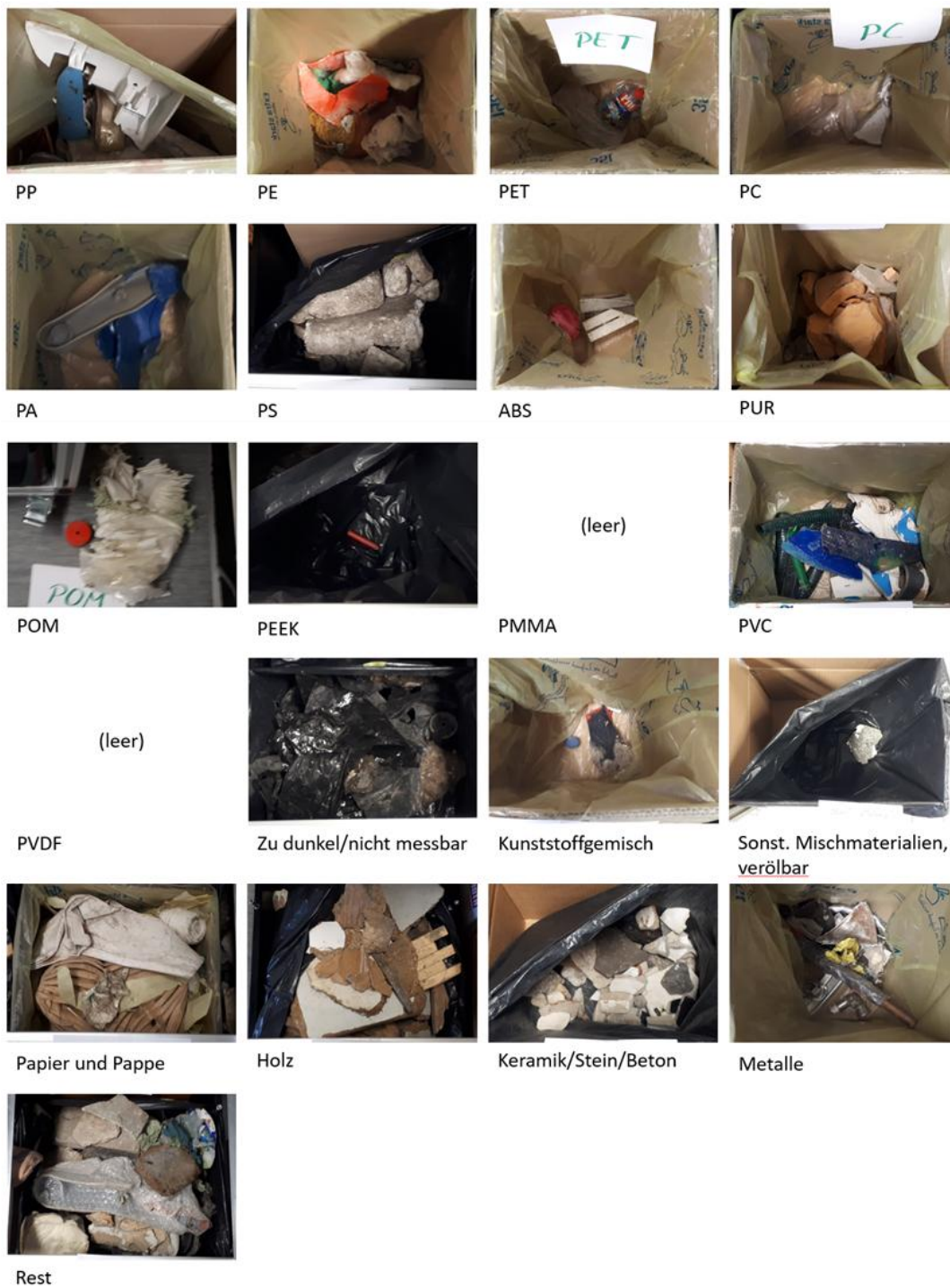


Abbildung 17: Sortierte Fraktionen aus Run 2

Tabelle 5: Anzahl und Massenverteilung der sortierten Fraktionen, Run 2.

Fraktion	F1.2 (groß)			
	Anzahl	Anteil Anzahl	Masse / g	Anteil Masse
PP	23	4%	2.670	5%
PE	12	2%	490	1%
PET	2	0%	95	0%
PC	3	1%	344	1%
PA	4	1%	304	1%
PS	36	7%	1.206	2%
ABS	4	1%	169	0%
PUR	18	3%	1.784	4%
POM	2	0%	370	1%
PEEK	1	0%	9	0%
PMMA	0	0%	0	0%
PVC	13	3%	747	2%
PVDF	0	0%	0	0%
zu dunkel/nicht messbar	99	19%	10.640	22%
Kunststoffgemisch	3	1%	88	0%
Sonst. Mat.-Gemisch, verflüssigbar	1	0%	67	0%
Holz	113	22%	10.820	22%
Papier/Pappe	57	11%	3.760	8%
Keramik/Stein/Beton	38	7%	5.820	12%
Metalle	12	2%	1.041	2%
Rest	69	13%	8.120	17%
Aussortiert zur Aufbewahrung	6	1%	398	1%
Summe	514	100%*	48.942	100%*

* Abweichungen zur Summe der Einzelpositionen sind auf Rundungsfehler zurückzuführen

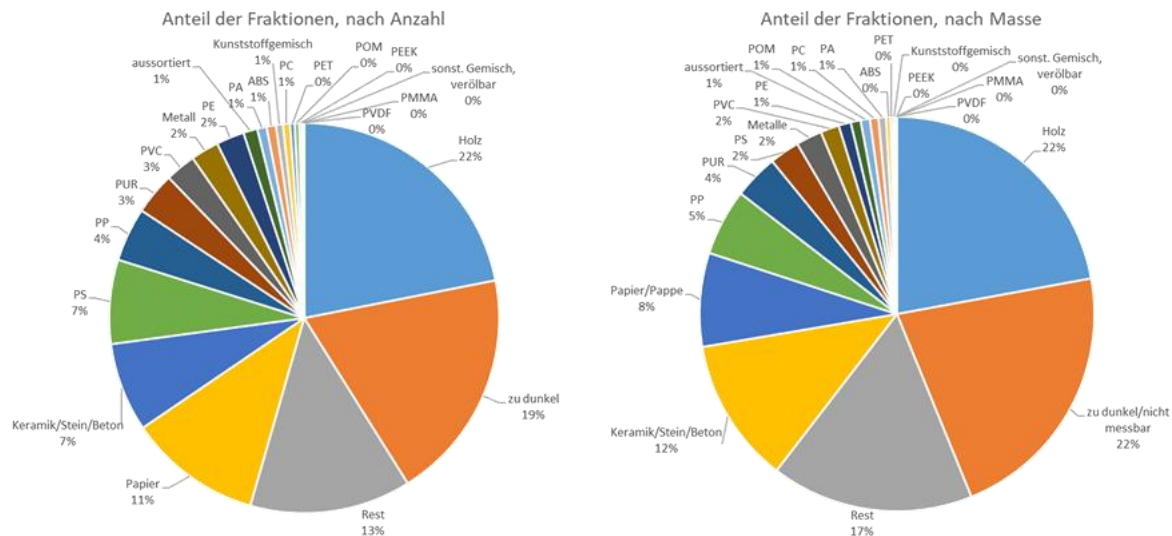


Abbildung 18: Anteile der sortierten Fraktionen nach Anzahl und Masse, Run 2

Die Ergebnisse wurden nach Anzahl und nach Massenanteil ausgewertet, wobei sich leichte Verschiebungen ergeben, da die Fraktion Keramik/Stein/Beton Teile mit erheblich höherer Dichte enthält als die anderen Fraktionen. Bei PS (vorwiegend Schaumplatten) ist der gegenteilige Effekt zu erkennen.

Den größten Anteil macht erneut Holz aus, dicht gefolgt von schwarzen und anderen nicht messbaren Materialien. Bei den Fraktionen Holz und Papier (allg. zellstoffbasierten Materialien) ist eine quasi-kontinuierliche Skala entlang der Fasergröße zu beobachten, die von Papier über Karton, Pappe, feine Faserplatte, grobe Faserplatte, Spanplatte bis Vollholz reicht. Eine Trennung in Papier und Holz ist demnach in gewissem Maße willkürlich. Die implementierte Trennung erwies sich in vielen Fällen als passend, im „Mittelteil“ der Skala jedoch noch als zu inkonsistent und somit verbesserungswürdig. Es stellt sich die Frage, ob die Trennung vielmehr so optimiert werden sollte, dass ausschließlich Papiere und Kartonagen unter „Papier“ fallen und alles andere unter „Holzwerkstoffe“, sodass die Papierfraktion einem hochwertigen Papierrecycling zugeführt werden kann.

Angeichts des hohen Anteils schwarzer Objekte, darunter viele eigentlich verwertbare Monomaterial-Kunststoffteile, ist es erstrebenswert, diese Fraktion ebenfalls sortieren zu können. Da hier die NIR-Technologie an ihre physikalischen Grenzen stößt, wurde im Projekt an der Weiterentwicklung der Reflexionsspektroskopie im mittleren Infrarotbereich gearbeitet, mit der die Erkennung einiger Polymerarten bei schwarzen Objekten möglich ist (siehe Abschnitt 4.1.8).

Die neu definierten Fraktionen „Kunststoffgemische“ und „sonstige Materialgemische, verflüssigbar“ wurden kaum belegt, da in diesem Batch im Gegensatz zum vorherigen kaum entsprechende „reine“ Gemische vorkamen. Meist waren in Frage kommende Teile mit nicht verflüssigbaren Komponenten wie Metall verunreinigt und wurden deshalb in „Rest“ abgelegt. In der Rest-Fraktion konnte dementsprechend ein recht hoher Kunststoffanteil festgestellt werden. Ein Teil davon könnte mittels Schreddern in kleinere Teile und erneute Nachsortierung noch gehoben werden, jedoch müsste für eine vertretbare Wirtschaftlichkeit ein für Schüttgut optimierter Kleinteilesorter eingesetzt werden.

Die Untersuchung ergab einige neue Ansatzpunkte für Verbesserungen am Sortieralgorithmus. So sind manche Targets noch nicht perfekt angepasst, was sich in häufiger vorkommenden niedrigen Übereinstimmungswerten bei manchen Polymeren äußert. Im Entscheidungsbaum kann das Zusammenspiel der Schwellwerte für „zu dunkel/nicht messbar“, Konfidenz, Anzahl auswertbarer Pixel und Anzahl erkannter Material-Cluster noch optimiert werden.

Der Anteil verflüssigbarer Kunststofffraktionen betrug in diesem Batch 15% (nach Masse). Dieses Material wurde an carbolig weitergeleitet.

4.1.6.3 Run 3

In diesem Sortierversuch wurden wieder beide Fraktionen F1.2 und F2.2 sortiert, wobei die große Fraktion nur 13,9 kg umfasste. Von der kleineren Fraktion wurden insgesamt 1000 Teile oder 20,6 kg sortiert.

Die Sortierstrategie aus dem vorherigen Run wurde beibehalten. Die Fraktion „Kunststoffgemische“ wurde auch zur Ablage von einigen Monomaterial-Objekten aus nicht eingelernten Kunststoffsorten, für die keine eigene Fraktion definiert war, genutzt. Es handelte sich hierbei um einzelne Objekte aus MABS und PBT.

Tabelle 6: Anzahl und Verteilungen basierend auf Anzahl und Masse der sortierten Fraktionen, Run 3

	F1.2 (groß)				F2.2 (klein)			
Fraktion	Anzahl	Anteil Anzahl	Masse / g	Anteil Masse	Anzahl	Anteil Anzahl	Masse / g	Anteil Masse
ABS	20	19,6%	5340	38,4%	35	3,5%	1284	6,2%
zu dunkel/nicht messbar	18	17,6%	2505	18,0%	181	18,1%	6280	30,5%
Keramik/Stein/Beton	12	11,8%	2162	15,5%	49	4,9%	3384	16,4%
Rest	15	14,7%	1227	8,8%	89	8,9%	1219	5,9%
Holz	9	8,8%	1032	7,4%	309	30,9%	4635	22,5%
PS	11	10,8%	419	3,0%	105	10,5%	694	3,4%
Kunststoffgemisch	3	2,9%	390	2,8%	22	2,2%	391	1,9%
Aussortiert zur Aufbewahrung	3	2,9%	260	1,9%	6	0,6%	344	1,7%
PET	2	2,0%	141	1,0%	21	2,1%	325	1,6%
PP	2	2,0%	123	0,9%	31	3,1%	367	1,8%
PE	3	2,9%	117	0,8%	57	5,7%	330	1,6%
sonst. Gemisch, verflüssigbar	2	2,0%	98	0,7%	10	1,0%	243	1,2%
Papier/Pappe	1	1,0%	77	0,6%	5	0,5%	114	0,6%
PVC	1	1,0%	27	0,2%	57	5,7%	670	3,3%
PUR	0	0,0%	0	0,0%	2	0,2%	30	0,1%
Metalle	0	0,0%	0	0,0%	6	0,6%	47	0,2%
POM	0	0,0%	0	0,0%	1	0,1%	37	0,2%
PC	0	0,0%	0	0,0%	3	0,3%	35	0,2%
PA	0	0,0%	0	0,0%	7	0,7%	124	0,6%
PEEK	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
PVDF	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
PMMA	0	0,0%	0	0,0%	4	0,4%	29	0,1%
Summe	102	100%*	13.918	100%*	1000	100%*	20.582	100%*

* Abweichungen zur Summe der Einzelpositionen sind auf Rundungsfehler zurückzuführen

In diesem Versuch war in der großen Input-Fraktion F1.2 die nach Massenanteil größte Fraktion ABS (Tabelle 6). Die meisten ABS-Teile waren massive Blöcke, möglicherweise Guss- oder Extrusionsreste aus der Spritzgussherstellung von ABS-Teilen oder aus dem 3D-Druck. Daher lag der Massenanteil verflüssigbarer Materialien dieses Mal sehr hoch bei 47,6%. In F2.2 traten diese Blöcke praktisch nicht auf, sodass die Verteilung eher dem bisherigen Muster folgt. Der Anteil verflüssigbarer Materialien war 18,9%.

Dies zeigt eine große Varianz im Gewerbemüllstrom und eine unter Umständen signifikante Abhängigkeit der Materialqualität bei der Verflüssigung von Batch zu Batch. Eine hochwertige Sortierung in viele Fraktionen kann diesen Effekt ausgleichen, da sie die kontrollierte Mischung der Ausgangsfraktionen in konstanten Verhältnissen und somit den Ausgleich variabler Zusammensetzungen des Eingangsmaterials über einen längeren Zeitraum ermöglicht.

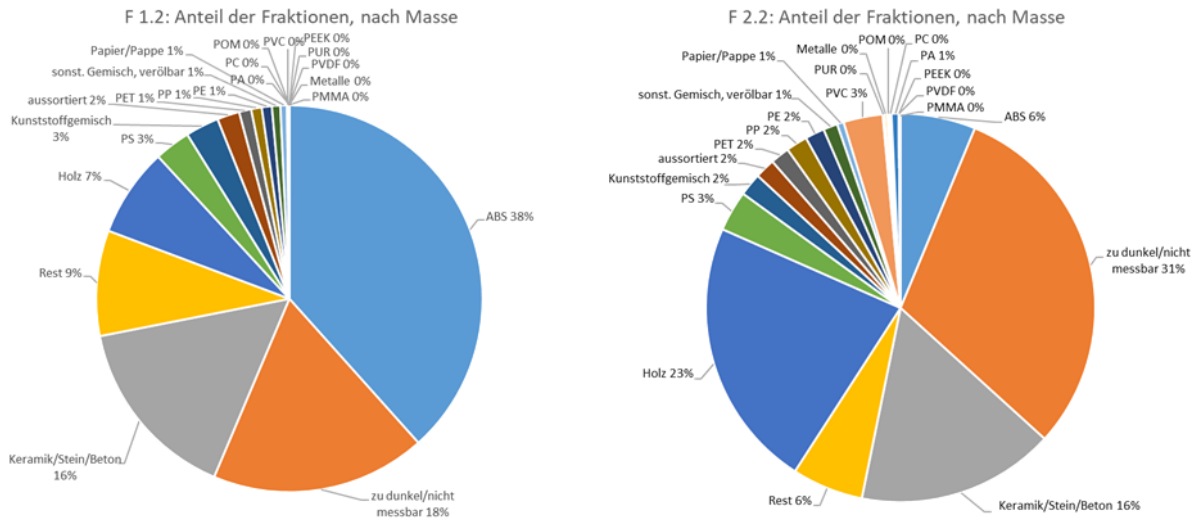


Abbildung 19: Massenanteile der sortierten Fraktionen für F1.2 und F2.2, Run 3

Für die Weiterentwicklung der Messtechnik lieferte der Versuch neue Impulse: So kamen zwei Kunststoffsorten – MABS und PBT – vor, die bisher nicht eingelernt waren. MABS wurde nicht als ABS erkannt, sodass die Erstellung eines neuen MABS-Targets möglich ist. PBT wurde aufgrund der großen Ähnlichkeit als PET erkannt. Ob eine Unterscheidung messtechnisch möglich ist, bleibt zu untersuchen. Außerdem kamen einige Objekte aus Kork im Strom vor (Bodenbelagplatten). Kork wurde trotz der Ähnlichkeit zu Holz nicht als solches erkannt, sodass auch hier die Generierung eines spezifischen Kork-Targets möglich erscheint. Dies würde die Sortierung und Sammlung dieses hochwertigen Naturstoffes ermöglichen.

4.1.7 Ergebnisanalyse

Tabelle 7 fasst die detaillierten Ergebnisse aus den Messkampagnen unter dem Blickwinkel der Eignung des Materials für die Verflüssigung zusammen. Zwei Eigenschaften spielen hier die dominierende Rolle: Der Massenanteil des für die Verflüssigung geeigneten Materials, und der Massenanteil des die Verflüssigung störenden Materials, vor allem Cl- und F-haltige Stoffe. Letzterer muss unbedingt aus dem Materialstrom entfernt werden.

Tabelle 7 zeigt, neben der hohen Variation der Anteile in den verschiedenen Chargen, welche die Notwendigkeit einer Homogenisierung der Materialströme nahelegen, zwei Tatsachen sehr deutlich:

- Das Ziel der Vorsortierung, den Cl- und F-haltigen Anteil am Materialstrom auf deutlich unter 2% zu senken gelingt zwar im Mittel, nicht aber für jede charakterisierte Charge. Besonders in der kleinen rollenden Fraktion (F1.2) finden sich mehr Cl-haltige (der F-Anteil ist generell sehr gering) Materialien wieder als gewünscht. Dies macht deutlich, dass eine reinere Sortierung und vor allem eine verbesserte Erkennung der Cl-haltigen Materialien die Effektivität der Verflüssigung steigern kann. Dies kann Sort4Circle leisten.
- Der Massenanteil des vom NIR-System als zu dunkel klassifizierten Materialien liegt in ähnlicher Höhe wie der Massenanteil der verflüssigbaren Fraktion. Da dieser augenscheinlich zum großen Teil aus Kunststoffen besteht, wäre es für die Wirtschaftlichkeit der Verflüssigung wichtig, dieses Massenpotential konkret zu heben. Hierzu bedarf es einer Messtechnik, die in der Lage ist, schwarze Kunststoffe zu erkennen. Mit der Entwicklung dieser Messtechnik befasst sich Abschnitt 3.1.8.

Tabelle 7: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse aus den Messkampagnen

		F1.2 (groß)		F1.2 (klein)	
	Run 1	Run 2	Run 3	Run 1	Run 3
Verflüssigbar	4%	15%	48%	8%	19%
Cl- und F-haltig	0%	2%	0,2%	3%	3%
Zu dunkel/ nicht messbar	4%	22%	18%	5%	31%

Im Zuge der Messkampagnen wurde die bestehende NIR-Messtechnik erweitert auf die häufig im Materialstrom vorkommenden Fraktionen Holz, Pappe/Karton und zusätzliche Kunststofffraktionen. Allerdings verbleiben signifikante Materialanteile in den analysierten Strömen, die nicht mittels NIR-Sensorik erkannt werden können. Neben den oben bereits erwähnten schwarzen Kunststoffen sind dies vor allem metallische Stoffe und Objekte aus Keramik/Stein/Beton. Besonders die zwar geringe, aber doch signifikante Anwesenheit von Metall überrascht, gibt es dafür doch effektive Abscheidemethoden. Um einen Strom an verflüssigbaren Materialien zu erhalten, ist es deshalb notwendig, positiv auf diese zu sortieren. Die nicht verflüssigbaren Materialien verbleiben somit im Rest und können separat entsorgt werden.

Insgesamt wurden im letzten Run mit optimiertem NIR-Messsystem 50% der großen und 60% der kleinen Objekte in den Materialströmen erkannt. Wenn man diese Anteile der Anzahl Objekte gegenüberstellt, die maximal von der NIR-Messtechnik erkannt werden könnten (53% für den großen, 67% für den kleinen Objektstrom) ergibt sich eine Detektionseffizienz von 94% bzw. 89%. Dies ist eine sehr gute Sortierquote für einen so komplexen Materialstrom wie den vorliegenden.

Papier, Holz und Holzwerkstoffe wurden bei der Sortierung zunächst nicht der verflüssigbaren Gut-Fraktion zugeordnet, da deren Heizwert wesentlich niedriger ist als der von reinen Kunststoffgemischen und die chemischen Eigenschaften bei der Verflüssigung abweichen. Da jedoch der Anteil dieser Fraktionen am Gesamtstrom relativ hoch ist und das Material außerdem als erwünschte Kohlenstoffquelle bei der Verflüssigung dienen kann, könnte es auch – ganz oder in verträglichem Anteil – dem Gut-Material zugeordnet werden. Die Sort4Circle-Sortierung ermöglicht hier eine saubere Trennung und Einstellung der gewünschten Materialzusammensetzung. Die endgültige Bewertung kann somit in Abwägung von technischen und wirtschaftlichen Parametern des Gesamtprozesses getroffen werden.

4.1.8 Weiterentwicklung der Messtechnik – MIR-Reflexionsspektroskopie

Schwarze Kunststoffe haben in vielen Abfallströmen einen bedeutenden Anteil – insbesondere bei technischen Kunststoffen (z.B. aus dem Automobilbereich), aber – wie die Sortierversuche in diesem Projekt gezeigt haben – auch bei Gewerbeabfällen. Deshalb ist es wünschenswert, auch bei schwarzen Objekten eine Sortierung in möglichst viele Polymerfraktionen zu ermöglichen. Das Messverfahren der NIR-Reflexionsspektroskopie kann dies aus physikalischen Gründen nicht leisten, da das Schwarzpigment meist Ruß ist und Ruß im NIR-Bereich breitbandig stark absorbiert, sodass die reflektierte Intensität nicht für eine Detektion ausreicht.

Diese Limitierung lässt sich umgehen, indem man die Messung in den Bereich des mittleren Infrarots (2 µm – 5 µm Wellenlänge) verlegt. In diesem Bereich ist die Absorption des Ruß-Pigments nicht mehr problematisch und es existieren spektrale Banden, anhand derer manche Kunststoffsorten differenziert werden können.

Eine besondere Herausforderung bei der Anwendung dieser Messtechnik in der Sortierung ist die Messgeschwindigkeit. Bei einer Bandgeschwindigkeit von 1 m/s und einer angenommenen minimalen Teilegröße von 50 mm beträgt die Expositionsdauer lediglich 50 ms. Dies ist für viele (FTIR¹-)Spektrometer zu kurz für ein ausreichendes Signal. Polysecure setzt deshalb ein

¹ Fourier-Transformations-Infrarot

Spektrometer ein, das mit einer speziellen Photonen-Aufkonversionstechnik arbeitet. Das Licht wurde vor der Messung vom MIR-Spektralbereich in den sichtbaren Bereich konvertiert, sodass es mit einem konventionellen, schnellen und zugleich sensitiven Siliziumchip detektierbar ist.

Die Beleuchtung erfolgt mit einem keramischen Wärmestrahler, dessen spektrale Emissionskurve auf den Messbereich abgestimmt ist.

Diese Technologie ermöglicht eine schnelle, robuste und dennoch relativ kostengünstige Detektion von MIR-Reflexionsspektren und somit den Einsatz dieser Messtechnik in der Sortiertechnik.

Zur Evaluation wurde zunächst im Labor ein Teststand aufgebaut mit Lichtquelle und Spektrometer über einem Förderband, um erste Tests durchzuführen. Im nächsten Schritt wurde die Messtechnik in eine Demo-Sortieranlage implementiert, um die Integration mit der Anlagentechnik zu demonstrieren (Abbildung 20)². In der Anlage werden die Ergebnisse von NIR-, MIR- und Farbmessung kombiniert, um eine möglichst genaue Information über Material und Farbe eines Gegenstands zu erhalten und entsprechend sortieren zu können.

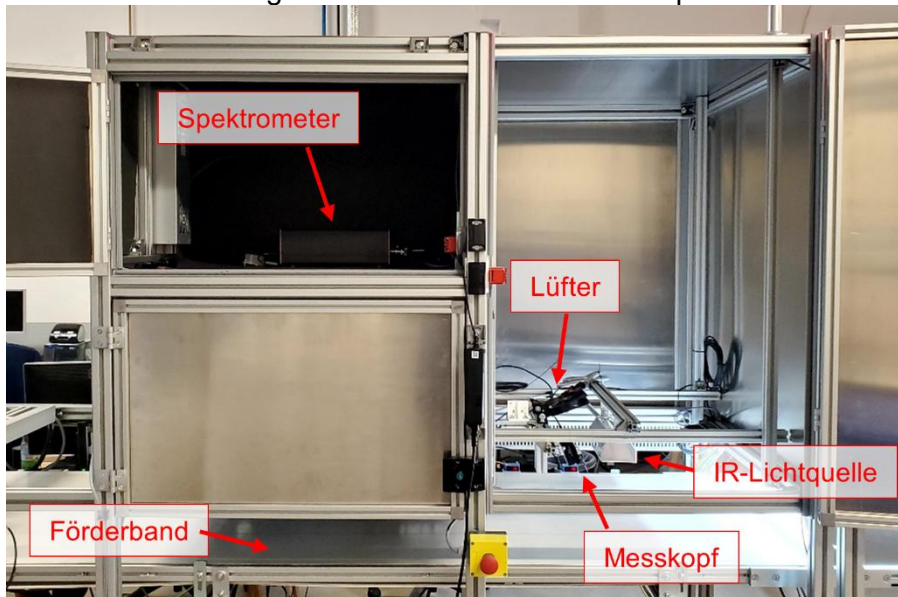


Abbildung 20: MIR-Detektionskammer in Demo-Sortieranlage

Abbildung 21 zeigt gemessene Spektren (nach Vorverarbeitung mittels Glättung und Ableitung) von schwarzen Proben aus den Polymeren PE, PP und PA. Die Daten zeigen deutlich unterschiedliche Features im Bereich von 3 μm bis 3,5 μm Wellenlänge, die für eine Unterscheidung geeignet sind. (Das immer auftretende Feature bei ca. 4,3 μm ist durch die Absorption von CO_2 in der Luft im Strahlengang bedingt.)

Die Ähnlichkeitsmatrix in Abbildung 22 zeigt anhand des Grauwerts die Abweichung zwischen je zwei verschiedenen Spektren. Je dunkler der Farbton, desto größer die Abweichung und desto sicherer ist eine Unterscheidung von den anderen Polymeren. Für PA, PP und PE existieren deutliche Unterschiede im Spektrum, die eine sichere Differenzierung ermöglichen. Für andere Kombinationen, z.B. zwischen PC, PEEK, PK und POM, ist die Unterscheidbarkeit noch nicht ausreichend.

Polysecure arbeitet fortlaufend an der weiteren Verbesserung der Qualität der Messdaten und der Optimierung des Auswertealgorithmus.

² Die Anlage selbst und deren Entwicklung waren nicht Teil des RohWerKBaWü-Projekts.

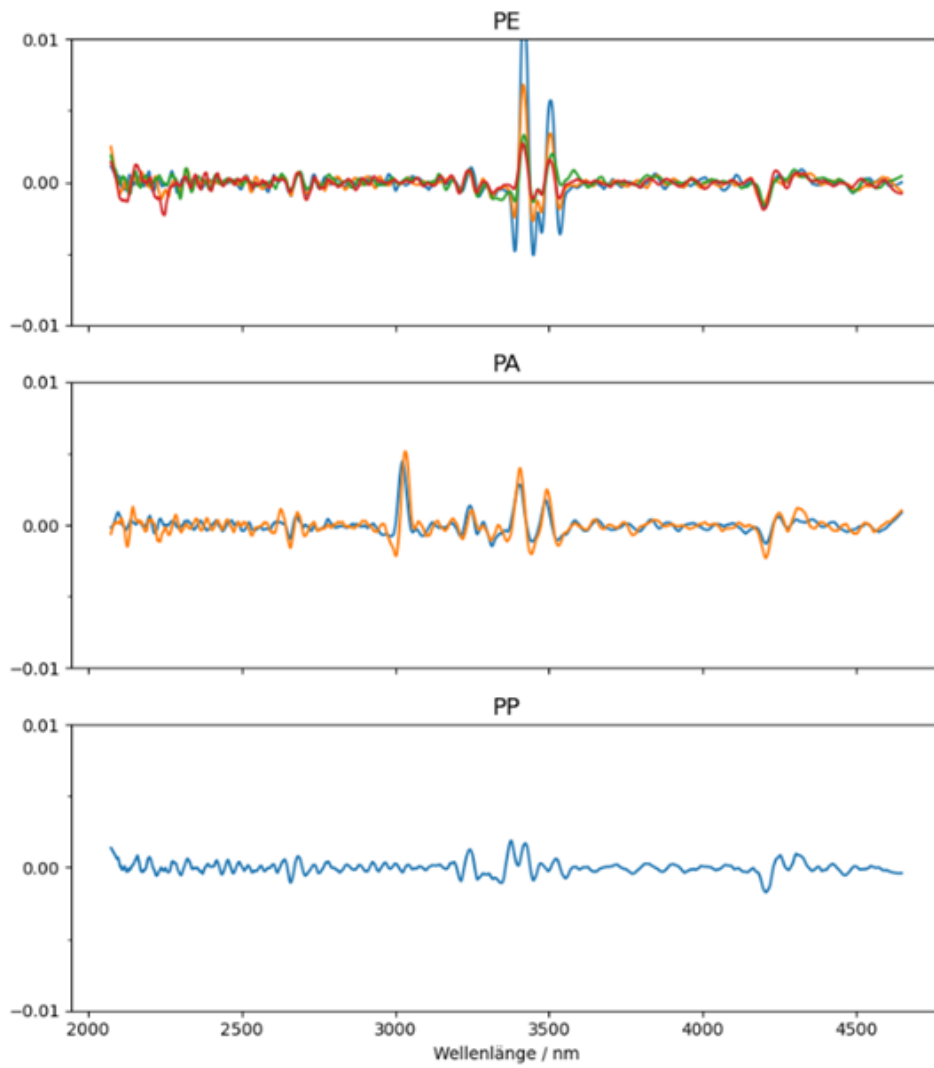


Abbildung 21: Targetspektren (nach Vorverarbeitung) für die drei wichtigsten und am besten unterscheidbaren Polymere PE, PA und PP

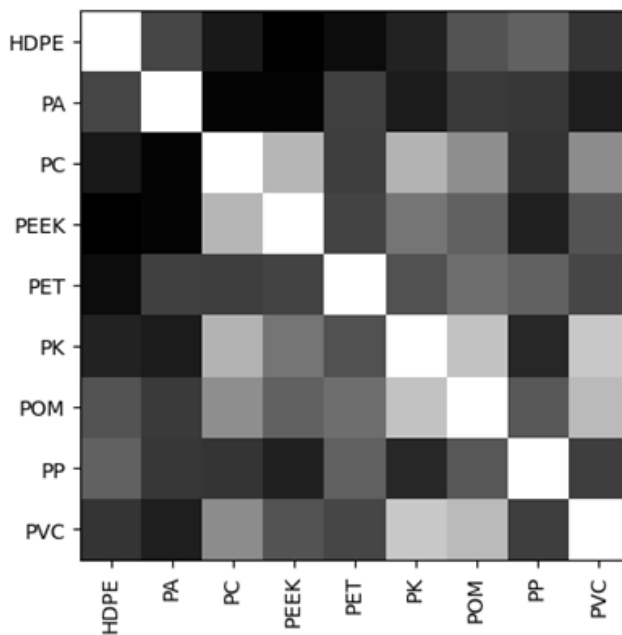


Abbildung 22: Ähnlichkeitsmatrix gemessener Spektren untereinander für 9 verschiedene Polymersorten. Je dunkler der Grauton, desto höher die Abweichung und desto besser die Unterscheidbarkeit.

4.1.9 Sort4Circle-Brennwertanalyse

Das Material der aus der Sort4Circle-Sortierung erhaltenen Gut-Fractionen (siehe Tabelle 4) aus F1.2 und F2.2 wurde zur CARBOWEST nach Ennigerloh geschickt. Wie in Abbildung 23 zu sehen sind die 3-D-Teile für eine Bemusterung und weitere Verarbeitung im Labor ungeeignet (zu groß) und mussten zuvor zerkleinert werden. Hierzu wurden die einzelnen Proben händisch nachsortiert (Baumaterialien) und in einer kleinen Hammermühle (Abbildung 24) für das Labor vorzerkleinert.



Abbildung 23: Probendarstellung und händisches Nachsortieren



Abbildung 24: Schneidmühle zur Zerkleinerung der Proben in Ennigerloh



Abbildung 25: Zerkleinerte Proben für die Laboranalyse

Das Ergebnis der Vorzerkleinerung ist in Abbildung 25 gezeigt. Alle festen Teile konnten gut homogenisiert werden. Im ECOWEST-Labor wurden die Proben auf die Parameter Brennwert, Aschegehalt, Dichte und Feuchte untersucht. Die Analyseergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Laborergebnisse der durch Sort4Circle extrahierten Proben

		Dichte	Feuchte	Schneidbarkeit	Brennwert	Aschegehalt	Masse	Anteil
CW2508Polyseure	F1.2_1	521	0,65	gut	29	0,54	60	13,5%
CW2508Polyseure	F1.2_2	271,16	0,87	gut	39,4	5,81	130	29,2%
CW2508Polyseure	F1.2_3	626,21	0,39	mittel	42,2	4,1	140	31,5%
CW2508Polyseure	F1.2_4	21,75	0,149	gut	27,3	13,19	20	4,5%
CW2508Polyseure	F1.2_5	568,47	1,32	gut	37,7	0,99	95	21,3%
CW2508Polyseure	F2.2_1	466,95	0,65	mittel	36,3	3,75	71	19,7%
CW2508Polyseure	F2.2_2	626,3	0,27	gut	39,5	1,46	290	80,3%
		kg/m ³			MJ/KG	Gew.-%	g	

Bis auf die Probe F1.2_4, die bei der Zerkleinerung zerfrante und über einen messbar hohen Inertanteil verfügt, sind alle anderen Proben sehr gut zur mechanischen und/oder chemischen Weiterverarbeitung geeignet. Insbesondere die Fraktionen mit fast 40 MJ/kg sollten mindestens einem chemischen Recycling oder gar einem mechanischen Recycling zugeführt werden können.

Die mittels Handauflage in der S4C-Versuchsanlage sortierbaren Mengen sind allerdings für ein mechanisches Recycling zu gering, sodass eine echte Vermarktung/Kundentest nicht durchgeführt werden konnte – hierzu müsste

- a) die Sort4Circle-Anlage mit einer auf den EBS/Gewerbeabfallstrom angepassten automatischen Vereinzelungsstrecke und einer Ablageeinheit ausgestattet werden
- b) größere Probenvolumina des EBS-Stroms (Tonnen-Maßstab) entweder aus der Korn-Anlage gezogen und bei Polysecure durchsortiert werden, oder die S4C-Sortierlinie am Standort von KORN an die Sortieranlage angegliedert werden.

Hinsichtlich der Verarbeitung im chemischen Recycling kann eine uneingeschränkte Empfehlung gegeben werden. Von der Qualität handelt es sich sogar um ein PO85 bzw. PO95 (Tabelle 9) das am Markt erhältlich ist und auch für das mechanische Recycling Verwendung findet.

Tabelle 9: Vergleich der erzeugten S4C Qualitäten mit existierenden PO95- und PO85-Qualitäten am Markt

	Einheit	Spezifikation CARBOWEST	PO-85	PO95	F2.2. S4C	F1.2 S4C
Datum			Jul 25	Jul 24	Jul 25	Jul 25
Brennwert Ho	MJ/kg	>24	36,85	40,1	38,9	38
Wassergehalt	%v.OS	<10	0,97	0,80	0,34	0,75
Asche	%v.OS	<10	5,58	4,50	1,91	3,86
Chlor	%v.OS	<0,4	0,30	0,15	n.b.	n.b

4.2 Strang B: TBSlight

4.2.1 Versuchsziel

Ziel der in Strang B definierten Projektstätigkeiten war es, die Machbarkeit eines geschlossenen Kreislaufs für eine Kunststoff-Verpackungs-Fraktion am Beispiel von LDPE/PA-Mehrschicht-Folienverpackungen zu demonstrieren. Da diese Verbundfolien mit herkömmlichen Sortierverfahren nicht sortenrein abgetrennt werden können, sollte eine Markierung mit Fluoreszenzmarkern als Sortierkriterium eingesetzt werden. Der zu demonstrierende Closed-Loop-Prozess dieses Stroms besteht aus folgenden Prozessschritten:

1. Herstellung markierter PA/PE-Mehrschichtfolien
2. Herstellung von Testverpackungen aus dem Folienmaterial
3. Einmischung der markierten Verpackungen in einen Hintergrundstrom aus unmarkierten Folien-Verpackungsabfällen
4. Sortierung in einer mit einem sog. TBSlight-Addon ausgerüsteten NIR-Sortieranlage bei KORN nach dem Fluoreszenzsignal der Marker
5. Werk- oder rohstoffliches Recycling des sortierten Folienmaterials zu neuem Kunststoff
6. Produktion von neuen Folien und schließlich Verpackungen mit erneuter Markierung

Von diesem Prozess sollten im Projekt mindestens die Schritte 1 bis 4 durchgeführt werden, um die Machbarkeit in industriellem Maßstab zu demonstrieren und wesentliche Kennzahlen abzuleiten.

4.2.2 Vorgesehener Versuchsablauf

Für eine Implementierung des TBSlight-Verfahrens muss zunächst die benötigte Markerkonzentration bestimmt werden. Da sich die in Recyclinganlagen installierten Sorter-Modelle hinsichtlich ihrer Messtechnik und insbesondere der Sensitivität unterscheiden, muss sichergestellt werden, dass die Markerkonzentration für den verwendeten Sorter ausreichend ist. Andererseits sollte die Konzentration so niedrig wie möglich eingestellt werden, um die laufenden Kosten des Verfahrens zu minimieren.

Die Markierung kann prinzipiell entweder durch Einmischen des Markers in den Kunststoff bei der Herstellung der Folien erfolgen oder mittels Bedruckung der Verpackung mit

markerhaltiger Drucktinte. Für diesen Versuch wurde in Absprache zwischen dem Hersteller Südpack und Polysecure die Markierung im Vollmaterial gewählt, da der simulierte Stoffstrom der PA/PE-Mehrschichtfolien häufig unbedruckt ist und dies somit den realistischeren Anwendungsfall darstellt. Bei diesem Verfahren besteht der geplante Sortierversuch aus den in Abbildung 26 dargestellten Schritten.

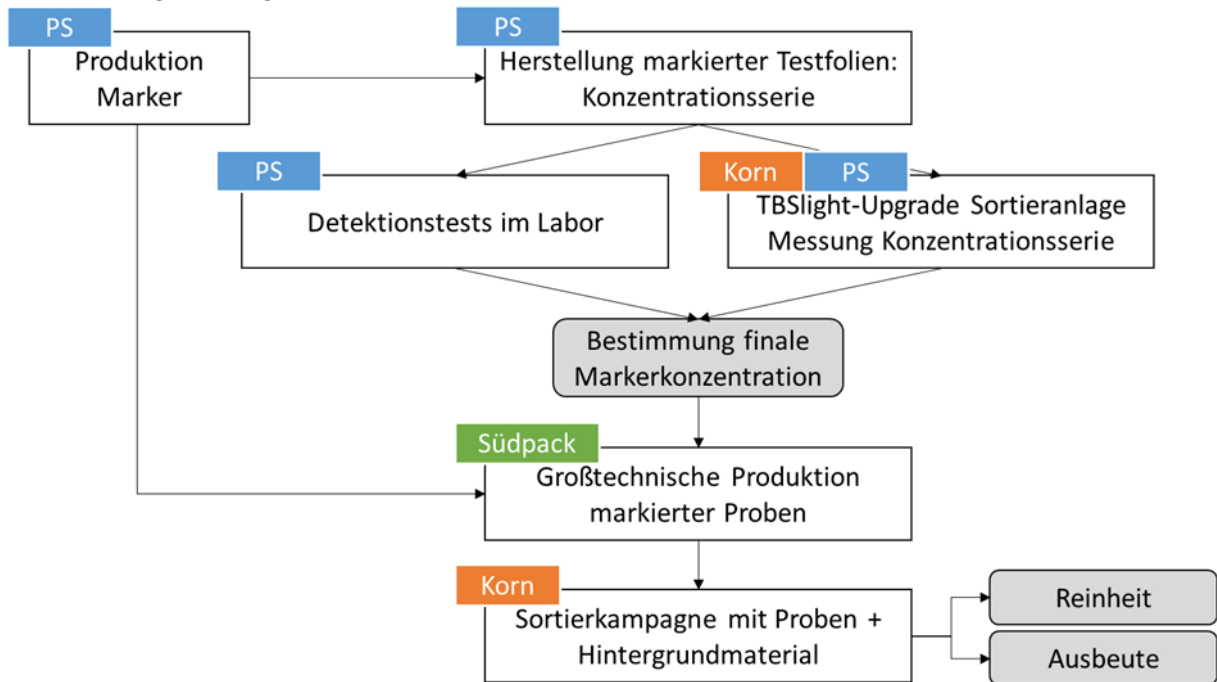


Abbildung 26: Ablaufschema des TBSlight-Sortierversuchs

4.2.3 Herstellung markierter Testfolien

Für die Vorcharakterisierung des NIR-Sorters wurden von Polysecure zwei Sätze Testfolien mit einer Konzentrationsserie hergestellt. Die verwendeten Markerkonzentrationen waren 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 und 5000 ppm. Diese große Spanne deckt den gesamten sinnvoll nutzbaren Konzentrationsbereich ungefähr logarithmisch ab, sodass trotz noch unbekannter Sensitivität des Sorters in jedem Fall mindestens eine Konzentration ein messbares Signal im richtigen Größenbereich liefert. Es wurde eine Serie in PP natur und eine zweite in PP weiß hergestellt, damit der Hersteller bei der Folienherstellung flexibler agieren kann und z.B. eine bereits laufende Produktion in natur oder weiß nutzen kann. Das Polymer selbst spielt keine wesentliche Rolle, solange der Natur-Ton ähnlich ist. PP wurde aus produktionstechnischen Gründen gewählt.



Abbildung 27: Testfolien zur Einrichtung des NIR-Sorters und die Bestimmung der Marker-konzentration für die Versuchskampagne

4.2.4 TBSlight-Upgrade der KORN-Sortieranlage

Polysecure und KORN identifizierten gemeinsam den besten Sorter in der KORN-Sortieranlage für den Versuch und planten die TBSlight-Aufrüstung.

Es wurde der Sorter an der sog. Bypass-Linie ausgewählt. Hierbei handelt es sich um eine Anlage der Firma RTT/Steinert vom Typ Unisort P2000, Bj. 2010. Die Messtechnik besteht aus einer Reihe von nebeneinander angeordneten Optiken, die jeweils das Licht eines kurzen Streifens auf dem Band sammeln. Dieses wurde über Lichtleitfasern und einen optischen Multiplexer (Drehspiegel) auf ein Spektrometer abgebildet. NIR-Sortieranlagen dieser Bauart werden von RTT, jetzt Steinert, nicht mehr hergestellt. Über die Sensitivität dieser Messtechnik im Vergleich zu bekannten Sortern, die auf Hyperspektralkameras basieren, lagen keine Informationen vor, sodass die benötigte Markerkonzentration nicht abgeschätzt werden konnte und in jedem Fall durch Tests zu bestimmen war.



Abbildung 28: Für den TBSlight-Versuch vorgesehener Sorter in der KORN-Sortieranlage

Hardwareseitig müssen mehrere Infrarot-Laser mit Linienoptiken integriert werden, die eine Laserlinie in der Sichtlinie der NIR-Kamera des Sorters erzeugen müssen. Die Geometrie des Sorters erlaubt eine Platzierung der Laseroptiken zwischen den Halogenlampen für die NIR-Anregung, sodass die Laserlinie an der richtigen Stelle erzeugt werden kann. Auch die benötigten Montagepunkte können geschaffen werden. Es mussten allerdings Laseroptiken mit einem größeren Abstrahlwinkel beschafft werden, um bei der niedrigen verfügbaren Einbauhöhe das gesamte Band abzudecken. Für die gegebene Bandbreite von 2050 mm sind drei der vorhandenen Laser mit je 100W erforderlich. Zur Sicherstellung des Laserschutzes

wurde von KORN ein Gehäuse um den Sorter herum konstruiert. Zudem wurde ein technisches und organisatorisches Laserschutzkonzept für den Versuchszeitraum erstellt.

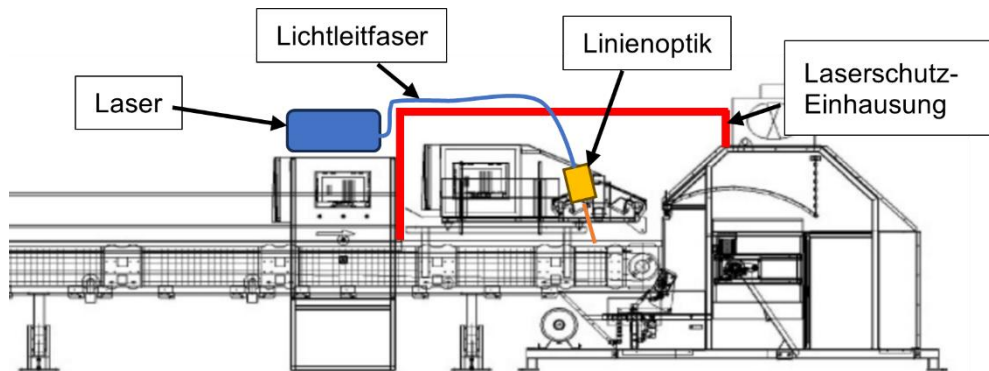


Abbildung 29: Schemazeichnung des NIR-Sorters mit für das TBSlight-Addon zusätzlich zu installierenden Komponenten. Der Laser mit Lichtleitfaser und Linienoptik wurde dreifach benötigt.

Softwareseitig galt es, eine neue Signalform, bestehend aus dem NIR-Spektrum der PE/PA-Folie und dem zusätzlichen Peak des Fluoreszenzmarkers, zu messen und in der Anlagensteuerung zu hinterlegen, sodass markierte und unmarkierte Folien unterschieden werden können. Außerdem muss ggf. der Entscheidungsbaum angepasst werden. Diese Änderungen kann nur der Hersteller des Sorters durchführen. Deshalb wurde Kontakt mit der Firma Steinert aufgenommen, die Support und Wartung für den Sorter durchführt.

Leider sah sich Steinert nicht in der Lage, die gewünschte Änderung an Sortern dieser Bauart durchzuführen, sodass eine Durchführung des Sortierversuchs bei KORN nicht möglich war. Als Ausweichmöglichkeit kam durch Vermittlung von Steinert ein Kontakt zur Firma Umweltdienste Kedenburg mit Sitz in Beckum zustande. Dort bestand durchaus Interesse an der Durchführung des Versuchs, jedoch bestanden große Schwierigkeiten, einen passenden Zeitslot während des Betriebsablaufs zu finden. Im besten Fall hätte der Versuch unter extremem Zeitdruck an einem Samstag (zur Vorbereitung) und 1/2h am darauffolgenden Montag für den Versuchs-Run stattfinden müssen. Da erfahrungsgemäß Versuchsfahrten dieser Größenordnung länger dauern, ist dies eine sehr riskante Randbedingung. Kedenburg hätte die Sortierung von PP bevorzugt. PA/PE-Multilayer zu sortieren wäre dort u.U. nicht möglich, da der Versuch nicht vom Anlagenbetrieb getrennt gefahren werden kann. Eine der Output-Fractionen wurde immer in die laufende Anlage gefahren und kann nicht analysiert werden. Zudem wären Zusatzkosten für Hardware in der Größenordnung 10.000 € zu erwarten gewesen, da für eine vollständige zweistufige Sortierung mglw. zwei Sorter hätten ausgerüstet werden müssen, wofür zusätzliche Laser nötig wären. In Anbetracht dieser Umstände musste diese Alternative verworfen werden.

Generell bestand der Hauptzweck des Sortierversuchs darin, TBSlight bei KORN Recycling zu demonstrieren, um das Ergebnis in die technische und wirtschaftliche Betrachtung des konkreten Falles einfließen zu lassen. Ein Versuch bei einem anderen Sortierer mit anderer Technik und anderem Versuchsmaterial hätte kaum noch Daten und Erkenntnisse geliefert, die nicht bereits in vorherigen Versuchen von Polysecure ermittelt worden waren. Aus diesem Grund wurde die Durchführung des TBSlight-Versuchs in diesem Projekt schließlich verworfen.

Stattdessen wurde beschlossen, dass KORN zusätzliche Versuche und Analysen an einem modernen NIR-Sorter von TOMRA in der Anlage durchführt. Dieser Sorter ist bauartbedingt nicht geeignet für TBSlight. Er ist jedoch moderner und für Anpassungen von Parametern besser zugänglich als die anderen Sorter bei KORN und daher gut geeignet für Untersuchungen und Optimierungen der auf NIR-Technologie basierenden klassischen Sortierung. Diese Versuche sind in 4.3 dargestellt.

4.3 Strang C: Optimierung TOMRA und Nachzerkleinerung ³

4.4 Problembeschreibung

Die stoffliche Nutzung von Kunststoffen aus Gewerbe- und Sperrmüll stellt eine wesentliche Herausforderung für die Kreislaufwirtschaft dar. Die Heterogenität dieser Stoffströme, ihre wechselnde Zusammensetzung und der hohe Anteil an Störstoffen erfordern eine gezielte Kombination aus mechanischer Vorbehandlung und sensorbasierter Sortierung, um ein hochwertiges EBS++ als Grundlage für das chemische oder mechanische Recycling bereitzustellen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde zunächst der rollende Stoffstrom einer Aufbereitungsanlage detailliert analysiert. Hierbei standen insbesondere die 3D-Fractionen (körperhafte Materialien wie Kunststoffteile) im Fokus. Ziel war es, die Trennschärfe zwischen wertstoffhaltigen Kunststoffen und störenden Begleitstoffen systematisch zu bewerten.

Ursprünglich war geplant, auf der Sortieranlage Versuche mit markierten Kunststoffmaterialien durchzuführen. Dadurch sollte die Rückverfolgung einzelner Polymerarten im Sortierprozess ermöglicht und die Detektionsgenauigkeit quantifiziert werden. Eine Umsetzung dieses Ansatzes war jedoch nicht möglich, da die erforderliche Adaption der vorhandenen NIR-Systeme sowie die entsprechende Parametrisierung nicht realisierbar waren.

Um die vorhandenen Ressourcen dennoch effizient und zielgerichtet zu nutzen, wurde der Schwerpunkt der Arbeit auf die Untersuchung des flächigen Materials gelegt. Mit Hilfe eines TOMRA-NIR-Sorters wurden systematische Versuche gefahren, um ein ganzheitliches Bild der Sortierbarkeit von PE-Folie, Hart-PE, PP und PMMA aus Gewerbe- und Sperrmüllströmen zu erhalten.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen aufzeigen, wie durch die Variation ausgewählter Prozessparameter am Ballistikseparator und am NIR-Sorter die Reinheit und Ausbringung der Zielpolymere optimiert und gleichzeitig die Anteile an PVC (Chlor) sowie Inertstoffen auf ein Minimum reduziert werden können. Damit liefert die Arbeit praxisrelevante Ansätze zur Optimierung des Anlagenbetriebs sowie zur Steigerung der Qualität des Einsatzstoffes für das chemische Recycling von EBS (Ersatzbrennstoff).

4.5 Problembeschreibung

Gewerbliche Abfallströme zeichnen sich durch eine hohe Materialheterogenität, einen wechselnden Input-Mix und einen überdurchschnittlichen Anteil an Störstoffen aus. Neben klassischen Verpackungskunststoffen wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) sind in diesem Abfallstrom auch technische Kunststoffe wie Polymethylmethacrylat (PMMA) sowie erhebliche Mengen an chlorhaltigen Materialien (PVC) und mineralischen Inerten enthalten.

Ziel dieser Arbeit ist es, aus dem flächigen Sortierstrom einer mechanischen Aufbereitungsanlage die Kunststoffe PE-Folie, Hart-PE, PP und PMMA mit möglichst hoher Sortenreinheit abzuscheiden. Diese Fraktionen sind für das chemische Recycling besonders relevant.

Dabei ergeben sich zwei wesentliche Qualitätsanforderungen an die Zielprodukte:

1. Minimierung des Chloranteils (PVC):
Schon geringe PVC-Verunreinigungen wirken sich bei der Weiterverarbeitung in chemischen Reaktoren gravierend negativ aus, da sie die Materialeigenschaften verschlechtern und beim thermischen Recycling zur Bildung von HCl und Dioxinen führen können [4]. Der Chloranteil sollte deutlich unter 1% sein. Daher ist es erforderlich, PVC so weit wie möglich aus den Zielströmen fernzuhalten.
2. Reduzierung des Inertstoffgehalts (Aschegehalt):

³ Da die Installationsprobleme und das Workaround erst während der Bilanzfahrt erarbeitet wurden, standen die in Strang C durch KORN erarbeiteten Lösungen erst nach der CARBOWEST Bilanzfahrt zur Verfügung

Inertstoffe wie Glas, Steine und mineralische Reststoffe sowie einzelne Bestandteile von Kunststoffen stellen ein erhebliches Problem bei der Verarbeitung im chemischen Recyclinganlagen dar. Sie verursachen Störungen im Produktionsablauf, müssen aufwendig herausgefiltert werden, können zu erhöhtem Verschleiß der Anlage führen und müssen als Reststoffe teuer entsorgt werden. Zudem kann aus diesem Anteil an Einsatzstoff kein Öl gewonnen werden und senkt somit die Ausbeute. Ziel ist daher, den Inertstoffanteil auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Schwierigkeit liegt darin, dass sowohl PVC als auch Inertstoffe in der Praxis ähnliche Größen- und Formcharakteristika wie die Zielpolymere aufweisen. Dadurch können sie bei konventionellen mechanischen Trennverfahren unzureichend separiert werden. Hinzu kommt, dass die flächigen 2D-Materialien (Folien, Platten, Verbundstoffe) ein besonders schwieriges Sortierkollektiv darstellen: Überlappungen, Anhaftungen (durch Feuchtigkeit) und Feuchtigkeit führen zu einer Verschlechterung der NIR-Signale und erhöhen die Fehlwurfraten.

Vor diesem Hintergrund ist die Kombination mechanischer Vortrennung (Ballistikseparator) mit einer sensorbasierten Nachsortierung (TOMRA-NIR-Sorter) ein bewährter Ansatz, um die Zielkunststoffe von Störstoffen zu trennen. Die Wirksamkeit dieser Sortierkette hängt jedoch stark von den eingestellten Betriebsparametern ab. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine Versuchsreihe durchgeführt, in der gezielt folgende Parameter variiert werden:

- Ballistikseparator: Neigungswinkel und Schlagfrequenz
- TOMRA-NIR-Sorter: Bandgeschwindigkeit, Düsendruck und Confidence-Level

Durch die gezielte Variation dieser Faktoren soll untersucht werden, wie sich die Sortierqualität hinsichtlich Reinheit, Ausbringung sowie PVC- und Inertstoffanteilen verändern lässt. Ziel ist es, Handlungsempfehlungen für den praktischen Betrieb abzuleiten und eine optimierte, reinheitsorientierte Fahrweise der Anlage zu ermöglichen.

4.6 Anlagenbeschreibung (flächiger Sortierstrom)

4.6.1 Überblick

Die Anlage kombiniert mechanische Vortrennung (Ballistikseparator) mit sensorbasierter Sortierung (NIR) und nachgeschalteter Nachzerkleinerung sowie metallischer Abscheidung.

4.6.2 Ballistikseparator (Hersteller Fa. Stadler)

Der Ballistikseparator trennt den Inputstrom anhand von Form, Gewicht und Bewegungsverhalten in eine flächige **2D-Fraktion**, eine körperhafte **3D-Fraktion** sowie eine **Feinfraktion**. Dies geschieht über oszillierende Siebplatten, deren Neigungswinkel und Schlagfrequenz variabel einstellbar sind. Flächige Materialien (Folien, Papier) werden nach oben transportiert, während 3D-Körper nach unten ausgetragen und Feinteile durch die Sieböffnungen separiert werden. Für die 2D-Linie sind Neigungswinkel und Schlagfrequenz wesentliche Stellgrößen zur Stabilisierung der Folienfraktion und zur Reduktion von Fremdstoffen.

4.6.3 TOMRA-NIR-Sorter (erste Stufe)

Die 2D-Fraktion wurde auf einem TOMRA-NIR klassifiziert. Der NIR-Sorter arbeitet mit Nahinfrarot-Spektroskopie im SWIR-Bereich (kurzwelliges Infrarot). Materialien auf dem Förderband werden optisch erfasst, anhand ihrer spezifischen Spektralsignatur klassifiziert und über eine Druckluftdüsenleiste gezielt ausgetragen. Neben der Materialerkennung sind insbesondere **Bandgeschwindigkeit, Düsendruck und Confidence-Level** entscheidend für die Sortiergenauigkeit. In der ersten Stufe wurde primär PE-Folie ausgetragen, während Nicht-PO (z. B. Holz, Papier, PET, PVC) im Rest verbleibt. Wichtige Parameter: Bandgeschwindigkeit, Düsendruck, Confidence.



Abbildung 10: Verwendeter TOMRA-NIR Sorter

4.6.4 Zweiter NIR-Sorter (Polishing-Stufe)

Zur Erhöhung der Produktreinheit folgt eine Polishing-Stufe im Binary-Modus (PVC oder nicht PVC) mit schärferen Einstellungen (höheres Confidence, kürzere Düsendruck-Zeit), um Restfehlwürfe (inkl. PVC-Risiken) zu minimieren.

4.6.5 Nachzerkleinerung (Lindner Komet)

Die nachgeschaltete Nachzerkleinerung erfolgt serienmäßig über mehrere Lindner Kometen. Durch die definierte Kornreduzierung werden Partikelform und Schüttdichte homogenisiert und Anhaftungen reduziert. Die Komet-Nachzerkleinerung ist fester Bestandteil der Linie; temporäre, versuchsbezogene Alternativaggregate werden ausschließlich im Versuchskapitel beschrieben.

4.6.6 Eisen-/FE-Abscheidung

Nach der Komet-Stufe erfolgt die FE-Abscheidung mittels Magnet, um ferromagnetische Störstoffe auszutragen und die Produktqualität der EBS-Fractionen weiter zu sichern.

4.6.7 Schematischer Materialfluss



Abbildung 11 Prozesskette der 2D-Fraktion (Serienbetrieb)

4.7 Versuchsablauf am Ballistikseparator

4.7.1 Zielstellung

Der Ballistikseparator bildet die erste Trennstufe für die flächige 2D-Fraktion. Ziel der Versuchsreihe war es, den Einfluss ausgewählter Betriebsparameter auf die Reinheit und Ausbringung der 2D-Fraktion zu untersuchen. Im Vordergrund stand die Fragestellung, wie sich die Separationsschärfe zwischen Folien/Kunststoffen einerseits und unerwünschten 3D-Fractionen wie Holz andererseits optimieren lässt. Abbildung 12 zeigt die Vorbereitung und Durchführung der Probenaufgabe mit einem Teleskopkran



Abbildung 12: Arbeitsvorbereitung zur Aufgabe der Proben

4.7.2 Untersuchte Einstellgrößen

Für die Untersuchungen wurden zwei zentrale Einstellgrößen des Ballistikseparators systematisch variiert:

- **Neigungswinkel der Siebplatten:**
Steilere Einstellungen begünstigen die Abtrennung schwererer und dickwandiger Materialien in die 3D-Fraktion, während flachere Winkel eine höhere Ausbringung an Folien im 2D-Strom ermöglichen.
- **Schlagfrequenz (U/min):**
Höhere Frequenzen fördern das schnelle Austragen körperhafter Materialien, wodurch die Reinheit des 2D-Stroms steigt. Niedrigere Frequenzen lassen Materialien länger auf der Maschine verweilen, was die Gefahr von Fehlzugeordnungen erhöht. Die Geschwindigkeit konnte lediglich durch die Einstellungen am Frequenzumformer erreicht werden und musste manuell eingestellt werden.

Die Variation erfolgte in definierten Stufen, sodass jeweils zwei unterschiedliche Winkel- und Frequenzbereiche miteinander kombiniert werden konnten. Dadurch wurde eine Versuchsmatrix erstellt, die Rückschlüsse auf Haupteffekte und Interaktionen zwischen den Parametern zuließ.

4.7.3 Versuchsaufbau und Probenahme

- **Input:** heterogener Gewerbeabfall mit hohem Folienanteil, typischer Feuchtegehalt 8–12 %.
- **Aufgabe:** gleichmäßige Materialdosierung über Zuführbänder, Teppichhöhe <150 mm.

- Stoffstrom wurde über den TOMRA-NIR Sorter gesteuert und die jeweilige Zusammensetzung der Fraktionen über die Zeit in %-Anteilen gemessen.
- Bewertungsgrößen: Anteil der Holzfraktion am Flächigen Material
- Zudem wurde der Anteil an Flächigem Material ins Verhältnis zur aufgegebenen Menge gesetzt und optisch beurteilt.

4.8 Versuchsablauf am TOMRA-NIR-Sorter

4.8.1 Zielstellung

Nach der mechanischen Vortrennung durch den Ballistikseparator sollte untersucht werden, wie sich die wesentlichen Parametereinstellungen des TOMRA-NIR-Sorters auf die Sortierqualität der flächigen Fraktion auswirken. Im Fokus standen dabei die Reinheit und Ausbringung der Zielpolymere (PE-Folie, PE, PP, PMMA) sowie die Minimierung von PVC- und Inertanteilen.

4.8.2 Untersuchte Parameter

Folgende Parameter wurden systematisch variiert:

- Bandgeschwindigkeit (m/s): niedrige Geschwindigkeit ermöglicht längere Erkennungszeiten und präzisere Auswürfe, höhere Geschwindigkeit steigert Durchsatz bei potenziell höherer Fehlwurfquote.
- Düsendruck (bar): niedriger Druck reduziert Mitnahmeeffekte, höherer Druck verbessert die Separation kleiner Objekte, erhöht jedoch das Risiko von Überauswürfen.
- Confidence-Level (%): Schwellenwert für die Erkennungssicherheit; höhere Werte erhöhen die Reinheit, niedrigere Werte verbessern die Ausbringung.

4.8.3 Versuchsablauf

Die flächige Fraktion aus dem Ballistikseparator wurde auf den NIR-Sorter aufgegeben. Je Versuchseinstellung lief die Anlage für eine definierte Dauer (ca. 10–15 Minuten) stabil, bevor Proben aus Zielstrom und Rest entnommen wurden. Die Proben wurden anschließend klassifiziert (visuelle Kontrolle) und hinsichtlich Reinheit, Ausbringung sowie Störstoffanteilen ausgewertet.

Zur Bewertung der Reinheit am Ballistikseparator wurde zusätzlich die Holzfraktion als Maßstab herangezogen. Holz weist in der Regel keine flächigen Eigenschaften auf und wurde daher überwiegend in die 3D-Fraktion überführt. Einzelne Holzteile oder -platten, die dennoch im 2D-Strom verblieben, wurden als Indikator für Unreinheit gewertet. Diese Vorgehensweise erlaubt eine praxisnahe Einschätzung der Trennschärfe des Ballistikseparators, da Holz in heterogenen Gewerbeabfällen häufig vorkommt und durch seine eindeutigen Materialeigenschaften (Farbe, Struktur, Dichte) zuverlässig manuell klassifiziert werden kann. Eine geringe Holzrate im 2D-Strom wurde somit als positiver Hinweis auf eine hohe Reinheit der Folienfraktion interpretiert.

Zur Bestimmung der Reinheit der sortierten Kunststofffraktionen wurde ein praxisnahes, schnell durchführbares Verfahren angewandt. Aus dem Zielstrom wurde jeweils eine Probe von 1 kg entnommen und auf einem Sortiertisch handsortiert. Dabei erfolgte eine visuelle und haptische Klassifizierung der enthaltenen Materialien in die Zielpolymere (PE-Folie) sowie in eine Reststofffraktion (PVC, PET, Papier, Inertstoffe, Holz, Sonstiges). Die Zuordnung stützte sich auf typische Erkennungsmerkmale wie Optik (transluzent, opak, bedruckt) und Haptik (weich-raschelnd, steif, wachsartig). In Fällen, in denen eine eindeutige Zuordnung visuell oder haptisch nicht möglich war, kam ergänzend ein Schwimm-Sink-Verfahren im Laboreimer zum Einsatz. Hierbei wurde die Probe in Wasser überführt, wodurch sich die Dichteunterschiede der Polymere nutzbar machen ließen: Polyolefine (PE, PP) schwimmen, während dichtere Polymere wie PVC oder PET absinken.

Durch diese Kombination aus Handsortierung und einfacher Dichtentrennung konnte eine schnelle, aber dennoch wissenschaftlich fundierte Aussage zur Reinheit der sortierten Fraktionen getroffen werden.

Zur Bestimmung des Inertstoffanteils wurde der Aschegehalt der sortierten Proben ermittelt. Dafür wurden repräsentative Teilproben bei hoher Temperatur (ca. 550–600 °C) verascht. Während die organischen Kunststoffbestandteile vollständig verbrannten, verblieben mineralische Rückstände wie Glas, Steine, Keramik oder anorganische Füllstoffe als Aschefraktion. Der prozentuale Anteil dieser Rückstände am ursprünglichen Trockengewicht wurde als Aschegehalt in % dokumentiert und diente als Maß für den Inertstoffgehalt in der jeweiligen Fraktion.

4.8.4 Temporäre Nachzerkleinerung (Mobiler Zerkleinerer Fa. Arjes) im Versuch

Um den Einfluss der Korngröße auf die Erkennung und Trennschärfe zu untersuchen, wurde im Rahmen der Versuche ein Teilstrom des sortierten Materials zusätzlich durch einen Arjes-Zerkleinerer geführt. Dieses Aggregat stand nicht im Regelprozess, wurde jedoch gezielt für die Versuchsdurchführung eingesetzt (**Abbildung 13**). Das zerkleinerte Material wurde anschließend erneut dem TOMRA-NIR-Sorter zugeführt, um Veränderungen in der Erkennungsqualität und Sortierleistung zu messen. Zusätzlich wurde eine Teilmenge in einem weiteren mobilen Aggregat (NE-Abscheider der Firma Komptech) verarbeitet.



Abbildung 13: Mobiler Arjes VZ 950 Titan-Nachzerkleinerer

4.8.5 Serienmäßige Nachzerkleinerung (Lindner Komet)

Im regulären Anlagenbetrieb erfolgt die Nachzerkleinerung über einen Lindner Komet, der die Kornverteilung homogenisiert und die nachgelagerten Recyclingprozesse stabilisiert. Der Arjes-Einsatz im Versuch war somit ein ergänzender Zwischenschritt zur wissenschaftlichen Untersuchung.

4.8.6 Bewertungsgrößen

- Ausbringung (%) je Polymerfraktion
- PVC-Anteil (%) im Endprodukt
- Inertstoffanteil (%) (visuell/Aschegehalt)
- Einfluss der Vorzerkleinerung auf Erkennung und Trennung

4.9 Ergebnisse und Auswertung

4.9.1 Ergebnisse der Ballistikseparator-Versuche

Die Variation von Neigungswinkel und Schlagfrequenz zeigte deutliche Auswirkungen auf die Zusammensetzung des 2D-Stroms.

- Schlagfrequenz von 180 – 210 U/min
- Neigungswinkel von 30-40 Grad
- Holzanteil von 16,2% bis 22,2%

Tabelle 3: Einfluss von Neigungswinkel und Schlagfrequenz auf Reinheit und Ausbringung der 2D-Fraktion

Neigungs- winkel (°)	Frequenz in Hz	Schlagfrequenz (U/min)	Reinheit	Ausbringung	Wirkung	Holz-Anteil in %
30	60	180	Qualität eher runter	nach oben	mehr PVC und Inertstoffe	22,20%
30	65	200	wenig Veränderung	nach oben		21,80%
30	70	210	kaum Veränderung	kaum Veränderung	Flacher Winkel und hohe Frequenz -> Effekte heben sich auf	21,20%
35	60	180	kaum Veränderung	wenig Veränderung		20,70%
35	65	200			war Referenzwert	19,00%
35	70	210	Qualität nach oben	Verluste		18,70%
40	60	180	Qualität nach oben	kaum Veränderung	trennt besser	17,80%
40	65	200	Qualität nach oben	Verluste	Reinheitsorientiert	17,30%
40	70	210	Qualität deutlich nach oben	hohe Verluste	super Trennschärfe	16,20%

Eine Erhöhung des Neigungswinkels (z. B. von 30° auf 40°) und der Schlagfrequenz (z. B. von 180 auf 210 U/min) führt zu einer signifikanten Steigerung der Trennschärfe zwischen 2D- und 3D-Kollektiv. Dies zeigt sich auch in der besseren Ausschleusung der Holzfraktion. Mechanistisch ist dies durch die verstärkte gravimetrisch-ballistische Selektion erklärbar: 3D-Körper erfahren bei steilerem Winkel und höherer Beschleunigung eine frühere Abförderung, während flächige 2D-Partikel längere Kontaktzeiten auf den Siebplatten aufweisen. In der 2D-Fraktion resultiert dies in höherer Reinheit. Mitnahme von Mineralanteilen (Inertstoffen) und Holz wurde reduziert, gleichzeitig ist mit einer moderaten Abnahme der Folien-Ausbringung zu rechnen (Verlust dünnwandiger 3D-ähnlicher Teile in die 3D-Fraktion). Die Referenzeinstellung (35° bei 65 Hz und 200 U/min) bildet ein robustes Arbeitsfenster; die reinheitsorientierte Fahrweise (40°, 210 U/min) maximiert die Qualitätskennzahlen, verlangt jedoch eine begleitende Durchsatz-Optimierung (Dosierung, NIR-Parameter), um wirtschaftliche Verluste zu begrenzen.

4.9.2 Ergebnisse der TOMRA-NIR-Versuche

Die untersuchten Parameter Bandgeschwindigkeit, Düsendruck und Confidence-Level beeinflussten maßgeblich die Trennschärfe der NIR-Sortierung.

- Bandgeschwindigkeit von 2,4 – 3,0 m/s
- Druck von 2,5-3,5 bar
- Confidence hoch und niedrig

Tabelle 4: Einfluss des Confidence-Levels auf Reinheit und Ausbringung (PE-Folie)

Test	Band speed m/s	Druck (bar)	Confidence (PE-Folie)	Feed (t/h)	Trockensubstanz (%)	PE Folien Reinheit (%)	Chlorgehalt (%)	Aschegehalt (%)	TS Heizwert (in MJ/KG)
Test 1	2,4	3,5	hoch	5,9	97,80	76,6	0,26	19,1	34,5
Test 2	3,0	2,2	niedrig	6,1	97,39	80,7	0,40	28,0	26,4
Test 3	3,0	3,5	niedrig	5,7	97,64	77,7	0,81	30,8	24,8
Test 4	3,0	3,5	hoch	5,8	97,42	74,8	0,38	28,8	25,2
Test 5	2,4	3,5	niedrig	6,0	97,47	79,0	0,27	19,8	36,0
Test 6	3,0	2,2	hoch	6,2	97,74	77,0	0,37	27,7	30,1
Test 7	2,4	2,2	hoch	6,0	97,48	81,3	0,25	17,6	29,5
Test 8	2,4	2,2	niedrig	6,2	97,46	78,2	0,45	20,5	26,2

Die Variation der Stellgrößen Bandgeschwindigkeit, Düsendruck und Confidence-Level zeigte einen hochsignifikanten Einfluss auf die Sortierleistung der 2D-Fraktion. Eine Reduktion der Bandgeschwindigkeit (z. B. von 3,0 auf 2,4 m/s) führte zu einer verlängerten Verweilzeit im Detektionsfenster und damit zu einer höheren Erkennungsgenauigkeit sowie einer verbesserten Trennschärfe zwischen Zielpolymeren und Störstoffen. Gleichzeitig stieg bei zu niedrigen Bandgeschwindigkeiten die Gefahr von Überlagerungen (Monolayer >80 %), sodass die Nettoausbringung nicht linear zunahm.

Der Düsendruck beeinflusste primär die Mitnahmeeffekte: Niedrige Druckstufen (<2,5 bar) führten zu unvollständiger Abtrennung kleiner PVC- Fragmente, während hohe Druckstufen (>3,0 bar) die Reinheit steigerten, jedoch durch Mehrfach-Hits und Luftturbulenzen die Materialverluste im Zielstrom erhöhten.

Besonders relevant erwies sich das Confidence-Level: Mit steigenden Werten (≥90 %) konnte eine signifikante Absenkung des PVC-Anteils auf <0,01 % erzielt werden, was unmittelbar zur Reduktion des Chlorgehalts in den Zielpolymeren beitrug. Diese Qualitätssteigerung ging jedoch mit einer moderaten Reduktion der Ausbringung einher, da auch grenzwertige PE/PP-Partikel verworfen wurden.

Die interaktive Wirkung der Faktoren zeigte, dass eine Kombination aus moderater Bandgeschwindigkeit, mittlerem Düsendruck und hohem Confidence-Level den besten Kompromiss zwischen Reinheit und Ausbringung darstellte.

4.9.3 Einfluss der Vorzerkleinerung (Arjes im Versuch)

Die zusätzliche Zerkleinerung führte zu einer Veränderung der Partikelgröße und einer verbesserten Detektierbarkeit durch den NIR-Sorter.

Die vorgeschaltete FE- und NE-Metallabscheidung führte zu einer Stabilisierung der NIR-Signale, da metallische Reflexionen reduziert wurden. Dies führte insbesondere beim positiv ausgeschossenen PVC-Strom zu einer deutlich höheren Reinheit und damit zu einer maßgeblichen Senkung des Chloranteils im Endprodukt

Tabelle 5: Ergebnisse mit Vorzerkleinerung (PE-Folie)

Test	Band speed m/s	Druck (bar)	Confidence (PE-Folie)	Feed (t/h)	Trockensubstanz (%)	PE Folien Reinheit (%)	Chlorgehalt (%)	Aschegehalt (%)	TS Heizwert (in MJ/KG)
Test 1 zerkl.	2,4	3,5	hoch	5,8	97,12	81,7	0,22	18,8	34,1
Test 2 zerkl.	2,4	2,2	hoch	6,1	96,94	85,8	0,09	16,9	34,3
Test 3 zerkl.	3,0	3,5	niedrig	5,9	97,40	76,3	0,47	27,1	29,8
Test 4 zerkl.	2,4	3,5	niedrig	5,8	97,83	78,4	0,33	25,2	32,5

4.10 Gesamtbewertung der Versuchsergebnisse

Die kombinierten Ergebnisse aus Ballistikseparator- und NIR-Versuchen zeigen folgende Trends:

- Mit steilerem Neigungswinkel und erhöhter Schlagfrequenz steigt die Reinheit der 2D-Fraktion, bei leicht sinkender Ausbringung.
- Niedrige Bandgeschwindigkeit und hohe Confidence-Werte führen zu einer Verbesserung der Reinheit, allerdings zulasten der Ausbringung.
- Der Düsendruck zeigte eine kritische Balance: zu niedrige Werte senkten die Abtrennschärfe, zu hohe Werte erhöhten die Mitnahme.
- Die temporäre Nachzerkleinerung mit dem Arjes verbesserte die Detektierbarkeit und konnte Inertanteile insbesondere FE-Anteile bereits entfernen.
- Insgesamt konnten die PVC-Anteile und damit der Chlorgehalt in den Zielströmen in mehreren Varianten unter 0,3 % gedrückt werden, bei gleichzeitig hoher Reinheit von PE-Folie und PP.

5 Anwendung der entwickelten Sortierprozesse zur Erzeugung der EBS++ und PA-PE-Verbundfolien Fraktion

5.1 Vorbereitung der Feedstock-Auswahl bei KORN

Die Herstellung des Materials EBS++ (A) bei KORN, welches während der Bilanzfahrt bei der CARBOWEST verflüssigt wurde, wurde von zwei Mitarbeitern der carbolig/RECENSO (SAS/LVE) begleitet und vor Ort in Albstadt analysiert und bewertet. Dabei wurden verschiedene EBS-Fraktionen betrachtet, diese sind in Abbildung 14 und Tabelle 6 dargestellt. Für die Probe 1, die in der Nachschicht am 20.02.2025 hergestellt wurde, wurde der Brennwert, Aschegehalt und Chlorgehalt bestimmt. Außerdem wurden eine Probe (Probe 2) aus der Tagschicht am 19.02.2025, eine Probe aus dem Lager (Probe 3) sowie eine Probe (Probe 4) aus einer Ausschleusung aus der Anlage (F2.4) genommen und analysiert. Aufgrund der Ergebnisse wurde sich für 4 Radlader-Schaufeln der Probe 1 und für 4 Schaufeln der Probe 4 was insgesamt ca. 16,5 Tonnen ergibt, entschieden. Darüber hinaus wurden 8 Bigbags (ca. 1,5 Tonnen) des EBS++ (B) als F2,4A auf den LKW auf das EBS geladen und für die Bilanzfahrt bereitgestellt. In Summe wurden 18,14 Tonnen versendet (siehe auch Abbildung 15)



Abbildung 14 EBS-Lager bei KORN mit Radlader zur Beladung des LKW (HN-FK-450)

Tabelle 6: Analysen verschiedener EBS-Proben bei KORN

		Spec	Probe 1	Probe 1	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
			Produktion Nacht 20.02.25			Tagprodukti on 19.02.2025	Lager	F2.4A
		CW2502KO45_250220_830_SAS			CW2502KO45_250220_045_250219_250220_F2A			
Messung bei			KORN	KORN	CWEST	KORN	KORN	KORN
Brennwert	MJ/kg	24	26,26	24,89		28,21	20,32	22,30
Aschegehalt	%	<10	12,50%	7,50%	7,11%	2,70%	11,50%	6,90%
Chlor	%	<0,4	0,54	0,34		0,32		0,2



Korn Recycling GmbH
Unter dem Malesfelsen 35-45
72458 Albstadt

Telefon
Fax
USt-ID-Nr.

00497431-94929-0
00497431-94929-21
DE207721521

info@korn-recycling.de
http://www.korn-recycling.de

Kunde:
CARBOLIQ GmbH

Karlsruhe 8b
42697 Remscheid

Kd.-Nr. 64714

Endladeort:
CARBOWEST GmbH

Westring 10
59320 Ennigerloh

Zielort Nr. 98776

Beförderer: FK Spedition GmbH

Wiege-/Lieferschein Nr.

2209061 /A /2383448

KFZ-Kennz.: HN-FK 450

Einzelwiegung: 20.02.25 12:49

Bezeichnung: 1354 Brennbare Abfälle 25mm Kat.1(Brennstoffe aus ... 19 12 10 18,140 to

Brutto: W 10009802
34.720 kg

Tara: W 10009759
16.580 kg

Netto:
18.140 kg

Unterschrift Wiegemeister

Unterschrift Anlieferer/Fahrer

Beleg erstellt am 20.02.25 Waage Korn Recycling GmbH,
Messwerte aus frei programmierbarer Zusatzeinrichtung. Die geeichten Messwerte können eingesehen werden.
Wir weisen darauf hin, dass der Fahrer des Fahrzeuges für Gewichtüberschreitungen selbst verantwortlich ist.

Abbildung 15 Wiege und Lieferschein der KORN-Kampagne (EBS++ (A+B))

6 Fahren der EBS++ Fraktion von KORN bei CARBOWEST

6.1 Ziel des Versuchs

KORN Recycling GmbH ist an einem Nachweis der technischen Fähigkeit der Verflüssigungsanlage der CARBOWEST in Ennigerloh und der generellen Zuverlässigkeit der patentierten carboliq-Technologie beim Einsatz ihres Ersatzbrennstoffes aus der Anlage in Albstadt interessiert.

Das in Kapitel 5 hergestellte EBS++ (A+B) wurde in zwei Kampagnen mit einer insgesamt 20-tägigen Dauer in einer Bilanzfahrt verarbeitet. Es erfolgten planmäßige Probenzüge. Die Ergebnisse sind in Protokollen dokumentiert.

Weitere Nebenziele des Tests sind

- Störungs- und unterbrechungsfreier Betrieb der Anlage
- Erreichen des steady state/stationären Zustandes
- Erreichen einer konstanten Produktqualität
- Vermarktbarkeit des erzeugten Erdölersatzproduktes
- Protokollierung und Darstellung der gesamten Bilanzfahrt
- Integrale Massen-, Energie- und Stoffbilanzen

6.2 Feedstock-auswahl und -anlieferung / Schreddern bei der GRE

Im Folgenden ist die Anlieferung des KORN EBS-Material dokumentiert, das im Rahmen der vereinbarten Bilanzfahrt verflüssigt wurde.



Abbildung 16 Anlieferung des KORN EBS++ Materials bei GRE Fr. 21.02.2025, morgens 8:30



Abbildung 17 KORN EBS++-Material nach dem Lohnschreddern (vgl. Dichten)

Das Material wurde aufgrund der Anforderung der CARBOWEST bezüglich Korngröße bei einem Lohnschredderbetrieb auf 30 mm nachzerkleinert. Damit wurde unter anderem sichergestellt, dass Placken, die durch Lagerung bilden, entfernt wurden. Abbildung 16 zeigt das Material nach der Anlieferung bei dem Lohnschredder und Abbildung 17 zeigt das Material nach dem Schreddern bei der CARBOWEST.

6.3 Vorcharakterisierung des Feedmaterials im Labor

6.3.1 Grundcharakterisierung

Das angelieferte Material wurde beprobt und zur Vorcharakterisierung ins ECOWEST Labor gebracht, wo es nach der CARBOWEST Standardanalytik voranalysiert wurde (Abfolge siehe Abbildung 9).

Tabelle 7 zeigt die Materialeigenschaften des KORN EBS-Materials im Vergleich zu dem typischen carboliq-Feedstock. Der Brennwert ist mit 25 bis 28 MJ/kg gering und im unteren Bereich der Grenzwerte. Der Aschegehalt ist mit 3 bis 7 % eher hoch was auf den höheren Inertanteil zurückzuführen ist. Die Schneidfähigkeit ist gut. Insgesamt ist die (stoffliche) Qualität des Materials erwartungsgemäß für ein EBS. Ob die Qualität des Materials über längere Zeiträume als homogen und konstant angesehen werden kann, zeigen weitere Analysen und Beprobungen während der Bilanzfahrt

Tabelle 7 Vergleich der Proben des KORN EBS++-Materials mit den Werten des typischen Feedstocks

				
Materialeigenschaft	Einheit	Typische Feedstocks	KORN Albstadt Bemusterung	KORN Probe Ennigerloh
Aschegehalt	% (m/m)	< 5	Ca. 7	7,11
Brennwert	MJ/kg	25 bis 41	26,1	25,20
Schüttdichte	kg/m ³	50 bis 100	-	-
Feuchte	% (m/m)	5	-	4,65
Schneidfähigkeit		gut	gut	gut

6.4 Bilanzfahrt der Anlage

Die Bilanzfahrt wurde am 24.02.2025 um 23:30 Uhr gestartet und die Temperatur im Reaktor eingestellt und mit dem Einfördern des KORN EBS++-Materials begonnen. Am 24.02.2025 zur Mittagszeit war Jürgen Lehmann anwesend und hat die Bestandsaufnahme (protokollieren aller Füllstände/Gewichte) Leerung (Nullung) der Behälter und IBC überwacht. Da unterbrechungsfrei, also ohne ab- und anfahren der Anlage, von der Kampagne AR44 auf die Kampagne KO45 umgestellt wurde, dauert es ca. drei Tage bis sich der Reaktor im stationären/eingeschwungenen Zustand befindet.

Am 25.02.2025 hat ein großes Projekttreffen stattgefunden, wo alle Projektbeteiligten anwesend waren und in Kleingruppen einen Rundgang über das Gelände des Entsorgungszentrums durchgeführt haben um einen Eindruck der EBS-Anlage und den Umgang mit realen Abfällen im industriellen Maßstab zu bekommen.

Die Proben vom Eingangsmaterial KORN EBS++ F2 und vom CLR Produkt P1 wurden während der Anwesenheit von Herrn Jürgen Lehmann in dessen Beisein genommen (vgl. Tabelle 8). Es wurde zusätzlich zu der Probennahme für die Standardanalytik, eine weitere Probe für KORN zur eigenen Auswertung genommen.

Es wurde jeden Morgen eine Morgenrunde um 8:00 Uhr durchgeführt, in denen der KORN – Mitarbeiter anwesend war und in denen Vorkommnisse aus der Nacht sowie die anstehenden Punkte für die Tagschicht (Anlieferung, Reparaturen/Wartungen, Sonstiges) besprochen und geklärt wurden.

Da es durch die Heterogenität und die höhere Verschmutzung des Einsatzmaterials während des Betriebes zu unterschiedlichen Problemstellungen, wie zum Beispiel Förderproblemen kam, wurde die Fahrstrategie regelmäßig angepasst.

Am 12.03. war das gesamte Material aus der Probe 2 von KORN verflüssigt. Am 14.03. startete die KO46 mit dem Material aus Probe 4 (Tabelle 7). Während dieser Kampagne wurde ein Neutralisator zugegeben um den Chlorgehalt im Material zu reduzieren.

Die Bilanzfahrt(en) (stationärer Zustand) wurde am 16.03 wie zwischen den Parteien vereinbart, einstimmig als beendet erklärt.

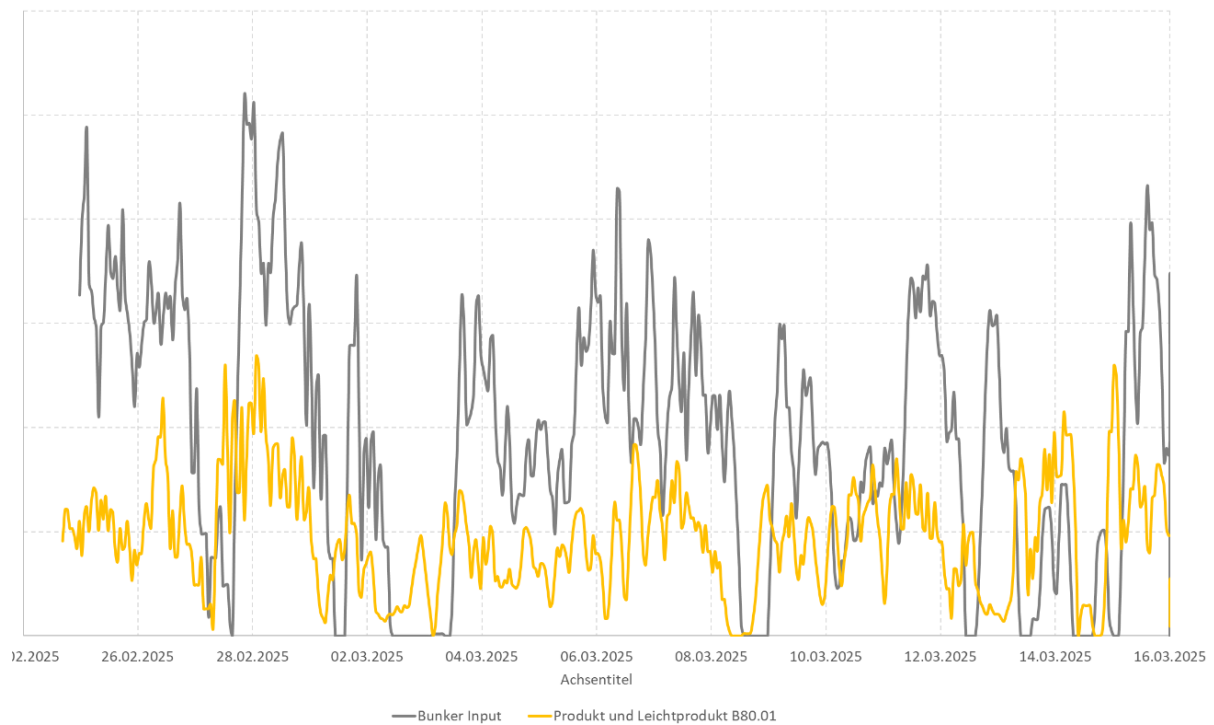


Abbildung 18 Darstellung der stündlich geförderten Mengen (ohne Absolute Einheit)

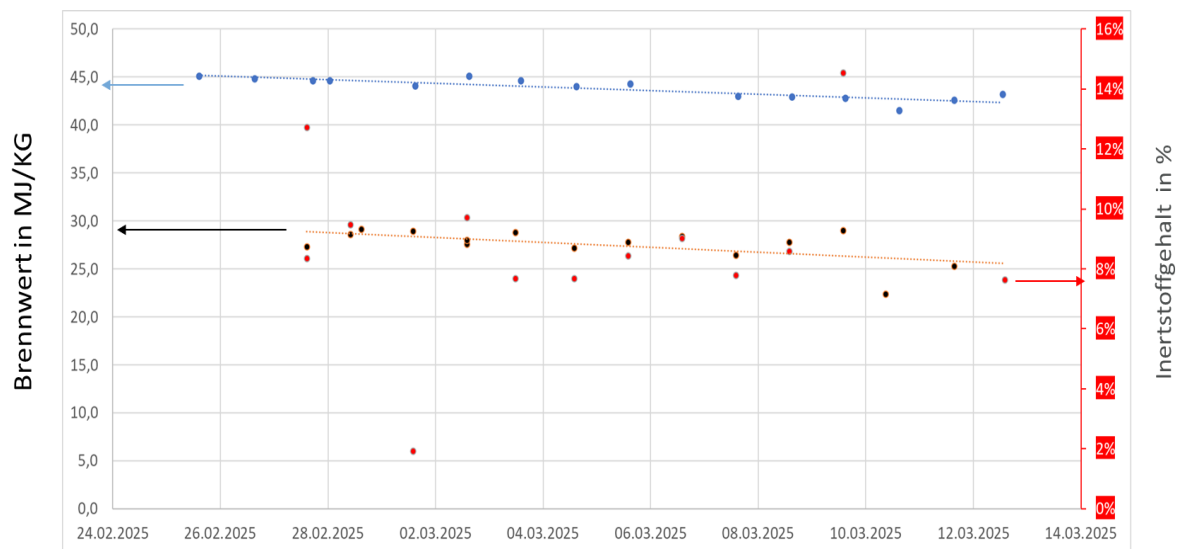


Abbildung 19 Zeiträume und Brennwerte des Einsatzmaterials und des CLR-Produktes (linke Achse, rechte Achse: Inertstoffgehalt)

Abbildung 19 zeigt den gesamten Zeitraum der Bilanzfahrt (24.02.2025 Uhr bis 14.03.2025). Die Brennwerte liegen auf einem hohen Niveau und sinken gegen Ende der Kampagne leicht ab – da die gesamte Produktion der KO45/KO46 als Teil eines Tankwagens abgenommen wurde, ist die Qualität des Produktes in der Spezifikation der Petrochemie. Somit konnte der Nachweis der Verwertbarkeit des EBS++ in der Petrochemie erbracht werden. Die leichte Verringerung des Brennwertes ist unerheblich/vernachlässigbar.

6.5 Analysen und Messergebnisse

Tabelle 8 Brennwert, Schüttdichte, Asche- und Wassergehalt des F2 Feedstocks während der Bilanzfahrt

	Schneidbarkeit	Schüttdichte	Wassergehalt	Brennwert	Aschegehalt
Abkürzung		$r_{\text{Schuett.F1}}$	$w_{\text{Feucht.F1}}$	$D_{\text{cH.F1}}$	$w_{\text{Ash.F1}}$
Datum /Einheit		kg/m ³	gew%	MJ/kg	gew%
21.02.2025 11:00	Gut	-	4,65	25,2	7,11
27.02.2025 14:35	Gut	-	3,6	27,3	8
28.02.2025 10:10	Gut	-	3,7	28,6	13
01.03.2025 14:01	Gut	-	2,73	28,9	9
02.03.2025 14:01	Gut	110,47	4,22	28,0	8
04.03.2025 14:00	Gut	89,73	2,8	27,2	8
05.03.2025 14:00	Gut	107,1	3,15	27,8	9
06.03.2025 14:00	Gut	106,92	2,7	28,4	7
07.03.2025 14:00	Gut	90,69	3,29	26,4	10
08.03.2025 14:00	Gut	104,56	2,12	27,8	8
09.03.2025 14:00	Gut	96,97	3,75	29,0	9
10.03.2025 9:00	Gut	109,94	7,65	22,4	15
11.03.2025 15:30	Gut	97,37	6,96	25,3	11
12.03.2025 14:00	Gut	81,58	3,14	20,7	21
Mittelwert	Gut	99,5	3,9	26,6	10,2

Tabelle 8 zeigt die bilanzbegleitende Messung der Brennwerte, Schüttdichte, Wasser- und Aschegehalte. Gut erkennbar ist, dass der Feedstock relativ gleichförmig ist. Der Brennwert kann als sehr stabil über die Zeit angenommen werden. Der Aschegehalt zeigt, dass das Material einen erhöhten Inertanteil, also nicht verflüssigbare Komponenten enthält.

6.5.1 Prüfmethoden

Tabelle 9 Prüfparameter und Prüfmethoden der Firma ASG

Prüfparameter	Prüfmethode
Kohlenstoffgehalt	ASTM D5291, method D :2021
Wasserstoffgehalt	
Stickstoffgehalt	
Sauerstoffgehalt	
Schwefelgehalt	
Chlorgehalt	ASTM D5622 :2017
Fluorgehalt	DIN EN 15408 :2011
Bromgehalt	

Iodgehalt	
Metalle	DIN EN ISO 11885 :2009
Quecksilber (Hg)	ASTM D7623 :2020
Säurezahl	DIN EN 12634 :1999
Flammpunkt	DIN EN ISO 3679 :2023
Pourpoint	DIN EN ISO 3016 :2017
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185 :1997
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937 :2002
Destillationsverlauf (GC-Verfahren)	ASTM D7169 :2020

Tabelle 9 zeigt die Prüfparameter und die Prüfmethoden der Firma ASG. Diese werden selbst kontrolliert und regelmäßig auditiert. Sie stellen die üblichen Standardmessungen und -verfahren für die jeweilige Messgröße dar. Bei den Stickstoffgehalten konnte wie beschrieben schon festgestellt werden, dass die Genauigkeit der ASTM D5291, method D :2021 für die Anforderung <5.000 ppm zu gering ist.

7 Bewertung der Ergebnisse, Erstellung von Investitionsplanung (KORN)

7.1 Einleitung und Allgemeines

7.1.1 Problemstellung und Motivation

Die globale Kunststoffproduktion wächst seit Jahrzehnten kontinuierlich und hat im Jahr 2020 bereits 350 Millionen Tonnen überschritten. Prognosen zufolge wird sich diese Menge bis 2050 nahezu verdreifachen. Dieses Wachstum führt zu einer zunehmenden Belastung durch Kunststoffabfälle, die in klassischen mechanischen Recyclingverfahren nur unzureichend bewältigt werden können. Vor allem gemischte oder verschmutzte Kunststofffraktionen werden nach wie vor überwiegend energetisch verwertet (Verbrennung), wodurch wertvolle Rohstoffe verloren gehen und erhebliche CO₂-Emissionen entstehen.

7.1.2 Zielsetzung der Analyse

Ziel dieser Analyse auf Basis der Ergebnisse aus der Kampagne ist es, ein tragfähiges Geschäftsmodell für chemisches Recycling von Ersatzbrennstoffen aus der mechanischen Abfallaufbereitung (EBS++) auf Basis der patentierten carboliq-Technologie zu entwickeln. Der Bericht soll aufzeigen, wie durch die Integration dieser Technologie in bestehende Abfallaufbereitungsprozesse nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Vorteile erzielt werden können. Dazu werden die Markt- und Umfeldbedingungen analysiert, die Unternehmensstrategie beschrieben, die technologische Prozesskette erläutert sowie ein Business Model Canvas und ein Finanzmodell über einen Zeitraum von zehn Jahren erstellt. Darüber hinaus wurde untersucht, ob das Geschäftsmodell Venture-Capital-fähig ist.

7.1.3 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen basiert auf einer Kombination aus Literatur- und Marktanalysen, der Auswertung bestehender Pilotprojekte sowie betriebswirtschaftlicher Modellierungen. Es wurde ein Business Model Canvas entwickelt, das die wesentlichen Bausteine des Geschäftsmodells strukturiert darstellt. Ergänzend wurde ein Finanzmodell erstellt, das auf Basis von Annahmen zu Investitions- und Betriebskosten, Marktpreisen und regulatorischen Rahmenbedingungen eine Cashflow-Betrachtung über zehn Jahre ermöglicht. Die Analyse wurde durch eine Venture-Capital-Readiness-Prüfung sowie eine Risiko- und Mitigationsanalyse abgerundet.

7.2 Markt- und Umfeldanalyse

7.2.1 Makrotrends und regulatorischer Rahmen

Die Kunststoffproduktion nimmt weltweit weiterhin stark zu. Prognosen zufolge könnte die jährliche Produktion bis 2050 über eine Milliarde Tonnen erreichen. Dieses Wachstum verstärkt die Problematik der Abfallbewirtschaftung, insbesondere da die globalen Recyclingquoten bisher nur unzureichend sind. In Europa setzt die Europäische Union zunehmend strengere Ziele: Bis 2030 sollen mindestens 30 % Rezyklate in Kunststoffprodukten verwendet werden, bis 2050 strebt die EU eine vollständige Kreislaufwirtschaft an. Zusätzlich wirken Instrumente wie die CO₂-Bepreisung im Rahmen des europäischen Emissionshandels sowie staatliche Förderprogramme zur Unterstützung neuer Recyclingtechnologien als zentrale Treiber. Die thermische Verwertung von Ersatzbrennstoffen beispielsweise durch die Zementindustrie wurde dadurch erschwert.

7.2.2 Limitierungen des mechanischen Recyclings

Das mechanische Recycling ist heute die am weitesten verbreitete Technologie, stößt jedoch bei komplexeren Abfallströmen an Grenzen. Sortenreine Kunststoffe können zwar wiederaufbereitet werden, jedoch führt der Prozess häufig zu einem Qualitätsverlust.

Insbesondere bei Mehrschichtverpackungen, Verbundmaterialien oder stark verschmutzten Kunststoffen ist eine stoffliche Verwertung kaum möglich. Diese Fraktionen werden überwiegend als Ersatzbrennstoffe thermisch verwertet, wodurch wertvolle Rohstoffe verloren gehen, und Treibhausgasemissionen entstehen.

7.2.3 Potenzial und Wachstumsperspektiven des chemischen Recyclings

Chemisches Recycling adressiert genau jene Lücke, die das mechanische Recycling offenlässt. Verfahren wie das einstufige Verfahren zur Verflüssigung fester Kohlenwasserstoffe nach carboliq ermöglichen es, gemischte oder verunreinigte Kunststoffabfälle in hochwertige Öle zurückzuführen, die fossiles Naphtha ersetzen können. Studien prognostizieren, dass chemisches Recycling in den kommenden Jahrzehnten schneller wachsen wird als mechanisches Recycling und eine Schlüsselrolle bei der Erreichung der EU-Recyclingziele übernehmen wird. Die Skalierbarkeit der Technologie und die Möglichkeit langfristiger Abnahmeverträge mit der Chemieindustrie schaffen ein signifikantes Marktpotenzial.

7.2.4 Wettbewerb und Positionierung

Der Wettbewerb im chemischen Recycling ist von einer Vielzahl von Technologieanbietern geprägt, die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden. Gleichzeitig investieren große Petrochemieunternehmen, wie unter anderem die BASF, massiv in diese Technologien, um ihre Rohstoffbasis nachhaltiger zu gestalten. Ein Unternehmen, das über eine eigene Sortier- und Aufbereitungsinfrastruktur verfügt, kann sich hierbei durch eine gesicherte Feedstock-Basis und die Integration von mechanischem und chemischem Recycling differenzieren.

7.2.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Marktumfeld für chemisches Recycling von starken Wachstumsimpulsen geprägt ist. Während mechanisches Recycling weiterhin seine Relevanz behält, wird chemisches Recycling insbesondere bei komplexen Abfallströmen die entscheidende Technologie zur Schließung des Kreislaufs darstellen. Unternehmen, die frühzeitig in diese Technologie investieren und dabei Zugang zu gesicherten Abfallströmen haben, können sich als strategisch wichtige Partner für die Chemieindustrie positionieren.

7.3 Unternehmensstrategie

7.3.1 Strategische Ausgangslage

Das Unternehmen KORN Recycling GmbH verfügt über eine etablierte Kompetenz in der mechanischen Aufbereitung von Gewerbeabfällen. Die bestehende Sortieranlage ist auf die Verarbeitung von Baumischabfällen und Sperrmüll spezialisiert und ermöglicht die Gewinnung wertvoller Fraktionen für stoffliche und energetische Verwertungswege. Gleichzeitig entstehen Restströme, die bislang überwiegend thermisch verwertet werden und damit nicht zur Kreislaufschließung beitragen. Angesichts der steigenden regulatorischen Anforderungen und des gesellschaftlichen Drucks ergibt sich für das Unternehmen ein strategisches Zeitfenster, um sich durch die Integration chemischer Recyclingtechnologien neu zu positionieren.

7.3.2 Zielbild und Vision

Die Vision des Unternehmens ist es, sich von einem klassischen Abfallaufbereiter zu einem integrierten Rohstofflieferanten für die Chemie- und Kunststoffindustrie weiterzuentwickeln. Das strategische Zielbild umfasst dabei die Nutzung von Restströmen aus der eigenen Sortieranlage, insbesondere Ersatzbrennstoffe (EBS++), die bislang unzureichend verwertet wurden, und deren Umwandlung in hochwertige Sekundärrohstoffe. Konkret soll mit Hilfe des carboliq® -Verfahrens ein Ölersatzprodukt erzeugt werden, das fossiles Naphtha ersetzt und direkt in petrochemische Prozesse eingespeist werden kann. Damit wird das Unternehmen

Teil einer vollständig geschlossenen Kreislaufwirtschaft und schafft gleichzeitig neue Wertschöpfungspotenziale.

7.3.3 Wettbewerbsvorteile und Differenzierungsmerkmale

Das Unternehmen kann sich durch mehrere Faktoren vom Wettbewerb abheben. Erstens verfügt es über direkten Zugang zu gemischten und schwer recycelbaren Kunststoffströmen aus seiner Sortieranlage. Dies reduziert die Abhängigkeit von externen Feedstock-Lieferanten und minimiert das Risiko steigender Inputkosten. Zweitens entstehen durch die Kombination mechanischer und chemischer Prozesse Synergien, da nicht recycelbare Reststoffe aus der mechanischen Aufbereitung in der chemischen Anlage verwertet werden können. Drittens ermöglicht die Technologie einen messbaren Beitrag zur Erreichung der EU-Recyclingziele (Recyclingquoten) und zur Reduktion von CO₂-Emissionen.

7.3.4 Wachstumsstrategie

Mit dem Eintritt in das chemische Recycling erschließt sich die KORN Recycling ein neues Geschäftsfeld, das komplementär zum bestehenden mechanischen Recycling wirkt und dadurch das Geschäftsmodell breiter und robuster aufstellt.

Damit dient die Wachstumsstrategie weniger einer kurzfristigen Steigerung von Durchsatzmengen, sondern vielmehr der strategischen Diversifikation, der Stärkung der Wettbewerbsposition und dem Aufbau neuer technologischer Kompetenz in einem Markt, der in Zukunft eine herausragende wirtschaftliche Bedeutung haben wird.

7.3.5 Beitrag zum Unternehmenswert

Die Umsetzung der Unternehmensstrategie eröffnet vielfältige Chancen zur Wertsteigerung. Durch die vertikale Integration entwickelt sich das Unternehmen vom reinen Entsorger zu einem Produzenten hochwertiger Rohstoffe. Damit entstehen neue Umsatzquellen durch den Verkauf von Ölersatzprodukten und eventuell potenziell handelbaren CO₂-Zertifikaten. Darüber hinaus trägt das Geschäftsmodell zur langfristigen Zukunftssicherheit bei, indem es den regulatorischen Wandel proaktiv aufgreift und das Unternehmen in den Transformationsprozess der Industrie integriert.

7.4 Technologie und Prozesskette

Die technologische Grundlage des geplanten Geschäftsmodells bildet das patentierte carbolig-Verfahren, eine Form der Verflüssigung fester Kohlenwasserstoffe. Dabei handelt es sich um ein thermochemisches Verfahren, das gemischte und verunreinigte Kunststoffströme in hochwertige Öle umwandelt.

7.4.1 Einsatzstoff (Feedstock)

Die Anlage soll mit Restfraktionen aus der mechanischen Sortierung gespeist werden, insbesondere Ersatzbrennstoffe (EBS++). Diese Ströme sind bislang nur für die energetische Verwertung geeignet.

7.4.2 Das carbolig® -Verfahren (Direct Liquefaction)

Das carbolig®-Verfahren arbeitet bei Temperaturen unter 400 °C und atmosphärischem Druck. Dies reduziert den Energieaufwand und minimiert die Bildung von Koks und Gas. Das resultierende Produkt, das sogenannte Circular Liquid Resource (CLR), kann fossiles Naphtha vollständig substituieren.

7.4.3 Prozessintegration

Die Prozesskette umfasst die Vorbehandlung des Feedstocks, den Liquefaction-Prozess selbst sowie die Lagerung und Distribution des Produkts. Die Einbindung in bestehende

Infrastruktur von Chemieparks gewährleistet kurze Transportwege und einfache Integration in petrochemische Wertschöpfungsketten.

7.4.4 Endprodukte und Absatzmärkte

Das Endprodukt CLR findet in der chemischen Industrie Verwendung als Rohstoff für Steamcracker, in der Kunststoffindustrie für die Produktion neuer Kunststoffe und in weiteren Industrien als nachhaltige Rohstoffalternative. Damit wird eine echte Kreislaufschließung erreicht.

7.5 Business Model Canvas

Das Business Model Canvas nach Osterwalder und Pigneur ist ein etabliertes Instrument, um Geschäftsmodelle systematisch darzustellen und ihre wesentlichen Elemente in einer standardisierten Struktur zu erfassen. Für das Business Modell lassen sich die neun Bausteine wie folgt beschreiben:

1. Kundensegmente: Abnehmer sind primär die chemische Industrie (Steamcracker-Betreiber), Kunststoffproduzenten sowie die Verpackungs- und Konsumgüterindustrie, die regulatorische Recyclingquoten erfüllen müssen.
2. Wertangebote: Herstellung von Circular Liquid Resource (welches fossiles Naphtha substituieren kann. Das Verfahren ermöglicht die Verwertung von Ersatzbrennstoffen (EBS++), erfüllt regulatorische Anforderungen und trägt zur CO₂-Reduktion bei.
3. Kanäle: Direktvermarktung an Abnehmer, Abnahme-Verträge sowie strategische Partnerschaften mit Chemieunternehmen (Versorgungssicherheit).
4. Kundenbeziehungen: Langfristige, vertragsbasierte Partnerschaften, Co-Development-Projekte mit Industriepartnern und strategische Joint Ventures.
5. Einnahmequellen: Erlöse aus dem Verkauf von CLR, zusätzliche Einnahmen durch handelbare CO₂-Zertifikate sowie evtl. Fördergelder in der Investitionsphase.
6. Schlüsselressourcen: Sortieranlage, carboliq-Reaktoranlage, gesicherte Feedstock-Ströme, technisches Know-how
7. Schlüsselaktivitäten: Sammlung, Sortierung und Vorbehandlung der Abfälle und Verarbeitung zu EBS++, Durchführung des Liquefaction-Prozesses, Qualitätskontrolle und Distribution.
8. Schlüsselpartner: Technologieanbieter (carboliq), Engineering-Unternehmen, Chemiekonzerne, Förderbanken und öffentliche Institutionen sowie kommunale Entsorger.
9. Kostenstruktur: CAPEX Produktionsanlage, OPEX für Betrieb, Personal, Energie und Wartung, Lizenzgebühren, Logistik- und Administrationskosten.

Business Model Canvas				
Schlüsselpartner	Schlüsselaktivitäten	Wertversprechen	Kundenbeziehungen	Kundensegmente
Carboliq (Technologie) Engineering-Partner Chemiekonzerne Kommunale Entsorger	Sammlung & Sortierung Liquefaction-Prozess Qualitätskontrolle Distribution	Echte Kreislaufwirtschaft Circular Liquid Resource (CLR) Substitution von Naphtha CO ₂ -Reduktion Regulatorische Erfüllung: Recyclingquoten Verwertung komplexer Abfälle Insbesondere EBS++ Reputationsgewinn für Kunden	Langfristige Verträge Co-Development Strategische Kooperationen	Chemische Industrie Kunststoffhersteller Verpackungsindustrie
	Schlüsselressourcen		Marktkanäle	
	Sortieranlage zur Aufbereitung und Zerkleinerung Carboliq (Technologie) Feedstock Infrastruktur bestehender Anlage -> Technik, Verwaltung		Direktvertrieb an strategische Abnehmer -> langfristige Offtake-Verträge Jonit Ventures -> Cooperationen mit Petrochemieunternehmen (die sich beteiligen um Versorgung zu sichern) Direkter B2B Vertrieb	
Kosten		Einnahmen		
CAPEX Anlagenbau OPEX Energie & Personal Wartung Logistik Lizenzen		Verkauf von CLR CO ₂ -Zertifikate (Potential für handelbare Zertifikate) Evtl. Fördermittel		

Abbildung 20: Business Model Canvas

Die wissenschaftliche Stärke des Canvas liegt darin, dass es eine einheitliche Sprache für Geschäftsmodelle schafft und sowohl interne als auch externe Stakeholder befähigt, Chancen und Risiken schnell zu erfassen.

7.6 Finanzmodell und Profitabilität

Die ökonomische Analyse des Geschäftsmodells basiert auf einer detaillierten Cashflow-Modellierung über einen Zeitraum von zehn Jahren. Sie berücksichtigt Investitionskosten (CAPEX), Betriebskosten (OPEX), Erlöse aus dem Verkauf von Ölersatzprodukten, Circular Liquid Resource (CLR) sowie die finanzielle Belastung durch Fremdkapital. Auf Grundlage der aktuellen Annahmen ergibt sich ein deutlich restriktiveres Bild hinsichtlich der Profitabilität und Investorenattraktivität als ursprünglich angenommen.

6.1 Grundannahmen

- Anlagenkapazität: 45.000 t/a (keine wirtschaftliche Tragfähigkeit bei kleineren Größen bei Verwendung des KORN EBS++).
- Investitionskosten (CAPEX): rund 51,4 Mio. € (inkl. Infrastruktur, Engineering).
- Betriebskosten (OPEX): ca. 20 Mio. €/a, bestehend aus Personal, Energie, Instandhaltung, Verwaltung und Logistik.
- Ausbeute: ca. 66% → Jahresproduktion von rund 29.500 t CLR.
- Verkaufspreis CLR: Modellannahme ca. 1.200 €/t (sensitiv gegenüber Öl- und Naphthapreisen).
- Finanzierung: Mischstruktur aus Eigenkapital (29%) und Fremdkapital (71%). Fördermitteln wären natürlich wünschenswert.

7.6.1 Umsatz- und Kostenpotenzial

Bei den genannten Parametern liegt der Umsatz im Vollbetrieb bei ca. 32 Mio. € pro Jahr. Dem stehen operative Kosten von ca. 20 Mio. € gegenüber. Daraus ergibt sich ein jährliches EBITDA von rund 12,5 Mio. €, was einer EBITDA-Marge von ca. 39% entspricht.

7.6.2 Betriebsergebnis (EBITDA/EBIT)

Die Modellrechnung zeigt ein positives EBIT ab dem ersten Vollbetriebsjahr. Dennoch ist die absolute Profitabilität angesichts der hohen Investitionskosten begrenzt. Über den Betrachtungszeitraum ergibt sich ein kumuliertes EBIT von rund 70 Mio. €, was bei den gegebenen Kapitalkosten nur eine moderate Wertschöpfung darstellt.

7.6.3 Cashflow-Projektion (10 Jahre)

Die Free-Cashflow-Betrachtung weist einen Break-even ab Jahr 7 aus. Vor diesem Zeitpunkt dominieren die Kapitaldienstlasten und die Rückführung der hohen Anfangsinvestitionen. Erst in der zweiten Projektphase generiert die Anlage positive Cashflows, die zu einem kumulativen Wert von rund 41,5 Mio. € bis Jahr 10 führen.

7.6.4 Kapitalwert (NPV) und interne Rendite (IRR)

Die Berechnungen ergeben bei einem Diskontsatz von 9,9% (WACC) einen Kapitalwert (NPV) von lediglich 4,4 Mio. €. Die interne Rendite (IRR) liegt bei 11,7% und damit nur knapp oberhalb der Kapitalkosten. Die Pufferzone gegenüber negativen Marktentwicklungen ist somit sehr gering, was die Investorenattraktivität stark einschränkt.

7.6.5 Sensitivitätsanalyse

Die Analyse der Sensitivitäten zeigt die hohe Fragilität des Modells:

- Auslastung: Bereits bei einer Anlagenauslastung von 95% ist kein positiver Kapitalwert (NPV) mehr erreichbar. Das Geschäftsmodell setzt somit eine dauerhafte Vollauslastung voraus – ein hohes operatives Risiko.
- Strompreise: Ein Anstieg der Stromkosten um nur 7,5% führt zu einem NPV von null. Damit ist die Profitabilität stark von der Energiepreisentwicklung abhängig.
- Verkaufspreise: Ein Rückgang der Produktpreise um 9% reduziert die interne Rendite (IRR) auf 0%. Das Modell ist damit stark abhängig von stabilen oder steigenden Naphthapreisen.

7.6.6 Zusammenfassung

Die Finanzanalyse zeigt, dass die wirtschaftliche Tragfähigkeit des Projekts nur unter sehr engen Voraussetzungen gegeben ist. Die Eintrittsschwelle von 45.000 t/a führt zu einem hohen Investitionsrisiko, während die erzielbare Rendite mit 11,7 % nur knapp über dem WACC liegt. Zudem offenbart die Sensitivitätsanalyse eine erhebliche Verwundbarkeit gegenüber Abweichungen bei Auslastung, Strompreisen und Produktpreisen.

Daraus folgt, dass das Geschäftsmodell in seiner jetzigen Form für klassische Venture-Capital-Investoren nur eingeschränkt attraktiv ist. Um die Attraktivität zu steigern, müssen substanzielle Optimierungen erfolgen, insbesondere durch:

- eine Reduzierung des Inertstoffanteils im Feedstock auf unter 5 %,
- eine signifikante Senkung des Energieeinsatzes,
- die Optimierung des Katalysatorverbrauchs sowie
- die vertragliche Absicherung von Absatz- und Energiepreisen.

7.7 Investment-Readiness

Die Attraktivität eines Geschäftsmodells für Risikokapital hängt maßgeblich von seiner Skalierbarkeit, seiner Profitabilität sowie von der Robustheit gegenüber Marktschwankungen ab. Die aktualisierten Modellannahmen zeigen, dass das auf Carboliq-basierte Projekt zwar technologisch valide ist, die ökonomischen Rahmenbedingungen jedoch aktuell eine nur eingeschränkte Attraktivität für Investoren-Readiness erkennen lassen.

Für klassische Venture-Capital-Investoren ist die Rendite einer einzelnen Anlage – vergleichbar mit einer „Einzelgarage“ – im Verhältnis zu den notwendigen Renditeerwartungen zu gering. Ein Beteiligungskapitalinvestor würde sich im Wesentlichen eher an einer

Technologiefirma beteiligen, die eine Vielzahl entsprechender Anlagen errichtet und über separate Betreiberstrukturen skaliert.

Gleichzeitig ist eine erste Full-Scale-Anlage aufgrund des hohen Risikos als **First-of-its-kind-Projekt** mit einer typischen VC-Risikokurve zu bewerten. In dieser frühen Phase investieren Venture-Capital-Gesellschaften jedoch in der Regel **nicht die erforderlichen Summen** für einen solchen Investment Case.

Entsprechend ist die Finanzierung einer Erstanlage nur durch eine **deutliche Risikoübernahme der öffentlichen Hand** möglich. Dies rechtfertigt sich auch durch das **öffentliche Interesse** an nachhaltiger Wirtschaftsentwicklung und an der **ressourcenschonenden Verwertung von Abfällen**.

7.7.1 Skalierbarkeit

Im Gegensatz zu vielen klassischen Green-Tech-Modellen fehlt die Option eines risikoarmen Markteintritts über kleinere Mid-Scale-Anlage. Die Wirtschaftlichkeit setzt eine Mindestkapazität von 45.000 t/a voraus, was ein hohes Einstiegsrisiko für Investoren bedeutet. Eine modulare Skalierung ist nicht möglich, sodass der Kapitalbedarf bereits beim Markteintritt erheblich ist. Dies widerspricht dem typischen Investitionsprofil von Venture Capital, das auf schrittweise Wachstumsfinanzierung abzielt.

7.7.2 Technologierisiken

Das carboliq-Verfahren ist mit TRL 8 technisch weit entwickelt und in Pilotanlagen umfassend erprobt (Biessey, Vogel, Seitz, & Quicker, 2023). Die technologischen Risiken sind daher im Vergleich zu alternativen chemischen Recyclingverfahren gering. Allerdings verschärfen die aktuellen Inputqualitäten vom Ersatzbrennstoff (EBS++) die Situation: Zwar konnten klare Verbesserungen im Gesamtprojekt der Ersatzbrennstoff-Qualität erreicht werden, dennoch ist ein Inertstoffanteil von derzeit ca. 8 % zwar technisch handhabbar, limitiert jedoch die Effizienz und Profitabilität erheblich. Ohne eine Verbesserung der Vorbehandlung auf Werte < 5 % wird die Technologie langfristig keine attraktive Rendite erzielen.

7.7.3 Markt- und Kundenrisiken

Auf der Nachfrageseite bestehen grundsätzlich günstige Rahmenbedingungen, da die Chemie- und Kunststoffindustrie einem zunehmenden regulatorischen Druck unterliegt, ihren Rohstoffeinsatz auf nachhaltige Alternativen umzustellen. Zusätzlich belasten die steigenden CO₂-Kosten im Rahmen des EU-Emissionshandels (ETS) fossile Rohstoffe zunehmend, während die EU-Taxonomie und ESG-Reportingpflichten Unternehmen dazu verpflichten, ihre Investitionen an Nachhaltigkeitskriterien auszurichten. Dennoch zeigen die Sensitivitätsanalysen, dass das Geschäftsmodell extrem abhängig von stabilen Absatzpreisen ist: Ein Rückgang um lediglich 9 % reduziert die IRR auf null. Abnahmeverträge mit Mindestpreisgarantien sind daher unerlässlich, um das Risiko zu begrenzen.

7.7.4 Renditepotenzial

Mit einer IRR von 11,7 % liegt das Projekt nur knapp oberhalb des gewichteten Kapitalkostensatzes (WACC: 9,9 %). Für Venture-Capital-Investoren, die typischerweise zweistellige Renditen pro Jahr und deutlich oberhalb von 20 % erwarten, ist dies nicht ausreichend attraktiv. Selbst unter Best-Case-Bedingungen bleibt das Potenzial begrenzt, da die hohe Kapitalintensität und fehlende Flexibilität das Risiko-Rendite-Profil verschlechtern.

7.7.5 Finanzierungsbedarf und Investitionsvolumen

Der Kapitalbedarf beläuft sich auf rund 52,4 Mio. € für eine Produktionsanlage, wovon mindestens 15 Mio. € als Eigenkapital aus Sicht der finanzierenden Banken benötigt werden. Dieser hohe Einstiegskapitalbedarf stellt eine erhebliche Hürde für Venture-Capital-Investoren dar. Eine Finanzierung erscheint eher im Rahmen von strategischen Investoren (Chemiekonzerne, Energieunternehmen) oder über öffentlich-private Finanzierungsmodelle realistisch.

7.7.6 Exit-Optionen

Grundsätzlich bestehen Exit-Pfade über strategische Käufer, insbesondere aus der Chemie- und Energiebranche, die Zugang zu recyceltem Rohstoff suchen. Sobald die Anlage einen stabilen Cashflow über mehrere Jahre nachweisen, ist es möglich, dass Private-Equity-Fonds einsteigen. Für unseren Business Case nicht relevant.

7.7.7 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das vorliegende Business Model unter den aktuellen Rahmenbedingungen keine Venture-Capital-Readiness im engeren Sinne aufweist. Die notwendige Anlagengröße von 45.000 t/a, die nur moderate Rendite von 11,7 % sowie die hohe Sensitivität gegenüber Inputqualität, Auslastung und Energiepreisen machen das Projekt für klassische VC-Investoren wenig attraktiv. Realistische Finanzierungspfade liegen daher eher in der Kombination aus strategischen Partnern, Fördermitteln und langfristigen Kreditfinanzierungen als in einer klassischen VC-Beteiligung.

7.8 Risiken und Mitigation

Die Risikoanalyse bildet einen entscheidenden Bestandteil der Bewertung des Geschäftsmodells. Während technologische Risiken aufgrund des hohen Reifegrades des Verfahrens begrenzt sind, zeigen die ökonomischen Modellierungen, dass insbesondere die wirtschaftliche Fragilität erhebliche Herausforderungen birgt. Im Folgenden werden die zentralen Risikokategorien sowie mögliche Maßnahmen zur Risikominderung dargestellt.

7.8.1 Technische Risiken

Das carbolig-Verfahren wurde in Pilotanlagen umfassend erprobt und erreicht mit TRL 8 einen hohen technologischen Reifegrad. Technische Restrisiken bestehen jedoch im Hinblick auf die Qualität des Einsatzstoffs, hier EBS++. Ein Inertstoffanteil von über 5 % reduziert die Effizienz und Ausbeute signifikant. Der aktuell vorliegende Wert von rund 8 % ist zwar technisch beherrschbar, gefährdet aber die langfristige Profitabilität. Mitigation: Weitere Verbesserung der Abfallvorbehandlung in der Sortieranlage sind zwingend erforderlich, um den Inertstoffanteil auf < 5 % zu senken. Parallel sollte ein kontinuierliches Monitoring der Inputqualität etabliert werden, um Prozessstörungen frühzeitig zu erkennen und gegenzusteuern.

7.8.2 Wirtschaftliche Risiken

Die ökonomischen Risiken sind die kritischsten Faktoren für den Projekterfolg. Das Modell zeigt eine hohe Abhängigkeit von wenigen Parametern:

- Anlagenauslastung: Bereits bei 95 % Auslastung ist kein positiver Kapitalwert (NPV) mehr erzielbar. Das Geschäftsmodell erfordert somit eine dauerhafte Vollauslastung – ein erhebliches operatives Risiko.
- Strompreise: es besteht eine hohe Sensitivität
- Produktpreise: auch der Absatzpreis für CLR ist sehr sensitiv. Damit ist die Profitabilität stark an die Entwicklung der Öl- und Naphthapreise gekoppelt.

Mitigation: Langfristige Energiebezugsverträge (PPAs) und Hedging-Strategien können die Strompreisvolatilität abfedern. Auf der Absatzseite sind Abnahmeverträge mit Mindestpreisen entscheidend, um ein entsprechendes Preisniveau zu sichern. Ergänzend kann die Diversifizierung der Absatzmärkte die Abhängigkeit von einzelnen Abnehmern reduzieren.

7.8.3 Regulatorische Risiken

Die regulatorische Entwicklung ist grundsätzlich ein Treiber für chemisches Recycling, birgt jedoch auch Unsicherheiten. Noch gibt es keine einheitliche Anerkennung des chemischen Recyclings in Bezug auf die Anrechenbarkeit von CO₂ Einsparungen in allen EU-

Mitgliedsstaten.

Mitigation: Das Unternehmen sollte aktiv in politischen und branchenspezifischen Initiativen mitwirken, um die klare Anerkennung chemischen Recyclings als CO₂ mindernde Technologie voranzutreiben. Perspektivisch könnten zusätzlich CO₂ Zertifikate als Einnahmequelle erschlossen werden, wenn die regulatorische Gleichstellung erfolgt.

7.8.4 Stakeholder-Risiken

Neben technischen und ökonomischen Risiken spielen auch Stakeholder-Erwartungen eine Rolle. Kritische Stimmen von NGOs könnten das Verfahren als „Verlängerung fossiler Rohstoffnutzung“ darstellen. Zudem besteht eine potenzielle Abhängigkeit von wenigen großen Kunden.

Mitigation: Eine proaktive Kommunikation der ökologischen Vorteile (Kreislaufschließung, CO₂-Reduktion) ist entscheidend. Kooperationen mit Kommunen und Branchenpartnern erhöhen die Akzeptanz. Eine breitere Kundenbasis reduziert die Abhängigkeit von einzelnen Abnehmern.

7.8.5 Zusammenfassung

Während technologische Risiken durch den hohen Reifegrad des Carbolig-Verfahrens begrenzt sind, zeigen die Finanzmodellierungen eine erhebliche ökonomische Anfälligkeit: Schon geringe Abweichungen bei Auslastung, Energie- oder Produktpreisen können das Projekt in die Unwirtschaftlichkeit treiben. Nur durch eine Kombination aus Inputoptimierung, Kostenreduktion, kommerzieller Risikoteilung und regulatorischer Flankierung kann das Geschäftsmodell mittelfristig stabilisiert und für Investoren attraktiver gestaltet werden.

7.9 Roadmap und Implementierungsplan

Die Umsetzung des Projekts erfordert eine sorgfältig abgestufte Roadmap, die technologische, regulatorische und ökonomische Faktoren berücksichtigt. Anders als bei vielen innovativen Technologien ist ein Markteintritt über eine kleine Produktionsanlage, die skaliert werden kann, hier nicht wirtschaftlich tragfähig und möglich.

7.9.1 Projektphasen

Phase 1 – Vorbereitung (Jahr 0–1):

Detaillierte Machbarkeitsstudien, Sicherung von Fördermitteln, Standortwahl. Paralleler Beginn von Verhandlungen mit strategischen Partnern (Chemiekonzerne, Energieunternehmen) zur Risikoteilung. Weiterführende Optimierung von EBS++ als Einsatzstoff.

Phase 2 – Engineering und Finanzierung (Jahr 1–2):

Erstellung von Engineering für eine 45.000 t/a-Anlage. Festlegen der Finanzierungsstruktur (EK/ FK, öffentliche Zuschüsse). Genehmigungsverfahren mit besonderem Fokus auf emissionsrechtliche Auflagen (BImSchG).

Phase 3 – Bau und Inbetriebnahme (Jahr 2–5):

Errichtung der Anlage mit umfangreichen Investitionen. Testbetrieb mit Fokus auf Prozessstabilität.

Phase 4 – Kommerzieller Betrieb (ab Jahr 5):

Übergang in den Vollbetrieb mit 45.000 t/a Input. Fokus auf Erreichung von Volllauslastung (≥ 100 %), da bereits geringere Werte (< 95 %) die Wirtschaftlichkeit gefährden. Paralleler Abschluss langfristiger Verträge

Phase 5 – Konsolidierung (Jahr 6–10):

Optimierung des Betriebs, insbesondere Reduktion von Energieverbrauch und Katalysatoreinsatz.

7.9.2 Zeitplan

- Jahr 0–1: Vorbereitung, Fördermittel, Standort

- Jahr 1–2: Engineering, Finanzierung, Genehmigungen
- Jahr 2–5: Bau & Inbetriebnahme
- Ab Jahr 5: Kommerzieller Betrieb
- Jahr 6–10: Betriebsoptimierung, Konsolidierung, potenzielle Expansion

7.9.3 Erfolgsfaktoren in der Umsetzung

- Verbesserung der Ersatzbrennstoff-Qualität: Reduzierung des Inertstoffanteils im EBS++ auf < 5 % ist erforderlich, sollten keine kostengünstigen Entsorgenwege für den inertstoffhaltigen Reststoff gefunden werden.
- Risikoteilung mit Partnern: Beteiligung von Chemie- oder Energieunternehmen notwendig, um Investitions-Risiko abzufedern.
- Energiepreismanagement: Abschluss langfristiger Verträge und Hedging zur Stabilisierung der Stromkosten.
- Regulatorische Anerkennung: Klare Definition des chemischen Recyclings als CO₂-minderndes Verfahren, um zusätzliche Einnahmen aus Zertifikaten zu erschließen.
- Projektmanagement: Striktes Kosten- und Termincontrolling in der Bauphase, da Verzögerungen die ohnehin enge Profitabilität gefährden.

7.9.4 Zusammenfassung

Die Roadmap verdeutlicht, dass ein erfolgreicher Markteintritt nur durch ein konsequent strukturiertes Projektmanagement möglich ist, das die komplexen technischen, regulatorischen und ökonomischen Anforderungen entlang der einzelnen Phasen systematisch steuert.

7.10 Finanzmodellübersicht

Die nachfolgende Finanzmodellübersicht zeigt die detaillierte Entwicklung der Umsätze, Kosten, Cashflows sowie der Ertragskennzahlen über einen Zeitraum von zehn Jahren. Grundlage ist die Annahme einer 45.000 t/a carbolig-Anlage, deren Wirtschaftlichkeit anhand der Free Cash Flows (FCF), des Kapitalwerts (NPV) und der internen Rendite (IRR) bewertet wird.

Besonders hervorzuheben ist die Erreichung des Break-even ab Jahr 7, die stabile EBITDA-Marge von rund 25,0 % sowie eine interne Verzinsung (IRR) von 12 %. Das Modell verdeutlicht, dass sich die Investition bei stabilen Rahmenbedingungen als finanziell tragfähig erweist aber gleichzeitig fragil auf bereits kleine Veränderungen reagiert.

Jahr	-1	0	1 50%	2 70%	3 100%	4 100%	5 100%	6 100%	7 100%	8 100%	9 100%	10 100%
Umsatz		16.064.660,56 €	22.490.524,78 €	32.129.321,11 €	32.129.321,11 €	32.129.321,11 €	32.129.321,11 €	32.129.321,11 €	32.129.321,11 €	32.129.321,11 €	32.129.321,11 €	32.129.321,11 €
Materialkosten		7.683.134,61 €	10.756.388,45 €	15.366.269,22 €	15.366.269,22 €	15.366.269,22 €	15.366.269,22 €	15.366.269,22 €	15.366.269,22 €	15.366.269,22 €	15.366.269,22 €	15.366.269,22 €
Rohhertrag		8.381.525,95 €	11.734.136,32 €	16.763.051,89 €	16.763.051,89 €	16.763.051,89 €	16.763.051,89 €	16.763.051,89 €	16.763.051,89 €	16.763.051,89 €	16.763.051,89 €	16.763.051,89 €
Personalkosten		793.000,00 €	1.110.200,00 €	1.586.000,00 €	1.586.000,00 €	1.586.000,00 €	1.586.000,00 €	1.586.000,00 €	1.586.000,00 €	1.586.000,00 €	1.586.000,00 €	1.586.000,00 €
Operative Kosten		1.313.718,38 €	1.839.205,73 €	2.627.436,76 €	2.627.436,76 €	2.627.436,76 €	2.627.436,76 €	2.627.436,76 €	2.627.436,76 €	2.627.436,76 €	2.627.436,76 €	2.627.436,76 €
EBITDA		6.274.807,56 €	8.784.730,59 €	12.549.615,13 €	12.549.615,13 €	12.549.615,13 €	12.549.615,13 €	12.549.615,13 €	12.549.615,13 €	12.549.615,13 €	12.549.615,13 €	12.549.615,13 €
AfA		4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €
EBIT		1.721.397,49 €	4.231.320,52 €	7.996.205,05 €	7.996.205,05 €	7.996.205,05 €	7.996.205,05 €	7.996.205,05 €	7.996.205,05 €	7.996.205,05 €	7.996.205,05 €	7.996.205,05 €
Zinsen	-962.992,37 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €	-3.275.984,74 €
Steuern		512.976,45 €	1.260.933,51 €	2.382.869,11 €	2.382.869,11 €	2.382.869,11 €	2.382.869,11 €	2.382.869,11 €	2.382.869,11 €	2.382.869,11 €	2.382.869,11 €	2.382.869,11 €
NOPAT	-962.992,37 €	-1.041.610,80 €	2.216.269,28 €	7.103.089,41 €	7.103.089,41 €	7.103.089,41 €	7.103.089,41 €	7.103.089,41 €	7.103.089,41 €	7.103.089,41 €	7.103.089,41 €	7.103.089,41 €
AfA		4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €	4.553.410,07 €
CAPEX	-25.699.915,25 €	-25.699.915,25 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Bankkredit Tilgung	-10.699.915,25 €	-25.699.915,25 €		4.549.978,81 €	4.549.978,81 €	4.549.978,81 €	4.549.978,81 €	4.549.978,81 €	4.549.978,81 €	4.549.978,81 €	4.549.978,81 €	
Eigenkapital	15.000.000,00 €											
FCF	-27.625.899,99 €	-21.675.139,52 €	4.754.628,13 €	10.763.383,85 €	10.763.383,85 €	10.763.383,85 €	10.763.383,85 €	10.763.383,85 €	10.763.383,85 €	10.763.383,85 €	10.763.383,85 €	10.763.383,85 €
kum FCF		-49.301.039,52 €	-44.546.411,39 €	-33.783.027,54 €	-23.019.643,69 €	-12.256.259,84 €	-1.492.875,99 €	9.270.507,86 €	20.033.891,71 €	30.797.275,56 €	41.560.659,41 €	
WACC	9,9%											
NPV	4.365.512,31 €											
IRR	11,7%											
Amortisationszeit	7,2 Jahre											
Umsatzrendite		10,72%	18,81%	24,89%	24,89%	24,89%	24,89%	24,89%	24,89%	24,89%	24,89%	24,89%
EBITDA Rendite		39,06%	39,06%	39,06%	39,06%	39,06%	39,06%	39,06%	39,06%	39,06%	39,06%	39,06%

Abbildung 21: Finanzmodellübersicht für eine 45.000 t/a Anlage (Quelle: Eigene Berechnungen von KORN).

8 Zusammenfassung

In Summe konnte der technische Nachweis erbracht werden, dass mit geeigneten Sortier- und Fahrstrategien ein spezifikationsgerechtes, verflüssigbares und vermarktbare Produkt erzeugt werden konnte. Die ökonomischen Rahmenbedingungen erlauben allerdings aufgrund eines zu großen Anteils zu entsorgender Nebekomponenten zum derzeitigen Stand noch keinen wirtschaftlichen Einsatz – hierzu werden entweder deutlich größere Anlagenkapazitäten (>50.000 t/a Durchsatz mit entsprechend hohen Investsummen) oder bessere Einsatzstoffqualitäten benötigt (EBS+++). Für eine Anlagenbaugröße von ca. 10.000 t/a Flüssigprodukt ist ein Inertstoffgehalt von maximal ca. 5% notwendig. Es konnte aufgezeigt werden, dass durch geeignetes Nachsortieren des Abfallstroms mit der Technologie der Polysecure GmbH oder mit klassischen Nahinfrarot-Sortern diese ökonomischen Anforderungen erfüllt werden können, dies aber eine nachträgliche Installation in die bestehende KORN-Anlage notwendig macht – bzw. Teil einer zukünftigen Anlagenplanung werden müsste.

8.1 Sortierversuche

8.1.1 *Strang A: Sort4Circle-Technologie*

Die Sort4Circle-Technologie der Polysecure GmbH ermöglicht ein feingranulares Sortieren des Abfallstroms in über 15 verschiedene Fraktionen in einer Stufe. In einer Reihe von Nachsortier-Versuchen an EBS wurde gezeigt, dass sich im Inputmaterial noch ein signifikanter Anteil von chlor- und fluorhaltigen Kunststoffen sowie von Inertstoffen befindet, der durch eine Nachsortierung deutlich reduziert werden kann.

Zudem wurde eine beträchtliche Varianz in der Zusammensetzung des Inputstroms über die Zeit festgestellt. Sort4Circle kann dazu beitragen, diese zu nivellieren, indem die Zusammensetzung des Outputmaterials aus den einzelnen Sortierfraktionen gezielt gesteuert wurde.

Eine der größten Fraktionen im Sortiergut waren schwarze Materialien. Diese können mit konventioneller Nahinfrarot-Sortiertechnik nicht erkannt werden. Da deren Anteil teils über 30% betrug und oft aus potentiell verwertbaren Kunststoffen bestand, wurde im Projekt die Messtechnik der Mittel-Infrarot-(MIR)-Spektroskopie weiterentwickelt, um das Potential dieses Materialanteils in Zukunft heben zu können.

8.1.2 *Strang B: TBSlight-Addon*

In einem parallelen Strang wurde die Aufrüstung der Sortieranlage bei KORN mit einem sog. TBSlight-Addon geprüft, um spezifisch PA/PE-Mehrschichtfolien erkennen und als qualitativ besonders hochwertiges EBS ausschleusen zu können. Hierzu sollte die TBSlight-Technologie von Polysecure eingesetzt werden, bei der fluoreszierende Marker im Material als Sortierkriterium genutzt werden. Die Untersuchung zeigte jedoch, dass die in der Anlage eingesetzten NIR-Sorter-Modelle nicht mit der Modifikation versehen werden können.

8.1.3 *Strang C: Alternative NIR Sort-Route*

- Die Gewinnung sortenreiner Kunststoffe aus heterogenen Gewerbe- und Sperrmüllströmen ist eine zentrale Herausforderung für den Ausbau der Kreislaufwirtschaft. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der flächige Stoffstrom (2D) einer Sortieranlage eingehend untersucht, um die Abtrennung von PE-Folie, Hart-PE, PP und PMMA zu optimieren und gleichzeitig den Chloranteil (PVC) sowie den Inertstoffgehalt zu minimieren.

- Die ursprünglich geplante Durchführung von Versuchen mit markierten Kunststoffen konnte aufgrund fehlender Adaption der NIR-Systeme nicht umgesetzt werden. Stattdessen wurden die verfügbaren Ressourcen genutzt, um eine systematische Versuchsreihe mit realem Inputmaterial durchzuführen. Dabei wurden sowohl am Ballistikseparator (Variation von Neigungswinkel und Schlagfrequenz) als auch am TOMRA-NIR-Sorter (Variation von Bandgeschwindigkeit, Düsendruck und Confidence-Level) gezielte Parameterstudien durchgeführt.
- Ergänzend wurde ein Teilstrom mit einem Arjes-Zerkleinerer mit integriertem FE-Abscheider behandelt, wodurch der Metallanteil deutlich reduziert werden konnte. In einem weiteren Schritt kam ein mobiler NE-Abscheider zum Einsatz, der zusätzlich aluminiumbeschichtete Kunststoffe und andere Nichteisenmetalle entfernte. Dies führte zu einer verbesserten Detektierbarkeit im NIR und einer deutlichen Absenkung des Chloranteils in den Zielströmen.
- Die Ergebnisse zeigen, dass eine reinheitsorientierte Betriebsweise des Ballistikseparators in Kombination mit einer feinparametrierten NIR-Sortierung und ergänzender Metallabscheidung eine stabile Gewinnung sortenreiner Kunststofffraktionen aus Gewerbe- und Sperrmüll ermöglicht. Damit liefert die Arbeit praxisnahe Empfehlungen für die Optimierung bestehender Anlagen und verdeutlicht das Potenzial sensorbasierter Sortiertechnik zur Sicherung von hochwertigem Einsatzstoff (EBS) für das chemische Recycling.

8.2 Bilanzfahrt bei CARBOWEST

Das wesentliche Ziel des Tests, die optimierten Ersatzbrennstoffe (EBS++) von KORN während eines stationären Betriebs über mindestens eine Woche zu verarbeiten, den Prozess aufrecht zu erhalten und ein verkaufsfähiges Erdölersatzprodukt zu überführen konnte erfolgreich erreicht werden. In der ersten Betriebswoche mussten noch eine verbesserte Fahrstrategie aufgrund verschiedener Probleme und hoher Inertstoffgehalte entwickelt werden, weshalb insb. die Verdünnungsölverbräuche hoch sind. In der zweiten Woche konnte ein stationärer Betrieb erfolgreich durchgeführt werden – die Verdünnungsölverbräuche konnten deutlich reduziert werden. Im Vergleich zu hochkalorischem Wettbewerbsmaterial konnte ein vergleichbares CLR-Erdölersatzprodukt (Circular Liquid Resource) erzeugt werden. Es konnten aufgrund des geringeren Ausgangsbrennwertes jedoch nur vergleichsweise geringere Ausbeuten um die 50 wt.% realisiert werden, vor dem Hintergrund der Massen-, Stoff- und Energieerhaltung ist dies aber auch zwangsläufig und logisch – die Qualität des CLR ist vergleichbar hoch mit einem etwas geringeren Brennwert von im Mittel 44 MJ/Kg. Mit den neuen Fahrstrategien können in Zukunft längere Bilanzfahrten bei geringeren Purge-Öl Verbräuchen durchgeführt werden. Für eine erste Vor-Auslegung innerhalb eines Basic Engineerings sind die erzeugten Massen-, Energie- und Stoffbilanzen ausreichend (worst-case). Für eine Verbesserung der Ausbeuten sollte eine Minimierung der Inertstoffe in dem Feedstock durch eine bessere Vorsortierung (z.B. durch die Firmen Polysecure oder Steinert) ermöglicht werden. Aufgrund der nicht funktionstüchtigen Filtration während der Bilanzfahrt (kurzfristiger, nicht-schnell behebbarer Schaden vor der Bilanzfahrt), konnte keine Feststoff-Aufkonzentration im CLR-Heavy und keine batch-weise Feststoff-Abkonzentration im Reaktor durchgeführt werden, was zu hohen Verdünnungsölverbräuchen und hohen Selektivitäten hinsichtlich CLR-Heavy führten. Dies wiederum hat drei Effekte, die sich negativ auf einen Business-Case auswirken:

- *Reduzierung der CLR-Produkt-Ausbeute (Erlösverluste)*
- *Erhöhung der Entsorgungsmengen (Kosten)*
- *Verringerung der Anlagenverfügbarkeit aufgrund des Purses*

In Summe wurden die wesentlichen Punkte der Betriebsfahrt erfolgreich erfüllt:

- *Verarbeitung von 18 Tonnen verbesserten Ersatzbrennstoffes der Firma KORN*
- *Erfolgreiche Abnahme (innerhalb der Spezifikation) der produzierten Mengen an ein petrochemisches Unternehmen*
- *Stabiler und stationärer Betrieb nach 2 Tagen, insgesamt 20 Tage andauernd für die Kampagnenfahrt*
- *Konstante Produktqualität nachweisbar durch CHNO-, GC- und SimDist-Analysen*
- *Geringe mechanische Nebenströme an NE, FE-Metallen, Inertstoffen und Brüdenwasser (guter Feedstock), nur geringe Mengen zur Entsorgung*
- *Hoher Staubanteil F3, auch aufgrund nicht optimierter Siebmatten*
- *Hoher Anteil an Reststoffen – diese sollten einer weiteren Verarbeitung zugeführt oder minimiert werden*
- *Mittlere Nebenproduktmengen zur Entsorgung*
- *Hochgradig geschlossene Bilanzen*
 - *101 % Masse*
 - *94% Stoffmenge; 105% Kohlenstoff, 119% Wasserstoff, 83% Stickstoff, 68% Sauerstoff, 27% Schwefel*
- *85% Enthalpie/Energie*

8.3 Ökonomische Analyse

Die vorliegende Analyse zeigt, dass chemisches Recycling von EBS++ auf Basis des carbolig-Verfahrens ein technologisch funktionsfähiger Ansatz zur Schließung von Stoffkreisläufen ist und einen Beitrag zu den Nachhaltigkeitszielen der Industrie leisten kann. Ökonomisch erweist sich das Modell jedoch in seiner derzeitigen Ausgestaltung als nur begrenzt tragfähig.

Die hohen Investitionsanforderungen bei einer Einstiegsgröße von 45.000 t/a sowie die enge Renditemarge gegenüber den Kapitalkosten führen zu einem eingeschränkten Chancen-Risiko-Profil. Um die langfristige Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen, sind daher gezielte Optimierungen in der Rohstoffqualität, der Energieeffizienz und der Kostenstruktur erforderlich. Ebenso werden strategische Partnerschaften und kommerzielle Absicherungsmechanismen entscheidend sein, um die Finanzierbarkeit zu verbessern.

Damit lässt sich festhalten: Das chemische Recycling von optimierten Ersatzbrennstoffen (EBS++) ist ein zukunftsweisender, aber derzeit noch nicht investorenreifer Ansatz. Seine Attraktivität hängt maßgeblich davon ab, ob es gelingt, die ökonomischen Schwachstellen zu adressieren und die regulatorischen Chancen – insbesondere im Kontext von Klimazielen und CO₂-Bepreisung – konsequent zu nutzen.

9 Verwertung

Im Projekt wurden, wie beantragt, die Veröffentlichungen und sonstigen Verwertungen umgesetzt bzw. vorbereitet. Zur Kommunikation des Projekts wurden über einen reichweitenstarken Dienstleister für Technologietransfer (13.000 Kontakte mit Schwerpunkt Innovationscommunity BW) unter der Leitung von Dr. Marc König vier LinkedIn-Beiträge verfasst und das Projekt dadurch bekannt gemacht.

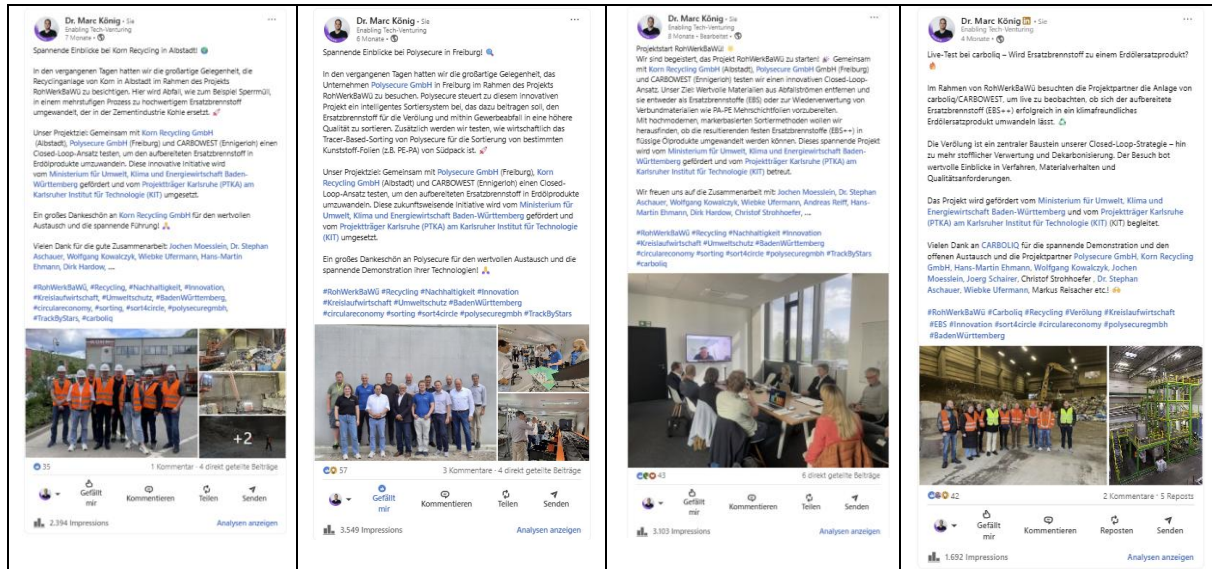


Abbildung 22: Dokumentation des Projektfortschritts und der Projekttreffen durch Dr. Marc König

Im Rahmen des Technologietransferkonzepts fand am 17. April 2024 in Karlsruhe eine Auftaktveranstaltung mit 150 Teilnehmern und Experten aus der Kreislaufwirtschaft statt. Zudem wurde das Projekt am 11. Dezember 2024 im Rahmen der Veranstaltung „Green and Energy Innovation“ in einer Expertenrunde diskutiert und einem Auditorium mit über 100 Teilnehmern vorgestellt.

Darüber hinaus wurde gemeinsam mit einer Forschungsgruppe eine Analyse der Geschäftsmodelle über die gesamte Wertschöpfungskette initiiert und eine entsprechende Veröffentlichung vorbereitet. Dabei wurde die Wertschöpfungskette, die über das Projekt initiiert werden soll, mit einem Case Study-Ansatz untersucht. Aus den Ergebnissen entstand folgende Veröffentlichung, die auf der ICE/IEEE International Technology Management Conference in Valencia durch Dr. Marc König präsentiert und mit einem Fachpublikum diskutiert wurde:

Kling, C., Schützner, F., & König, M. (2025). Balancing Profit and Purpose in Business Model Innovation: A 6C Analysis of an Emerging Circular Ecosystem. In Proceedings of the IEEE 31st International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE IEEE/ITMC 2025), Valencia, Spain, June 16–19, 2025. IEEE.

Im Zentrum des Papers steht die Untersuchung hybrider Geschäftsmodelle in der Kreislaufwirtschaft. Mit Hilfe des 6C-Frameworks werden die Zielkonflikte zwischen ökonomischen und ökologischen Zielen systematisch analysiert. Basierend auf Fallstudien aus den Bereichen Abfallwirtschaft, chemisches Recycling und Sortiertechnologie zeigt die Publikation, wie Unternehmen innerhalb eines entstehenden zirkulären Ökosystems ihre Strategien ausbalancieren, Kooperationen gestalten und neue Wertschöpfungspotenziale erschließen. Dabei werden sowohl Herausforderungen als auch Erfolgsfaktoren identifiziert, die für den Transfer in andere Branchen von Bedeutung sind.

Darauf aufbauend wurde für die Umsetzung des Technologietransfers im Rahmen der Abschlussveranstaltung mit relevanten Stakeholdern aus der Investment-Szene und von Vergleichsinnovationsprojekten Möglichkeiten der Finanzierung diskutiert. Teilnehmer waren unter anderem Verantwortliche von der L-Bank, MBG Baden-Württemberg, von INERATEC, verschiedenen VC-Gesellschaften, Privatinvestoren und Business Angels sowie Manager aus großen Industrieunternehmen.

Insgesamt nahmen an dem Workshop 30 Personen teil.

Von Seiten des Projektkonsortiums anwesend waren:

- Alexander Korn (KORN)
- Jörg Schaier (KORN)
- Hans Martin Ehmann (carboliq)
- Dr.-Ing. Stephan Aschauer (carboliq)
- Gerhard Olbert (carboliq)
- Jochen Mösslein (POLYSECURE)
- Robin Just (POLYSECURE)

Carboliq (durch Stephan Aschauer) und Polysecure (durch Jochen Mösslein) hielten jeweils einen Kurzvortrag um die spezifischen Invest-Herausforderungen und -Hürden dem Auditorium darzulegen.

Moderiert wurde dieser durch den Vorsitzenden der Business Angels Stuttgart und eine Forscherin der Universität Leipzig. Eingebettet war die Veranstaltung im Rahmen des 7. Technology Arts Evening mit mehr als 150 Teilnehmern am 09.07.2025 in Karlsruhe.

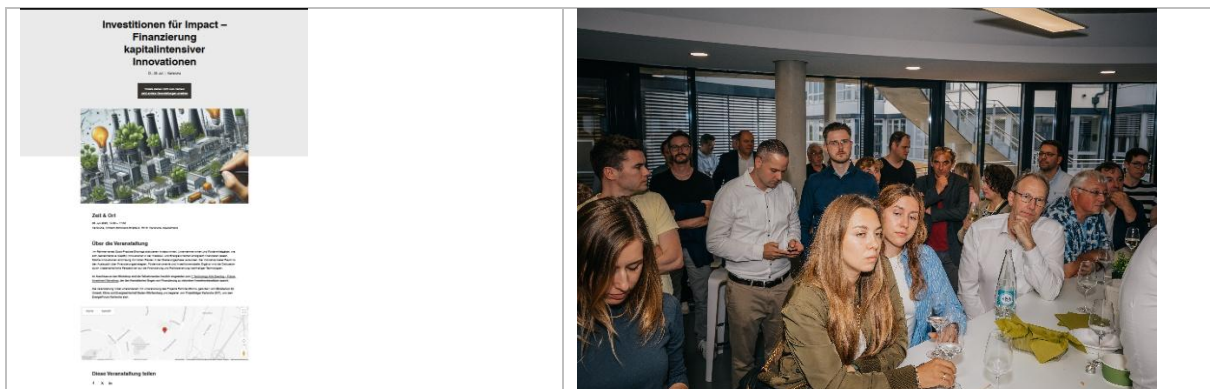


Abbildung 23: Veranstaltungshinweise und Eindrücke zum 7. Technology Arts Evening mit mehr als 150 Teilnehmern in Karlsruhe

Im Rahmen des Abschlussevents wurde ein Poster zur **Finanzierung kapitalintensiver Impact-Innovationen** entwickelt. Das folgende Poster stellt eine **erste Draft-Version aus dem Workshop** dar. Es bündelt zentrale Perspektiven zu Impact-Investments – von allgemeinen und spezifischen Investitionsanforderungen über phasenbezogene Finanzierungsmöglichkeiten bis hin zu Hemmnissen und Lösungsansätzen.

Entscheidend ist, dass die Finanzierungsmöglichkeiten über die verschiedenen Phasen des Entwicklungslebenszyklus hinweg möglichst gut **aufeinander abgestimmt** werden. Ein wesentlicher Punkt ist dabei die **kontinuierliche Entwicklung und Validierung von Technologie und Geschäftsmodell anhand prüfbarer Kriterien**, die auch in Tests überprüft werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass Investitionen aufgrund der langen Entwicklungszyklen gezielt und wirkungsvoll erfolgen.

Ebenso wichtig war, dass entlang der Schritte von **Konzeption, Simulation, Laboranlage, Prototypenbau bis hin zur industriellen Skalierung** das Risiko durch systematische Prüfungen der relevanten Kriterien Schritt für Schritt aus dem Investment Case genommen wurde.

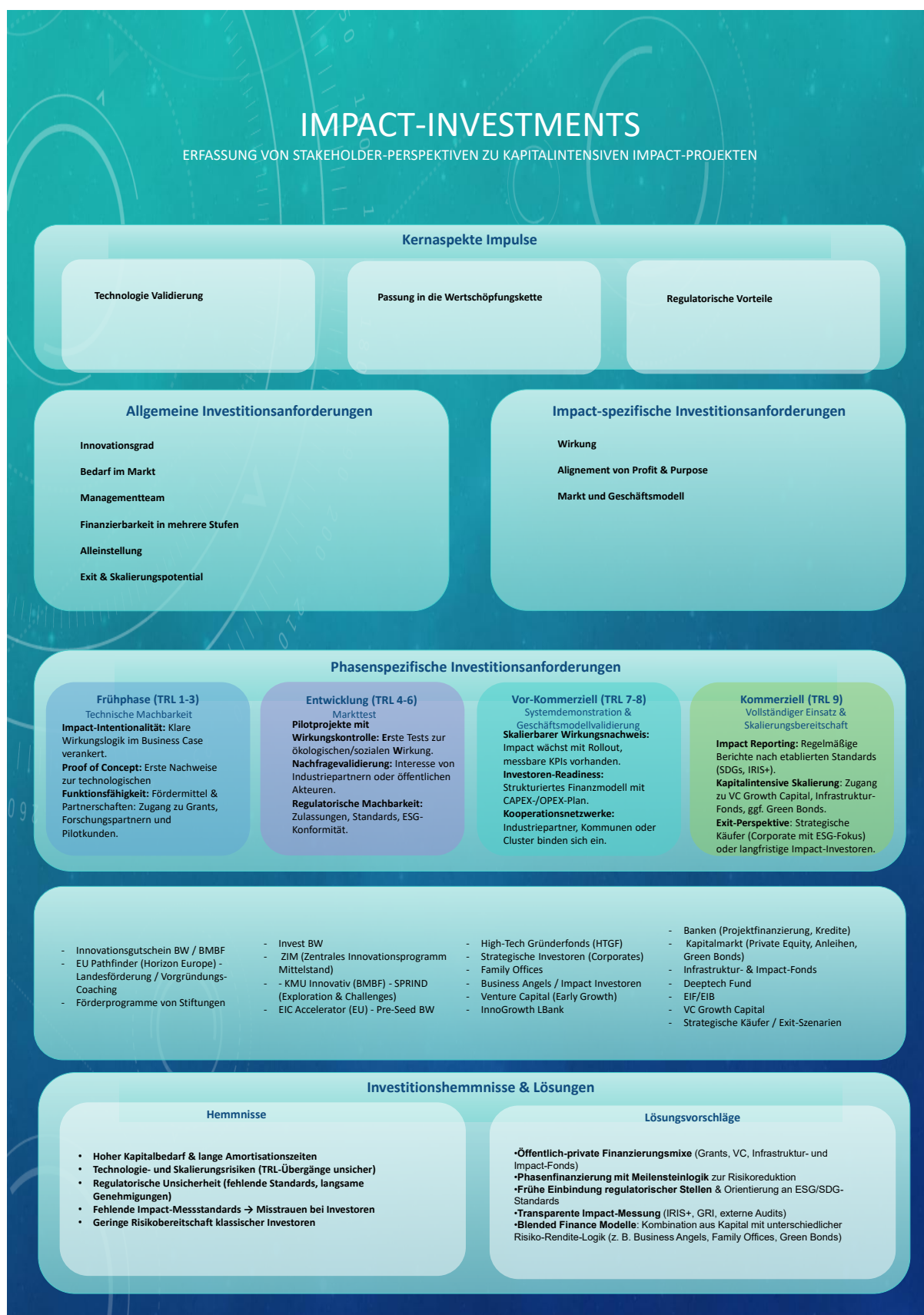


Abbildung 24: Impact-Investments - Erfassung von Stakeholder-Perspektiven zu kapitalintensiven Impact-Projekten

10 Ausblick

Nach dem erfolgreichen Projekt RohWerKBaWü ist die weitere Zusammenarbeit auf Basis der hier vorliegenden Ergebnisse zu erarbeiten.

Der (EBS)-Feedstock von KORN eignet sich grundsätzlich als Einsatzstoff für eine großtechnische kt/a Anlage, allerdings sind noch weitere wichtige Untersuchungen und Entwicklungen vor einer kommerziellen Applikation notwendig.

Die Vorteile des mittelkalorischen Feedstocks sind:

- Hohe verfügbare Mengen am Markt
- Mittelmäßiger Anteil Störstoffe (Empfehlung der Reduktion durch Nachsortieren – z.B. durch Polysecure)
- ausreichende Ausbeuten

Im nächsten Schritt müssten weitere Feedstock-Festlegungen und ein Basic Engineering durchgeführt werden. Hierzu sollte geprüft werden, welche dauerhaften Anlagenveränderungen notwendig wären und welche Nachsortiertechnologien wie z.B. Sort4Circle von Polysecure mitprojektiert werden müssten.

Außerdem besteht die Notwendigkeit einer weiteren (längeren) Bilanzfahrt (mind. 1000h) – der sogenannten 1000h-Bilanzfahrt mit dem Ziel-Material einer kommerziellen Anlage und der entwickelten Fahrstrategie um den Prozess weiter zu stabilisieren. Sollte das Ziel-Material deutlich abweichen – müssen neue Fahrstrategien vor dem 1000h Test entwickelt werden. Verfahrensgarantien können ohne erfolgreiche, störungsfreie 1000h-Bilanzfahrt nicht vergeben werden.

Herausfordernd sind neben der Entsorgung der Prozesswässer die Verwertung und Entsorgung der inertstoffhaltigen Rückstände. Hierzu sollten bestehende Entsorgungswege zu Zementwerken geprüft und Muster entsendet werden.

Es könnten und sollten weitergehende vertiefende Analysen hinsichtlich der Energieverbräuche von Energieeintragsaggregaten und notwendige Anlagenerweiterungen an der KORN-Anlage in Albstadt durchgeführt werden.

Neben dem erfolgreichen Proof-of-Concept für das EBS++ könnten weitere Fraktionen nutzbar gemacht werden, hier ist z.B. die Holzfraktion G1 zu erwähnen die einen nicht unerheblichen Anteil am Stoffstrom der Anlage in Albstadt ausmacht und die gut aus der Anlage ausgeschleußt und vermarktet werden könnten. Bei Biomasse-stämmigen (Alt)-Hölzern ist zudem ein CO₂-Benefit und Anrechnung möglich da Biomassen negative CO₂-Emissionen aufweisen und in vielen Bereichen anerkannt sind (z.B. Erzeugung von Pflanzenkohle).

Darüber hinaus könnten die identifizierten PMMA Mengen ebenfalls einem mechanischen und oder chemischen Recycling unterzogen werden.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Aufgaben und Ergebnisse

	Arbeitspakete	Aufgabenstellung	Ergebnis
AP1	Analyse der Ausgangslage und bestehender anforderungen	Analyse der Ausgangsstoffströme (Charakterisierung des vorhandenen EBS (u.a. nach chemischen und physikalischen Eigenschaften, Viskosität, Dichte, Anteil Inert, Brennwert, Chlorgehalt, Aschegehalt)	Mögliche Stoffströme wurden identifiziert und über 6 Monate beobachtet, bei CARBOWEST vermessen und verglichen – Siehe Tabelle 2 Geeignete Stoffströme wurden ausgewählt
		Analyse technischer und wirtschaftlichen Anforderungen (Evaluation möglicher Parameter, wie z.B. Durchsatzleistung, Sortier- und Recyclingkosten)	Siehe hierzu Qualitäts- (3.3.1) und Prozess-KPIs (3.3.2)
		Analyse der organisatorischen Anforderungen (Evaluation rechtlicher und organisatorischer Rahmenfaktoren)	
AP2	Entwicklung des Detailkonzepts der Sortier- und Recyclingprozesse	Abgleich der Analyseergebnisse aus 1.1. (Ist-Zustand) mit dem Anforderungsprofil (Soll-Zustand) entsprechend der CARBOWEST Spezifikation	
		Ableitung von notwendigen Prozessspezifikationen und relevanten KPIs bezüglich der Weiterentwicklung und Anwendung des Sortier- und Recyclingtechnik	Als wesentliche Parameter wurden - der Chlorgehalt (Abnahmerisiko des Produktes / Korrosion der Anlage) - Inertstoffgehalt (Abbrasion der Anlagenteile, Ausbeuteverluste, Entsorgungskosten) - Störstoffe (Eisen- und Nicht-Eisenmetalle) identifiziert
		Entwicklung und Beschreibung des Detailkonzepts der Sortier- und Recyclingprozesses unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus 2.2	
AP3	Validierung der TBS-light Technologie zur präzisen Sortierung markierter	Bereitstellung fluoreszierender Tracer und entsprechend markierter PA-PE-Verbundfolien	Ein geeigneter Tracer wurde ausgewählt und ausreichende Lagerbestände für den Großversuch sichergestellt. Es wurden Testfolien mit einer Konzentrationsserie für die Charakterisierung der Sortieranlage produziert.

	Verbundverpackungen und Validierung der SORT4CIRCLE® Technologie als alternative Lösung zur spezifischen Sortierung von Gewerbeabfall und anderen Abfallströmen unter Erzeugung eines neuen EBS++ Produktes		Die Produktion der markierten PA/PE-Folien für den Versuch wurde aufgrund der Stornierung des Versuchs nicht durchgeführt.
		Validierung der TBS-light Technologie zur Sortierung der markierten PA-PE-Verbundfolien	Der Versuch wurde in der Vorbereitungsphase abgebrochen, da sich die vorhandenen NIR-Sorter als nicht verwendbar erwiesen und keine praktikable Alternative gefunden werden konnte.
		Weiterentwicklung der SORT4CIRCLE® Demo-Sortierlinie bezüglich des mechanischen Handlings und der kombinierten Detektion des Gebewerbeabfalls	Die Detektion funktionierte trotz des stark verschmutzten Materials stabil. Holz/Holzwerkstoffe und Papier wurden als zusätzliche Sortierfraktionen hinzugefügt. Es wurden umfangreiche Daten über den Gewerbeabfallstrom gesammelt, der Algorithmus für diesen Strom verifiziert und weitere Optimierungspotentiale ermittelt.
AP4	Anwendung der entwickelten Sortierprozesse zur Erzeugung der EBS++ und PA-PE-Verbundfolien Fraktion	Adaption der Sortierprozesses bei KORN entsprechend der Ergebnisse aus AP2	
		Integration der TBS-light Technologie innerhalb der Anlage von KORN basierend auf den Ergebnissen von 3.1 zur Sortierung der markierten PA-PE-Verbundfolien	Aufgrund von technischen Randbedingungen nicht möglich
		Vorbereitung der markierten PA-PE-Verbundfolien mit realem Ausgangsstoffstrom	Aufgrund von technischen Randbedingungen nicht möglich
		Durchführung von Sortierversuchen innerhalb der Anlage von KORN zur Erzeugung der EBS++ und PA-PE Verbundfolien Fraktion (2 Bilanzfahrten)	nur teilweise möglich
		Durchführung von Sortierversuchen mit der SORT4CIRCLE® Demo-Sortierlinie basierend auf den Ergebnissen von 3.3 als alternative Lösung zur Sortierung von Gewerbeabfall und ggf. Erzeugung der EBS++ Fraktion	3 Sortierkampagnen mit EBS wurden durchgeführt und ausgewertet.
		Evaluation der Sortierversuche aus 4.3 und 4.4 (Erstellen von Massen- und Stoffstrombilanzen, Evaluation der Sortiereffizienz, Analyse der sortierten Fraktionen hinsichtlich Reinheit, Inertstoffgehalt und Brennwert, Ableitung von bestmöglichen	Zu den gefundenen Materialzusammensetzungen siehe Schaubilder in Abschnitt 4.1.6. Gemäß Laboranalyse ist das sortierte Material für die Verflüssigung gut verwendbar. Holz und Holzwerkstoffe bilden eine große Fraktion, sodass

		Weiterverwertungsmöglichkeiten (primär werkstofflich, sekundär rohstofflich)	eine separate werkstoffliche Verwertung geprüft werden kann.
AP 5	Fahren der EBS++ Fraktion von KORN bei CARBOWEST	Vorcharakterisierung des Materials im Labor-Reaktor	Material geeignet, niedrigere Temperatur zur Verarbeitung empfohlen
		Einstellung der Direkt-Verflüssigungssanlage im westfälischen Ennigerloh anhand der gewonnen Labor-Ergebnisse (Katalysator, Produkt)	Einstellung auf Basis der Labor Ergebnisse und Erfahrungen
		Vorbereitung der Kampagnenfahrt mit der Betriebsmannschaft – Minimierung von Kampagnenproblemen,	Briefing um 8 Uhr morgens während der Kampagnenfahrt
		Kampagnenfahrt von mindestens 14 Tagen, um stationäre Zustände zu erreichen,	Insgesamt 17 Tage mit ein paar Start-Schwierigkeiten
		Bilanzfahrtprotokollierung und Begleitung	Bestandsaufnahmen vor und nach der Kampagne wurden ermittelt
		a. Messungen der Einsatzstoffe vor und nach der Kampagnenfahrt	
		b. Begleitende Messungen der wesentlichen Produktparameter zur Qualitätssicherung	Messungen an ASG zur Bestimmung von Elementaranalysen, Gesamthalogenide, Total Acid Number
		c. Mitschrift der wesentlichen Anlagenparameter	Dokumentiert
		Auswertung der Kampagnenfahrt	
		a. Massen- Energie und Stoffbilanzen	Massenbilanzen wurden ermittelt und dem Konsortium zur Bewertung sowie dem Projektträger zur Dokumentation zur Verfügung gestellt
		b. Entsorgungs- und Aufarbeitungskosten von Neben- und Koppelprodukten	Wurden ermittelt, vertrauliche Informationen, wurden im vertraulichen Bericht für den Projektträger dokumentiert
		Nachweis über die Weiter-Verarbeitung in der Raffinerie / Chemieindustrie -End-Preis des Produktes,	ISCC+ und Versanddokumente wurden dem Projektträger zur Verfügung gestellt – wurden nicht veröffentlicht
		Bericht der Kampagnenfahrt und erste Wirtschaftlichkeitsrechnungen	Teile diese Berichtes, Ausführlicher Bericht liegt dem Projektträger (non-public) vor ()
		Zahlengrundlage für eine Life-Cycle-Analyse	Wurde an wiss. Partner übermittelt
AP6	Bewertung der Ergebnisse, Erstellung	Ökonomische Analyse	Siehe Kapitel 7, Seite 56ff
		Publikationen	<i>Kling, C., Schützner, F., & König, M. (2025). Balancing Profit and Purpose in Business Model Innovation: A 6C</i>

	von Publikationen und Investitionsplanung		<i>Analysis of an Emerging Circular Ecosystem. In Proceedings of the IEEE 31st International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE IEEE/ITMC 2025), Valencia, Spain, June 16–19, 2025. IEEE.</i>
--	--	--	--

Literaturverzeichnis

11 Literaturverzeichnis

- Biessey, P., Vogel, J., Seitz, M., & Quicker, P. (2023). Plastic Waste Utilization via Chemical Recycling: Approaches, Limitations, and the Challenges Ahead. (Wiley-VCH, Hrsg.) *Chemie Ingenieur Technik*, 1199 bis 1214. doi:10.1002/cite.202300042
- Brandt, F. (2004). *Brennstoffe und Verbrenungsrechnung* - ISBN 3-8027-5801-3. Essen: Vulkan Verlag.
- Weppel, J., Ufermann, W., & Aschauer, S. (11 2023). Abfallaufkommen, Verwertung und Erfassung potenzieller Einsatzstoffe für das mechanische und chemische Recycling von Kunststoffen in Deutschland. *Müll und Abfall*. doi:https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2023.11.04