



Abschlussbericht

Energieeinsparung bei der Papierproduktion durch Erschließung der Wertschöpfungsketten Altpapier aus Leichtverpackungen, Restabfall und Gewerbeabfall (EnEWA)



Abschlussbericht

„EnEWA – Energieeinsparung bei der Papierproduktion durch Erschließung der Wertschöpfungsketten Altpapier aus Leichtverpackungen, Restabfall und Gewerbeabfall“

Förderkennzeichen: 03EN2073 A-F

Laufzeit: 01.12.2021 bis 30.11.2024

03EN2073 A Teilvorhaben: Ökonomische Bewertung der Prozesskette zur Erschließung der Senken für die Gewinnung von Papier als sekundärem Rohstoff – Universität Siegen, Lehrstuhl für International Production Engineering and Management

03EN2073 B Teilvorhaben: Stoffliche Analyse des Wertstoffpotentials der Senken Restabfall, Gewerbeabfall und Leichtverpackung hinsichtlich der sekundären Ressource 'Papier', ökologische Bewertung der Prozesskette – RWTH Aachen, Lehrstuhl für Anthropogene Stoffkreisläufe

03EN2073 C Teilvorhaben: Konzeption, Entwicklung und Validierung eines Prozessdesigns für die Gewinnung eines verwertbaren Papierprodukts aus den Senken Restabfall, Gewerbeabfall und Leichtverpackungen – STADLER Anlagenbau GmbH

03EN2073 D Teilvorhaben: Konzeption, Entwicklung und Validierung der nasschemischen Aufbereitung und Hygienisierung der erzeugten Papierprodukte – PROPAKMA GmbH

03EN2073 E Teilvorhaben: Proof-of-concept für die Papierbranche zur Feasibility des Sortier- und neuen Aufbereitungsprozesses – LEIPA Group

03EN2073 F Teilvorhaben: Proof-of-concept für die Sortierung verwertbarer und werthaltiger Papiersorten aus gemischten Abfällen– Tomra Feedstock GmbH

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Burggräf, Peter; Greiff, Kathrin; Huesmann, Robin; Kaufeld, Sebastian; Köhler, Hannah; Krolle, Arne; Küppers, Bastian; Lambertz, Oliver; Ludes, Annika; Raulf, Karoline; Sauer, René; Spies, Alena Maria; Wigger, Marius; Winter, Jens

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

In diesem Dokument wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit verallgemeinernd das generische Maskulinum verwendet. Diese Formulierungen umfassen gleichermaßen weibliche und männliche Personen; alle sind damit selbstverständlich gleichberechtigt angesprochen. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten somit gleichermaßen für alle Geschlechter.

Kreuztal, den 26.05.2025

Schlussbericht Teil I - EnEWA

Konsortialführer: Universität Siegen, IPEM-Lehrstuhl	Förderkennzeichen: 03EN2073A
Vorhabenbezeichnung: EnEWA - Energieeinsparung bei der Papierproduktion durch Erschließung der Wertschöpfungsketten Altpapier aus Leichtverpackungen, Restabfall und Gewerbeabfall	
Laufzeit des Vorhabens von: 01.12.2021	bis: 30.11.2024
Berichtszeitraum: 01.12.2021	bis: 30.11.2024

Aufgabenstellung:

Fasern aus Altpapier stellen als Sekundärrohstoff eine wichtige Basis für die Papierproduktion dar. Dennoch gelangen derzeit noch rund 20 % des produzierten Papiers nicht zurück in den Altpapierkreislauf und können somit nicht stofflich verwertet werden. Um diesen Verlustanteil, den Primärenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen weiter senken zu können, ist es daher erforderlich, Aufbereitungsprozesse für Altpapier aus gemischten Abfallströmen, wie beispielsweise Leichtverpackungen (LVP), Restabfällen (RA) und Gewerbeabfällen (GA), zu entwickeln.

Das Forschungsvorhaben EnEWA entwickelte hierzu in sieben Arbeitspaketen (AP) ein Recyclingverfahren, in dem Papier, Pappe, Kartonagen und Papierverbunde aus gemischten Abfallsammlungen zu hochwertigen Papierprodukten recycelt werden können. Dazu wird das Material in mehreren Prozessschritten behandelt, darunter trockenmechanische Sortierung, Zerkleinerung, Nassmechanische Aufbereitung und Hygienisierung, mit besonderem Augenmerk auf Papierverbunde. In großtechnischen Versuchen im industriellen Maßstab wurde der Prozess von Aufbereitung bis Kartonproduktion validiert. Zur Bewertung wurde zudem eine ökologische sowie ökonomische Bewertung über die gesamte Projektkette zur Erschließung der Wertschöpfungsketten Altpapier aus LVP und RA erstellt. Auf Basis der Projektergebnisse wurde abschließend eine Empfehlung zur Weiterentwicklung der XXXVI. Empfehlung des Bundesinstituts für Risikoabschätzung (BfR) abgegeben, um die entwickelte Lösung nach Projektabschluss in eine wirtschaftliche Nutzung überführen zu können.

Voraussetzungen sowie wissenschaftlich und technischer Stand:

Bereits in den vergangenen Jahren konnte die deutsche Papierindustrie durch eine kontinuierliche Steigerung der Altpapier-Einsatzquote und die damit verbundene Einsparung von Primärressourcen die Nachhaltigkeit der Papierproduktion steigern und große Erfolge hinsichtlich der gesetzlich angestrebten Quoten erzielen. So entspricht der Einsatz von Fasern aus Altpapier als Sekundärrohstoff in der Papierproduktion heutzutage dem Stand der Technik. Durch hohe Einsparungen an Energie und Wasser beim Einsatz der sogenannten Sekundärfasern gegenüber den Primärfasern aus Holz- oder Faserstoff ist die Nutzung der Sekundärfasern nicht nur aus ökologischer und rohstofflicher Sichtweise attraktiv, sondern darüber hinaus auch aus wirtschaftlicher Perspektive. Aus diesem Grund stellt Altpapier, bezogen auf die Masse, mit mehr als 71,4 % (DIE PAPIERINDUSTRIE e. V. 2025) den wichtigsten Rohstoff in der Papierproduktion dar. Die Sekundärfasern werden dabei maßgeblich aus getrennt erfasstem Altpapier aus der privaten und gewerblichen Sammlung sowie aus Produktionsabfällen (Verschnitt und Fehlchargen) gewonnen. Nach einer trockenmechanischen Sortierung zur Erzeugung der - üblicherweise gemäß DIN EN 643 - definierten Altpapiersorten erfolgt am Produktionsstandort einer Papierfabrik eine Nassmechanische Aufbereitung zu einem Faserbrei, der entweder ausschließlich oder mit einem Anteil an Frischfasern zur Produktion von Papier, Karton oder Pappe verwendet wird.

Die aktuelle Situation der Erfassung, Sortierung und das in den aktuell geltenden gesetzlichen Regelungen enthaltene Rezeptverbot in Form der XXXVI. Empfehlung des BfR schränkt die Quellen zur Sekundärmaterialgewinnung jedoch stark ein, weshalb das Altpapier aus Restmülltonnen, Systemverpackungen aus der Gastronomie und das über die Leichtverpackungsabfälle (gelber Sack/Tonne) eingesammelte Fasermaterial nicht als hochwertiges Sekundärmaterial in der Papierproduktion verwendet werden kann.

Schlussbericht Teil I - EnEWA

Aufgrund dieser geltenden Vorschriften stellt das Verfahren der energetischen Nutzung für die Materialien aus der gemischten Sammlung (LVP, GA, RA) den derzeit von der Industrie präferierten Weg dar. Zusätzlich geht die Verbrennung der Materialien auch mit einem hohen Ascheanteil einher, die wiederum auf Kosten des Verursachers entsorgt werden muss.

Doch das Rezeptverbot wirkt sich nicht nur auf die stoffliche Verwertung der Abfallströme, sondern auch auf die bei der Produktion von Umverpackungen verwendeten Materialien und damit auf die produzierten Papiersorten aus. Dies liegt daran, dass beim Einkauf sowie der Lagerung der Rohpapiere und bei der Erstellung der Umverpackung ein indirekter Lebensmittelkontakt in der Nutzungsphase nicht ausgeschlossen werden kann. Daher werden durch die Verpackungshersteller fast ausschließlich Rohpapiere für die Herstellung der Verpackungen geordert, die durch die Regelungen des BfR für den Lebensmittelkontakt als unbedenklich eingestuft werden. Ein Aspekt dieser Unbedenklichkeit ist, dass das verwendete Altpapier nicht aus einer Mehrkomponenten- oder Gesamtmüllfassung stammen darf. Die einzige bisherige Ausnahme der faserbasierten Verpackungen aus der Gemischtsammlung ist die faserbasierte Hauptfraktion der Flüssigkeits- bzw. Getränkekartons. Für eine spezifisch sortierte Qualität (Altpapiersorte 5.03.00 gemäß DIN EN 643) konnte die Gewinnung dieser hochwertigen Sekundärfasern in Papierfabriken durch die Implementierung spezifischer Reinigungs- und Aufbereitungsprozesse technologisch erfolgreich umgesetzt werden. Weitere qualitativ definierte Sorten gibt es bisher nicht.

Eine stoffliche Nutzung des Fasermaterials von Papier, Pappe und Kartonagen (inkl. Lamine) aus der gemischten Sammlung ist, neben den Verwendungseinschränkungen, durch die derzeit undefinierte Faserausbeute, die unklare Zusammensetzung der nicht faserbasierten Reststoffe und die unklare Faserqualität bisher wirtschaftlich höchst unattraktiv. Eine der Unwirtschaftlichkeit entgegenwirkende Anpassung des Aufbereitungsprozesses, der, neben einer Vorsortierung der Altpapierfraktion, zwingend eine Prozessstufe zur Hygienisierung enthalten muss, ist aufgrund des ungewissen Projektausgangs ohne eine unterstützende Förderung als alleinstehendes Projekt nicht realisierbar.

Ziel des Forschungsprojektes war es daher, zunächst technisch zu prüfen, welche Altpapiersorten aus den Fraktionen LVP, GA und RA für die weitere Aufbereitung erzeugt werden können. Im Anschluss wurden die nötigen Optimierungen des technischen Prozesses zur Gewinnung von Sekundärfasern aus LVP, GA und RA im Technikumsmaßstab erprobt und der nötige Prozessschritt der Hygienisierung auf die vorkonditionierten Fasern abgestimmt. Darüber hinaus konnten Sortier- und Produktionsversuche im Industriemaßstab realisiert werden. Zur Bewertung wurde eine Energie- und Treibhausgasbilanz sowie eine ökonomische Bewertung über die gesamte Projektkette zur Erschließung der Wertschöpfungsketten Altpapier aus LVP erstellt. Die Bewertung beinhaltete die Identifizierung der bestmöglichen und aktuell verfügbaren Technologien in jedem der Verfahrensschritte. Das transparente Wissen um die erwartete Energieeinsparung soll in die zukünftige Weiterentwicklung des Mindeststandards zum Verpackungsrecycling einfließen und fließt nach intensivem Austausch und mehrfacher Abstimmung mit dem BfR auch in die angestrebte Weiterentwicklung der XXXVI. Empfehlung des BfR ein. Diese beschränkt bisher eine stoffliche Verwendung dieser Abfallströme durch ein Rezeptverbot und könnte, durch die Einführung von technischen Grenzwerten oder durch die Forderung der Anwendung eines Hygienisierungsprozesses, die industrielle Realisierung von technischen Lösungen ermöglichen. Die Erschließung dieses, im Wesentlichen aus Produktverpackungen bestehenden, Altpapiers hat das Potenzial, hochwertige Sekundärfasern als Rohstoff zu liefern und damit eine Substitution von Primärfaserstoffen sowie eine Reduktion von Energie und Wasser und eine Reduzierung des Reststoffanfalls zu bewirken.

Ein entscheidender Prozess für den Einsatz von Sekundärfasern aus LVP, GA und RA in der Papierproduktion ist der Hygienisierungsprozess, der sich an die Zerfaserung anschließt. Die Aufbereitung von Altpapier zu Sekundärfasern ist meist in den Produktionsprozess von Papier integriert. Bei der Aufbereitung wird ein pumpfähiger Faserbrei erzeugt, gereinigt und anschließend meist direkt verarbeitet. Das gewählte Hygienisierungsverfahren sollte daher den Faserbrei aus bzw. schon in der Aufbereitung verarbeiten können, ohne vorher getrocknet zu werden, da dieser zusätzliche Schritt einen hohen Energieaufwand bedeutet.

Es bietet sich an, für die Hygienisierung das Verfahren der Heißdispersion im Überdruck-Verfahren

Schlussbericht Teil I - EnEWA

anzuwenden, da in der Altpapieraufbereitung vergleichbare Knet- und Scheibendisperger bereits für die Zerkleinerung von Druckfarben und anderen Störstoffen zum Einsatz kommen. Für eine Hygienisierung müssen die Disperger bei hohen Temperaturen und Überdruck betrieben werden, um die Keimbelastung zu reduzieren.

Ablauf des Vorhabens:

Das Projekt begann zunächst mit einer Stoffstromanalyse der drei oben genannten Abfallströme in AP1 und legte dadurch die Anforderungen an die nachfolgenden Sortierprozesse fest. Der Stoffstrom PPK aus LVP stellt ein unmittelbar verfügbares Materialpotenzial dar, da er bereits heute standardmäßig bei LVP-Sortieranlagen abgetrennt wird. Der Stoffstrom Restabfall ist aufgrund der enthaltenen Kontaminationen nur eingeschränkt für eine weitere Aufbereitung geeignet, da er – auch künftig – die Senke für Schadstoffe und Kontaminanten sein wird, die haushaltsnah anfallen und diese nicht aktiv in den Papierkreislauf eingebracht werden sollten. Die Analysen des Stoffstroms Gewerbeabfall zeigten zweierlei: Zum einen werden je nach Gewerbeabfallaufbereitung bereits PPK-Konzentrate für die weitere Aufbereitung separat erfasst, angenommen und vermarktet, zum anderen sind die Papieranteile in den gemischten Gewerbeabfälle stark schwankend und mögliche Kontaminationen nicht vorhersehbar, da sie teils restabfallähnlich zusammengesetzt sind. Für eine umfassende und ökonomisch tragbare stoffliche Verwertung ist eine Zulassung für den Einsatz im Lebensmittelbereich nach Empfehlung XXXVI des BfR notwendig. Aufgrund dessen und den unmittelbar verfügbaren Potenzialen, entschied das EnEWA Konsortium, sich auf PPK aus LVP und selektiv erfasste Gewerbeabfälle (bspw. aus Fast-Food Restaurants) zu fokussieren, da hier geringere Kontaminationen als im Restabfall bzw. restabfallähnlichen gemischten Gewerbeabfällen zu erwarten sind und das Material bereits heute unmittelbar zur Verfügung steht. Durch die technische Sortierung (AP2) wurden in Sortierversuchen im Technikumsmaßstab Altpapiersorten erzeugt, anhand derer in AP3 die notwendigen Modifikationen für den weiteren Aufbereitungsprozess ermittelt und Sekundärfasern für die Nutzung in AP4 und AP5 gewonnen wurden. In AP4 wurde die Hygienisierung des gewonnenen Fasermaterials untersucht, um eine geringe Keimbelastung sicherzustellen. In AP5 wurde die Zusammensetzung und Wiederverwertbarkeit der Rejekte untersucht. Dieses Arbeitspaket konnte erfreulich entgegen der initialen Planung bereits früher gestartet werden. Darüber hinaus wurden AP2, AP3, AP4 und AP5 entgegen der initialen Planung länger weitergeführt, um iterativ mit neuen Erkenntnissen aus anderen Arbeitspaketen die erzielten Ergebnisse noch weiter verbessern zu können. Über alle Aufbereitungsschritte hinweg wurde in AP6 eine ökonomische und ökologische Bewertung des Prozesses durchgeführt, um die Effizienz und Nachhaltigkeit der entwickelten Verfahren zu analysieren. Ziel war es, die Umweltauswirkungen wie Treibhausgasemissionen, Energie- und Wasserverbrauch sowie Landnutzung zu bewerten und gleichzeitig die wirtschaftliche Attraktivität der Prozesse sowohl aus industrieller Sicht als auch aus der Perspektive der Endkunden zu untersuchen.

Projektbegleitend wurde durch wissenschaftliche Publikationen, Vorträge oder Podiumsdiskussionen und Akteursworkshops, bei denen die relevanten Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette einbezogen wurden, der Wissenstransfer sichergestellt.

Wesentliche Ergebnisse sowie Zusammenarbeit der Partner:

Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit des Konsortiums, bestehend aus den zwei universitären Einrichtungen Lehrstuhl für Anthropogene Stoffkreisläufe der RWTH Aachen und dem Lehrstuhl für International Production Engineering and Management der Universität Siegen und den vier Industrieunternehmen LEIPA Group GmbH, PROPAKMA GmbH, STADLER Anlagenbau GmbH und Tomra Feedstock GmbH konnte als Ergebnis ein Recyclingprozess für PPK aus LVP entwickelt werden. Dieser beinhaltet die trocken-mechanische Sortierung, Zerfaserung und Hygienisierung bis hin zum Einsatz der Fasern in der Papierproduktion. Der entwickelte Prozess konnte gesamtheitlich von der Sortierung bis hin zur Papierproduktion bereits in zwei realen Durchläufen erfolgreich realisiert werden. Auf Basis der Projektergebnisse konnte zudem abschließend im engen Austausch mit den relevanten Stakeholdern und öffentlichen Institutionen eine Empfehlung zur Weiterentwicklung der XXXVI. Empfehlung an das Bundesinstituts für Risikoabschätzung abgegeben werden, um die

Schlussbericht Teil I - EnEWA

entwickelte Lösung nach Projektabschluss in eine wirtschaftliche Nutzung überführen zu können.

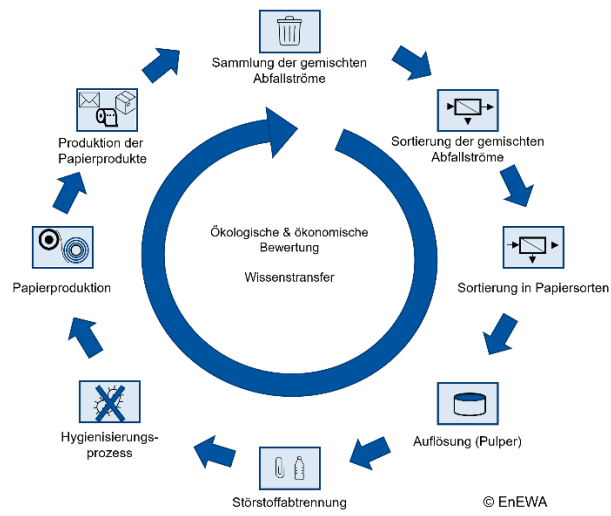


Abbildung 1 Entwickelter Wiederaufbereitungsprozess im Rahmen des Projektes EnEWA

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation und Ziel	7
1.1.	Ziel	8
1.2.	Projektstruktur	9
2	Erzielte Ergebnisse der Arbeitspakete	11
2.1	Arbeitspaket 1: Stoffstromanalysen.....	11
2.1.1	Methodische Vorgehensweise.....	11
2.1.2	Ergebnisse und Diskussion	15
2.2	Arbeitspaket 2: Technische Sortierung	22
2.2.1	Methodische Vorgehensweise.....	22
2.2.2	Ergebnisse und Diskussion	26
2.3	Arbeitspaket 3: Adaptierung Aufbereitungsprozess (Zerfaserung)	27
2.3.1	Grundlagen der Zerfaserungstechnologie	27
2.3.2	Methode der Zerfaserungsversuche (VOITH Heidenheim, Kavitationspulper)	28
2.3.3	Ergebnisse der Zerfaserungsversuche Technikum VOITH Heidenheim	31
2.3.4	Faserqualität und Prozesswasser.....	33
2.3.5	Bewertung der Faserqualität	34
2.3.6	Ausblick.....	35
2.4	Arbeitspaket 4: Hygienisierung	36
2.4.1	Methode und mikrobiologische Untersuchungen im VOITH Technikum, Heidenheim	36
	Methode und mikrobiologische Untersuchungen des 24h-Versuchs (LEIPA, Schrobenhausen).....	37
2.4.2	Kontaminanten bei den Technikumsversuchen bei VOITH und beim 24h Produktionsversuch in Schrobenhausen (LEIPA)	39
2.4.3	Zusammenfassung und Ausblick.....	42
2.5	Arbeitspaket 5: Reststoffrecycling	44
2.5.1	Methodische Vorgehensweise und Ergebnisse	44
2.5.2	Ausblick.....	55
2.6	Arbeitspaket 6: Ökonomische und ökologische Bewertung	56
2.6.1	Methodische Vorgehensweise und Ergebnisse der ökologischen Bewertung	56
2.6.2	Methodische Vorgehensweise und Ergebnisse der ökonomischen Bewertung	65
2.6.3	Zusammenfassung AP6	72
2.7	Arbeitspaket 7: Wissenstransfer	74
2.7.1	Methodische Vorgehensweise und Ergebnisse	74
2.7.2	Ergebnisse und Ausblick	86
2.7.3	Verwertungsmöglichkeiten	86
2.7.4	Angabe des voraussichtlichen Nutzens - Energieeinsparung	87
3	Veröffentlichung der Ergebnisse.....	88
4	Literaturverzeichnis	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbereitungsprozess im Projekt EnEWA	8
Abbildung 2: Aufbau der Projektstruktur anhand der Arbeitspakete	9
Abbildung 3: Beispielhaft sortierte Fraktionen des in EnEWA genutzter Sortierkatalogs	16
Abbildung 4: PPK-Anteile im Stoffstrom LVP ermittelt durch zwei Bilanzen der LVP-Sortieranlage Erfstadt	16
Abbildung 5: Wassergehalte der PPK-Proben aus LVP (PPK-Produktstrom verschiedener LVP-Sortieranlagen)	17
Abbildung 6: Zusammensetzung der PPK-Proben aus LVP (PPK-Produktstrom verschiedener LVP-Sortieranlagen)	17
Abbildung 7: PPK- und PPK-Verbund-Anteile im Stoffstrom Gewerbeabfall	18
Abbildung 8: Wassergehalte der PPK-Proben aus Gewerbeabfall (AVG-Proben stammen aus mechanisch ausgetragem Strom einer Gewerbeabfallsortierung)	18
Abbildung 9: Zusammensetzung der PPK-Proben aus Gewerbeabfall (AVG-Proben stammen aus mechanisch ausgetragem Strom einer Gewerbeabfallsortierung)	19
Abbildung 10: PPK- und PPK-Verbund-Anteile im Stoffstrom Restabfall	19
Abbildung 11: Wassergehalte der PPK-Proben aus Restabfall (Lahnstein-Proben stammen aus mechanisch ausgetragem Strom einer Restabfalltestsortierung)	20
Abbildung 12: Zusammensetzung der PPK-Proben aus Restabfall (Lahnstein-Proben stammen aus mechanisch ausgetragem Strom einer Restabfalltestsortierung, Zusammensetzung der Lahnstein-Proben bezieht sich auf Trockensubstanz)	20
Abbildung 13: Übersicht der Sortierversuche	23
Abbildung 14: Versuchsaufbau im Technikum der STADLER d.o.o. Krsko sowie untersuchte Parameter und aufgenommene NIR-Spektren	23
Abbildung 15: Beispielsortierkonzept	25
Abbildung 16: Getestete Zerfaserungssysteme bei der Firma VOITH in Heidenheim	30
Abbildung 17: Rohstoffe zum Einsatz beim den Zerfaserungsversuchen	30
Abbildung 18: Systemskizze Technikumsanlage VOITH	31
Abbildung 19: Vergleich der Zerfaserungssysteme im VOITH Technikum (V2)	32
Abbildung 20: Zerfaserung in einer kleinindustriellen Anlage mit Kavitation PPK aus LVP (ähnlich V2)	33
Abbildung 21: Probenblätter aus dem Pulp der Zerfaserungsaggregate HC, LC und ZT vor der Sortierung	33
Abbildung 22: Vergleich von Fasereigenschaften in den Versuchen bei VOITH	34
Abbildung 23: Reduktion der Keimbelastung durch Heißdispergierung (Material V2)	37
Abbildung 24: Abbildung Entwicklung von pH-Wert und Redox in der Stoffaufbereitung im Kavitationspulper	39
Abbildung 25: Bestimmte flüchtige Kontaminanten	40
Abbildung 26: Flüchtige Kontaminanten über den Prozessverlauf im VOITH Technikum Heidenheim	40

Abbildung 27: Entwicklung der Gesamtkonzentration an flüchtigen Kontaminanten über den 24h-Produktionsversuch	41
Abbildung 28: Entwicklung von MOSH/MOAH im Versuch VOITH	41
Abbildung 29: Faserreiches (links) und faserarmes Probenmaterial für die Brennstoffanalytik	45
Abbildung 30: Schematischer Aufbau des Paddelwellenreaktors zur kontinuierlichen Pyrolyse der Papierrejekte	47
Abbildung 31: Foto des Paddelwellenreaktors und des Messaufbaus zur Kondensatprobenahme	48
Abbildung 32: Verblockung der Messerschieber am Zugabetrichter des Paddelwellenreaktors durch eine stehende Materialsäule faserarmer Papierrejekte, links: Foto des Schließensors, rechts: Foto des Zugabetrichters	49
Abbildung 33: Fotos des verblockten Partikelfilters und der Kondensatprobenahme im Teilstrom	50
Abbildung 34: Immediat- und Elementaranalytik der untersuchten Input-Fractionen (Bezug analysenfeucht).....	51
Abbildung 35: Ergebnisse der Thermogravimetrie der untersuchten Materialien in inerter Atmosphäre.....	52
Abbildung 36: Reaktortemperaturen und -druck während des Einsatzes faserreicher Papierrejekte (Material-zugabe von 13:04-16:09).....	53
Abbildung 37: Permanentgaszusammensetzung (trocken) während des Einsatzes faserreicher Papierrejekte (Unterbrechung 14:05-14:50 Uhr)	54
Abbildung 38: Fotos des Karbonisats (links) und Kondensats des Pilotversuchs mit dem faserreichen Rejekt	54
Abbildung 39: Immediat- und Elementaranalytik des Karbonisats (Bezugszustand analysenfeucht).....	55
Abbildung 40: Systemgrenze für den Vergleich der Verwertungswege von PPK aus LVP	57
Abbildung 41: Systemgrenze für den Produktvergleich.....	58
Abbildung 42: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Treibhausgasemissionen	59
Abbildung 43: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Kumulierter Energieaufwand	60
Abbildung 44: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Wasserverbrauch	60
Abbildung 45: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Landnutzung	61
Abbildung 46: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse – Indikatoren GWP, CED, LOP und WCP.....	61
Abbildung 47: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Treibhausgaspotential	64
Abbildung 48: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Kumulierter Energieaufwand	64
Abbildung 49: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Wasserverbrauch	65
Abbildung 50: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Landnutzung	65
Abbildung 51: Erhebung der Kosten für die ökonomische Bilanzierung	66
Abbildung 52: Nutzungshäufigkeit	68
Abbildung 53: Präferenz Recyclingpapierverwendung.....	68
Abbildung 54: Entscheidungskriterien.....	70
Abbildung 55: Gütesiegel zur Entscheidungsfindung	70

Abbildung 56: Akzeptanz von Recyclingpapier aus alternativen Quellen	71
Abbildung 57: Präferenz Recyclingpapierverwendung.....	72
Abbildung 58: Ergebnis des 1. Akteursworkshops – Herausforderungen und Optimierungspotenziale (1/2).....	75
Abbildung 59: Ergebnis des 1. Akteursworkshops – Herausforderungen und Optimierungspotenziale (2/2).....	75
Abbildung 60: Benötigte Vorgaben der Papierindustrie für die Entsorger.....	76
Abbildung 61: Brainstorming von Differenzierungsmerkmalen.....	76
Abbildung 62: Sammlung potenzieller Ursachen für Verbraucherfehlwürfe.....	77
Abbildung 63: Lösungsstrategien zur Reduzierung von Verbraucherfehlwürfen	77
Abbildung 64: Rejektklassifizierung (1/2).....	79
Abbildung 65: Rejektklassifizierung (2/2).....	80
Abbildung 66: Einordnung der Rejekte hinsichtlich Lösbarkeit und Störpotential	81
Abbildung 67: Klassifizierung der Hürden	82
Abbildung 68: Klassifizierung der Chancen	83
Abbildung 69: Ergebnisse zu Mehrweg-, Rezyklateinsatz- und Erfassungsquoten	84
Abbildung 70: Kundennutzen und -erwartungen beim Recycling von PPK aus LVP	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Meilensteine während der Projektlaufzeit	10
Tabelle 2: Im Projekt EnEWA entwickelter Sortierkatalog für PPK aus gemischten Abfallströmen inkl. Produktbeispiele je Sortierfraktion	12
Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Beprobungen und entnommenen Proben des PPK-Produktstroms verschiedener LVP-Sortieranlagen	14
Tabelle 4: Übersicht der durchgeführten Beprobungen und entnommenen Proben für PPK aus Gewerbeabfall	14
Tabelle 5: Übersicht der durchgeführten Beprobungen und entnommenen Proben für PPK aus Restabfall	15
Tabelle 6: Fehlwurfquoten an PPK in den analysierten gemischten Abfallströmen, das über die getrennte Altpapiersammlung hätte entsorgt werden können	21
Tabelle 7: Versuchsplanung VOITH	29
Tabelle 8: Tabelle Maschenweite Faserfraktionierung	32

Glossar

ASTM	American Society for Testing and Materials
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
CED	Cumulative Energy Demand
DSD	Duales System Deutschland GmbH
EBS	Ersatzbrennstoffwerk
FG	Frischgewicht
FSC	Forest Stewardship Council
GA	Gewerbeabfall
GWP	Global Warming Potential
HC	High Consistency
IFAT	Internationale Fachmesse für Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Rohstoffwirtschaft
LC	Low Consistency
LCA	Life Cycle Assessment
LOP	Land Occupation Potential
LVP	Leichtverpackungen
MOAH	Mineral Oil Aromatic Hydrocarbons
MOSH	Mineral Oil Saturated Hydrocarbons
NIR	Near Infrared (Nahinfrarot)
PET	Polyethylenterephthalat
PC-Agar	Plate Count Agar
PPK	Papier, Pappe, Karton
RA	Restabfall
SoC	Substances of Concern
TM	Trockenmasse
WCP	Water Consumption Potential
ZT	Zerfaserungstrommel

1 Ausgangssituation und Ziel

Bereits in den vergangenen Jahren konnte die deutsche Papierindustrie durch eine kontinuierliche Steigerung der Altpapier-Einsatzquote und die damit verbundene Einsparung von Primärressourcen die Nachhaltigkeit der Papierproduktion steigern und große Erfolge hinsichtlich der gesetzlich angestrebten Quoten erzielen. So entspricht der Einsatz von Fasern aus Altpapier als Sekundärrohstoff in der Papierproduktion heutzutage dem Stand der Technik. Durch hohe Einsparungen an Energie und Wasser beim Einsatz der sogenannten Sekundärfasern gegenüber den Primärfasern aus Holz ist die Nutzung der Sekundärfasern nicht nur aus ökonomischer und rohstofflicher Sichtweise attraktiv, sondern darüber hinaus auch aus wirtschaftlicher Perspektive. Aus diesem Grund stellt Altpapier, bezogen auf die Masse, mit mehr als 71,4 % (DIE PAPIERINDUSTRIE - Leistungsbericht PAPIER 2025 2025) den wichtigsten Rohstoff in der Papierproduktion dar. Die Sekundärfasern werden dabei maßgeblich aus getrennt erfasstem Altpapier aus der privaten und gewerblichen Sammlung sowie aus Produktionsabfällen (Verschnitt und Fehlchargen) gewonnen. Nach einer trockenmechanischen Sortierung zur Erzeugung der - üblicherweise gemäß DIN EN 643 - definierten Altpapiersorten erfolgt am Produktionsstandort einer Papierfabrik eine nassmechanische Aufbereitung zu einem Faserbrei, der entweder ausschließlich oder mit einem Anteil an Frischfasern zur Produktion von Papier, Karton oder Pappe verwendet wird.

Die aktuelle Situation der Erfassung, Sortierung und das in zahlreiche B2B-Verträge übernommene Rezeptverbot aus der Empfehlung XXXVI des Bundesinstitutes für Risikobewertung (BfR) schränkt die Quellen zur Sekundärmaterialgewinnung jedoch stark ein, weshalb das Altpapier aus Restmülltonnen, Systemverpackungen aus der Gastronomie und das über die Systeme der Leichtverpackungen (gelber Sack/Tonne) eingesammelte Fasermaterial nicht als hochwertiges Sekundärmaterial in der Papierproduktion verwendet werden kann.

Aufgrund dieser geltenden Vorschriften stellt das Verfahren der energetischen Nutzung für die Materialien aus der gemischten Sammlung (Restabfall (RA), siedlungsabfallähnlichen Gewerbeabfällen (GA) und Leichtverpackungen (LVP)) den derzeit von der Industrie, trotz des wirtschaftlich und ökonomisch geringen Nutzens, präferierten Weg dar. Jedoch geht die Verbrennung der Materialien auch mit einem hohen Ascheanteil einher, die wiederum auf Kosten des Verursachers entsorgt werden muss.

Doch das Rezeptverbot wirkt sich nicht nur auf die stoffliche Verwertung der Abfallströme, sondern auch auf die bei der Produktion von Umverpackungen verwendeten Materialien und damit auf die produzierten Papiersorten aus. Dies liegt daran, dass beim Einkauf sowie der Lagerung der Rohpapiere und bei der Erstellung der Umverpackung ein indirekter Lebensmittelkontakt in der Nutzungsphase nicht ausgeschlossen werden kann. Daher werden durch die Verpackungshersteller fast ausschließlich Rohpapiere für die Herstellung der Verpackungen geordert, die durch die Regelungen des BfR für den Lebensmittelkontakt als unbedenklich eingestuft werden. Ein Aspekt dieser Unbedenklichkeit ist, dass das verwendete Altpapier nicht aus einer Mehrkomponenten- oder Gesamtmüllfassung stammen darf. Die einzige bisherige Ausnahme der faserbasierten Verpackungen aus der Gemischtsammlung ist die faserbasierte Hauptfraktion der Flüssigkeits- bzw. Getränkekartons. Für eine spezifisch sortierte Qualität (Altpapiersorte 5.03.00 gemäß DIN EN 643) konnte die Gewinnung dieser hochwertigen Sekundärfasern in Papierfabriken durch die Implementierung spezifischer Reinigungs- und Aufbereitungsprozesse technologisch erfolgreich umgesetzt werden. Weitere qualitativ definierte Sorten gibt es bisher nicht.

1.1. Ziel

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens war es, neue Quellen für das umweltfreundliche Altpapierrecycling zu erschließen und nutzbar zu machen. Zentraler Fokus des Projekts war dabei die Untersuchung des Potenzials zur Rückgewinnung von Papierfasern aus gemischten Abfallströmen, insbesondere LVP, GA und RA, für die Papierproduktion. Papierbasierte Verpackungen, insbesondere aus der Lebensmittelindustrie, verzeichnen bereits heute einen signifikanten Marktanteil mit wachsender Tendenz. Durch die Entwicklung und Optimierung von Recyclingprozessen zur Rückgewinnung der Fasern aus diesen Verpackungsabfällen kann deren Akzeptanz sowohl bei Produzenten als auch bei Konsumenten weiter gesteigert werden, was langfristig zu einem vermehrten Einsatz dieser Verpackungslösungen führen könnte. Die aktuelle Situation der Erfassung, Sortierung und das in den aktuell geltenden gesetzlichen Regelungen enthaltene Rezeptverbot in Form der XXXVI. Empfehlung des BfR schränkt die Quellen zur Sekundärmaterialgewinnung jedoch ein, weshalb das Altpapier aus Restabfalltonnen, Systemverpackungen aus der Gastronomie und das über die Systeme der Leichtverpackungen (gelber Sack/Tonne) eingesammelte Fasermaterial nicht als hochwertiges Sekundärmaterial in der Papierproduktion verwendet werden kann.

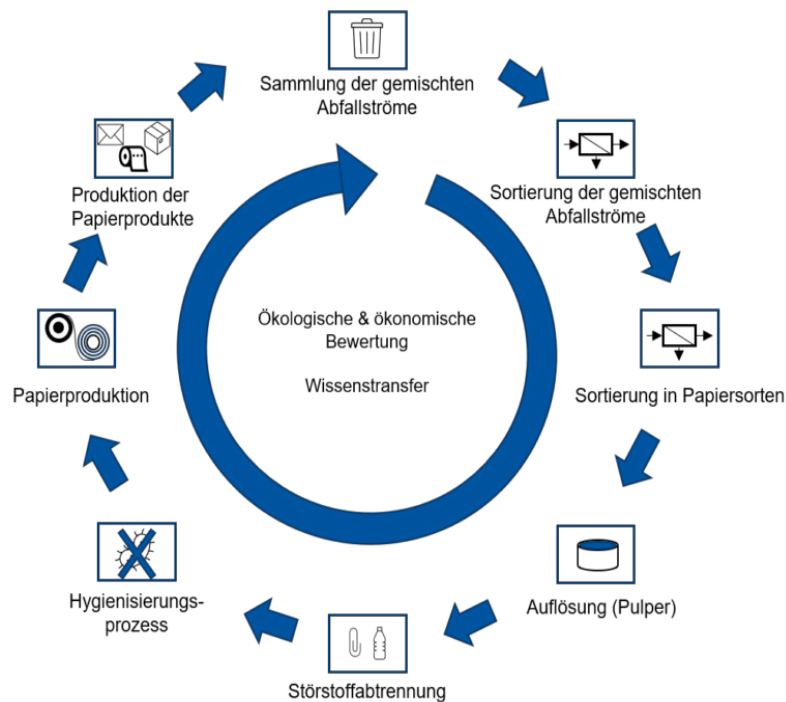


Abbildung 1: Aufbereitungsprozess im Projekt EnEWA

Zur Erreichung dieses Ziels wurde ein Aufbereitungsprozess entwickelt (siehe Abbildung 1), der die gesamte Wertschöpfungskette von der Sortierung über die Aufbereitung bis hin zur Wiederverwertung abdeckt. Nach der Sammlung der gemischten Abfallströme folgt im Prozess die trocken-mechanische Sortierung des Materials. Ziel ist die Trennung von wirtschaftlich verwertbaren Sekundärrohstoffen wie Papierfasern. Anschließend werden die gewonnenen Rohstoffe einer nass-mechanischen Aufbereitung unterzogen, die die Auflösung der Papierfasern sowie die Trennung von Laminat- und Verbundmaterialien und Fremdstoffen ermöglicht. Dadurch wird sichergestellt, dass die Recyclingfasern eine hohe Qualität aufweisen, die den Anforderungen der Papierproduktion entspricht. Die anschließende Hygienisierung des Materials reduziert mikrobiologische Belastungen und gewährleistet die Verwendbarkeit der Fasern, die anschließend in die Papierproduktion integriert werden.

Ergänzend wurde geprüft, ob die im Prozess anfallenden Laminatreststoffe, insbesondere Kunststofffolien, durch chemisches Recycling stofflich verwertet werden können, um den Materialkreislauf weiter zu schließen und die Nachhaltigkeit zu erhöhen. Begleitend erfolgte die ökonomische und ökologische Bilanzierung zur Analyse von Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch, Landnutzung, Wasserverbrauch und Wirtschaftlichkeit. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Wissenstransfers wissenschaftliche Publikationen und Vorträge veröffentlicht sowie Podiumsdiskussionen und Stakeholder-Workshops durchgeführt. Dabei wurden relevante Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette eingebunden. Durch den Wissenstransfer wurden die gewonnenen Erkenntnisse nicht nur der Fachwelt zugänglich gemacht, sondern auch praxisnah vermittelt, um die Umsetzung der entwickelten Ansätze in der Wirtschaft zu fördern und einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft zu leisten. Zudem ist das erworbene Wissen in die angestrebte Weiterentwicklung der XXXVI. Empfehlung des BfR eingeflossen.

1.2. Projektstruktur

Die Umsetzung des Forschungsvorhabens erfolgte in sieben Arbeitspaketen (AP, siehe Abbildung 2). Das Projekt zeichnete sich durch eine agile Vorgehensweise und viele schnelle Iterationsschritte zwischen den einzelnen AP aus. Durch diese agile und iterative Vorgehensweise kam es zu einer hohen Parallelisierung von einzelnen AP, da im Prozess gewonnene neue Erkenntnisse über die gesamten AP zurückgegeben und anschließend eingearbeitet wurden.

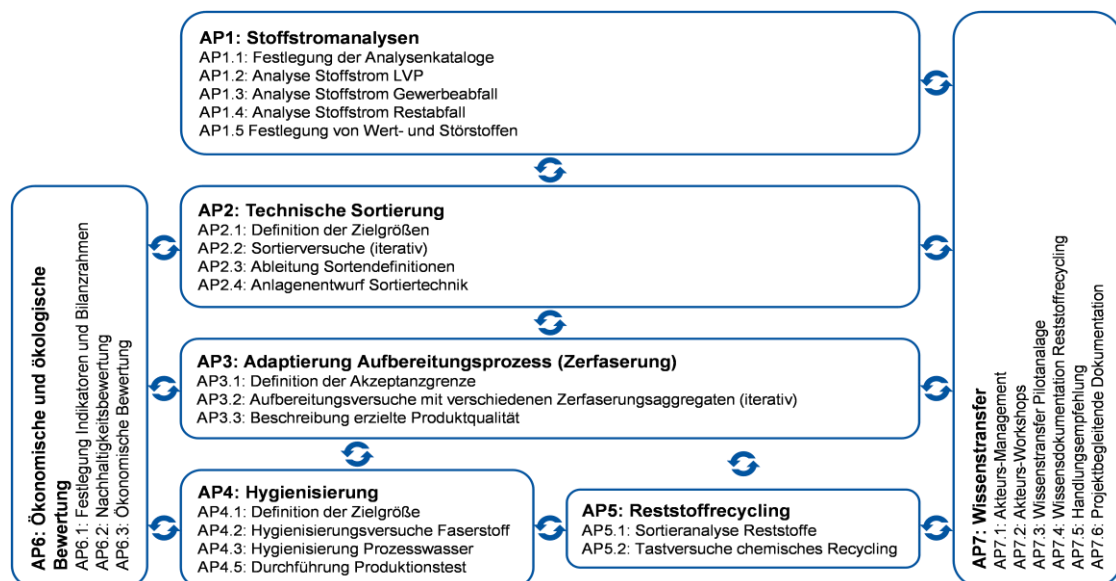


Abbildung 2: Aufbau der Projektstruktur anhand der Arbeitspakete

Die zeitliche Bearbeitung der einzelnen Arbeits- und Teilpakete erfolgte entlang sieben definierter Meilensteine (Tabelle 1), wobei alle sieben Meilensteine und die zugehörigen Zwischenziele erfolgreich im Projektkonsortium erreicht werden konnten:

Tabelle 1: Übersicht über die Meilensteine während der Projektlaufzeit

Meilen- stein	Ergebnis
1	Bewertungskatalog für Inputfraktionen
2	Definition der erzeugbaren Altpapiersorten
3	Definition der erzielbaren Zerfaserungsqualität
4	Produktionsversuch erfolgreich durchgeführt
5	Tastversuche zum Recycling der Rejekte erfolgreich durchgeführt
6	Ökologische und technische-wirtschaftliche Bewertung erstellt
7	Abgabe einer Handlungsempfehlung zur Weiterentwicklung der XXVI. Empfehlung des BfR

2 Erzielte Ergebnisse der Arbeitspakete

2.1 Arbeitspaket 1: Stoffstromanalysen

In Arbeitspaket 1 (AP1), verantwortet durch ANTS, STADLER, PROPAKMA, LEIPA und TOMRA, wurden umfangreiche Untersuchungen zur stofflichen Zusammensetzung von Papierkonzentraten aus LVP-Sortieranlagen (Fraktion 550 nach DSD-Spezifikation) sowie aus Rest- und Gewerbeabfällen durchgeführt. Ziel war es, diese Stoffströme zu analysieren, die enthaltenen Wert- und Störstoffe zu bewerten und die Anforderungen an nachfolgende Sortierprozesse festzulegen. In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern LEIPA, PROPAKMA und STADLER wurden vom ANTS die relevanten Parameter für die Analyse dieser Abfallströme bestimmt, um eine effiziente und umweltgerechte Verwertung der Materialien zu gewährleisten. Es wurden folgende wissenschaftlich-technische Vorhaben umgesetzt und folgende Aktivitäten durchgeführt:

- die Beprobung der drei gemischten Abfallströme LVP, RA und GA,
- die Entwicklung eines Sortierkataloges, der die PPK-Fraktionen in verschiedene Qualitäten unterteilt,
- die Beschreibung der im Abfall enthaltenen Papierqualitäten und die Definition von verwertbaren PPK-Anteilen,
- eine umfassende Materialcharakterisierung und Stoffstromanalyse der drei Abfallströme hinsichtlich Wassergehalte sowie
- ein Anwendertreffen zur Durchführung eines inhaltlichen Kick-off-Workshops für die technische Sortierung.

Zur Materialcharakterisierung des PPK aus gemischten Abfällen fanden Probenahmen in unterschiedlichen Abfallaufbereitungsanlagen an unterschiedlichen Orten in Deutschland statt. Die meisten Anlagen wurden zur Sicherung der Repräsentanz der Ergebnisse zweimal beprobt. Dabei wurden insbesondere jahreszeitliche und siedlungsstrukturelle Schwankungen berücksichtigt. Für die Analyse sind folgende Probenahmen von Bedeutung:

- 2022, KW 3 Erfstadt (Anlagenbilanz LVP-Sortieranlage)
- 2022, KW 13 Hamburg (Beprobung LVP-Sortieranlage, Beprobung Rest- und Gewerbeabfälle aus Abfallsammelfahrzeugen)
- 2022, KW 25 Erfstadt (Anlagenbilanz LVP-Sortieranlage)
- 2022, KW 38 Hamburg (Beprobung Rest- und Gewerbeabfälle aus Abfallsammelfahrzeugen, Analyse der Papierfraktionen aus Hausmüllanalyse Hamburg)
- 2022 KW 46 Lahnstein (Testbetrieb Sortierung PPK aus Restabfall)
- 2023, KW 8 Köln (Beprobung Gewerbeabfallsortierung)
- 2023, KW 8 Erfstadt (Beprobung LVP-Sortieranlage)

2.1.1 Methodische Vorgehensweise

1. Festlegung der Analysenkataloge (AP1.1)

Im ersten Schritt wurden die Fraktionen, nach denen in den Stoffstromanalysen unterschieden werden soll, festgelegt. In Zusammenarbeit mit den Partnern LEIPA, PROPAKMA und dem ANTS wurden spezifische Fraktionen definiert, einschließlich der Zielfraktionen (Papiersorten und Verbundtypen) sowie der Störstoffe, die durch technische Sortierprozesse abgetrennt werden müssen. Alle Projektmitarbeiter, die an den händischen Analysen beteiligt waren, erhielten eine Schulung, um die Unterscheidung der Papiersorten korrekt vorzunehmen. Alle

entnommenen PPK-Proben wurden in den Technika und Laboren des ANTS untersucht. Dafür wurden die Proben anhand eines eigens entworfenen Sortierkatalogs manuell in unterschiedliche Papiersorten und Störstoffgruppen sortiert. Der Sortierkatalog basiert auf Vorversuchen des EnEWA-Projekts und ist mit den unterschiedlichen Papierqualitäten (Qualität in absteigender Reihenfolge) und entsprechenden Produktbeispielen in Tabelle 2 dargestellt. Die Unterscheidung zwischen PPK-Food (mit Lebensmittelkontakt während der Nutzung) und PPK-Non Food (ohne Lebensmittelkontakt während der Nutzung) wurde gewählt, um einen Anteil an Papier zu bestimmen, der nach DIN EN 643 eindeutig über die getrennte Altpapiersammlung hätte entsorgt werden können. Zu diesen „klassischen Fehlwürfen“ zählen grafische Papiere und PPK weiß/braun Non Food. Alle Projektmitarbeiter, die an den händischen Analysen beteiligt waren, erhielten eine Schulung, um die Unterscheidung der Papiersorten korrekt vorzunehmen.

Tabelle 2: Im Projekt EnEWA entwickelter Sortierkatalog für PPK aus gemischten Abfallströmen inkl. Produktbeispiele je Sortierfraktion

Fraktion	Definition	Produktbeispiele
Grafisches Papier	Nach Art des Einsatzes umfassen grafische Papiere Büro- und Administrationspapiere sowie Druck- und Presse-papiere (Unterteilung auch nach gestrichen und ungestrichen sowie holzstofffrei und holzstoffhaltig möglich)	Werbe-/Anzeigenblättchen, Zeitungen, Anschreiben/Briefe, beschriebenes Papier, Bücher
Weißes PPK Non Food	Weißer Papiere, Pappen und Kartonagen ohne Kontakt zu Lebensmitteln	Verkaufsverpackungen von Lebensmitteln ohne Lebensmittelkontakt (Süßigkeitenverpackungen ohne direkten Süßigkeitenkontakt), Umverpackungen, Verpackungen von sonstigen Produkten (Elektronik, Spielzeuge, Unterhaltung)
Weißes PPK Food	Weißer Papiere, Pappen und Kartonagen mit sichtbarem Kontakt zu Lebensmitteln	Verpackungen von trockenen Lebensmitteln (Haferflocken, Mehl, Salz, Gebäck), Süßigkeitenverpackungen mit direkten Süßigkeitenkontakt), Bäckertüten, Verpackungen von Tiefkühlprodukten und sonstigen Lebensmitteln
Braunes PPK Non Food	Braune Papiere, Pappen und Kartonagen ohne Kontakt zu Lebensmitteln	Verkaufsverpackungen von Lebensmitteln ohne Lebensmittelkontakt (Süßigkeitenverpackungen ohne direkten Süßigkeitenkontakt, Flaschenträger für Sixpacks), Umverpackungen, Verpackungen von sonstigen Produkten (Elektronik, Spielzeuge, Unterhaltung)
Braunes PPK Food	Braune Papiere, Pappen und Kartonagen mit sichtbarem Kontakt zu Lebensmitteln	Verpackungen von "To-Go" Lebensmitteln, Fast-Food-Verpackungen (von McDonalds und Burger King), Bäckertüten, Verpackungen von Tiefkühlprodukten und sonstigen Lebensmitteln, Faserguss (Eierkartons)
Verbunde mit PPK	Materialkombinationen aus Papier, Pappe oder Kartonagen mit einer (oder auch mehreren) papierfremden Materialkomponenten, wobei nicht unterschieden wird, ob diese trennbar oder nicht trennbar voneinander sind und welchen Anteil sie ausmachen	Lebensmittelverpackungen mit innenliegenden Folien, Kombidosen, Zigarettenschachteln, Aluverbunde
Hygienepapier	Papiere mit niedriger flächenbezogener Masse, die als Textilersatz hygienischen oder sanitären Zwecken dienen, einmaliger Gebrauch (oft auch Tissue genannt)	Toilettenpapier, Küchenrollenpapier, Handtuchpapier, Taschentuchpapier, Serviettenpapier, Gesichtstuchpapier

Störstoffe	Materialien, die keinen Papieranteil aufweisen	Folien, Kunststoffe, Metalle, Verbunde ohne PPK
------------	--	---

Die mittlere Konzentration $c_{\text{Fraktion,Mittel}}$ pro Sortierfraktion wurde mittels Formel (1) bestimmt, wobei $m_{i,\text{Fraktion}}$ das Gewicht pro Sortierfraktion und $m_{i,\text{Probe}}$ das Gesamtgewicht pro Probe darstellt. n bezeichnet die Probenanzahl. Anhand der Konzentrationen pro Probe wurden anschließend entsprechende Mittelwerte berechnet.

$$c_{\text{Fraktion,Mittel}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{m_{i,\text{Fraktion}}}{m_{i,\text{Probe}}} \quad (1)$$

Für die PPK-Fractionen wurde zudem der Wassergehalt bestimmt. Der Wassergehalt wurde von TOMRA in Abstimmung insb. mit STADLER als relevanter Parameter für die nachfolgende trockenmechanische Sortierung eingestuft. Der Wassergehalt wurde angelehnt an die DIN EN ISO 287:2017 bestimmt. Die DIN EN ISO 287:2017 beschreibt die Bestimmung des Feuchtegehaltes in einem Lieferposten aus Papier und Pappe unter Verwendung eines Wärmeschranks. Die Probe wurden in einem Wärmeschrank bei 85 °C so lange getrocknet, bis die Gewichtsdiﬀerenz zwischen zwei Wägungen unter 0,1% der Ausgangsmasse betrug. Die Zeitspanne zwischen den Wägungen lag dabei bei mindestens 24 h. Das Ausgangsgewicht stellt das Nassgewicht der Probe dar. Berechnet wird der Wassergehalt über Formel (2). ω_w stellt dabei den Wassergehalt in Massenprozent (Ma.-%) dar, während $m_0 - m_1$ den Masseverlust der Probe in Gramm entspricht. m_0 stellt das Ausgangsgewicht der Probe in Gramm dar, während m_1 die Masse der Probe nach der Trocknung beschreibt.

$$w_w = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \quad (2)$$

Der durchschnittliche Wassergehalt $\omega_{w,\text{Mittel}}$ berechnet sich über den Mittelwert aller genommenen Proben, wie in Formel (3) dargestellt.

$$w_{w,\text{Mittel}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_{w,i} \quad (3)$$

2. Analyse des Stoffstroms LVP (AP1.2)

Für die Beprobung und Analyse des PPK-Anteils an LVP wurden vier Beprobungen durchgeführt. Drei Beprobungen erfolgten in Erfstadt in KW 3 (2022), KW 25 (2022) und KW 8 (2023), sowie eine Beprobung in Hamburg in KW 13 (2022). Es wurde jeweils der aussortierte PPK-Produktstrom der LVP-Sortieranlage beprobt. Für die Versuche Erfstadt KW 3 (2022) und KW 25 (2022) wurde zusätzlich eine Anlagenbilanz zur Bestimmung des PPK-Gehaltes im Input erstellt. Die Daten der Anlagenbilanz der Versuche Erfstadt KW 3 (2022) und KW 25 (2022) wurden bereits in einer peer-reviewten Publikation (Zeitschrift: Waste Management) umfassend veröffentlicht:

Alena Maria Spies, Nils Kroell, Annika Ludes, Bastian Küppers, Karoline Raulf, Kathrin Greiff (2024). Assessing the resource potential of paper and board in lightweight packaging waste sorting plants through manual analysis and sensor-based material flow monitoring.

Bei der Beprobung wurden jeweils die in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** dargestellte Anzahl an Proben des Papierproduktstroms der LVP-Sortieranlage als repräsentative Einzelproben gezogen. Alle 60 Minuten wurde dazu aus dem PPK-Bunker eine Wanne aus dem Abwurfpunkt und eine Wanne aus dem liegenden Haufwerk mit einem Fassungsvermögen von je 90 Litern entnommen. Vor der manuellen Analyse wurden die Proben bis auf die Proben Erfstadt KW 8 (2023) alle bei 40 mm mittels eines Analysetrommelsiebs abgesiebt.

Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Beprobungen und entnommenen Proben des PPK-Produktstroms verschiedener LVP-Sortieranlagen

Ort	Zeitpunkt	Entnommene Proben
Erfstadt	KW 3 (2022)	25
Erfstadt	KW 25 (2022)	30
Erfstadt	KW 8 (2023)	2
Hamburg	KW 13 (2022)	25

3. Analyse des Stoffstroms Gewerbeabfall (AP1.3)

Für die Beprobung und Analyse des PPK-Anteils aus Gewerbeabfall wurden drei Beprobungen durchgeführt. Zwei Beprobungen fanden in Hamburg in KW 13 (2022) und KW 38 (2022) statt. Dabei wurden Abfälle aus der Hohen Straße in Hamburg (Einkaufsstraße Innenstadt, kein Holsystem für Altpapier) und gemischten Gewerbeabfällen der HEG (Tochterunternehmen der Stadtreinigung Hamburg) beprobt. Die Beprobung erfolgte aus Mengen von Abfallsammelfahrzeuge. Die Fahrzeuge wurden entleert, die Abfälle wurden mittels eines Radladers durchmischt und eine Schaufel entnommen, die anschließend über 10 Probewannen à 90 Liter je Fahrzeug entleert wurde. Diese Proben wurden anschließend auf ihren PPK- und PPK-Verbundanteil analysiert. Zusätzlich fand eine Beprobung in Köln bei der AVG in KW 8 (2023) statt. Bei den Proben aus Köln handelt es sich um PPK-Proben aus einer Gewerbeabfallsortieranlage, wobei die Gewerbeabfälle aus Köln und der Umgebung stammten. Es wurden 90 Liter Wannen direkt aus dem laufenden PPK-Produktstrom der Gewerbeabfallsortierung entnommen. Bei der Beprobung wurden jeweils die in Tabelle 4 dargestellte Anzahl an Proben als Einzelproben gezogen.

Tabelle 4: Übersicht der durchgeführten Beprobungen und entnommenen Proben für PPK aus Gewerbeabfall

Ort	Zeitpunkt	Entnommene Proben
Hamburg, Gewerbeabfallsorten	2 KW 13 (2022)	20 (10 je Abfallherkunft)
Hamburg, Gewerbeabfallsorten	2 KW 38 (2022)	20 (10 je Abfallherkunft)
Köln (PPK-Produktstrom, Gewerbeabfallsortierung)	KW 8 (2023)	10

4. Analyse des Stoffstroms Restabfall (AP1.4)

Für die Beprobung und Analyse des PPK aus Restabfall wurden drei Beprobungen durchgeführt. Zwei Beprobungen aus Abfallsammelfahrzeugen fanden in Hamburg in KW 13

(2022) und KW 38 (2022) statt. Dabei wurden je 5 Abfallsammelfahrzeuge beprobt, die drei unterschiedlichen Siedlungsstrukturen innerhalb Hamburgs zugeordnet werden konnten. Konkret stammten zwei Abfallsammelfahrzeuge je Beprobung aus dem Bereich Kerngebiet/Blockrandbebauung (höchste Einwohnerdichte), eines aus dem Bereich Mehrfamilienhäuser (mittlere Einwohnerdichte) und zwei aus dem Bereich Einzelhäuser/lockere Bebauung (geringste Einwohnerdichte). Die Abfallsammelfahrzeuge wurden entleert, das Material wurde mittels Radlader gemischt und eine Schaufel des Radladers wurde über je 10 Probewannen à 90 Liter pro Fahrzeug ausgeleert. Anschließend wurde die PPK-Fraktion inkl. PPK-Verbunde händisch aussortiert.

Zusätzlich wurden im Herbst 2022 angedockt an die in Hamburg jährlich durchgeführte Hausmüllanalyse Papierproben analysiert (siehe Tabelle 5). Die Hausmüllbeprobung wird jährlich von einem Ingenieurbüro durchgeführt. Das ANTS konnte die vorsortierten Papierproben anschließend nachsortieren. Innerhalb Hamburgs wurden vier unterschiedliche Siedlungsstrukturen berücksichtigt (zusätzlich zu den zuvor genannten noch die Struktur der „Großwohnsiedlungen“).

Tabelle 5: Übersicht der durchgeführten Beprobungen und entnommenen Proben für PPK aus Restabfall

Ort	Zeitpunkt	Entnommene Proben
Hamburg, 3 Siedlungsstrukturen	KW 13 (2022)	50 (10 je Fahrzeug)
Hamburg, 3 Siedlungsstrukturen	KW 38 (2022)	50 (10 je Fahrzeug)
Hamburg, Hausmüllanalyse, 4 Siedlungsstrukturen	KW 39 (2022)	44
Lahnstein (Testbetrieb, Restabfallsortierung, Beprobung PPK-Produktstrom)	KW 46 (2022)	2

Daneben wurde zusammen mit TOMRA ein Testversuch in Lahnstein 2022 unterstützt, bei dem Papier aus Restabfall mechanisch im Anlagenmaßstab aussortiert wurde. So wurde ein Papierproduktstrom erzeugt. Da die Aussortierung von PPK aus Restabfall bisher in Deutschland noch nicht Stand der Technik ist, stellte die Analyse eine gute Möglichkeit dar, technisch erzeugbare PPK-Fractionen aus Restabfall zu untersuchen. Der Versuch stellt allerdings aufgrund der geringen Probenanzahl nur einen Antastversuch dar. Da die Proben bereits starke Anzeichen eines biologischen Abbaus aufwiesen, wurde das Material bei diesem Versuch zunächst getrocknet und im Anschluss manuell analysiert. Bei den Beprobungen von Restabfall wurden jeweils die in Tabelle 5 dargestellte Anzahl an Proben als Einzelproben gezogen.

5. Festlegung von Wert- und Störstoffen (AP1.5)

Basierend auf den Ergebnissen der Stoffstromanalysen wurden die Wert- und Störstoffe für die jeweiligen Fraktionen festgelegt. Dies umfasst eine detaillierte Kategorisierung, die den späteren Sortierprozess und die Materialaufbereitung optimierte. Es wurden drei spezifische "Rezepte" entwickelt, die die Anforderungen für die technische Sortierung festlegen, sowie übergeordnete Kategorien, die als Grundlage für die nachfolgenden Sortier- und Produktionsprozesse dienen.

2.1.2 Ergebnisse und Diskussion

1. Festlegung der Analysenkataloge (AP1.1)

Eine Übersicht über beispielhaft anhand des Sortierkatalogs sortierte PPK-Fractionen kann aus Abbildung 3 entnommen werden. Die Ergebnisse der manuellen Analysen nach Materialstrom sind im Folgenden dargestellt.

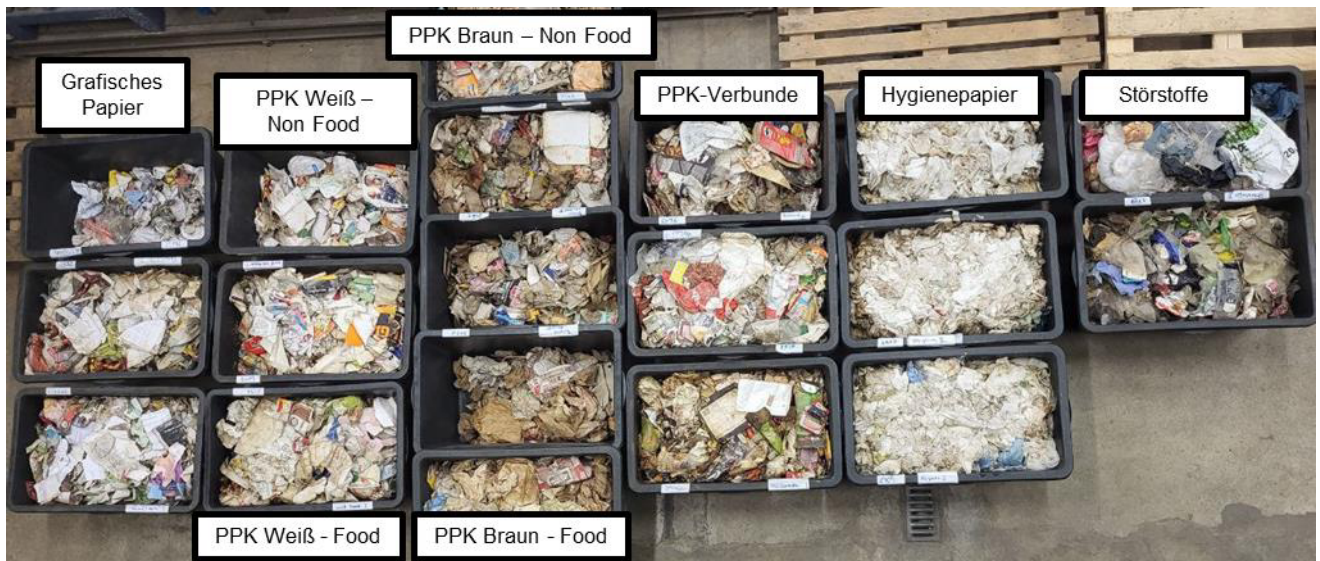


Abbildung 3: Beispielhaft sortierte Fraktionen des in EnEWA genutzter Sortierkatalogs

2. Analyse des Stoffstroms LVP (AP1.2)

Der Papieranteil im Stoffstrom LVP wurde anhand von zwei Materialbilanzen der LVP-Sortieranlage Erfstadt ermittelt. Die ermittelten Anteile sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Papieranteile im Input lagen zwischen 5,9 Ma.-% und 6,5 Ma.-%. Wichtig ist, dass diese Anteile nicht das unmittelbar technisch verfügbare Potenzial darstellen. PPK aus LVP wird in Deutschland bereits zum Großteil in LVP-Sortieranlagen als Produktstrom (Sorte 550 nach DSD-Spezifikation) aussortiert. Allerdings entstehen laut der durchgeführten Bilanzen teils erhebliche Massenverluste innerhalb der LVP-Sortieranlagen. Das aktuell direkt verfügbare, gut nutzbare Materialpotenzial für PPK aus LVP kann auf 100.000 Tonnen pro Jahr in Deutschland beziffert werden, wobei ein mittleres Wertstoffausbringen einer LVP-Sortieranlagen von 65 Ma.-% zugrunde gelegt wird.

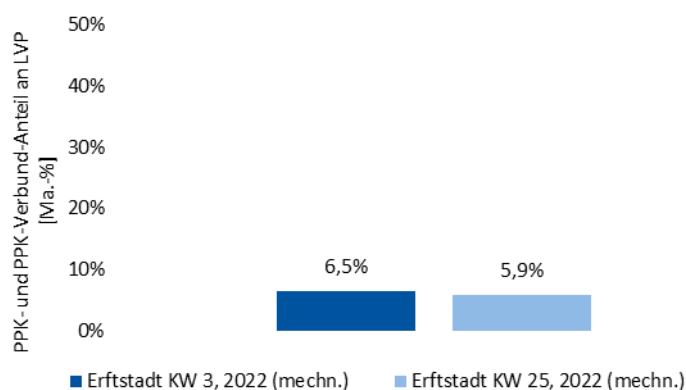


Abbildung 4: PPK-Anteile im Stoffstrom LVP ermittelt durch zwei Bilanzen der LVP-Sortieranlage Erfstadt

Die für alle Beprobungen bestimmten Wassergehalte sind in Abbildung 5 dargestellt. Alle Wassergehalte wurden im Anschluss an die manuelle Analyse bestimmt. Beim Vergleich der Werte aus Erfstadt, scheinen die Proben im Winter tendenziell einen höheren Wassergehalt

zu besitzen als im Sommer. Das Material aus Hamburg stellte im Vergleich das trockenste Material dar.

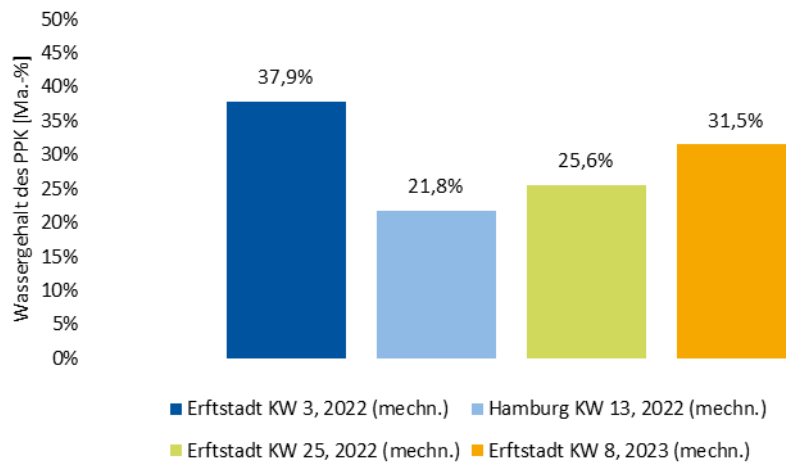


Abbildung 5: Wassergehalte der PPK-Proben aus LVP (PPK-Produktstrom verschiedener LVP-Sortieranlagen)

Die Zusammensetzung der manuell analysierten PPK aus LVP-Proben kann Abbildung 6 entnommen werden. Die Proben der Probenahme Erfstadt KW 8 wurden nicht gesiebt, weshalb kein Anteil < 40 mm angegeben ist. Die Zusammensetzung der Proben ist über alle Probenahmen hinweg verhältnismäßig konstant. In Hamburg wurde ein höherer Störstoffanteil festgestellt, was unter anderem am Aufbau der Anlage liegen kann.

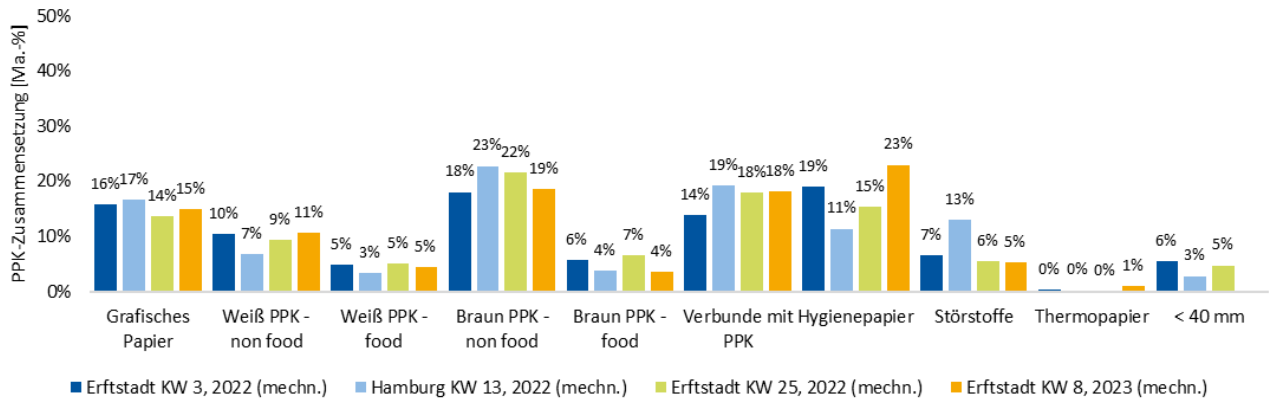


Abbildung 6: Zusammensetzung der PPK-Proben aus LVP (PPK-Produktstrom verschiedener LVP-Sortieranlagen)

3. Analyse des Stoffstroms Gewerbeabfall (AP1.3)

Der PPK- und PPK-Verbundanteil im Gewerbeabfall wurde anhand von zwei Sortierkampagnen für zwei unterschiedliche Sorten an Gewerbeabfällen bestimmt. Die Ergebnisse können Abbildung 7 entnommen werden. Die angegebenen Werte beziehen sich auf den mittleren Anteil an PPK- und PPK-Verbunden, die im gesammelten Gewerbeabfall bestimmt wurden. Für beide Gewerbeabfälle ergeben sich hohe Anteile an PPK- und PPK-Verbunden. Die Zusammensetzung von Gewerbeabfall hängt stark von der jeweiligen Herkunft ab. Gewerbeabfälle aus dem innerstädtischen Bereich weisen im Mittel bis zu 50 Ma.-% an PPK- und PPK-Verbunden auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es in diesem untersuchten Bereich Hamburgs nur ein Bringsystem für Papierabfälle gibt und Bringsysteme

im Gegensatz zu Holsystemen bekanntermaßen zu geringeren Erfassungsquoten führen. Nicht über das Bringsystem erfasstes PPK landet in den beprobten hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen. Eine Anpassung des Erfassungssystems könnte potenziell dazu beitragen, dieses PPK zurückzugewinnen.

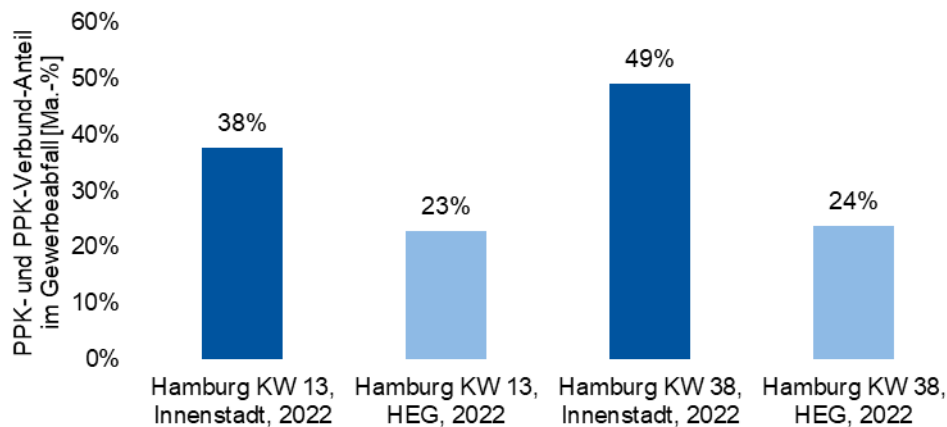


Abbildung 7: PPK- und PPK-Verbund-Anteile im Stoffstrom Gewerbeabfall

Die Wassergehalte des PPK- und der PPK-Verbunde sind in Abbildung 8 dargestellt. Bei den dargestellten Wassergehalten handelt es sich um getrocknete Einzelproben vor der manuellen Analyse. Die Proben aus dem innerstädtischen Bereich Hamburgs sowie die mechanisch ausgetragenen Proben der AVG Köln weisen relativ ähnliche Wassergehalte < 20 Ma.-% auf. Höhere Wassergehalte von > 35 Ma.-% ergeben sich für die HEG-Proben aus Hamburg. Dies ist auf den Ursprung der Proben und die Art des Gewerbes zurückzuführen.

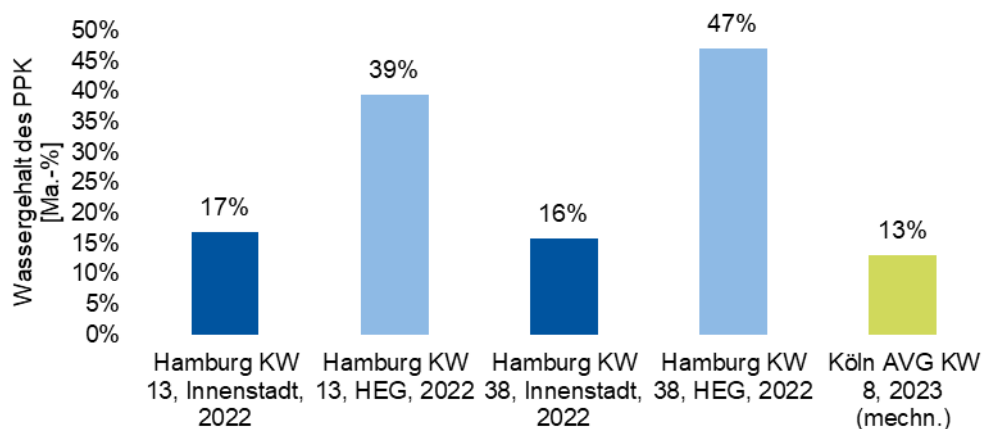


Abbildung 8: Wassergehalte der PPK-Proben aus Gewerbeabfall (AVG-Proben stammen aus mechanisch ausgetragendem Strom einer Gewerbeabfallsortierung)

Die Papierzusammensetzung der beprobten Gewerbeabfälle kann Abbildung 9 entnommen werden. Die Störstoffquote für die mechanisch aussortierten AVG-Abfälle liegt bei 11%. Die Störstoffquoten der anderen Probenahmen entsteht durch Fehlsortierung oder Verbunde, die sich während der Sortierung gelöst haben. Auch für diesen Stoffstrom sind für über Probenahmen relativ hohe Fehlwurfquoten zu beobachten, die über die getrennte Altpapiersammlung hätten entsorgt werden können.

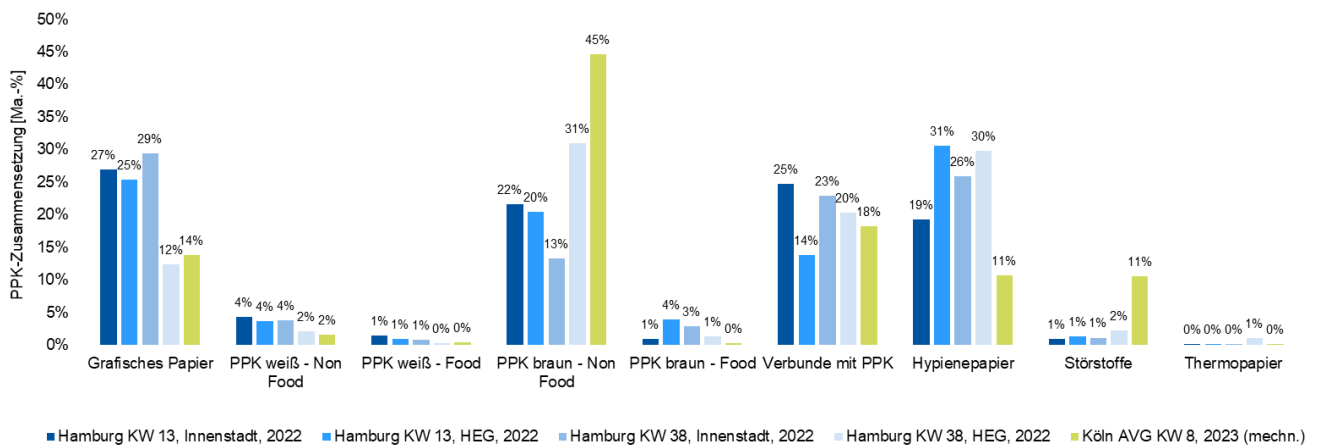


Abbildung 9: Zusammensetzung der PPK-Proben aus Gewerbeabfall (AVG-Proben stammen aus mechanisch ausgetragenerm Strom einer Gewerbeabfallsortierung)

4. Analyse des Stoffstroms Restabfall (AP1.4)

Die PPK- und PPK-Verbundanteile, die im Restabfall während der unterschiedlichen Beprobungen bestimmt wurden, sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Beprobung anhand der Siedlungsstrukturen ergab, dass tendenziell höhere PPK- und PPK-Verbundanteile in Gebieten mit höheren Siedlungsdichten zu finden sind. Es ist zu beachten, dass alle beprobten Gebiete städtische Strukturen aufweisen. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass in ländlicheren Strukturen geringere PPK- und PPK-Verbundanteile im Restabfall vorliegen.

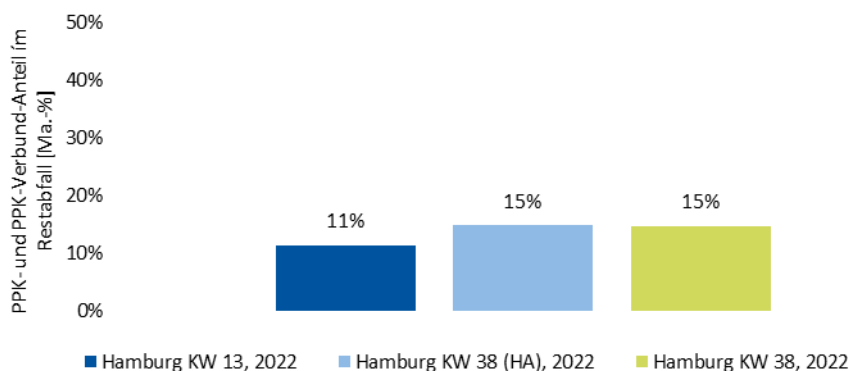


Abbildung 10: PPK- und PPK-Verbund-Anteile im Stoffstrom Restabfall

Die Wassergehalte der PPK- und PPK-Verbundproben aus Restabfall sind in Abbildung 11 dargestellt. Die dargestellten Wassergehalte beziehen sich für die Proben aus Hamburg auf die PPK- und PPK-Verbundgewichte nach der manuellen Analyse. Die Lahnstein Proben wurden vor der manuellen Analyse getrocknet. Für alle Beprobungen ergeben sich hohe Wassergehalte der PPK- und PPK-Verbunde von über 30 Ma.-%.

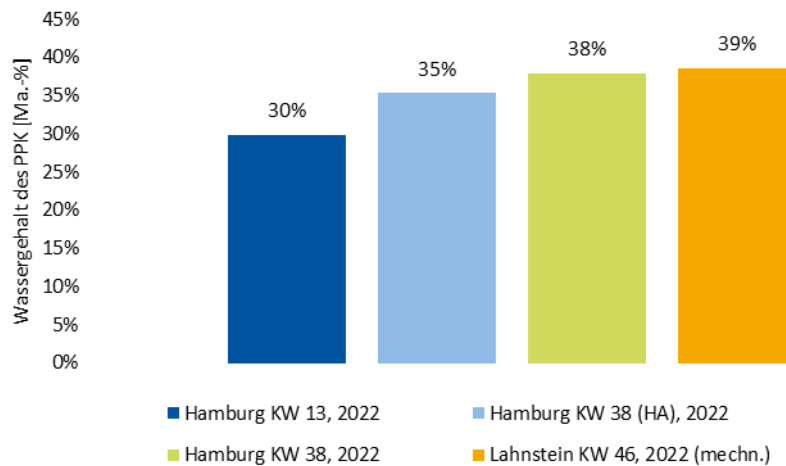


Abbildung 11: Wassergehalte der PPK-Proben aus Restabfall (Lahnstein-Proben stammen aus mechanisch ausgetragem Strom einer Restabfalltestsortierung)

Abbildung 12 ist die Zusammensetzung der PPK- und PPK-Verbundproben aus Restabfall zu entnehmen. Für die Lahnstein-Proben ist eine Anreicherung an grafischen Papieren zu beobachten. Die Ergebnisse sollten allerdings mit Einschränkungen verglichen werden, da das Material für die Restabfallsortierung in Lahnstein aus Österreich stammte. Daneben sind auch im Stoffstrom Restabfall hohe Fehlwurfquoten an PPK zu beobachten.

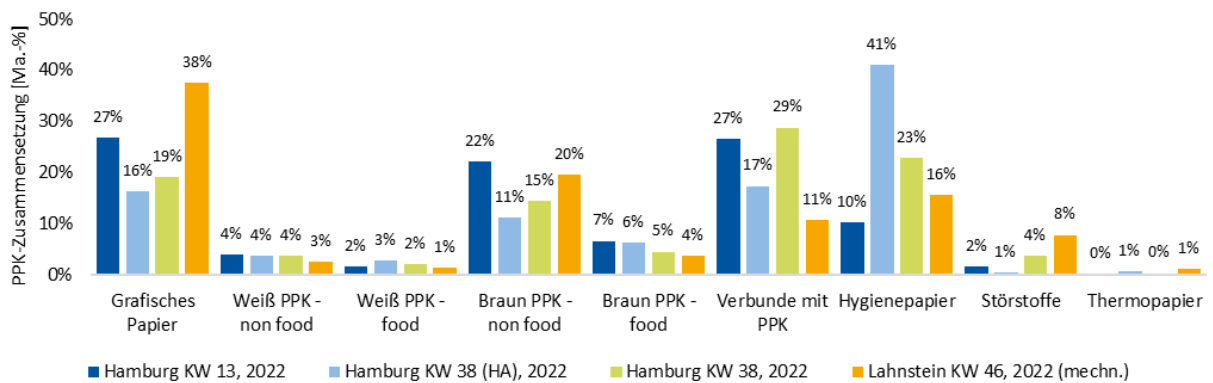


Abbildung 12: Zusammensetzung der PPK-Proben aus Restabfall (Lahnstein-Proben stammen aus mechanisch ausgetragem Strom einer Restabfalltestsortierung, Zusammensetzung der Lahnstein-Proben bezieht sich auf Trockensubstanz)

5. Festlegung von Wert- und Störstoffen (AP1.5)

Die in den Sortieranalysen ermittelten Fehlwurfquoten an Papier, das auch über die getrennte Altpapiersammlung hätte entsorgt werden können (grafische Papiere, weißes und braunes PPK Non-Food), sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Fehlwurfquoten an PPK in den analysierten gemischten Abfallströmen, das über die getrennte Altpapiersammlung hätte entsorgt werden können

Stoffstrom	Probennahme	Fehlwurf
LVP	Erftstadt KW 3, 2022 (mechn.)	44%
LVP	Hamburg KW 13, 2022 (mechn.)	46%
LVP	Erftstadt KW 25, 2022 (mechn.)	45%
LVP	Erftstadt KW 8, 2023 (mechn.)	44%
Gewerbeabfall	Hamburg KW 13, Innenstadt, 2022	53%
Gewerbeabfall	Hamburg KW 13, HEG, 2022	49%
Gewerbeabfall	Hamburg KW 38, Innenstadt, 2022	46%
Gewerbeabfall	Hamburg KW 38, HEG, 2022	45%
Gewerbeabfall	Köln AVG KW 8, 2023 (mechn.)	60%
Restabfall	Hamburg KW 13, 2022	53%
Restabfall	Hamburg KW 38 (HA), 2022	31%
Restabfall	Hamburg KW 38, 2022	37%
Restabfall	Lahnstein KW 46, 2022 (mechn.)	60%

Die Ergebnisse zeigen, dass über alle Sortieranalysen hinweg ein großer Anteil an PPK als Fehlwurf eingestuft werden kann. Damit liegt ein großes Potential zur stofflichen Verwertung dieser Fraktionen vor. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Abreicherung von papierfremden Störstoffen, Hygienepapieren und sonstigen unerwünschtem PPK (bspw. wachsbeschichtete Papiere) in der trockenmechanischen Nachsortierung forciert werden sollte. Die generierten Ergebnisse fließen in die Entwicklung eines Sortierprozesses für PPK aus gemischten Abfallsammlungen ein, um das ermittelte Potential möglichst vollständig auszuschöpfen. Dabei werden auch die Qualitäten berücksichtigt, die zwar nicht in der Altpapiersammlung hätten entsorgt werden können, für die aber ein ebenso hohes Potential zur stofflichen Verwertung vorliegt. Insgesamt hat die umfassende Analyse der drei betrachteten Stoffströme (LVP, Gewerbeabfall und Restabfall) detaillierte Erkenntnisse über Zusammensetzung und Potenziale geliefert.

2.2 Arbeitspaket 2: Technische Sortierung

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 (AP2), verantwortet durch STADLER, ANTS, PROPAKMA, LEIPA und TOMRA, wurden fortlaufende Sortierversuche durchgeführt, um die Zielgrößen für die PPK-Fractionen aus den Vorkonzentraten, die in AP1 definiert wurden, zu erreichen. Das Ziel war es, spezifische Sorteneigenschaften zu entwickeln, die für die Papierindustrie verarbeitbare und werthaltige Fractionen erzeugen. Hierbei wurde ein besonderes Augenmerk auf die mechanische Sortierung sowie den minimalen Sortieraufwand und Energieverbrauch gelegt. Die enge Abstimmung mit dem Arbeitspaket 6 (AP6) spielte eine wesentliche Rolle bei der Definition der optimalen Aufbereitungstechnik.

2.2.1 Methodische Vorgehensweise

1. Definition der Zielgrößen (AP2.1)

Zu Beginn des Arbeitspakets wurden in enger Abstimmung mit den Projektpartnern PROPAKMA, LEIPA und dem ANTS die Zielgrößen für die PPK-Fractionen festgelegt. Diese Zielgrößen berücksichtigen sowohl gesetzliche als auch technische Anforderungen der nachgeschalteten Prozessstufen und wurden in Form von exakten Werten, Mindestanforderungen oder Bereichen definiert. Dabei wurden insbesondere die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Vorkonzentrate sowie deren Eignung für die Papierproduktion berücksichtigt.

Basierend auf den Ergebnissen aus AP1 wurden Restabfälle als Quelle für die PPK-Fractionen zur Rückgewinnung von sekundären Fasern ausgeschlossen. Auch Gewerbeabfälle werden in AP2 nicht in den Fokus genommen, da Aufbereitungsanlagen für Gewerbe teils verkaufsfähige PPK-Fractionen erzeugen, teils direkte Verträge mit gewerblichen Kunden zur Erfassung und Bereitstellung reiner PPK-Fractionen geschlossen werden können. Entsprechend soll die technische Sortierung grundsätzlich die Sorte 550 (PPK aus LVP) in die Sorte 5.02 gemäß der Sortendefinition der DIN EN 643 durch die Trockensortierung aufbereiten. Diese Qualität ist definiert, und entspricht damit einer Altpapiersorte, die in den gesteuerten Prozessen bei der Papierherstellung verwendbar ist.

Wichtig für die technische Trockensortierung sind die Altpapierzusammensetzung, die Feuchte des Materials und die enthaltenen papierfremden Stoffe, die trockenmechanisch aussortiert werden können. Die Reduktion der papierfremden Stoffe und kritischer, schwer zerfaserbare Papiere lassen sich während der Nasszerfaserung der Papiere besser darstellen. Untersuchungen zeigen einen Anstieg an mikrobieller Belastung in der Lagerung und der Logistik. Teilweise zeigen die Ballen an PPK aus LVP einen Temperaturanstieg von bis zu 45°C. Das Risiko der mikrobiellen Belastung und damit der Geruchsbildung im Papier ist gegeben und muss bei der logistischen Handhabung der PPK-Fractionen aus LVP-Ballen und im nachfolgenden wässrigen Prozess beachtet werden.

2. Sortierversuche (Iterativ) (AP2.2)

In einem iterativen Prozess wurden verschiedene mechanische Verfahren zur Aufbereitung der Inputfractionen erprobt, um die festgelegten Zielgrößen für die PPK-Fractionen zu erreichen (siehe Abbildung 13). Dabei wurden insbesondere sensorgestützte Sortierverfahren, wie die NIR-Spektroskopie zur Bestimmung von Fasereigenschaften und Papier- bzw. Kunststoffarten, getestet. Die Versuchsreihen wurden kontinuierlich optimiert, um eine effiziente Kombination der Verfahren zu finden, die sowohl einen niedrigen Energieverbrauch als auch eine hohe Qualität und Verfügbarkeit der Fractionen gewährleistet. Der Fokus lag dabei auf der Minimierung von Materialverlusten und der Maximierung der Faserqualität.

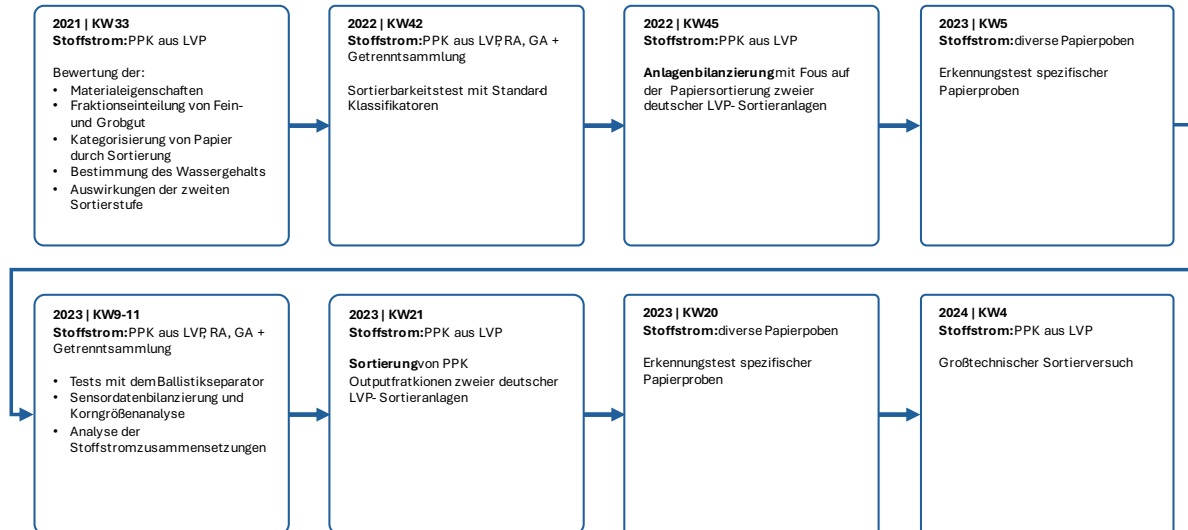


Abbildung 13: Übersicht der Sortierversuche

Zur Evaluierung der technischen Möglichkeiten der NIR-basierten Sortierung wurden Technikumsversuche bei TOMRA durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten eine hohe Detektionsfähigkeit dominierender Papiersorten sowie Optimierungspotenzial durch Anpassung der Klassifikatoren. Zudem wurde festgestellt, dass Wassergehalt und Oberflächenglanz die Detektionsleistung beeinflussen und dass eine Identifikation faserbasierter Verpackungsmaterialien möglich ist.

Ergänzend dazu fanden mehrwöchige Sortiertests im Technikum der STADLER d.o.o. in Krško, Slowenien statt, um verschiedene mechanische Trennverfahren zu untersuchen. Hierbei standen insbesondere der Einfluss von Korngröße, Partikelmasse und Kornform auf die Sortierleistung, die Nutzung von Vorkonzentraten aus unterschiedlichen Anlagen sowie Monosorten- und Mischungstests zur Trennung von Papierfraktionen mittels ballistischer Separation im Fokus. Der Versuchsaufbau und die variierten Parameter in der ballistischen Separation sind in Abbildung 14 dargestellt. Die Versuche wurden mit einem Durchsatz von 8 t/h durchgeführt, wobei manuelle Sortierungen und rechnergestützte Analysen und Volumenstromanalysen zur Ergebnisbewertung herangezogen wurden.

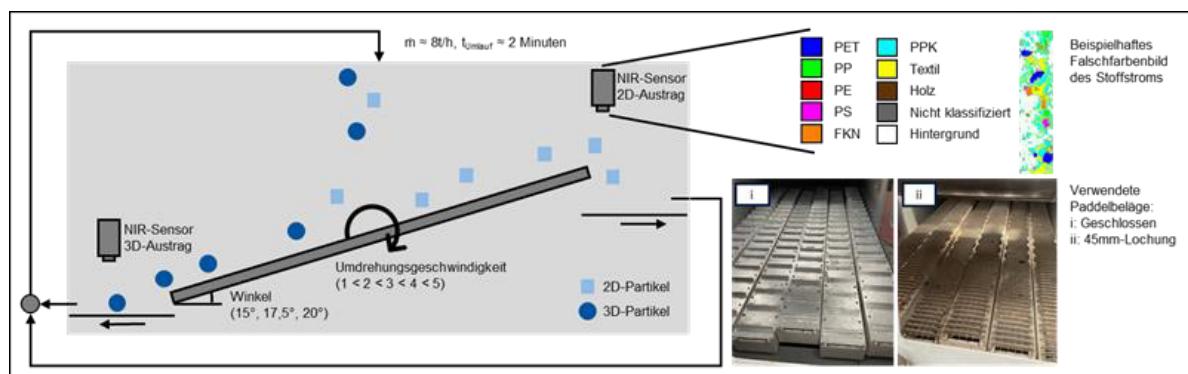


Abbildung 14: Versuchsaufbau im Technikum der STADLER d.o.o. Krško sowie untersuchte Parameter und aufgenommene NIR-Spektren

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Optimierung der sensorgestützten Sortierung gefahrstoffhaltiger Papiere. TOMRA führte umfassende NIR-Analysen durch, um Gefahrstoffproben zu identifizieren und spektral zu klassifizieren. Die Ergebnisse zeigten, dass bestimmte Gefahrstoffe, wie Thermopapier, eindeutig klassifiziert werden können, während spektrale Überlappungen die Abtrennung vieler gefahrstoffhaltiger Papiere erschweren. Daher sind weiterführende Sortiertests erforderlich, um die Trennschärfe weiter zu verbessern.

Die Ergebnisse der Technikumsversuche bei STADLER wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht:

Spies, Alena Maria; Scherling, Tabea; Ludes, Annika; Küppers, Bastian; Kroell, Nils; Raulf, Karoline; Greiff, Kathrin (2024): Assessing the Process Performance of Ballistic Separators in Waste Sorting Plants Using Sensor-Based Process Monitoring (Pre-Print). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5026820> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5026820>.

Spies, Alena Maria; Scherling, Tabea Anne-Marie; Ludes, Annika; Kroell, Nils; Küppers, Bastian; Kaufeld, Sebastian; Raulf, Karoline; Greiff, Kathrin (2024): Abtrennung von Papier aus Kunststoffgemischen: Parameterstudie mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring zur optimierten Einstellung eines Ballistikseparators. In: 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft, TU Wien, 15–16 February 2024. Innsbruck: innsbruck university press. Pages 71–76.

Scherling, Tabea Anne-Marie; Spies, Alena Maria; Ludes, Annika; Kroell, Nils; Küppers, Bastian; Raulf, Karoline; Greiff, Kathrin (2024): Modellierung eines Ballistikseparators mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring und Machine-Learning. In: 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft, TU Wien, 15–16 February 2024. Innsbruck: innsbruck university press. Pages 77–84.

3. Ableitung der Sortendefinition (AP2.3)

Auf Basis der ermittelten Zielgrößen und der Ergebnisse der Sortierversuche wurde ein geeignetes Aufbereitungskonzept ausgewählt. Die spezifischen Sortendefinitionen für die Vorkonzentrate wurden in dieser Phase erstellt, um sicherzustellen, dass die verschiedenen Fraktionen gemäß den Anforderungen der nachfolgenden Recyclingprozesse aufbereitet werden können. Jedes ausgewählte Aufbereitungskonzept musste die Fähigkeit besitzen, die Zielgrößen für die möglichen unterschiedlichen Inputqualitäten von PPK aus LVP zu erreichen, wobei eine besondere Rolle der Trennung von Wertstoffen und Störstoffen zukam.

In enger Zusammenarbeit von STADLER, PROPAKMA, LEIPA und dem ANTS wurden Zielgrößen für die PPK-Fraktionen definiert. Die primäre Zielstellung war die Trockensortierung von Sorte 550 (PPK aus LVP) zu Sorte 5.02 nach DIN EN 643. Diese Fraktion sollte eine für die Papierindustrie verwertbare Qualität erreichen, mit:

- Minimalem Sortieraufwand und Energieverbrauch,
- Reduzierung papierfremder Stoffe durch gezielte Abtrennung,
- Optimierung der Trennschärfe für Störstoffe mittels KI (Deep Learning).

Eine zentrale Herausforderung war die Sortierung unerwünschter Papiere aufgrund spektraler Überlappungen mit dem Gutmaterial. Weitere Verbesserungen sollen zukünftig durch KI-gestützte Objekterkennung erreicht werden.

4. Entwurf der Sortieranlage (AP2.4)

Parallel zur experimentellen Arbeit wurde eine Konzeptplanung für industrielle Sortieranlagen entwickelt. Hierbei wurde ein Prozessablaufplan für die Sortierung von PPK-Konzentraten erstellt. Drei Konzepte wurden diskutiert:

- Nachrüstung bestehender Anlagen,
- Errichtung einer Nachsortieranlage,
- Aufbau einer vollständigen Aufbereitungsanlage, in der neben PPK aus LVP auch separat erfasstes Altpapier behandelt werden kann.

Ziel war es, ein Layout und ein Budget für eine mögliche Umsetzung zu definieren. Zudem wurden Technikversuche zur Abtrennung kleiner Folien aus dem PPK-Stoffstrom durchgeführt, um die Machbarkeit dieses Schritts zu bewerten. Basierend auf den Diskussionen wurden zwei detaillierte Entwürfe für Sortieranlagen entwickelt – eine Sortieranlage mit 10 t/h Kapazität (PPK aus LVP) und eine vollumfängliche, größere Aufbereitungsanlage mit 20 t/h Kapazität (PPK aus LVP sowie getrennt erfasstes Altpapier). Diese Entwürfe beinhalten alle notwendigen Aufbereitungs- und Sortiertechniken, die erforderlich sind, um die festgelegten Sortendefinitionen zu erreichen. Die beiden Entwürfe berücksichtigen jeweils auch ein Budget für die Vorsortieranlage, das eine Kostenschätzung für die gesamte Maschinentechnik sowie den zugehörigen Stahlbau und die Infrastruktur umfasst. Die nachfolgende Abbildung 15 zeigt ein Beispielsortierkonzept zur Sortierung von PPK aus der nicht-getrennten Sammlung zum Recycling.

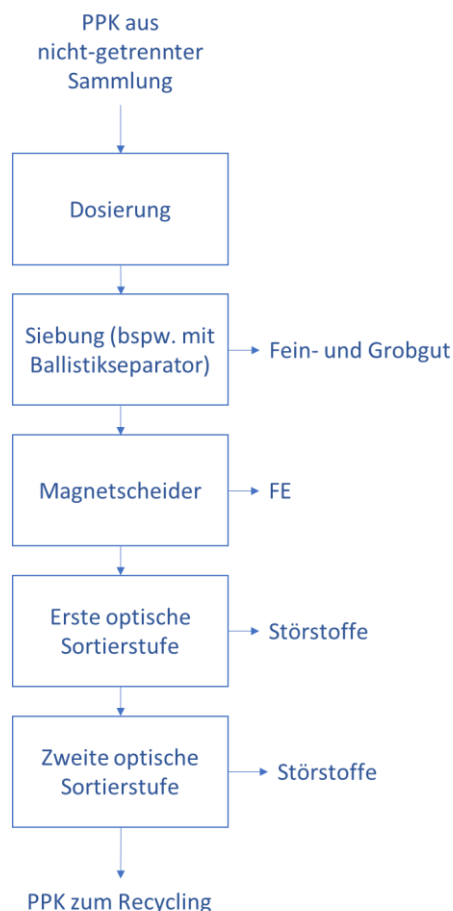


Abbildung 15: Beispielsortierkonzept zur Sortierung von PPK aus der nicht-getrennten Sammlung zum Recycling

2.2.2 Ergebnisse und Diskussion

- Sortendefinition der Outputfraktionen: Die Sortendefinitionen für die PPK-Fraktionen aus der Vorsortierung wurden erfolgreich erstellt und bilden die Grundlage für die nachfolgende Aufbereitung im Recyclingprozess.
- Anlagenkonzept für PPK aus LVP: Es wurden zwei Konzepte entwickelt, die die Verarbeitung der unterschiedlichen Inputfraktionen ermöglicht. Dies stellt sicher, dass die Anlagen für Leichtverpackungsabfälle geeignet sind.
- Anlagenentwurf: Zwei vollständige Anlagenentwürfe wurde ausgearbeitet, die die jeweils sämtliche benötigte Maschinentechnik und den zugehörigen Stahlbau umfasst.
- Budgetpreis: Ein Budget für die jeweiligen Anlagenkosten wurde erstellt, das sowohl die Investitionskosten für die Sortieranlage als auch die operativen Kosten zur Herstellung der Vorkonzentrate berücksichtigt.

2.3 Arbeitspaket 3: Adaptierung Aufbereitungsprozess (Zerfaserung)

Im Arbeitspaket 3 (AP3), welches durch PROPAKMA, ANTS und LEIPA bearbeitet wurde, lag der Fokus auf der Untersuchung und Optimierung von Verfahren zur Zerfaserung von Altpapierfraktionen und der effizienten Abtrennung von Laminatfolien. Ziel war es, die Altpapiersorten in eine pumpfähige Faserstoffsuspension zu überführen, dabei jedoch gleichzeitig die Fasereigenschaften zu bewahren und eine effiziente Trennung unerwünschter Substanzen, insbesondere der Laminatfolien, zu ermöglichen. Verschiedene Zerfaserungsverfahren, darunter atmosphärische Nassverfahren und Kavitationspulper, wurden untersucht, um die optimale Lösung zu identifizieren. Die Versuche zur Trockenzerfaserung wurden aufgrund der ungünstigen Ergebnisse aus anderen Projekten zurückgestellt.

Ein wesentlicher Ansatz ist die Anpassung der Zerfaserungstechnologie an die Altpapierquelle PPK aus LVP.

Die Leichtverpackung (LVP) wird im gelben Sack in den Haushalten erfasst. Der Materialstrom der Leichtverpackung wird i.d.R. einer mehrstufigen NIR-gestützten LVP-Sortierung zugeführt. In dieser Fraktionierung des Materialstroms wird der Strom PPK aus LVP generiert.

PPK aus LVP als Produktspezifikation 03/2018 Fraktions-Nr. 550 aus dem grünen Punkt ist definiert über:

- Flüssigkeitskartons $\leq 4\%$
- Kunststoffartikel $\leq 3\%$
- Metalle $\leq 0,5\%$
- Sonstige Störstoffe $\leq 3,5\%$

Die Sortierung des LVP erzeugt einen Stoffstrom außerhalb der allgemeinen Altpapiersorten. Innerhalb des Forschungsprojektes EnEWA wurde Handlungsfelder entwickelt, um durch eine weitere Trockensortierung aus der Sorte 550 eine Qualität innerhalb des Sortenspektrums der DIN EN 643 zu erzeugen. Die normalen Altpapiersorten haben einen Gehalt an Störstoffen von maximal 1,5%. Die Zerfaserungstechnologien und die Stoffsortierungen sind damit auf einen deutlich geringeren Anteil an Störstoffen ausgelegt. Ein unsortierter Eintrag führt zu Produktionsstörungen, wie Versuche in 2022 gezeigt haben. Die trockenmechanische Sortierung führt zu einem abgereicherten Störstoffgehalt von $< 5 \text{ Ma.-%}$, vgl. auch Kapitel 2.2.

2.3.1 Grundlagen der Zerfaserungstechnologie

Die Altpapieraufbereitung einer Papierfabrik wird allgemein als Stoffaufbereitung definiert. Das Ziel der Stoffaufbereitung ist es, aus dem Wertstoff Altpapier wieder einen für die Produktion von Papier verwendbaren Faserstoff zu erzeugen. Dieser Faserstoff besteht aus vereinzelt Papierfasern, anorganischen Pigmenten und anderen Stoffen aus der Papierherstellung, die im Recyclingprozess wieder verwendet werden können.

Die Aufgabe der Altpapieraufbereitung ist es, alle Fasern aus dem Faserverband zu vereinzeln sowie alle störenden Bestandteile in unterschiedlichen Sortierprozessen aus der wässrigen Suspension abzutrennen und gleichzeitig den Faserverlust so gering wie möglich zu halten. Der technische Aufbau einer Altpapieraufbereitung ist nach verschiedenen Gesichtspunkten optimiert, daher gibt es dafür keinen allgemein gültigen technischen Standard. Daraus ergibt sich für eine Papierfabrik eine sehr individuelle Kombination der Altpapieraufbereitung.

Das zentrale Modul, der Pulper hat die Aufgabe den Altpapierballen zu zerreißen und das

Papier in eine pumpfähige Suspension zu zerfasern. Gleichzeitig sollen dabei die papierfremden Bestandteile möglichst nicht zerkleinert werden. Unzerkleinerte Bestandteile können in der nachfolgenden Sortierung besser abgetrennt werden.

Folgende Variationen sind in den unterschiedlichen Pulpern gebräuchlich:

- Stoffdichte (4,5 % - 16 %)
- Form des Zerfaserungsaggregat (Pulper, Trommel, geometrische Form)
- Verweilzeit (4 - 60 Minuten)
- Wassereintrag (Menge, Dosiertechnik)
- Strömungsverhalten der Stoff/Wassersuspension, technische Strömungsbrecher, Geometrie Rotor, Einbau Rotor
- Eingetragene Energie kWh/t Eintrag
- Temperatur

Durch eine Lochsortierung wird der Gutstoff in die nächsten Sortierstufe ausgetragen. Die Lochung hat in der Regel einen Durchmesser von 12-25 mm. Der Siebrückstand kann je nach Konstruktion über einen Sekundärpulper oder andere Aggregate zur weiteren Fasergewinnung in einem kleinen Kreislauf gefahren werden. Ein wesentliches Aggregat zur intensiven Benetzung der Papieroberfläche mit Wasser ist eine sogenannte Sortiertrommel bei der das Material unter permanenter Wasserbenetzung in einer drehenden Trommel bewegt wird.

Ein modernes Konzept zur Stofflösung ist dabei die Trommelzerfaserung, die der bei einer Einweichzeit von bis zu 60 Minuten das Material ohne einen schneidenden Rotor aufgelöst wird. Insbesondere für große Mengen an gleichem Eintrag gilt diese Stofflöseform als besonders schonend für die Zerkleinerung von papierfremden Stoffen.

Die wässrige Stoffsuspension wird in den nachfolgenden Aggregaten weiter sortiert, um eine möglichst saubere einheitliche Stoffsuspension zu erhalten. Diese Reinigungsaggregate bestehen grundsätzlich aus den gleichen Grundelementen, werden jedoch nach Bedarf sehr unterschiedlich kombiniert.

- Gravitationsreinigung (Cleaner)
- Siebreinigung (Drucksiebe, Vibrationssiebe)

Ziel der Versuche waren:

1. Die Bewertung der Pulperleistung durch einen erhöhten Anteil an Verschmutzungen, und der damit möglicherweise verbundenen Störung des Materialflusses
2. Bewertung der Zerkleinerung der papierfremden Bestandteile und der damit verbundenen höheren Belastung der nachfolgenden Sortieraggregate in der Stoffaufbereitung
3. Messung des Übergangs von bedenklichen Stoffen (Substances of Concern - SoC) aus den Verpackungsmaterialien in das Stoff-Wassersystem

2.3.2 Methode der Zerfaserungsversuche (VOITH Heidenheim, Kavitationspulper)

Ziel der Untersuchungen ist es das geeignete Zerfaserungssystem zu den Inhaltstoffen

auszuwählen. Um die dargelegten Fragestellungen zu beantworten, wurden Technikumsversuche bei der Firma VOITH in Heidenheim durchgeführt. Die Zielstellung der Technikumsversuche ist in Tabelle 7 zusammengefasst:

Tabelle 7: Versuchsplanung VOITH

Aufgabenstellung	Vorgehensweise	Bewertungsparameter
Zerfaserungskurven	3 verschiedene Pulper (LC-Pulper, HC-Pulper, Zerfaserungstrommel (ZT))	Energiebedarf Qualität Faserstoff Qualität Rejekt
Vergleich PPK aus LVP nachsortiert und PPK aus Restabfall	Beste Pulper wird mit PPK aus LVP nochmals aufgenommen	Vergleich Qualität Faserstoff / Rejekt / chemische Inhaltsstoffe („Lohnt sich der Aufwand der trockenen Sortierung?“)
Hygienisierung	Wo werden chemische Verunreinigungen ausgeschleust	z. B. erste Eindickung, Aufheizung, Disperger, Flotation
Vergleich sortiertes PPK aus LVP und PPK aus RA	Niveau Mikrobiologie, chemische Verunreinigungen	-
Beurteilung Grobrejekt für weitere Verwendung	Materialanalysen	Rejekt für Pyrolyse oder Nachsortierung
Beurteilung Fertigstoff	Festigkeiten für die Papierproduktion	-

Dazu wurden verschiedene Stoffgruppen und Zerfaserungsaggregate ausgewählt:

- Stofflösesystem mit niedriger Stoffdichte (5-6 %) (LC-Pulper)
- Stofflösesystem mit hoher Stoffdichte (16 %) (HC-Pulper)
- Stofflösesystem mit Waschaggregaten (Zerfaserungstrommel)
- Stofflösesystem mit wechselnden Druckzuständen zur Erhöhung der Benetzung im Fasernetzwerk (Kavitationspulper)

Fotos und Funktionsdarstellungen der ersten drei Zerfaserungsaggregate können Abbildung 16 entnommen werden. Da bei der Firma VOITH kein Kavitationspulper getestet werden konnte, wurden die Versuche mittels Kavitationspulper von GVW in Österreich (Repulping Technologie) durchgeführt. Dort existiert ein Kavitationspulper im Realmaßstab. Die Ergebnisse sind deshalb mit den Ergebnissen der Technikumsversuche allerdings nur bedingt vergleichbar.

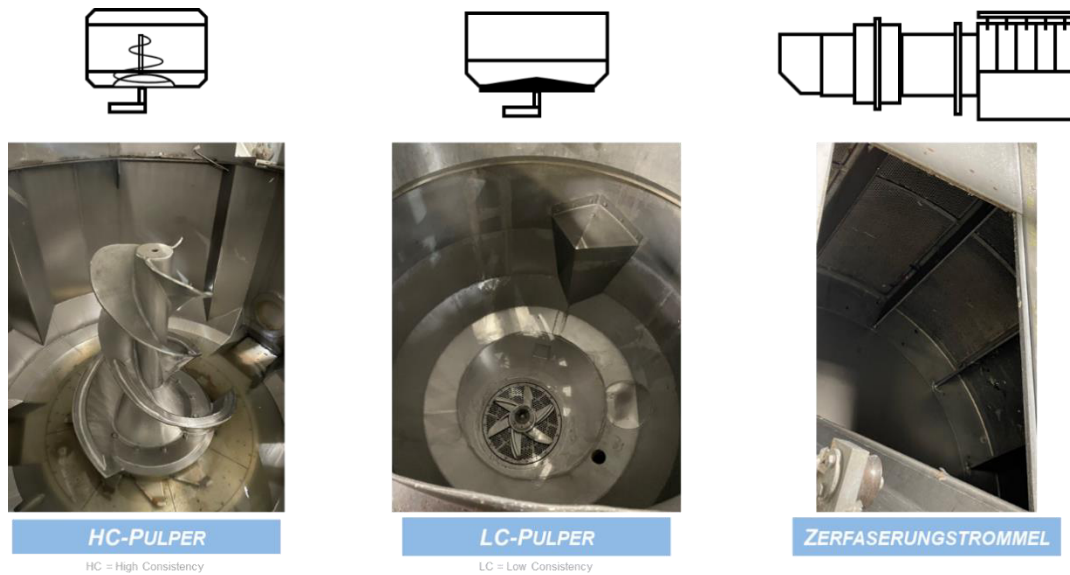


Abbildung 16: Getestete Zerfaserungssysteme bei der Firma VOITH in Heidenheim

Zusätzlich wurden für die Versuche unterschiedliche Rohstoffe eingesetzt, um eine Materialspannbreite abzudecken (vgl. Abbildung 17):

- Material aus Leichtverpackungsabfällen (V1)
- Material aus Leichtverpackungsabfällen trockenmechanisch nachsortiert (V2)
- Material aus sortiertem Restabfall (V3)

Diese Materialien wurden in einem Testcenter der Firma VOITH mit unterschiedlichen Zerfaserungssystemen aufgeschlossen. Im Kavitationspulper wurde nur sortiertes Material PPK aus LVP (wie V2) getestet. Die Stoffproben wurden nach erfolgter Zerfaserung untersucht.



Abbildung 17: Rohstoffe zum Einsatz beim den Zerfaserungsversuchen

Nach Zerfaserungsversuchen mit V1, V2 und V3 wurde im VOITH Technikum eine gesamte Stoffaufbereitung für V2 und V3 durchlaufen. Basierend auf den Zerfaserungsversuchen wurde der High Consistency (HC)-Pulper aus den vorhandenen Pulperlösungen im VOITH Technikum für eine optimale Auflösung ausgewählt. Die Suspension wird nach dem Auflöseprozess über einen Fiberizer und eine Waschtrommel mit 8 mm Lochblechweite abgepumpt. Aus der entstehenden Wasser-Faser-Suspension müssen anschließend weitere Störstoffe abgetrennt werden. Der Prozessablauf ist in Abbildung 18 dargestellt. Alle Rejektströme aus der Störstoffabtrennung sind als blaue Punkte gekennzeichnet.

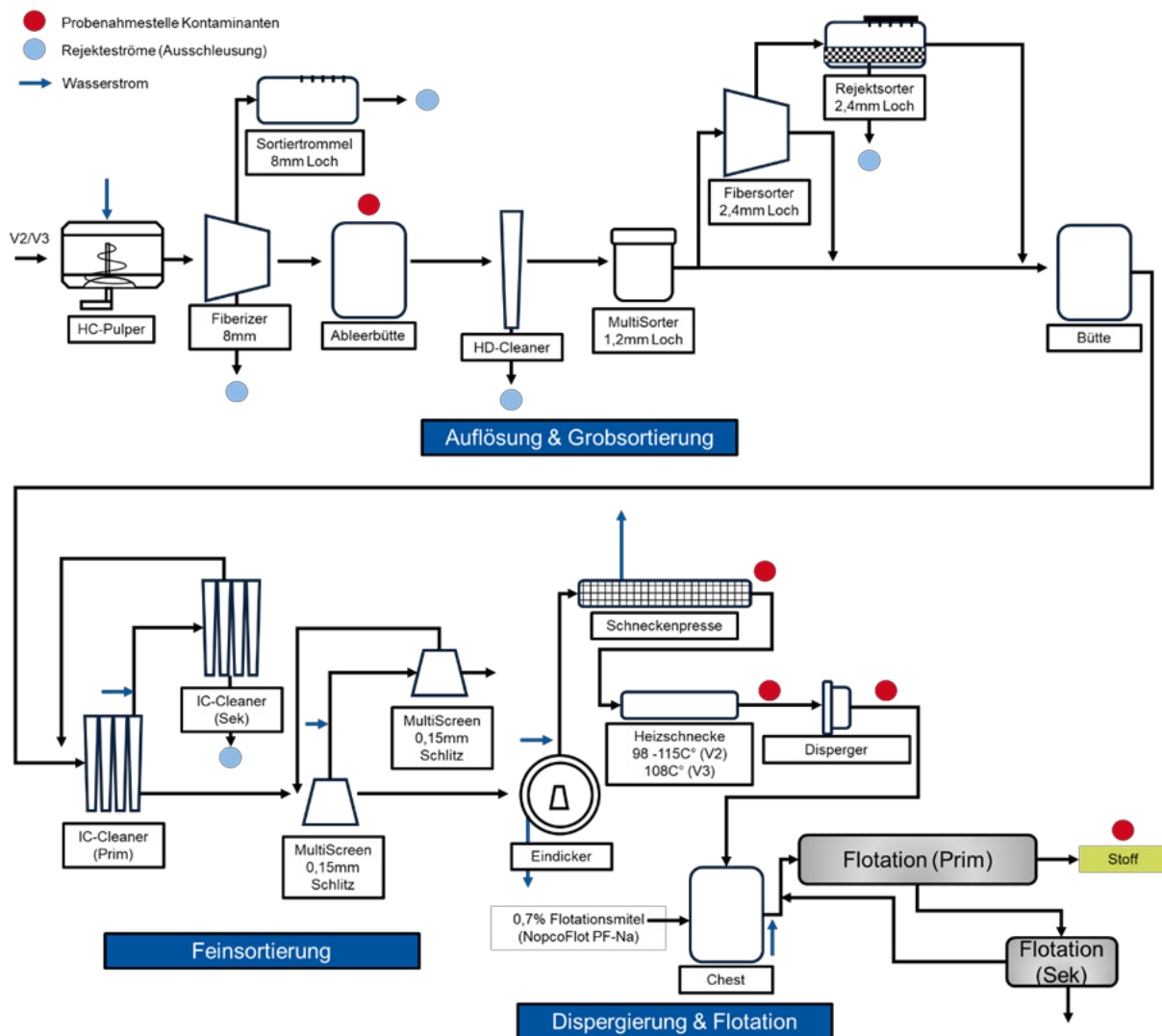


Abbildung 18: Systemskizze Technikumsanlage VOITH

Zur Störstoffabtrennung kommen folgende mechanischen Trennstufen zum Einsatz:

- Siebabscheidung von Störstoffen im Pulper, Fiberizer
- Schwerschmutzschleuse im Pulper, Dickstoffreiniger
- Dreistufige Grobsortierung mittels Sieb- und Dichtesortierer (Cleaner) zur Grobschmutzabtrennung
- Zweistufige Feinsortierung mittels Cleaner zur Schwerschmutzabtrennung und Feinsortern zur Feinschmutzabtrennung

2.3.3 Ergebnisse der Zerfaserungsversuche Technikum VOITH Heidenheim

Die Bestimmung der Faserlängenverteilung erfolgte mit einem Baur-McNett-Fraktionator. Dabei wird der Gutstoff der Schlitzsortierung in fünf weitere Fraktionen fraktioniert und der Rückstand, der in den vier Sortierbehältern zurückbleibt, gravimetrisch bestimmt. Der Durchlauf durch das feinste Sieb wird nicht bestimmt. Die Siebe werden mit der Maschenweite nach der ASTM-Norm (American Society for Testing and Materials) in mesh bezeichnet (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Tabelle Maschenweite Faserfraktionierung

Mesh USA (ASTM)	Lichte Maschenweite (ISO 3310-1)	Bezeichnung
16	1180 µm	Sehr lange Fasern
30	600 µm	Langfaser
50	300 µm	Mittelfaser
100	150 µm	Kurzfasern

Die Ergebnisse zu den einzelnen Stoffzefaserungsversuchen werden über eine Messung der Faserverteilung, der mechanischen Eigenschaften der Faser und dem Gehalt an Störstoffen untersucht. Der Anteil der Faserbündel und der Störstoffe auf dem Rejektsieb mit einer Schlitzbreite von 0,15 mm entspricht einer Feinsortierung in der Stoffaufbereitung einer Papierfabrik (vgl. Abbildung 19 und Abbildung 20).

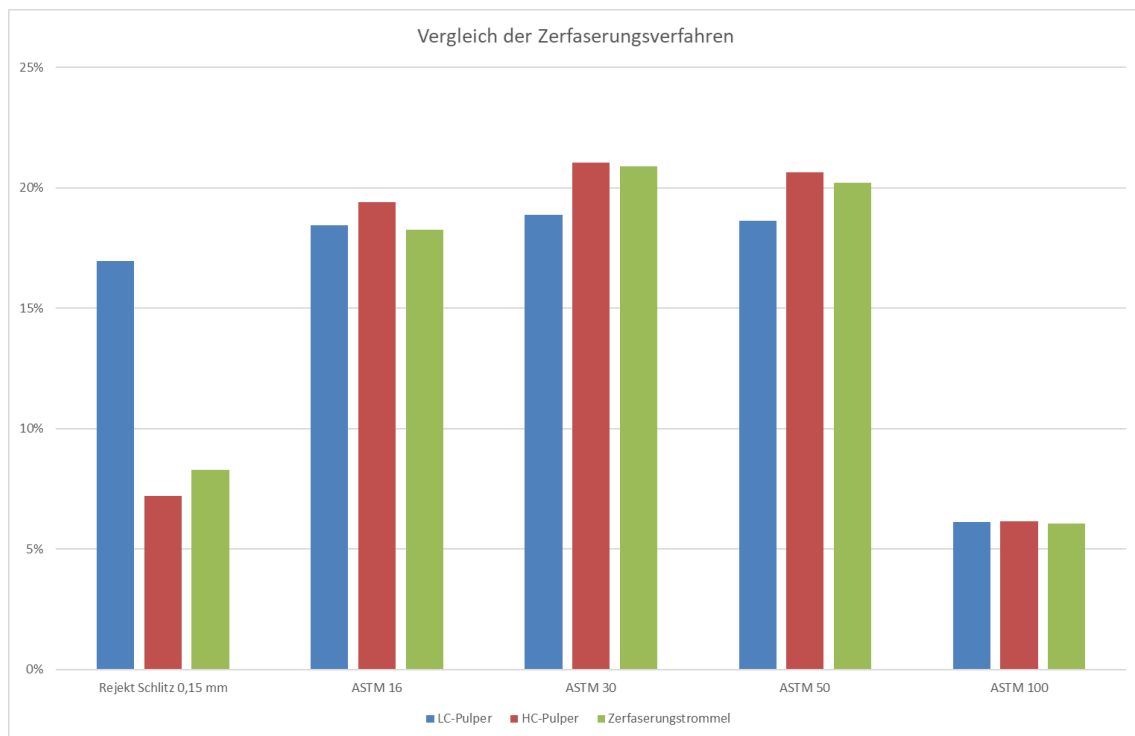


Abbildung 19: Vergleich der Zefaserungssysteme im VOITH Technikum (V2)

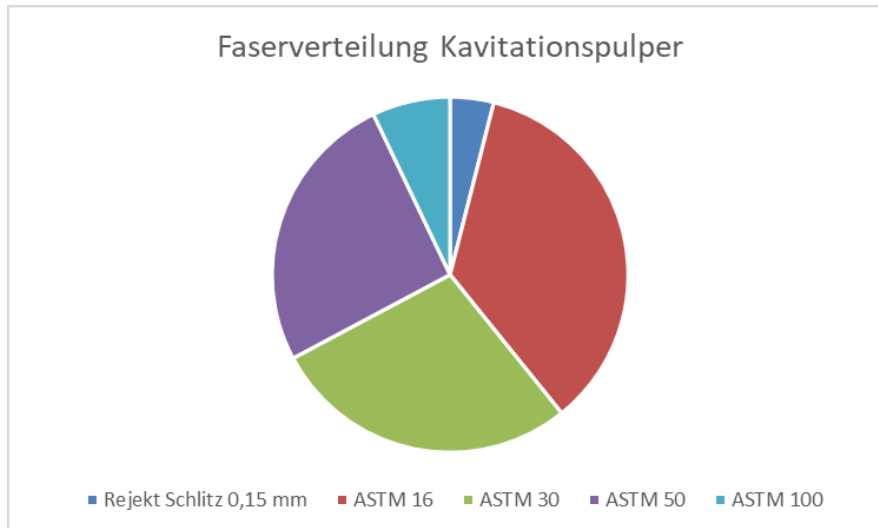


Abbildung 20: Zerkleinerung in einer kleinindustriellen Anlage mit Kavitation PPK aus LVP (ähnlich V2)

Die Untersuchungen der Faserverteilung zeigen den Vorteil des Kavitationspulpers gegenüber dem LC (low consistency), HC (high consistency) und der Auflösetrommel bei der Zerkleinerung von PPK aus LVP. Der Druckwechsel im Kavitationssystem drückt das Wasser viel besser in das Fasernetzwerk, und zerstört damit stärker die Wasserstoffbrückenbindung zwischen den OH-Gruppen. Offensichtlich ist die Anzahl an Faserstippen, welche auf dem Sortierblech mit 0,15 mm Schlitz zurückbleiben, deutlich geringer. Gleichzeitig zerkleinert der Kavitationspulper die einzelnen Störstoffe weniger. Diese lassen sich dann in der Sortierung gut abtrennen.

Die Zerkleinerungssysteme zeigen einen deutlichen Unterschied in der mechanischen Zerkleinerung der Störstoffe. Je größer die einzelnen Bestandteile der Störstoffe sind, desto früher lassen sie sich abtrennen. Das reduziert sowohl den notwendigen Energieeintrag als auch den auftretenden Faserverlust (vgl. Abbildung 21). Eine schonendere Zerkleinerung muss mit einer guten Faserquellung einhergehen, damit sich die Fasern gut vereinzeln. Sonst würde die schonendere Zerkleinerung auch einen höheren Faserverlust bedeuten.



Abbildung 21: Probenblätter aus dem Pulp der Zerkleinerungsaggregate HC, LC und ZT vor der Sortierung

2.3.4 Faserqualität und Prozesswasser

Die Versuche bei VOITH wurden mit Frischwasser durchgeführt, die Versuche mit dem Kavitationspulper mit einem Kreislaufwasser, die Versuche in der Papierfabrik, in einem 100 % geschlossenen Wassersystem.

Der Einfluss des Wassersystems auf die Bindefähigkeit der Faser ist nachgewiesen, bzw. es wird die Faserquellbarkeit und damit die Faserqualität auf die einzelnen Zerfaserungssystemergebnisse einen Einfluss haben.

2.3.5 Bewertung der Faserqualität

Die Faserqualität der einzelnen Versuchspunkte unterscheiden sich nicht wesentlich in der mechanischen Festigkeit, welche auf die Faserquellung und die Aufbereitung zurückzuführen sind. Die Standardbewertung der Faserqualität kann damit unabhängig von den Aggregaten gewählt werden. Die Bewertung der Faserqualität ist in diesem Fall auch durch den Einsatz von Frischwasser zu sehen. Aus diesem Grund lässt sich der Versuch mit dem Kavitationspulper nicht analog bewerten. In den VOITH Versuchen wurden zusätzlich die unterschiedlichen Altpapierqualitäten abgebildet, dort wurden keine wesentlichen Unterschiede ersichtlich (siehe Abbildung 22).

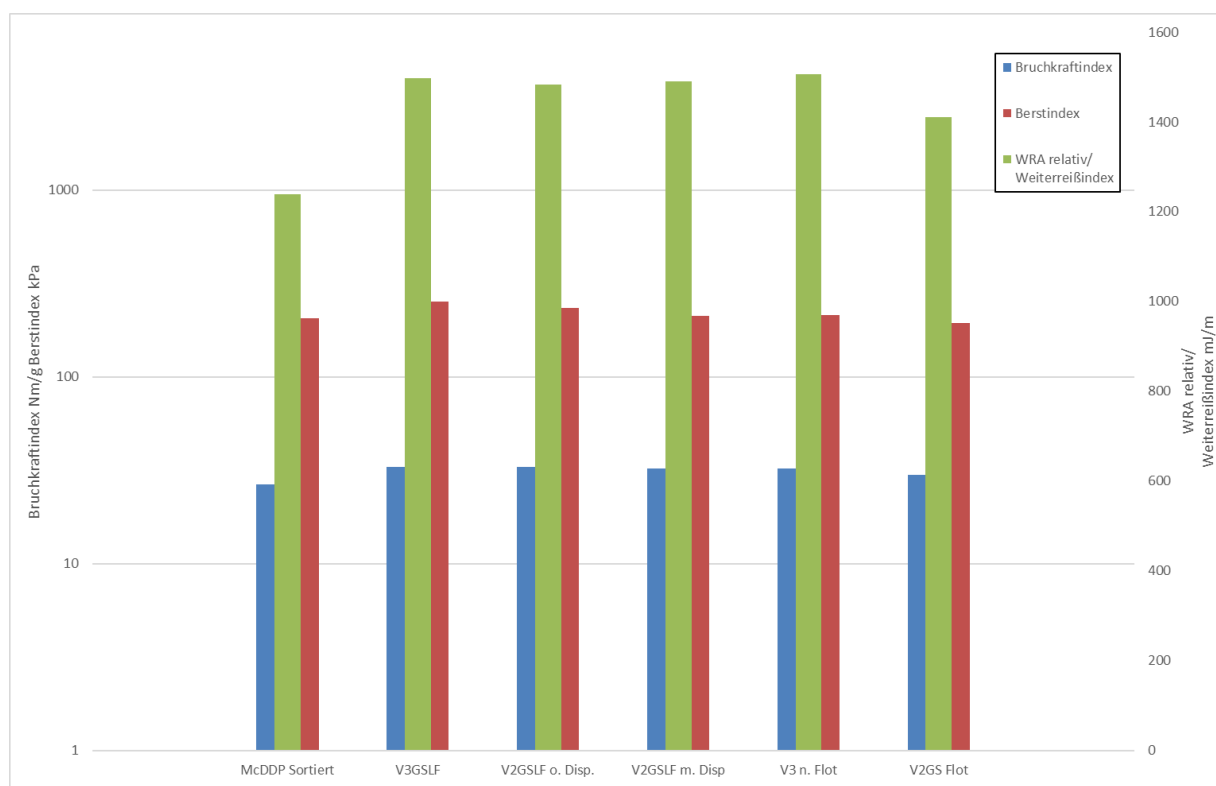


Abbildung 22: Vergleich von Fasereigenschaften in den Versuchen bei VOITH

In den Maschinenversuchen konnte das nur teilweise bestätigt werden, da typischerweise eine sehr hohe Belastung an Salzfracht (Leitfähigkeit) und chemischem Sauerstoffbedarf (CSB) in dem Prozesswasser auftritt. Parallel zu den Versuchen wurde getestet, ob ein kontinuierliches Filtersystem mit einer Filtermaschenweite von 60 µm in der Lage ist, das Siebwasser zu reinigen, um die CSB-Fracht und den Feinstoffgehalt zu senken. Das konnte nicht bestätigt werden. Offensichtlich ist der Gehalt an Feinstoffen und kolloidal gelöster Stoffe mit > 3 g/l im Siebwasser nicht durch ein Filtersystem systematisch zu senken.

Altpapierverarbeitende Papierfabriken haben i. d. R. keine Faserentwicklung über Mahlaggregate, da die recycelten Fasern bereits entwickelt sind. Der Einfluss der Prozesswässer und der chemisch-physikalisch-biologischen Bestandteile im Prozesswasser auf die Bindekraft der Fasern wird weiter untersucht.

In den industriellen Versuchen wurde teilweise eine Schwächung der Papierparameter durch den Einsatz von PPK aus LVP nachgewiesen.

2.3.6 Ausblick

Die Abtrennung der Störstoffe frühzeitig aus der Altpapierzerfaserung ist bei der Verwendung von PPK aus LVP deutlich wichtiger, da die Sorte 550 eine höhere Belastung an Störstoffen enthält. Zu der sinnvollen Energieeinsparung und der Reduzierung des Faserverlustes durch die Auswahl des geeigneten Zerfaserungsverfahrens ist auch der Übergang von Kontaminanten aus dem Wertstoff auf das Stoff-Wassersystem wichtig. Eine frühe Abtrennung reduziert diesen Übergang, und ermöglicht damit einen besser steuerbaren Prozess. Alle anderen Verfahrensschritte zur Abtrennung von Kontaminanten erhöhen sonst den Energiebedarf und den Faserverlust. Den Zusammenhang zwischen der Faseraufbereitung, der Inhaltsstoffe der Prozesswasser und der Entwicklung der papierspezifischen Parameter wurde innerhalb von EnEWA nicht weiter untersucht, dort ist weiterer Forschungsbedarf notwendig.

2.4 Arbeitspaket 4: Hygienisierung

Das Arbeitspaket 4 (AP4) wurde durch PROPAKMA, ANTS und LEIPA bearbeitet. Im Projekt ist eine Wärmebehandlung der Fasern aus selektiv erfassten gemischten Abfallströmen vorgesehen, um die Mikrobiologie im Faserstoff zu reduzieren. In einschlägigen Quellen ist die Reduzierung der Mikrobiologie durch die Temperatur in der Trockenpartie nachgewiesen worden. Zusätzlich wurden umfangreiche Untersuchungen zur Keimreduktion durch Stoff/Wassertrennung und Temperaturführung in der Papiermaschine gemacht. Die Oberflächentemperatur der Trockenzylinder beträgt bis zu 129°C, sodass eine Oberflächentemperatur von ca. 105°C erreicht wird. Selbst in Verpackungspapieren mit höherem Flächengewicht wird von einer Kerntemperatur von > 70°C ausgegangen. Trotz der bereits standardmäßig vorhandenen Hygienisierung im Papierproduktionsprozess wurde im Projekt EnEWA die Möglichkeit geprüft, über eine zusätzliche Wärmebehandlung mittels Heißdispergierung eine weitere Hygienisierung des Stoffes zu erreichen. Über den Prozessverlauf wurden deshalb zusätzlich aerobe und anaerobe Bakterien und Sporen, Schimmelpilze und Hefen in einer großtechnischen Anlage und in einem Produktionsversuch über 24h hinweg bestimmt.

2.4.1 Methode und mikrobiologische Untersuchungen im VOITH Technikum, Heidenheim

Zusätzlich zu den Zerfaserungsversuchen im VOITH Technikum in Heidenheim wurden dort auch die Hygienisierungsversuche des Faserstoffes durchgeführt. Nach erfolgter Zerfaserung und der Abtrennung der Störstoffe aus dem Faserbrei (vgl. Abbildung 18) erfolgte die Eindickung über einen Faltensiebeindicker und die Hygienisierung des Faserbreis durch Heißdispergierung. Der Faserbrei wird unter Druck auf bis zu 115 C (V2) bzw. 108°C (V3) (Mindesttemperatur von 90°C) erhitzt. Die unterschiedliche Temperatur ergab sich aus der Versuchsreihenfolge. Im Versuch wurde festgestellt, dass eine Erhitzung über 108°C nicht prozessstabil durchführbar war. Der Hygienisierungsprozess geschieht in Anlehnung an die Aufbereitung und Wiederverwertung von Flüssigkeitskartonagen und umfasst folgende Phasen:

1. Eindickung im Eindicker und der Schneckenpresse zur Wasserabscheidung und Trennung der Prozesswasserkreisläufe,
2. Erwärmung in Heizschnecke und Heißdispergierung der Fasern zur Mahlung von Farbteilchen und Reststörstoffen.

Anschließend wurde der aufbereitete und hygienisierte Stoff in der EcoCell-Flotationsanlage (Flotationszelle) weiterverarbeitet. Zur Bestimmung der Kontaminanten und flüchtigen Bestandteile im Stoff wurden an unterschiedlichen Stellen im Prozess Proben entnommen (rote Punkte in Abbildung 18). Die Entnahme erfolgte nach Abzug aus dem Pulper in der Ableerbütte, nach Eindickung in der Schneckenpresse, vor dem Disperger, nach dem Disperger und im Anschluss an die Flotation.

Die mikrobiologischen Untersuchungen erfolgen anhand der Feuchtegehaltsermittlung nach DIN EN ISO 6381-1:2022-07 sowie der Bestimmung der Bakterien, bakteriellen Sporen, Schimmelpilze und Hefen gemäß DIN ISO 8784-1-2016-05 und ISO 8784-3:2022-04. Zusätzlich zu den aeroben Bakterien und Sporen werden die anaeroben Bakterien und Sporen bestimmt. Es handelt sich dabei um eine Doppelbestimmung der koloniebildenden Einheiten je Gramm Probenmaterial. Dazu werden 2 g des Probenmaterials in 200 ml steriler Ringerlösung mit 0,01 % Tween-80 im Stomacher verdünnt. Ein Teil der Fasersuspension wird

zur Bestimmung der bakteriellen Sporen bei 80 °C innerhalb von 10 min pasteurisiert. Die Bestimmung der aeroben Bakterien und Sporen erfolgt auf PC-Agar nach 48 h Kultivierung bei 32°C. Der Nachweis der anaeroben Bakterien und Sporen erfolgt auf Schaedler-Agar nach anaerober Kultivierung für 3 Tage bei 30°C. Schimmelpilze und Hefen werden auf Sabouraud – 4 % Glucose-Agar mit Chloramphenicol für 5 Tage bei 25 °C kultiviert. Die sechs bestimmten Parameter aerobe Bakterien, aerobe Sporen, anaerobe Bakterien, anaerobe Sporen, Schimmelpilze und Hefen werden jeweils pro Gramm Frischgewicht (FG) sowie pro Gramm Trockenmasse (TM) bestimmt.

Der Versuchsaufbau der Heißdispergierung sowie die Ergebnisse sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Reduktion der Keimbelastung durch den Einsatz von Temperaturen von über 90°C. Die Messmethode DIN EN 8784-1 konnte keine Bakterien mehr nachweisen. Es ist jedoch nachweisbar, dass bei längeren Lagerzeiten wieder Mikrobiologie nachweisbar. Also kann der Stoff nicht als steril eingestuft werden. Gleichzeitig ist die Abtrennung des Prozesswassers in der Schneckenpresse zur Reduktion der Keime nachweisbar. Eine Stoffaufbereitung mit einer mesophilen Temperatur von 25-35°C führt zu einem Keimwachstum, da aufgrund der Verschmutzungen im PPK aus LVP deutliche Wachstumsraten von bis zu 10⁹ Keimen nachweisbar sind.

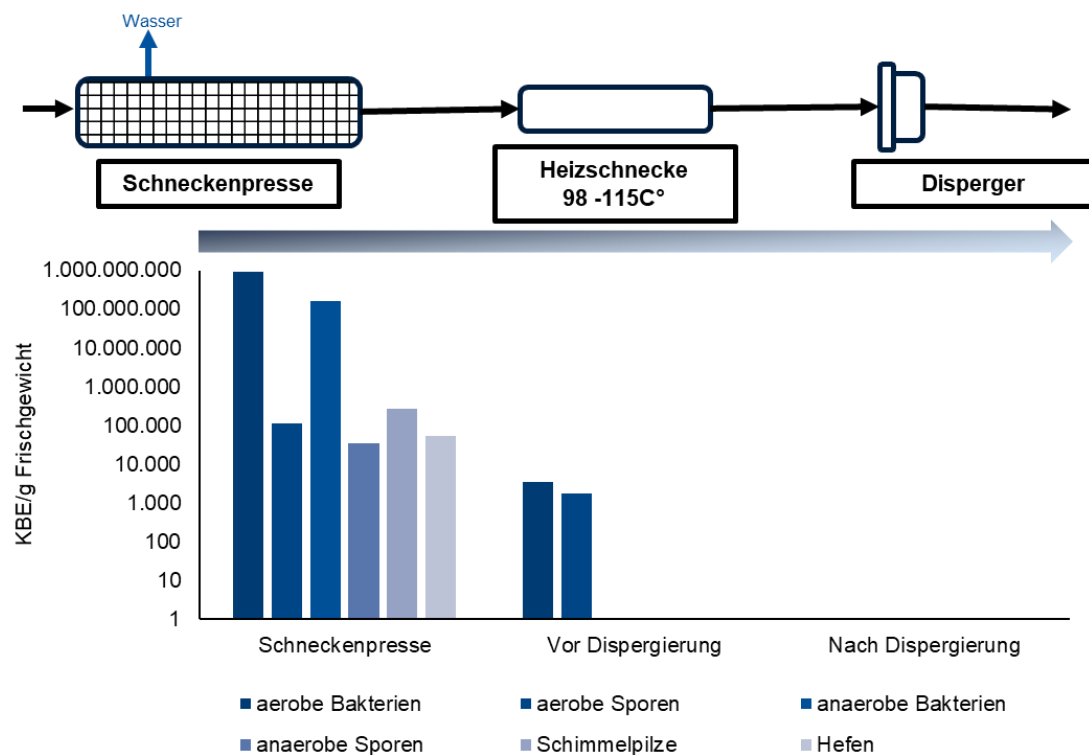


Abbildung 23: Reduktion der Keimbelastung durch Heißdispergierung (Material V2)

Methode und mikrobiologische Untersuchungen des 24h-Versuchs (LEIPA, Schrobenhausen)

Zusätzlich zu den Technikumsversuchen wurde 2024 ein Produktionsversuch mit Schwerpunkt auf die Prozesswasserkreisläufe durchgeführt. Dabei erfolgte eine umfangreiche Analyse der Keimbelastungen in Wasser und Faserstoff.

Nachsortiertes PPK aus LVP verpresst mit gemischtem Altpapier (1.02 nach europäischer Altpapiersortenliste) wurden zur Kartonfabrik geliefert. Im Produktionsversuch folgten in der Stoffaufgabe auf einen verpressten Ballen PPK aus LVP gemischt mit 1.02 immer drei Ballen

aus reinem gemischtem Altpapier 1.02. Der Inputstrom der Kartonproduktion setzte sich somit aus 12,5 Ma.-% PPK aus LVP und 87,5 Ma.-% gemischtem Altpapier der Sorte 1.02 zusammen.

Den ersten Schritt der Aufbereitung stellte die Auflösung im Pulper dar. Der Pulper wurde mit Prozesswasser gefüllt und der Inputstrom eingetragen. Ein Rotor sowie verschiedene Leisten und Kanten lösen durch mechanische Beanspruchung wie Reibung, Druck, Beschleunigung und Scherkraft die Papierfaserverbund im Prozesswasser auf und eine Fasersuspension entsteht. Zur Zerfaserung kommt ein herkömmlicher LC-Pulper zum Einsatz. Im LC-Pulper wird mit einer Stoffdichte von ca. 6 Ma.-% zerfasert und kontinuierlich der entstehende Faserbrei über Lochsiebe abgezogen. Im Pulper sowie in der anschließenden Stoffaufbereitung wurden über unterschiedliche Grob- und Feinsortierstufen weitere Störstoffe von der Papierfasersuspension abgetrennt und aussortiert. Dazu wurde das komplette Material über den Einlagestrang der Kartonproduktion gefahren, da dieser Strang für höhere Schmutzfrachten ausgelegt ist und die meisten Sortieraggregate der verschiedenen Aufbereitungslinien aufweist. Der aufgereinigte, eingedickte Faserbrei, weiter als „Einlage“ bezeichnet, gelangt in die Stoffbütte. Im nächsten Prozessschritt wird die Einlage mit überschüssigem Siebwasser verdünnt, um den aufgereinigten Faserbrei maschinenfähig zu machen. Die Fasersuspension wird über zehn Trommellochsiebe auf ein Laufband aufgetragen und eine Papierbahn entsteht. Jedes Trommellochsieb ergänzt eine weitere Schicht auf die entstehende Papierbahn. Das überschüssige Wasser der Trommellochsiebe wird gesammelt und dient der Verdünnung der Einlage in der Maschinenbütte. Die Papierbahn wird anschließend gepresst und bei hohen Temperaturen getrocknet. Die Oberfläche wird im Glättwerk glatt gepresst und die Papierrolle anschließend aufgerollt. Die entstehenden Papierrollen werden Tambour genannt.

Um die Kontaminanten und die Mikrobiologie im Prozess zu untersuchen, wurden ca. alle 2 h Stoffproben aus der Stoffaufbereitung gezogen. Die Entnahme erfolgt in der Stoffbütte, hier wurde eine Probe des eingedickten reinen Faserbreis der Einlage genommen.

Zusätzlich zur Wärmebehandlung ist die Auswahl und Dosierung von Bioziden ein wichtiger Bestandteil der Behandlung von Faserstoffen. Speziell Sporen gehören zu den Keimbelastungen, welche nur über den Eintrag von stark oxidierenden Bioziden gesteuert werden können. Andererseits ist die Zugabe von Bioziden limitiert, da im fertigen Produkt keine biozide Wirkung (Hemmhof) nachweisbar sein darf, um eine Verunreinigung der Lebensmittel durch Biozide zu verhindern. Die Entwicklung der Biozönose in einer Papierfabrik ist von vielen Faktoren abhängig. Der Eintrag der Keimbelastung und der Lebensmittelreste aus dem PPK aus LVP beeinflusst das spezifische Wachstum. Allerdings ist der Zustand der Fabrik, der Rohre, die Temperatur, die Verweildauer im Prozess und die Rezeptur ebenfalls wesentlich für die Entwicklung. Grundsätzlich kann von einer fabrikspezifischen Biozönose gesprochen werden.

Die Messung der koloniebildenden Einheiten (KBE) von aeroben Bakterien, aeroben Sporen, anaeroben Bakterien, anaeroben Sporen, Schimmelpilzen und Hefen im Stoff Einlage zeigt leichte Veränderungen der Biozönose über den Versuchszeitraum. Steigende Tendenzen sind für die Ansammlung von anaeroben Bakterien und Schimmelpilzen erkennbar. Da der Versuch in einer Kartonproduktionsanlage mit geschlossenem Wasserkreislauf durchgeführt wurde, handelt es sich hier um einen Worst-Case-Versuch. Der Langzeitversuch in der Papierfabrik hat keine wesentliche Erhöhung der Keimbelastung aufgezeigt, jedoch führt die Veränderung des Eintrags der Mikrobiologie und der Lebensmittelreste zu einer Verschiebung der

Biozönose im Bereich der Hefen und Schimmelpilze. Das lässt sich anhand von Messungen nachweisen. Im Gegensatz zum VOITH-Versuch mit Frischwasser zeigt der Langzeitversuch und die Faseraufbereitung im Kavitationspulper eine leichte Absenkung des pH-Wertes (vgl. Abbildung 24). Mit fortlaufender Versuchsdauer war ein säuerlicher Geruch in der Stoffaufbereitung wahrnehmbar.

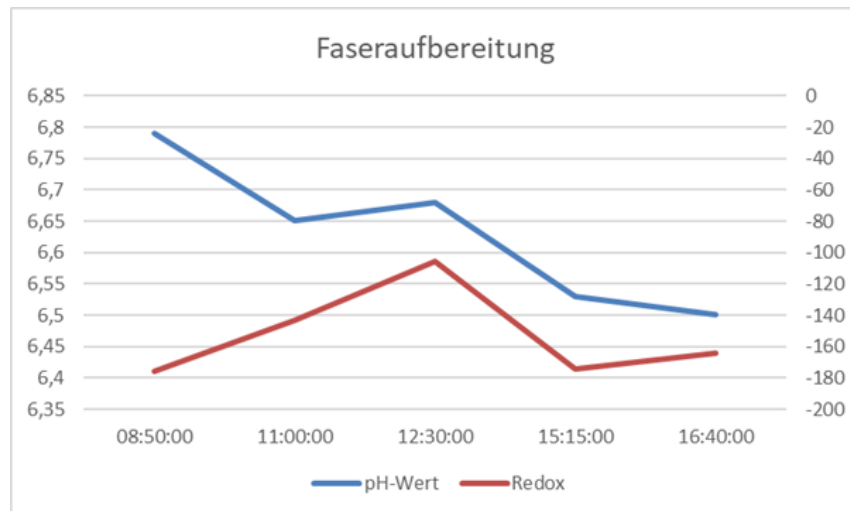


Abbildung 24: Abbildung Entwicklung von pH-Wert und Redox in der Stoffaufbereitung im Kavitationspulper

2.4.2 Kontaminanten bei den Technikumsversuchen bei VOITH und beim 24h Produktionsversuch in Schrobenhausen (LEIPA)

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist der Übergang von Kontaminanten SoC (Substances of Concern) aus dem Altpapier in den Papierstoff. Diese SoCs unterliegen teilweise Grenzwerten gegenüber dem Einsatz in Lebensmittelverpackungen gemäß der Empfehlung XXXVI des Bundesamtes für Risikobewertung. Eine Zulassung der Rohstoffe aus der gemischten Sammlung unterliegt damit auch der Freigabe durch dieses Bundesamt und der Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen.

Die Bestimmung der flüchtigen Kontaminanten im Stoff erfolgte mittels GCMS aus einem Acetonextrakt gem. DIN EN 14719:2005-10. Siebzehn Verbindungen werden berücksichtigt (siehe Abbildung 25).

Bestimmung von flüchtigen Kontaminanten *

Die Bestimmung erfolgte gemäß SOP 160.200 mittels GCMS aus einem Acetonextrakt. Folgende Verbindungen wurden berücksichtigt:

Diisopropyl-naphthalin (DIPN)	[38640-62-9]
Sonstiges Lösungsmittel	
Benzophenon	[119-61-9]
4-Methylbenzophenon	[134-84-9]
Dimethylphthalat	[131-11-3]
Diethylphthalat	[84-66-2]
Dibutylphthalat	[84-74-2]
Diisobutylphthalat	[84-69-5]
Di(2-ethylhexyl)phthalat	[117-81-7]
Di-n-octylphthalat	[117-84-0]
Benzylbutylphthalat	[85-68-7]
Diisononylphthalat (DINP)	[68515-48-0]
Diisodecylphthalat (DIDP)	[26761-40-0]
Di-(2-ethylhexyl)adipat	[103-23-1]
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiol-diisobutyrat (TXIB)	[6846-50-0]
Diisononyl-1,2-cyclohexandicarboxylat (DINCH)	[166412-78-8]
Diethylen-glykoldibenzoat	[120-55-8]
Benzyl-2-naphthylether	[613-62-7]

Bestimmungsgrenzen: DINCH 10 mg/kg, DINP 10 mg/kg, DIDP 10 mg/kg;
alle weiteren Verbindungen 1 mg/kg.

Abbildung 25: Bestimmte flüchtige Kontaminanten

Die Menge an gemessenen flüchtigen Kontaminanten über die Prozesskette bei der Firma VOITH ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Stoff-Wasser-Führung im Prozess einen Einfluss auf die Kontaminanten hat. Die Prozesse zur Anlagerung der Kontaminanten an Luftblasen, Feinstoffe und Fasern, sowie anorganische Bestandteile ist noch nicht ausreichend erforscht, sollte aber in weitergehenden Projekten nachgewiesen werden. Weiterhin ist eine Unterscheidung der Kontaminanten in wasserlösliche, sowie absorbierbare oder adsorbierbare Gruppen zu unterscheiden, um eine Steuerung der Kontaminanten besser zu führen.

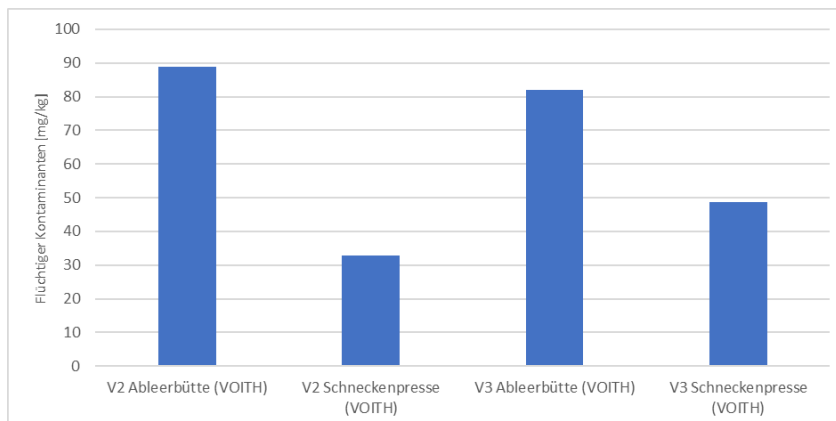


Abbildung 26: Flüchtige Kontaminanten über den Prozessverlauf im VOITH Technikum Heidenheim

Neben den Untersuchungen der flüchtigen Bestandteile, wurden auch Recyclingkontaminanten für den Direktkontakt mit Lebensmitteln untersucht. Da die vorliegende Anwendung der Papierverpackung nur für den Kontakt mit trockenen, nicht fettenden Lebensmitteln vorgesehen ist, wurden die weiteren Untersuchungen auf flüchtige Bestandteile reduziert. Im Technikum bei VOITH und in der Kavitationsanlage unterscheidet sich die Stoff- und Kreislaufführung von realen Systemen. Gerade die Auswaschung der Fasern mit Frischwasser im Technikum, bzw. der kleine geschlossene Wasserkreislauf mit nicht idealen Bedingungen beim Kavitationspulper hat eine große Auswirkung auf die Konzentration an Kontaminanten im Prozess. Deshalb wurden Anteile an flüchtigen

Kontaminanten zusätzlich im Produktionsversuch im Stoff der Einlage bestimmt. Abbildung 27 zeigt die Entwicklung der Summe an flüchtigen Kontaminanten im Stoff der Einlage über den 24h-Produktionsversuch. Die Probe um 6:00 stellt die Nullprobe vor Versuchsbeginn dar. Wie zu sehen ist, konnte durch den Einsatz von PPK aus LVP keine signifikante Anreicherung an flüchtigen Kontaminanten festgestellt werden.

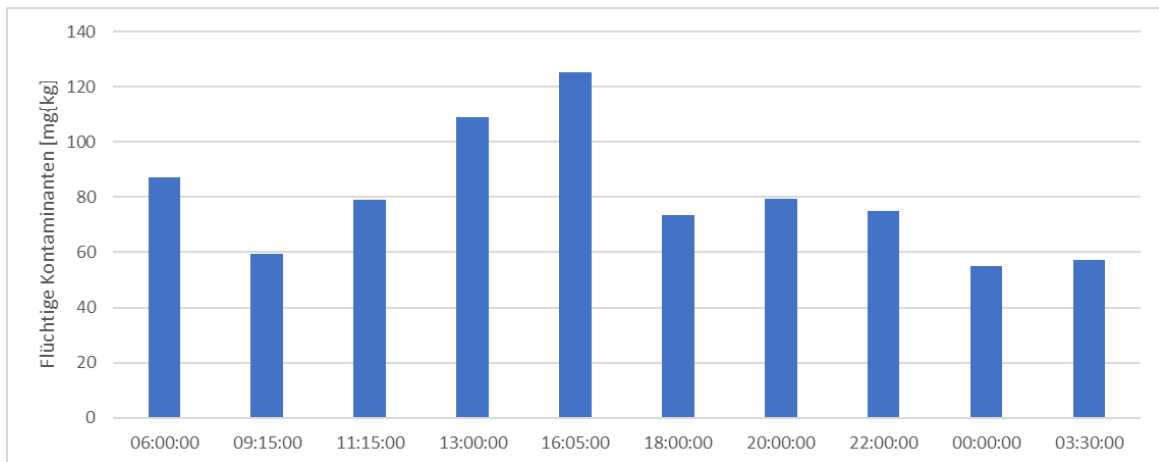


Abbildung 27: Entwicklung der Gesamtkonzentration an flüchtigen Kontaminanten über den 24h-Produktionsversuch

Vergleichbare Werte vom VOITH-Versuch lassen sich nicht darstellen, da dort das Wasser nicht im Kreislauf geführt worden ist, und kein Papier-Fertigprodukt entstanden ist. Wesentlich für den Versuch war der Nachweis, dass es in einem längeren Versuch mit geschlossenem Kreislauf nicht zu einer Anreicherung von flüchtigen Kontaminanten im Prozesswasser kommt. Parallel sind auch andere Parameter wie die mikrobielle Belastung und MOSH/MOAH nicht angestiegen (siehe Abbildung 28). Die Reduktion der mikrobiellen Belastung und der MOSH/MOAH Kontamination ist Teil des Gesamtprojektes.

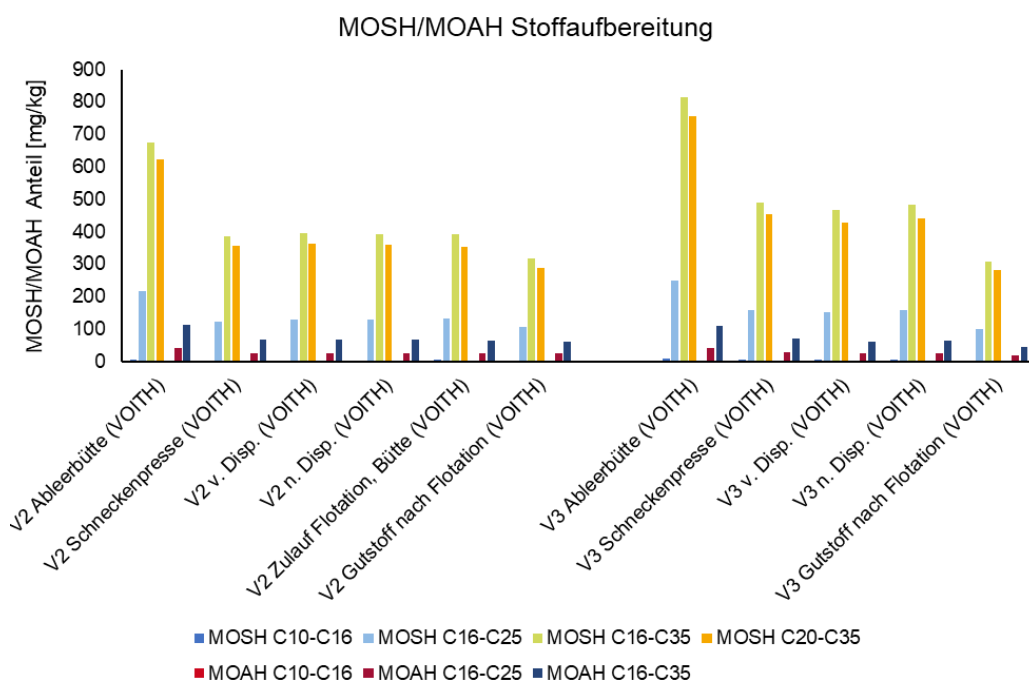


Abbildung 28: Entwicklung von MOSH/MOAH im Versuch VOITH

Die Konzentration von MOSH/MOAH wurde im gesamten Aufbereitungsprozess des Technikums bei VOITH untersucht. Die Entfrachtung der MOSH/MOAH ist insofern wichtig, da es für Lebensmittelverpackungen eindeutige Grenzwerte gibt. Im Technikum konnte die Senkung der Belastung an MOSH/MOAH um ca. 30% nachgewiesen werden. In diesem Zusammenhang ist die Prozessführung, die Auswahl an Trennaggregaten und der Faserverlust wesentlich. Die Gegenstromverdünnung des Stoffes und damit eine Trennung der Wasserkreisläufe ist für die Prozessführung wesentlich. Die generelle Abreicherung von Mineralöl im Deinkingprozess wurde nachgewiesen. Eine Reduktion von mineralölbasierten Kohlenwasserstoffen ist in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht worden, allerdings hat sich bisher noch keine wirtschaftliche technisch erfolgreiche Lösung ergeben. Die Reduktion der Mineralölbestandteile in den Druckfarben wird wirksam, allerdings hat die Zusammensetzung der Druckfarben in den Altpapiersammlungen bisher noch nicht wesentliche Erfolge in der Reduzierung erbracht. Im Projekt EnEWA konnte für Papier aus gemischten Abfallsammlungen keine wesentliche Erhöhung an MOSH/MOAH Werten im Vergleich zu getrennt gesammeltem Altpapier festgestellt werden.

2.4.3 Zusammenfassung und Ausblick

Verpackungspapiere unterliegen aktuell keiner mikrobiologischen Grenzwerteregulierung für den Einsatz in der Lebensmittelverpackung. Die aktuelle Umsetzung eines Hygienemanagements zur Herstellung von Verpackungspapieren für Lebensmittel betrachten keine mikrobiologischen Untersuchungen, da eine ausreichende Abtötung der Keime in der Papiertrocknung stattfindet. Zusätzliche Prozesssteuerung der Papieraufbereitung durch den Einsatz von Temperatur und mikrobiziden Additiven ist in der industriellen Produktion üblich. Der Einsatz von Altpapier aus einer gemischten Erfassung bedarf einer speziellen Prozessführung und Stoffbehandlung, um das Risiko einer Beeinträchtigung des Verpackungsgutes durch Geruch, Geschmack oder Keime auszuschließen. Die Ergebnisse aus den Versuchen haben eine Verschiebung der Biozönose beim Einsatz des PPK aus LVP ergeben. Diese spezielle Prozesssteuerung wurde im Projekt EnEWA untersucht. Eine Gefährdung der Menschen durch pathogene Keime aus der papierbasierten Verpackung auf trockene nicht fettende Lebensmittel kann nach heutigem Kenntnisstand nicht nachgewiesen werden. Die Entstehung von Schimmelpilzen durch Sporen kann bei nicht bestimmungsgemäßer Lagerung durch auftretende Feuchtigkeit begünstigt werden. Verschimmelte Lebensmittel werden nicht verwendet, daher kann das Risiko einer humanpathogenen Auswirkung als sehr niedrig eingestuft werden. Studien mit grundsätzlichen Überlegungen zur weiteren Betrachtung liegen als Basis für weitere Projekte vor.

Der Übergang von Kontaminanten aus dem Altpapier in das Stoff-Wassersystem findet statt. Die Technologie zur Verringerung der Kontaminanten kann über eine geeignete Stoff-Wasser-Führung und den Einsatz von Prozessen stattfinden. Ein Monitoring der Kontaminanten über eine weitere periodische Probenahme und Auswertung ist notwendig, damit die Einhaltung der gesetzlichen Regelung 1935/2008 und bilateralen Umsetzung der Empfehlung XXXVI des BfR gewährleistet ist. Die Entwicklung der Lebensmittelsicherheit und -hygiene nach Vorgaben der Verordnung EG 178/2002 und EG 852/2004 überträgt die Verantwortung für die Hygiene auf die Lebensmittelunternehmer. Dieser nutzt im Regelfall die Empfehlung XXXVI des BfR als Basis für die Vertragsgestaltung.

Neue Erkenntnisse und Grenzwerte zu der Migration von Kontaminanten aus der Verpackung in das Lebensmittel wird sowohl die Messmethoden und die Verfahrenstechnik beeinflussen. Die vorliegenden Erkenntnisse bilden daher eine Grundlage für weitere Forschung und

Entwicklungen.

2.5 Arbeitspaket 5: Reststoffrecycling

Im Rahmen des Arbeitspakets 5 (AP5), verantwortet durch ANTS, PROPAKMA und LEIPA, wurde untersucht, wie die Rejekte, die während der Altpapieraufbereitung aus den Prozessschritten des AP3 und AP4 entstehen, stofflich verwertet werden können. Das Ziel war es, durch Methoden des chemischen Recyclings, insbesondere durch Pyrolyse, eine wertvolle Nutzung der verbleibenden Reststoffe zu prüfen. Der Fokus lag auf der Analyse der Zusammensetzung der Rejekte und der Überprüfung von Methoden zur Trennung und Trocknung, um potenziell sortenreine Kunststoffe zurückzugewinnen. Zudem sollten die Auswirkungen dieser Reststoffbehandlung auf die Sortenzusammenstellung und die weitere Verwertbarkeit untersucht werden.

2.5.1 Methodische Vorgehensweise und Ergebnisse

1. Sortieranalyse der Rejekte (AP5.1)

Zunächst wurde eine detaillierte Sortieranalyse der Rejekte durchgeführt, die aus den Hygienisierungsversuchen (AP4.2) und der Zerfaserung (AP3.2) stammten. Die Analyse zielte darauf ab, die Zusammensetzung der Rejekte zu bestimmen und die Möglichkeit zu prüfen, einzelne Komponenten für eine stoffliche Verwertung zu trennen. Die Rejekte bestanden hauptsächlich aus einer Mischung von Papierfasern, Kunststofffolien und weiteren papierfremden Stoffen. Um die Trennbarkeit der verschiedenen Komponenten zu untersuchen, wurden sowohl händische als auch physikalisch-chemische Analysen durchgeführt. Zu den chemischen Analysen gehörten unter anderem eine Brennstoffanalyse sowie eine Thermogravimetrie, um die verschiedenen Bestandteile der Rejekte hinsichtlich ihres thermischen Verhaltens und ihrer Zersetzbarkeit zu charakterisieren. Die Ergebnisse der Sortieranalyse zeigten, dass die Rejekte eine signifikante Menge an kunststoffhaltigen Bestandteilen enthielten, die durch eine gezielte thermische Behandlung wie Pyrolyse potenziell in wertvolle Sekundärrohstoffe umgewandelt werden könnten. Es konnte auch eine Trennbarkeit von Papierfasern und Kunststoffkomponenten festgestellt werden, was auf eine stoffliche Verwertung der beiden Fraktionen hinweist. Diese Versuche in einem Technikum zur weiteren Behandlung der Rejekte ergaben eine Verbesserung in der Faserabtrennung, eine Fraktion von Faserbündeln und papierfremden Stoffe für eine rohstoffliche Verwertung, sowie eine Kunststofffraktion zur stofflichen Verwertung. Diese Rejektverwertungswege werden in dem Nachfolgeprojekt SPaRe weiter behandelt.

2. Tastversuche chemisches Recycling – Pyrolyse der Rejekte (AP5.2)

Basierend auf den Erkenntnissen der Sortieranalyse wurden im nächsten Schritt Tastversuche zur Pyrolyse der kunststoffhaltigen Rejekte durchgeführt. Ziel war die Charakterisierung der Rejekte in Bezug auf ihren Einsatz in thermochemischen Recyclingprozessen, insbesondere der Pyrolyse (Wärmebehandlung unter weitgehendem Luftabschluss) zur Erzeugung von Grundstoffen für die chemische Industrie (chemisches Recycling). Ein Nebenziel der Untersuchungen bestand darin, geeignete Analyseverfahren und die zugehörige Aufbereitungskette für Rest- und Abfallstoffe zu erproben. So sollten Herausforderungen beim Einsatz der Reststoffe in kontinuierlich betriebenen Pyrolyseprozessen identifiziert und der weitere Forschungsbedarf zur Verwertung der Rejekte in chemischen Recyclingverfahren abgeleitet und konkretisiert werden.

In einem ersten Schritt wurden Laborpyrolysen durchgeführt, um die grundsätzliche Eignung der Rejekte für diese Technologie zu testen. Die untersuchten Rejekte entstammen dem

Produktionsversuch Schrobenhausen (vgl. Kap. 2.4) und den Technikumsversuchen bei VOITH (vgl. Kap. 2.3). Diese werden nachfolgend als „faserreiche“ (Produktionsversuche) bzw. „faserarme“ (VOITH) Fraktionen bezeichnet. Die Untersuchungen des thermischen Verhaltens mittels Thermo-gravimetrie wurden zu einem frühen Projektzeitpunkt mit Proben aus dem jeweils ersten Produktionsversuch durchgeführt. Die späteren Pilotversuche im kontinuierlichen Betrieb wurden mit einer Mischprobe der unterschiedlichen Produktionsversuche durchgeführt. Im Absatz Feststoffanalytik werden daher die Analysen der für die Pilotversuche eingesetzten Materialien dargestellt.

Feststoffanalytik

Zur Charakterisierung der Brennstoffeigenschaften der Rejekte wurden die Einzelfraktionen labor-analytisch charakterisiert. Dabei wurden relevante Brennstoffparameter wie Wassergehalt (Anlehnung an DIN 51718), Aschegehalt (Anlehnung an DIN 51719), Gehalt flüchtiger Bestandteile (Anlehnung an DIN 51720), der Brennwert (Anlehnung an DIN 51900) und die Elementarzusammensetzung (Anlehnung an DIN 51724 und DIN 51727) untersucht. Nach dem Erhalt der Proben von den Projektpartnern wurden die Proben mit flüssigem Stickstoff kryogen auf Analysenfeinheit zerkleinert, homogenisiert und repräsentativ geteilt. Abbildung 29 zeigt Fotos von randomisiert entnommenen Teilproben der beiden untersuchten Fraktionen.



Abbildung 29: Faserreiches (links) und faserarmes Probenmaterial für die Brennstoffanalytik

PFAS-Analytik

Die Analytik von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) stellt aufgrund der hohen Strukturvariabilität dieser Stoffklasse eine große Herausforderung dar. Abhängig von den Eigenschaften werden unterschiedliche Analyseverfahren eingesetzt. LCxMS-Verfahren (Flüssigchromatographie gekoppelt mit Massenspektrometrie) werden für polare, semi-flüchtige Verbindungen genutzt, während GC-MS-Verfahren (Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektrometrie) vorwiegend für nicht polare, flüchtige Komponenten Anwendung finden. Die größte Herausforderung ist jedoch die hohe Anzahl an verschiedenen PFAS. Für die wenigsten dieser Substanzen sind Analysestandards verfügbar. Neben der Einzelanalytik gewinnt daher die Bestimmung des gesamten organisch gebundenen Fluoranteils an

Bedeutung (= Summenparameter), insbesondere wenn es darum geht, das gesamte PFAS-Belastungspotenzial einer Probe zu erfassen. Die Bestimmung kann mittels Verbrennungsochromatographie (CIC) erfolgen. Der Analytik ist ein Adsorptions- (Aktivkohle) oder Extraktionsschritt vorgeschaltet. Dadurch wird das organisch gebundene vom anorganisch gebundenen Fluor getrennt.

Allen Analyseschritten vorangestellt sind die Probenahme und die Probenvorbereitung. Während flüssige Proben nach einer Aufreinigung direkt in den Analysator überführt werden können, ist für Feststoffproben eine Extraktion notwendig (s. o.). Chemisch und physikalisch heterogen zusammengesetzte Feststoffe und organische Kondensate stellen hierfür eine besondere Herausforderung dar. Fluorpolymere können nicht mit einem Lösungsmittel aus einer Probe extrahiert werden. Der Anteil an PTFE und anderen Fluorpolymeren ist daher mit den etablierten Analyseverfahren nicht detektierbar.

Für Trinkwasser, Böden, Sedimente und Klärschlamm existieren standardisierte Methoden für die PFAS-Analytik (DIN EN 17892 und DIN 38414-14). Diese ermöglichen trotz analytischer Herausforderungen eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Für komplexe Stoffe, insbesondere Abfall- und Reststoffe, sind bisher keine Standards bekannt. Insbesondere im Kontext der Kreislaufwirtschaft ist es zwingend erforderlich, für Input- und Outputströme des stofflichen Recyclings geeignete Analyseverfahren für PFAS (sowie die zugehörige Aufbereitungskette der Proben) zu etablieren. Andernfalls kann nicht ausgeschlossen werden, dass PFAS in den Recyclingprozessen weitergetragen und in die erzeugten Produkte eingetragen werden.

Im ersten Schritt wurden akkreditierte und etablierte Analyselabore, welche die Untersuchung von PFAS in Boden- und Wasserproben kommerziell anbieten mit der Analyse der Proben beauftragt. Für die Feststoffe (Rejekte und Karbonisate) erfolgte vor der Übergabe der Proben an die Labore eine kryogene Zerkleinerung auf Analysenfeinheit.

Die ersten Anfragen ergaben, dass die Labore aufgrund der komplexen Matrix an ihre methodischen Grenzen stießen. Als Schwierigkeiten wurden das Aufschwemmen des Materials während der Eluatherstellung und eine notwendige Erhöhung der Bestimmungsgrenzen auf über 10 µg/kg zurückgemeldet. Letztendlich konnte von keinem der drei angefragten Labore eine valide Analyse durchgeführt werden.

Durch einer Literaturrecherche wurde das Forschungsinstitut Technologiezentrum Wasser (TZW) in Karlsruhe ausfindig gemacht. Am TZW konnte die Analysemethodik auf die Erfordernisse der Probenmatrix angepasst werden. Die aufbereiteten Proben wurden mittels LCxMS auf 56 PFAS-Einzelsubstanzen analysiert. Darüber hinaus wurde ein Summenparameter für den organisch gebundenen Fluoranteil (EOF = extrahierbares organisches Fluor, Detektion mittels CIC) und zusätzlich für den Gesamtfluoranteil in der Probe (Analyse ebenfalls mittels CIC, ohne vorherige Extraktion) bestimmt. Letzterer Wert wurde als konservative Abschätzung für die Fluoranteile aus Fluorpolymeren (PTFE, PVDF, FKM) herangezogen.

Thermogravimetrie

Zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens der Materialien wurde die Zersetzung in inerter Atmosphäre (Stickstoffatmosphäre) in einer Thermowaage der Firma Linseis (Modell PT1600) in Anlehnung an DIN 51005 und DIN 51006 untersucht. Dabei wurden die Proben mit konstanter Aufheizrate bis zu einer Zieltemperatur von 700 °C erhitzt. Durch kontinuierliche

Aufzeichnung des Probengewichts kann so das Entgasungsverhalten der Materialien ermittelt werden und Rückschlüsse auf das Verhalten der Proben in thermischen Prozessen gezogen werden.

Pilotversuche im kontinuierlichen Betrieb (Scale-Up)

Zusätzlich zu den durchgeführten Untersuchungen im Labormaßstab wurden auch Tastversuche in einer kontinuierlich betriebenen Pyrolyseanlage durchgeführt. Nachfolgend wird zuerst die Versuchsanlage beschrieben und anschließend die Versuchsplanung und -durchführung erörtert.

Für die Durchführung der Versuche wurde am Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft (TEER) der RWTH Aachen verfügbarer, kontinuierlich betriebener Paddelwellenreaktor genutzt (vgl. Abbildung 30). Das Aufgabematerial wird über eine mit Stickstoff inertisierte Doppelschieberschleuse, die zum Luftabschluss des Prozesses dient, in den elektrisch beheizten Reaktor eingebracht. Eine Paddelwelle fördert das Material anschließend durch den in vier einzeln regelbaren Zonen beheizten Bereich des Reaktors. Das gebildete Karbonisat wird auf der Austragsseite in einen luftdicht angeschlossenen Karbonisatbehälter gefördert, das gebildete Pyrolysegas wird auf der Oberseite abgezogen und gelangt anschließend in die Messstrecke (vgl. Abbildung 31). Nach der Messstrecke wird das Pyrolysegas in einer Nachbrennkammer oxidiert (in der Abbildung nicht dargestellt). Die Versuchsanlage ist für einen Einsatzstoff-Massenstrom bis zu 10 kg/h (abhängig von der Dichte des Einsatzmaterials) und Behandlungstemperaturen bis zu 600 C ausgelegt.

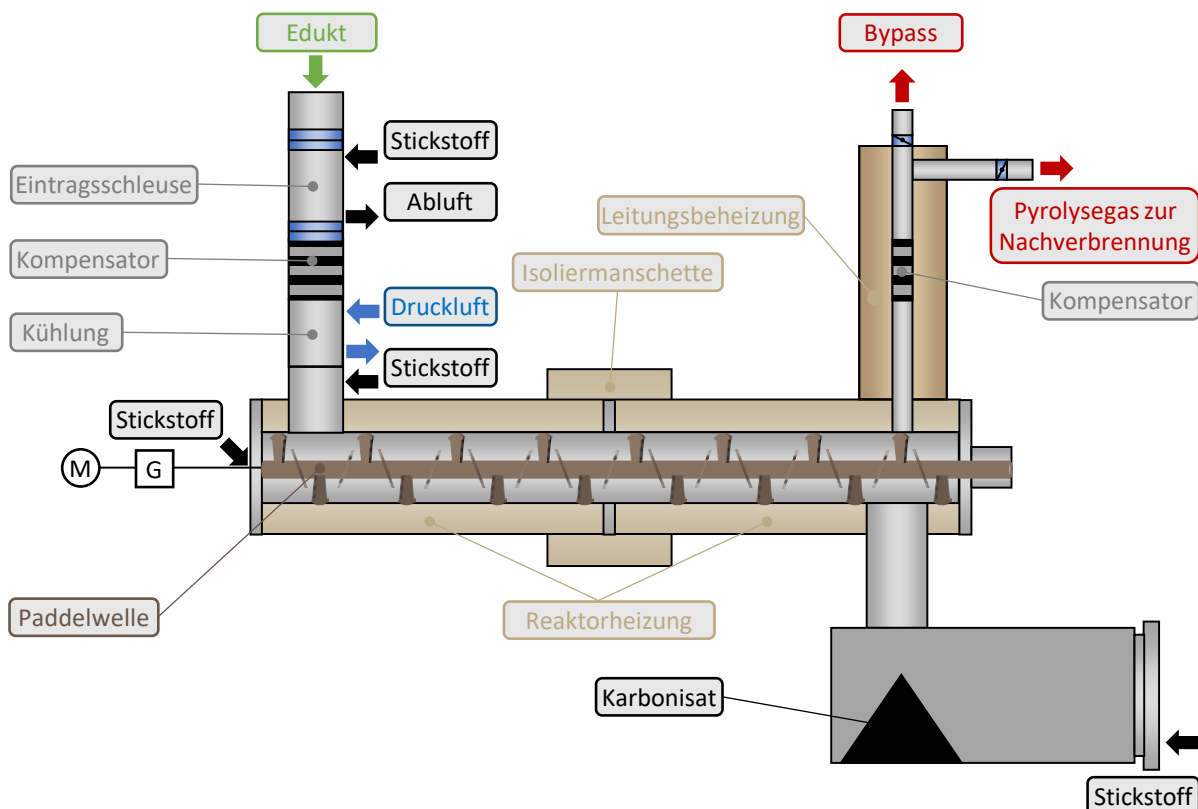


Abbildung 30: Schematischer Aufbau des Paddelwellenreaktors zur kontinuierlichen Pyrolyse der Papierrejte

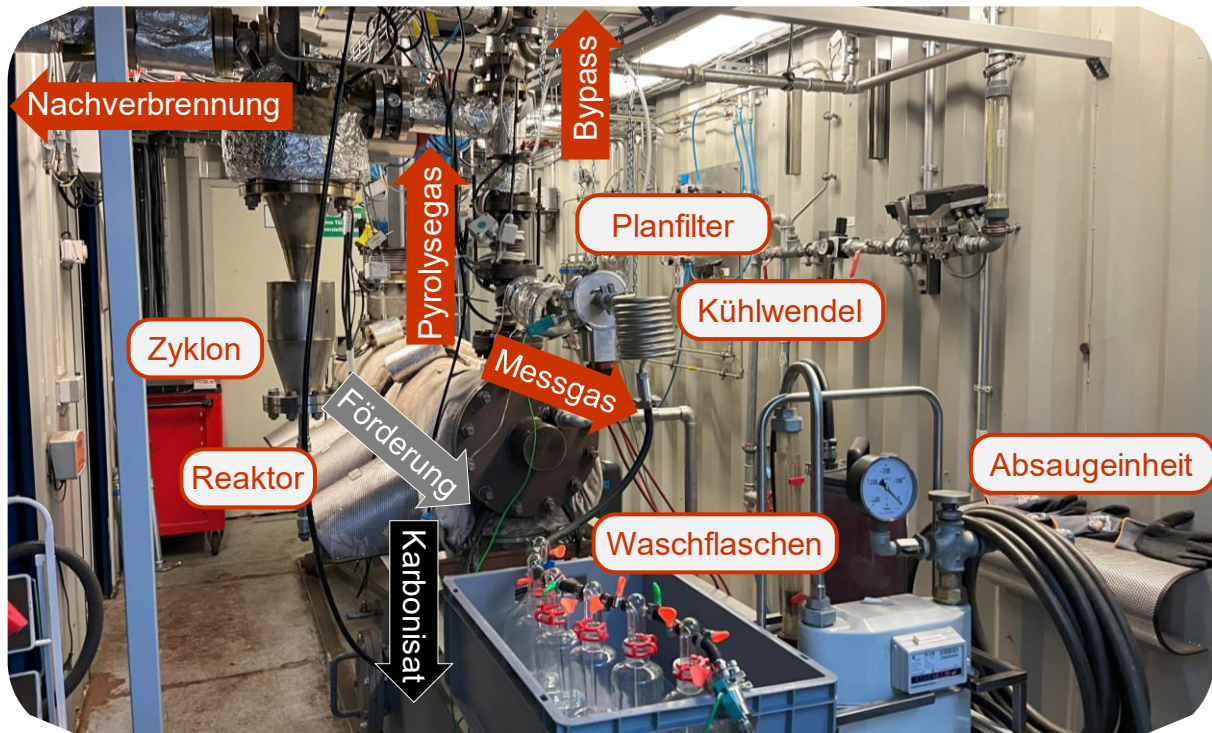


Abbildung 31: Foto des Paddelwellenreaktors und des Messaufbaus zur Kondensatprobenahme

Auf Basis der Ergebnisse der Thermogravimetrie wurde für die Pilotversuche eine Behandlungstemperatur von 450 °C ausgewählt, um eine vollständige Umsetzung der im Material enthaltenen Kunststoffe zu erreichen. Die Permanentgaszusammensetzung des Pyrolysegas wurde kontinuierlich mit einem extraktiven Gasanalysator (ehemalig VISIT 03 H) gemessen, zusätzlich wurde der feste Prozessrückstand (Karbonisat) beprobt und anschließend auf Gehalte an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen, Monoaromaten und PFAS analysiert. Kondensierbare Bestandteile des Pyrolysegas wurden nach Teilstromentnahme und Partikelabscheidung in einem Planfilter in einer gekühlten Waschflaschenkolonne in Isopropanol absorbiert. Die erste (leere) Waschflasche wurde zur Kondensatabscheidung genutzt, anschließend folgten vier Waschflaschen mit Isopropanol und eine Waschflasche mit Glaskugeln zur Abscheidung von mit dem Probengas mitgerissenen Tröpfchen. Nach Beendigung der Probenahme wurden alle gasberührten Teile bis zum Ende der Waschflaschenkolonne mit Isopropanol gespült, die Spüllösung wurde Probe hinzugefügt.

Zu Beginn des Versuchs wurde zuerst eine Druckprüfung durchgeführt, anschließend wurde die Anlage mit Stickstoff inertisiert und auf 450 °C Behandlungstemperatur aufgeheizt. Die Nachbrennkammer wurde mittels Propan-Stützbrenner auf 950 °C vorgeheizt. Bei Erreichen der gewünschten Prozesstemperaturen wurde der Pyrolysegasweg von Bypass auf Nachverbrennung umgestellt und mit der Materialzugabe gestartet. Die Materialzugabe erfolgte quasi-kontinuierlich direkt in die Doppelschieberschleuse (pro Schleusung ca. 80 bis 120 g). Der Eduktmassenstrom betrug bei dem Versuch mit faserreichem Material über einen Zeitraum von insgesamt 3 h gemittelt ca. 1,6 kg/h. Insgesamt wurden 5,03 kg faserreicher Papierrejekte erfolgreich pyrolysiert.

Bei dem Versuch mit faserarmem Material kam es zu Problemen mit dem Eintrag des Materials. Durch frühzeitiges Aufschmelzen des Edukts an der Eintragschleuse des Paddelwellenreaktors wurde der Zugabetrichter durch eine stehende Materialsäule verblockt,

sodass nachkommendes Material nicht in den Reaktor abgefördert werden konnte (Abbildung 32). Anschließend schlossen die Messerschieber der Schleuse nicht mehr vollständig, es kam zu einem Rauchaustritt und Fehlermeldungen in der Steuerung der Anlage, sodass der Versuch vorzeitig abgebrochen werden musste. Aufgrund des hohen Anteils an 2D-Kunststoffen im faserarmen Rejekt war die Einbringung in den Reaktor in der vorliegenden Form und Korngröße nicht möglich. Diesen Herausforderungen beim Eintrag des Materials soll zukünftig durch eine vorgeschaltete Agglomeration oder Pelletierung und/oder einer Optimierung des Materialeintrags der Versuchsanlage begegnet werden.

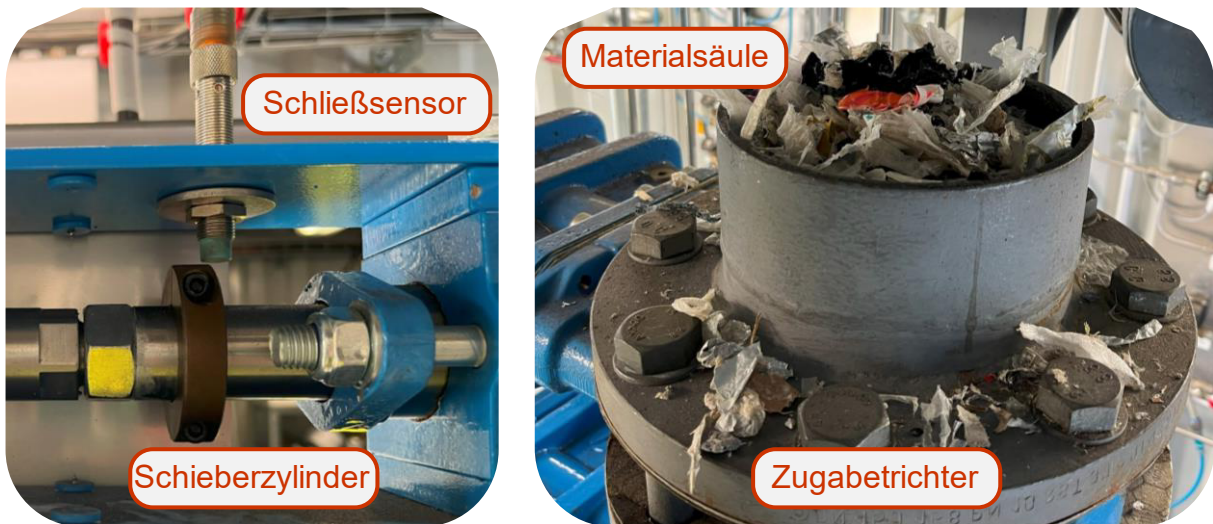


Abbildung 32: Verblockung der Messerschieber am Zugabetrichter des Paddelwellenreaktors durch eine stehende Materialsäule faserarmer Papierrejekte, links: Foto des Schließensors, rechts: Foto des Zugabetrichters

Bei der Kondensatprobenahme kam es zu einem Verblocken des den Waschflaschen vorgeschalteten Partikelfilters, der mit ausgehärteten, kondensierten Gasbestandteilen und Partikeln belegt war (Abbildung 33). Der Filter wurde anschließend ausgekoppelt und die Probenahme ohne Partikelfilter fortgeführt. Aus diesem Grund musste die Beprobung während 45 min unterbrochen werden. Es wurde trotzdem insgesamt ein für die Analytik ausreichendes Volumen von ca. 1 m³ Probengas beprobt.

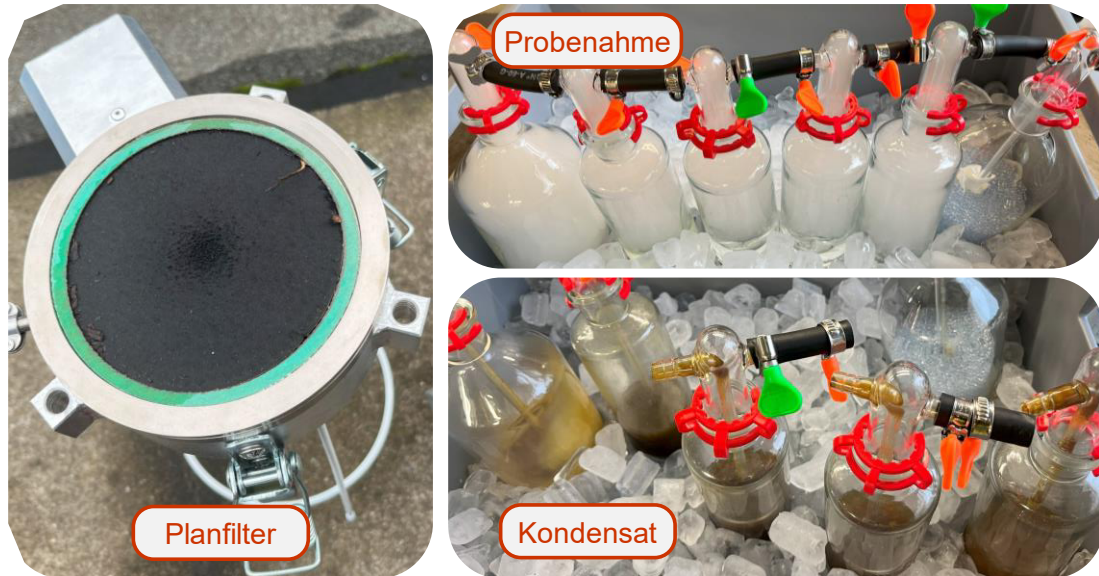


Abbildung 33: Fotos des verblockten Partikelfilters und der Kondensatprobenahme im Teilstrom

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen und Laboranalysen beschrieben. Zuerst werden die Ergebnisse der Brennstoff- und PFAS-Analysen dargestellt, anschließend die Ergebnisse der Thermogravimetrie und der Pilotversuche im kontinuierlichen Betrieb.

Die Ergebnisse der Immediat- und Elementaranalytik der faserreichen und faserarmen Rejekte sind Abbildung 34 zu entnehmen. Die faserreiche Fraktion weist mit 8,72 % im analysenfeuchten Zustand einen etwas höheren Aschegehalt (Bestimmung bei 550 °C) auf als die faserarme Fraktion mit 5,55 %. Ebenfalls hat die faserreiche Fraktion mit 0,99 % im wasserfreien Bezugszustand einen deutlich höheren Chlorgehalt als die faserarme Fraktion mit 0,24 %. Der Brennwert der faserreichen Fraktion liegt bei 26.120 kJ/kg, der der faserarmen Fraktion ist aufgrund des höheren Kunststoffanteils etwas höher (28.270 kJ/kg). Beide Fraktionen eignen sich dementsprechend auch prinzipiell für eine energetische Nutzung.

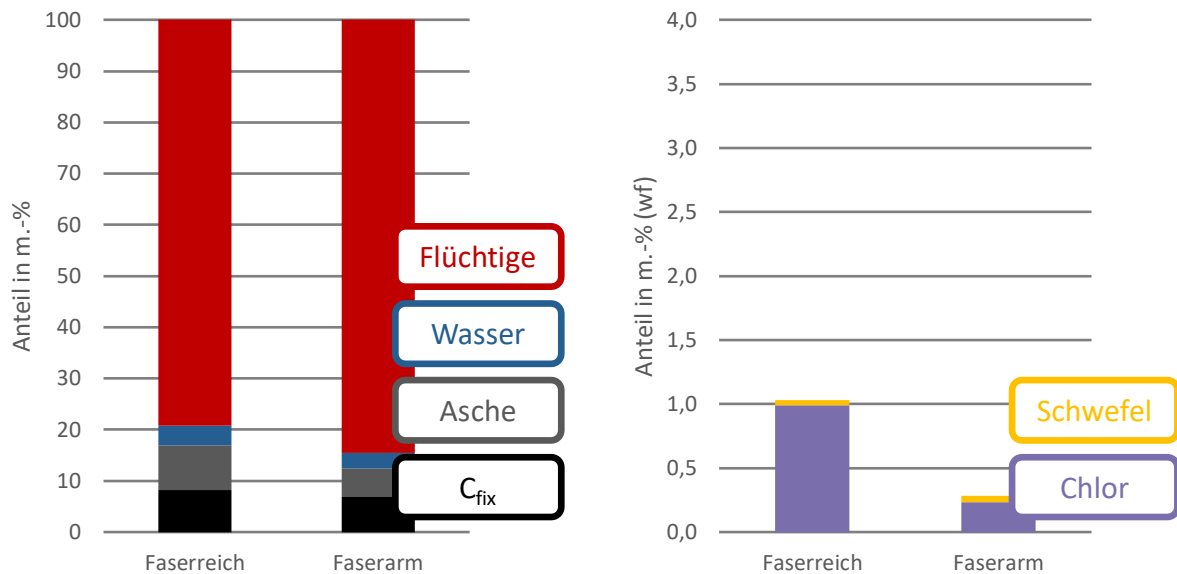


Abbildung 34: Immediat- und Elementaranalytik der untersuchten Input-Fractionen (Bezug analysenfeucht)

PFAS-Analytik

Die Ergebnisse der Einzelsubstanzanalytik zeigen für die faserarmen Rejekte eine geringe PFAS-Belastung von in Summe 11 µg/kg. 40% der Belastung gehen auf die Substanz Trifluoressigsäure (TFA) zurück. Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) wurde mit 1 µg/kg knapp über der Bestimmungsgrenze gemessen. Das Ergebnis des Summenparameters für den organisch gebundenen Fluoranteil zeigt mit einem Wert von 80 µg/kg hingegen eine um den Faktor 10 höhere Belastung auf (11 µg/kg PFAS entspricht etwa 7 µg/kg organisch gebundenem Fluor). Die Differenz kann auf unbekannte PFAS-Substanzen zurückgeführt werden, die nicht als Referenzsubstanzen im LCxMS hinterlegt sind. Für den Gesamtfluorgehalt der Probe wurde ein Wert von 150 µg/kg bestimmt. Der höhere Fluoranteil deutet auf das mögliche Vorhandensein von Fluorpolymeren in den Rejekten hin. Eine gesicherte Aussage kann jedoch nicht getroffen werden, da die Analysemethode auch anorganisch gebundenes Fluor erfasst.

Die Untersuchungen der Rejekte haben aufgezeigt, dass es sinnvoll ist, auch die Produkte des Pyrolyseverfahrens auf Gehalte von Fluor und PFAS-Verbindungen zu analysieren. Für die faserarme Fraktion wurde dieser Schritt durchgeführt. Das Karbonisat weist keine LC-gängigen PFAS-Einzelsubstanzen auf. Für das organisch gebundenen Fluor wurde ein im Vergleich zum Inputmaterial reduzierter Wert von 42 µg/kg gemessen. In den Kondensaten wurde lediglich eine PFAS-Verbindung nachgewiesen. Die kurzkettige Verbindung Perfluorpropionat (PFPrA) wurde mit 0,68 µg/l bestimmt (Bestimmungsgrenze = 0,2 µg/l). Der organisch gebundenen Fluor-Anteil liegt jedoch bei 210 µg/l. Es ist also nicht auszuschließen, dass PFAS-Zersetzungsprodukte in das Kondensat überführt wurden.

Die Verläufe der thermischen Zersetzung der beiden Fraktionen sind Abbildung 35 zu entnehmen. Es zeigen sich vier Hauptstufen der Massenabnahme: bis 100 °C (Trocknung), von 200 bis 300 °C, von 350 bis 450 °C und von 600 bis 650 °C. Oberhalb von 650 °C findet trotz einer Haltephase bei der Zieltemperatur von 700 °C keine weitere Zersetzung des Materials statt. Beim faserreichen Material lässt sich eine etwas höhere Massenabnahme zwischen 250 und 650 °C verzeichnen. Die höchste Massenabnahmerate des faserarmen

Materials liegt im Temperaturfenster zwischen 350 und 450 °C. Die so gewonnenen Informationen dienen der Festlegung optimaler Versuchsparameter im größeren Maßstab.

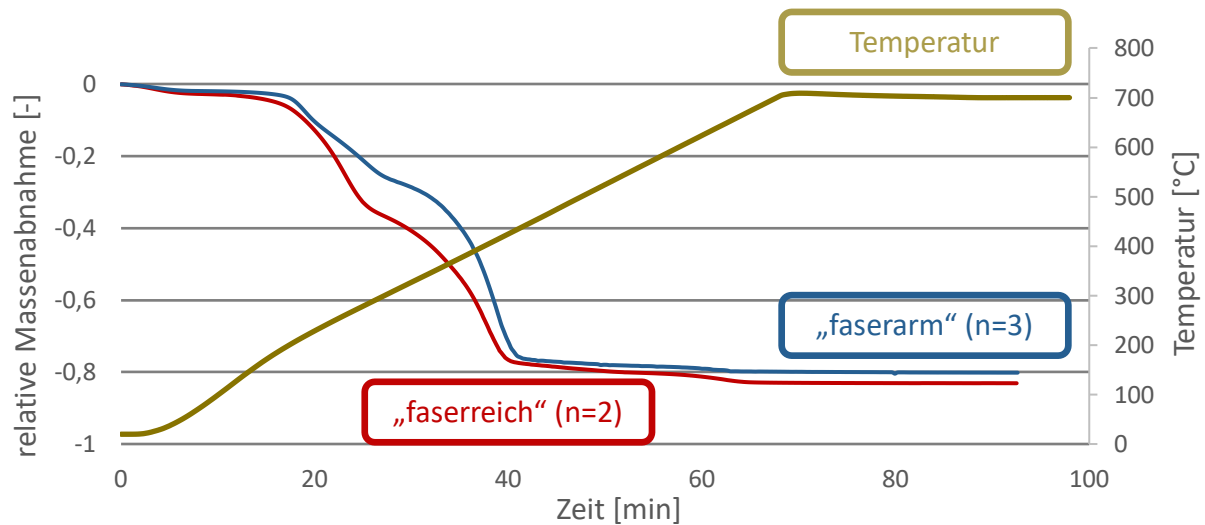


Abbildung 35: Ergebnisse der Thermogravimetrie der untersuchten Materialien in inerter Atmosphäre

Pilotversuche im kontinuierlichen Betrieb (Scale-Up)

Abbildung 36 zeigt den Verlauf charakteristischer Prozesstemperaturen während des Versuchs mit faserreichem Material. In den Zonen 2-3 konnte eine konstante Temperatur über den gesamten Versuchszeitraum erreicht werden. Die Temperatur in Zone 1 ist aufgrund der baulichen Nähe zu aktiv gekühlten Verbindungsteilen nachteilig und durch den Eintrag kalter Material- und Spülgasmengen während der Versuche schwankend. Der Anlagendruck schwankt im Bereich -20 bis 60 mbar und bewegt sich tendenziell im Zielbereich von 0 bis 20 mbar, die Schwankungen werden durch den Betrieb der Doppelschieberschleuse und die anschließende, schlagartige Entgasung der eingetragenen Kunststoffe hervorgerufen. Während der Durchführung mussten die N₂-Zufuhr und das Injektionsgebläse für den Abzug des Pyrolysegases daher händisch nachgeregelt werden. Die Beendigung des Versuchszeitraums und die Umschaltung des Pyrolysegases auf den Bypass sind durch eine Druckspitze erkennbar.

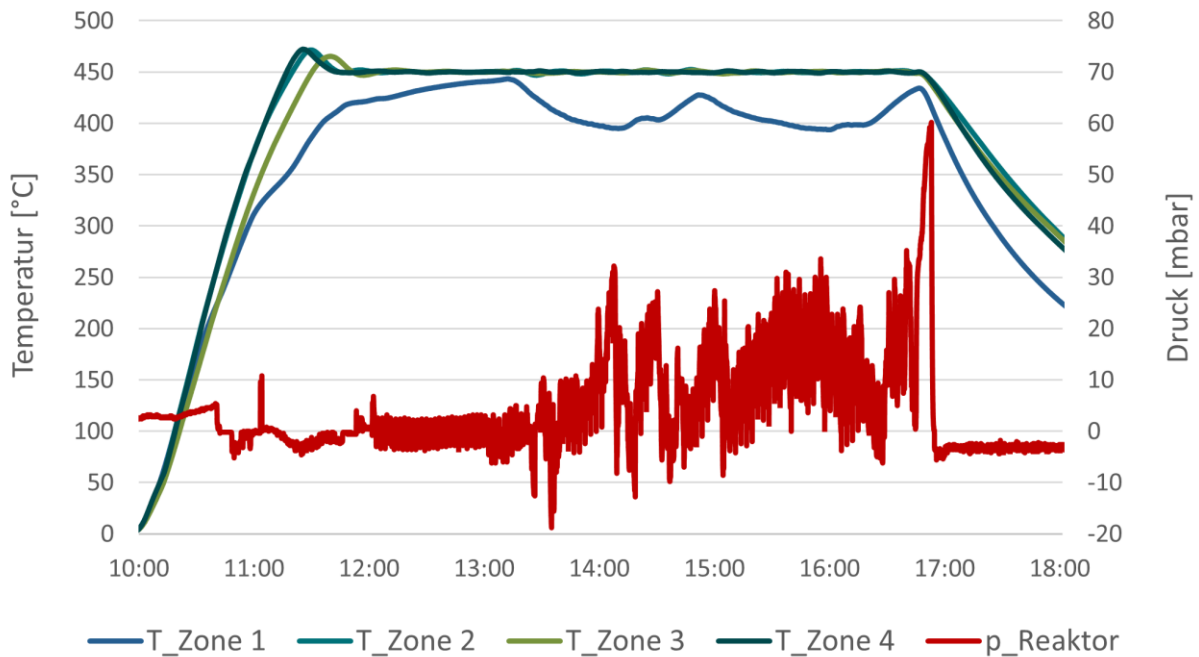


Abbildung 36: Reaktortemperaturen und -druck während des Einsatzes faserreicher Papierrejekte (Materialzugabe von 13:04-16:09)

In Abbildung 37 ist der Verlauf der Permanentgaszusammensetzung über die Versuchszeit aufgetragen. Die Analyse zeigt überwiegend Methan (CH_4) bis zu 16 Vol.-%. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Infrarotsensor auch höhere Kohlenwasserstoffe wie z. B. Ethan und Propan nicht von Methan unterscheiden kann und daher den Methangehalt überschätzt. Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO_2) wurden in geringfügigen Konzentrationen < 5 Vol.-% ermittelt. Der Wasserstoffsensor des Geräts hatte während der Versuche leider eine Fehlfunktion, sodass der Wasserstoffgehalt des Pyrolysegases nicht erfasst werden konnte. Die Unterbrechung der Gasanalyse zwischen 14:05-14:50 ist durch das Verblocken des dem Analysator vorgeschalteten Planfilters bedingt. Insgesamt sind die Verläufe von CH_4 und CO ähnlich, mit Abweichungen in der Ausprägung einiger Spitzen. CO_2 zeigt einen ruhigeren Verlauf. Die Beendigung des Probenahmezeitraums durch den Abschaltvorgang der Absaugpumpe vor dem Gasanalysator und kurzzeitigen Gasstau in der Messzelle ist als Spitze erkennbar.

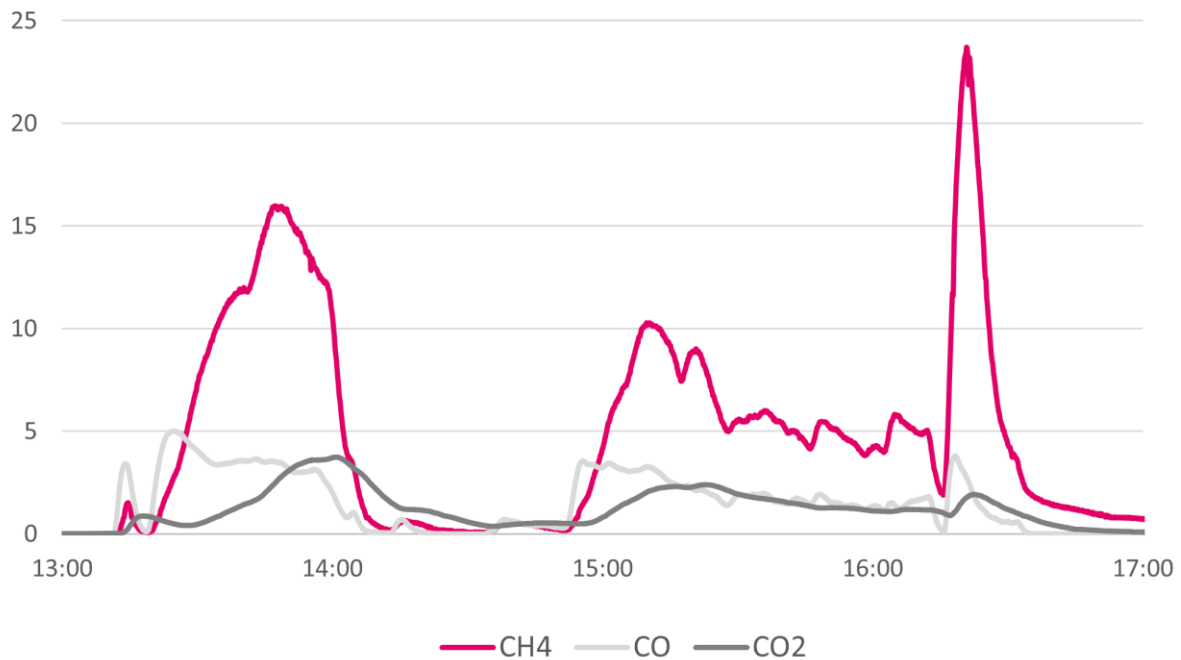


Abbildung 37: Permanentgaszusammensetzung (trocken) während des Einsatzes faserreicher Papierrejekte (Unterbrechung 14:05-14:50 Uhr)

Als Rückstände des erfolgreichen Versuchs mit dem faserreichen Material konnten Karbonisat und Kondensat (Abbildung 38) gewonnen werden. Auch diese Produkte wurden einer weitergehenden Analytik unterzogen.

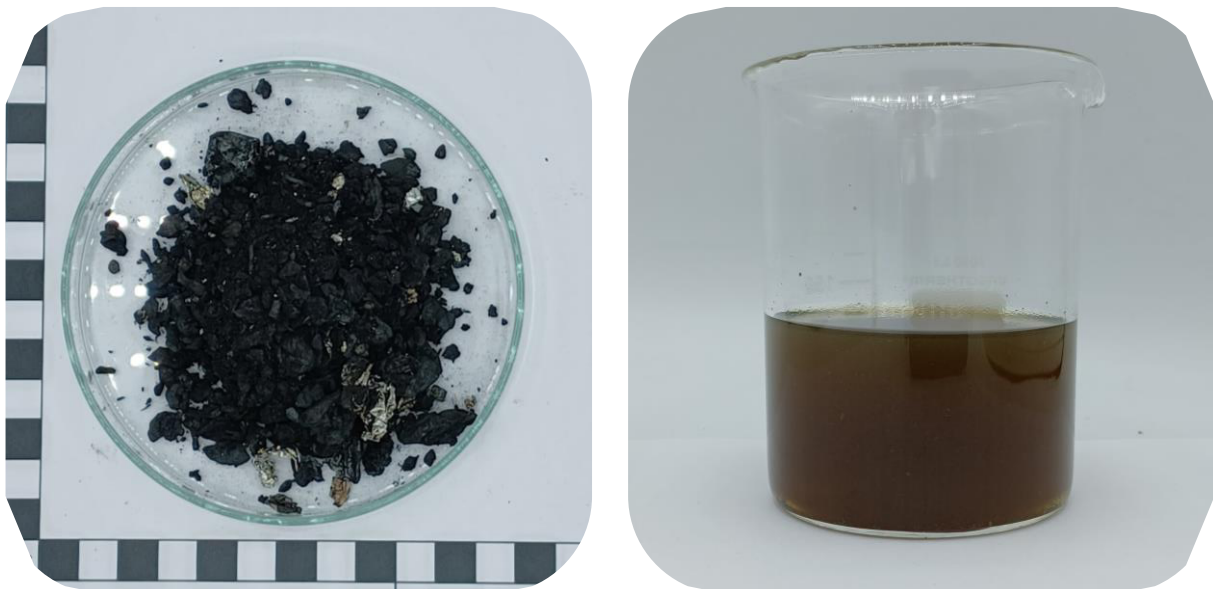


Abbildung 38: Fotos des Karbonisats (links) und Kondensats des Pilotversuchs mit dem faserreichen Rejekt

Die Ergebnisse der Immediat- und Elementaranalytik des Karbonisats sind Abbildung 39 zu entnehmen. Durch die thermische Behandlung im Pyrolysereaktor wurde der Flüchtigengehalt im Feststoff deutlich reduziert, sodass das feste Produkt zu großen Teilen aus fixem Kohlenstoff (49,2 %) und Asche (31,05 %) besteht. Der Chlorgehalt des Edukts hat sich im Produkt erhöht und beträgt hier 3,4 %. Der Brennwert des Karbonisats beträgt 18.340 kJ/kg.

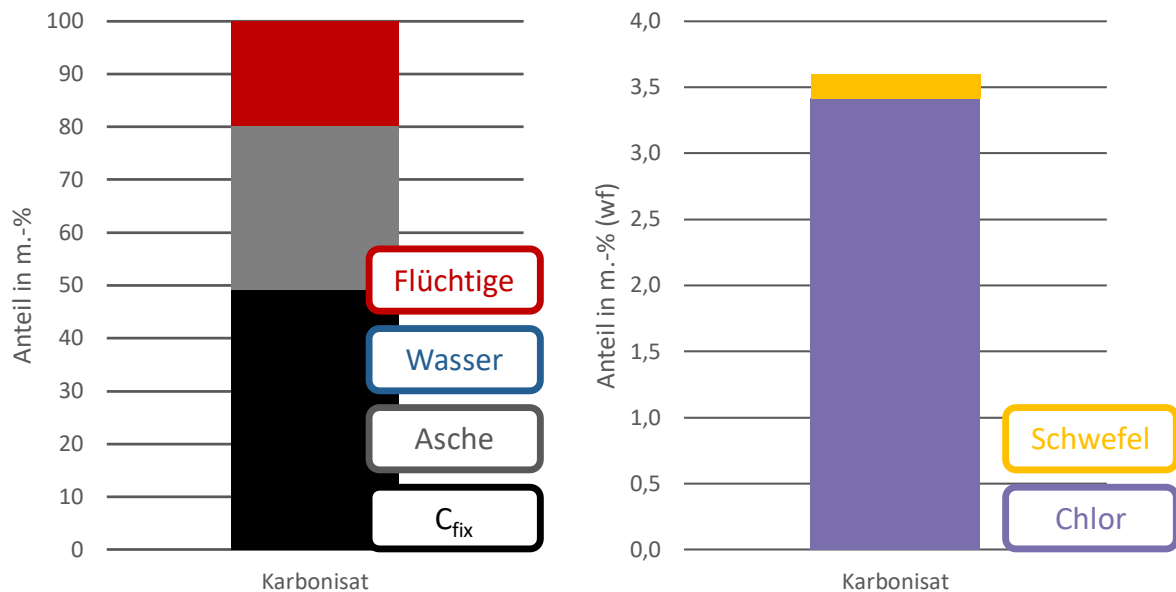


Abbildung 39: Immediat- und Elementaranalytik des Karbonisats (Bezugszustand analysenfeucht)

Die Kondensate weisen erwartungsgemäß hohe Konzentrationen an PAK (ca. 60 mg/l) und BTEX (8 mg/l) auf. Unter den 16 EPA-PAK dominiert Naphthalin mit 30 mg/l, bei den Monoaromaten bzw. BTEX liegt eine Gleichverteilung unter den Substanzen Benzol, Toluol, Ethylbenzol vor, für die jeweils eine Konzentration von 2,1-1,7 mg/l bestimmt wurde. Die Xylole weichen mit 0,4 mg/l hiervon ab.

Auch im Karbonisat konnte eine signifikante Konzentration an PAK detektiert werden. Die Summe der 16 EPA-PAK beträgt 14 mg/g und damit etwa 1,4 Ma-%. Dieser Wert ist als Indikation für eine erhöhte PAK-Beladung der Karbonisate zu werten, die die weiteren Verwertungsmöglichkeiten beschränkt und Konsequenzen für den Arbeitsschutz hat. Die deutlich flüchtigeren Substanzen der BTEX-Gruppe konnten im Karbonisat nicht nachgewiesen werden.

2.5.2 Ausblick

Der erfolgreiche Tastversuch zeigt die prinzipielle Machbarkeit des Einsatzes der Rejekte in Pyrolyseprozessen, es konnten wertvolle Daten als Basis für die Vertiefung der Untersuchungen im Folgeprojekt SPaRe ermittelt werden. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf der Brennstoffaufbereitung bzw. dem Eintrag des Materials in den Reaktor liegen, um Probleme mit Verblockungen vorzubeugen. Zusätzlich soll eine Kondensation des Pyrolysegases im Vollstrom durchgeführt werden, um Ausbeuten und Massenbilanzen bestimmen zu können und andere Gasanalytoren (z. B. FTIR) eingesetzt werden, um das Pyrolysegas detaillierter zu charakterisieren. So können Daten für die detaillierte techno-ökonomische Bewertung und Lebenszyklusanalyse des betrachteten Verwertungswegs bereitgestellt werden. Für die PFAS-Analytik konnten Probenahme- und Probenaufbereitungsmethoden sowie externe Labore identifiziert werden, die mit den komplexen Eigenschaften der Probenmatrizes der Edukte und Produkte der Pyrolyse arbeiten können. Im nächsten Schritt sollen weitergehende Analysen der Edukt- und Produktfraktionen erfolgen, um Aussagen hinsichtlich der Zerstörungseffizienz von PFAS unter pyrolytischen Bedingungen abzuleiten.

2.6 Arbeitspaket 6: Ökonomische und ökologische Bewertung

Das Arbeitspaket 6 (AP6), welches durch IPEM, ANTS, STADLER, PROPAKMA, LEIPA und TOMRA bearbeitet wurde, hat Nachhaltigkeitsaspekte und die ökonomische Rentabilität des entwickelten Aufbereitungsprozesses für Altpapier untersucht. Dabei wurden sowohl ökologische Indikatoren (Treibhausgaspotenzial, kumulierter Energieaufwand, Landnutzung, Wasserverbrauch und Zirkularität) als auch ökonomische Faktoren (Investitionskosten, Betriebskosten, Marktakzeptanz) berücksichtigt. Ziel war es, den entwickelten Prozess im Vergleich zur thermischen Verwertung und zu alternativen Verwertungswegen zu bewerten und Aussagen über die langfristige Umsetzbarkeit und Akzeptanz auf dem Markt zu treffen.

2.6.1 Methodische Vorgehensweise und Ergebnisse der ökologischen Bewertung

2.6.1.1 *Festlegung von Indikatoren und Bilanzrahmen (AP6.1)*

Zu Beginn wurde der Bilanzrahmen für die Nachhaltigkeitsbewertung gemäß den internationalen Normen DIN EN ISO 14040/44 festgelegt. Diese Normen bieten eine strukturierte Vorgehensweise zur Durchführung von Life Cycle Assessments (LCA), die es ermöglichen, die Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen zu quantifizieren und zu bewerten. Der Bilanzrahmen wurde so gewählt, dass alle relevanten Input- und Outputströme sowie Systemänderungen innerhalb des Wertstoffkreislaufs abgebildet werden. Zur ökologischen Bewertung der Verwertungswege von PPK aus LVP wurde eine Case Study für den ersten im Projekt durchgeführten Produktionsversuch im Vergleich zum Status Quo erstellt. Als Status Quo-Szenarien wurden die thermische Verwertung im Inland und das Recycling im Ausland, vor allem in den Niederlanden, Spanien und Bulgarien, von PPK aus LVP identifiziert. Zur Bestimmung der Einsparungspotenziale durch die thermische und stoffliche Verwertung wurden zum einen Energiegutschriften vom Energiemarkt berücksichtigt. Hier wurde für alle Ströme eine Verwertung als Ersatzbrennstoff (EBS) im EBS-Kraftwerk angenommen. Zum anderen wurde die Substitution von Primärfasern durch die zusätzliche Faserbereitstellung integriert. Der Substitutionskoeffizient wurde nach Literaturangaben zu 0,83 gewählt (Gala et al. 2015). Um die aufgrund der Rechtslage (Empfehlung XXXVI des BfR) erhöhten Aufbereitungsanforderungen für PPK aus LVP abbilden zu können, wurden im nächsten Schritt weitere Aufbereitungsschritte (Optimierte Sortierung und Auflösung, Hygienisierung) ergänzt, um die Auswirkungen möglichst realitätsnah abschätzen zu können. Diese wurden mit dem Produktionsversuch-Szenario ohne Materialsubstitution verglichen, um den zusätzlichen Aufwand darzustellen.

Die Systemgrenzen wurden dabei entlang des betrachteten Aufbereitungsprozesses von der trockenmechanischen Sortierung, der Zerfaserung und Stoffaufbereitung und der thermischen Verwertung von Rejekten gezogen (vgl. Abbildung 40). Als funktionelle Einheit wurde die Abfallbehandlung von 38 t PPK aus LVP und 88 t PPK der Sorte 1.02 gewählt, da diese Mengen im Produktionsversuch eingesetzt wurden.

Die Produktionsversuche im Projekt ermöglichten eine umfangreiche Erfassung der Inputmengen (z. B. Energie, Wasser, Chemikalien) und der Outputs (z. B. Produkte, Abwasser und Abfälle) für die Sachbilanz. Fehlende Daten wurden durch Datenbankprozesse und Literaturdaten ergänzt (Köhler et al. 2025). Die Daten für die optimierte Aufbereitung stammen von den Technikumsversuchen bei VOITH und wurden durch Daten aus dem BVT-Datenblatt zur Papierindustrie vervollständigt.

Zur Bewertung der Verwertungswege wurden die für die Papierindustrie relevanten Umweltwirkungskategorien Treibhausgaspotenzial, Landnutzung, Wasserverbrauch und Energiebedarf untersucht. Als Indikatoren wurden zum einen das Global Warming Potential

(GWP100), Land Occupation Potential (LOP) und das Water Consumption Potential der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe 2016 (H) ausgewählt. Zum anderen wurde der Energiebedarf über den Indikator kumulierter Energieaufwand (CED) analysiert. Ergänzend zu den Umweltindikatoren wurden zur Bewertung der Zirkularität des Systems die Recyclingquoten der Verwertungswege in der Case Study bestimmt sowie der Effekt auf die deutschlandweite Altpapierücklaufquote, Altpapiereinsatzquote und Altpapierverwertungsquote abgeschätzt. Dies ermöglichte eine fundierte Bewertung der Umweltauswirkungen.

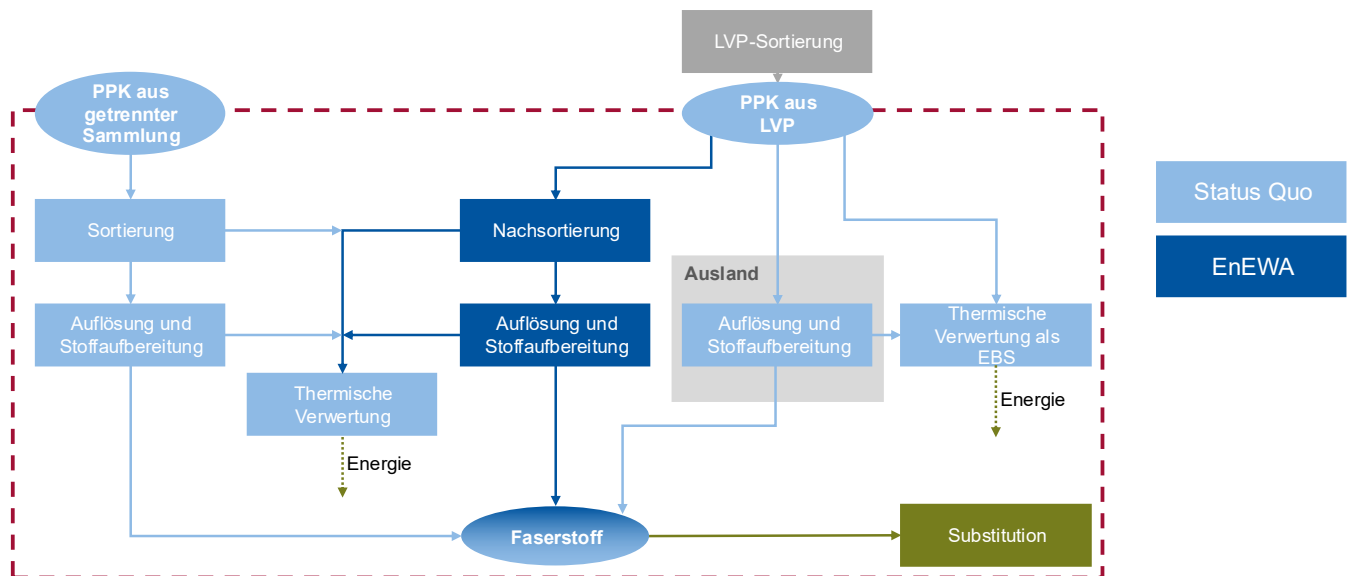


Abbildung 40: Systemgrenze für den Vergleich der Verwertungswege von PPK aus LVP

Ergänzend zur Case Study wurde ein Produktvergleich für PET- und Pappschalen durchgeführt. Als funktionelle Einheit (FU) wurde eine Schale zum Verpacken von 500 g Obst sowie die Energiegewinnung von 125 kJ gewählt, um den Nutzenkorb mit Materialgewinnung aus dem Recycling und Energiegewinnung aus der thermischen Verwertung abbilden zu können. Der Bilanzrahmen reicht von der Entsorgung einer Verpackung bis zur Herstellung einer neuen Verpackung (siehe Abbildung 41). Zur Modellierung der stofflichen im Vergleich zur thermischen Verwertung wurde der Systemraum erweitert, um gleiche Material- und Energie-Outputs zu berücksichtigen. So soll eine Aufteilung von Gutschriften auf zwei verschiedene Produktsysteme vermieden werden. Für die stoffliche Verwertung von PPK wurden die Primärdaten aus den Produktionsversuchen zugrunde gelegt. Die Datengrundlage wurde mittels Datenbankprozessen und Literaturdaten ergänzt.

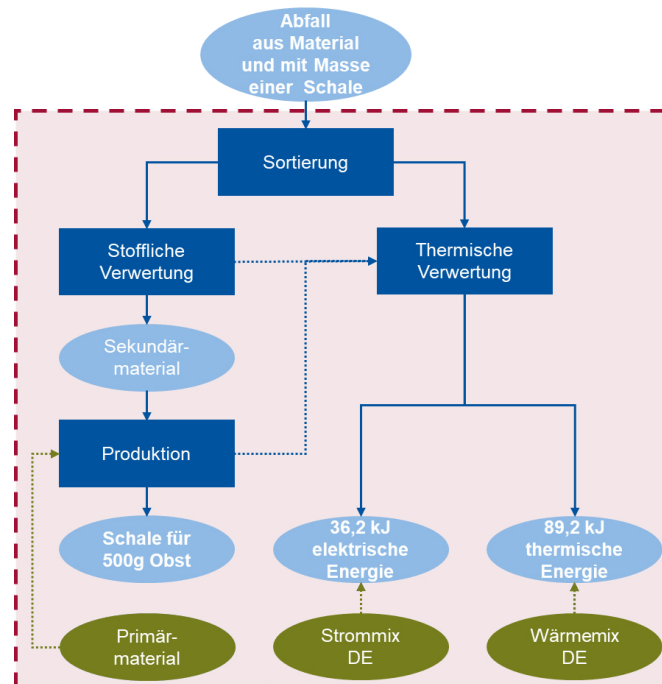


Abbildung 41: Systemgrenze für den Produktvergleich

Verwendete angepasste Datenbankprozesse:

Pappschalen:

- *market for corrugated board box | corrugated board box | Cutoff, U – modified to EnEWA*
- *paper production, woodfree, uncoated, 100% recycled content, at non-integrated mill | paper, woodfree, uncoated | Cutoff, U - modified to EnEWA + Germany*
- *paper production, woodcontaining, uncoated, at non-integrated mill | paper, woodcontaining, uncoated | Cutoff, U - modified to EnEWA + Germany*
- *market for packaging film, low density polyethylene | packaging film, low density polyethylene | Cutoff, U*

PET-Schale:

- *thermoforming, with calendering | thermoforming, with calendering | Cutoff, U modified to EnEWA*
- *extrusion, plastic film | extrusion, plastic film | Cutoff, U modified to EnEWA*
- *polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous | polyethylene terephthalate, granulate, amorphous | Cutoff, U modified to EnEWA*
- *market for waste polyethylene terephthalate, for recycling, unsorted | waste polyethylene terephthalate, for recycling, unsorted | Cutoff, U*

Verwendete Literaturquellen:

- Bulach et al. 2022 (Ökobilanz des Dualen Systems)
https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Duale_Systeme_Oekobilanz_Endbericht.pdf
- Suhr et al. 2015 (Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board)
https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/PP_revised_BREF_2015.pdf
- Gala et al. 2015 (Introducing a new method for calculating the environmental credits of

end-of-life material recovery in attributional LCA)

2.6.1.2 Lebenszyklusanalyse

Treibhausgasemissionen (GWP):

Die Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse für das Treibhausgaspotenzial sind in Abbildung 42 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Recycling von PPK aus LVP im Ausland mit den höchsten Treibhausgasemissionen verbunden ist. Dies ist vor allem auf die weiten Transportwege zurückzuführen. Im Vergleich zur thermischen Verwertung sind die Treibhausgasemissionen für die stoffliche Verwertung leicht erhöht, da ein höherer energetischer Aufwand für die trockenmechanische Sortierung und die Stoffaufbereitung nötig ist als für die Verbrennung von PPK aus LVP. Außerdem sind auch die Transportwege zur Papierfabrik höher als zum nächsten EBS-Werk. Für die Verbrennung von PPK aus LVP werden keine biogenen Treibhausgasemissionen im Indikator GWP berücksichtigt, da die Verbrennung biogener Materialien per Definition als emissionsfrei gilt. Dies lässt die thermische Verwertung leicht vorteilhaft erscheinen. Einsparpotenziale entstehen vor allem durch die Substitution vom Energiemarkt, da die emissionsfreie Energiegewinnung aus Papierfasern sowie die Energiegewinnung aus den Rejekten Energie vom teils fossilbasierten deutschen Energiemarkt ersetzt. Dieses Potential nimmt jedoch ab, wenn der Energiemix zunehmend erneuerbarer wird. Durch die Substitution von Primärfasern entsteht ebenfalls ein Einsparpotenzial, da Transporte aus dem Ausland reduziert werden können und die Primärfaserherstellung sehr energieintensiv ist. Jedoch sind diese Einsparungen begrenzt, da der Zellstoffimport aus Ländern (Skandinavien, Brasilien) mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien erfolgt.

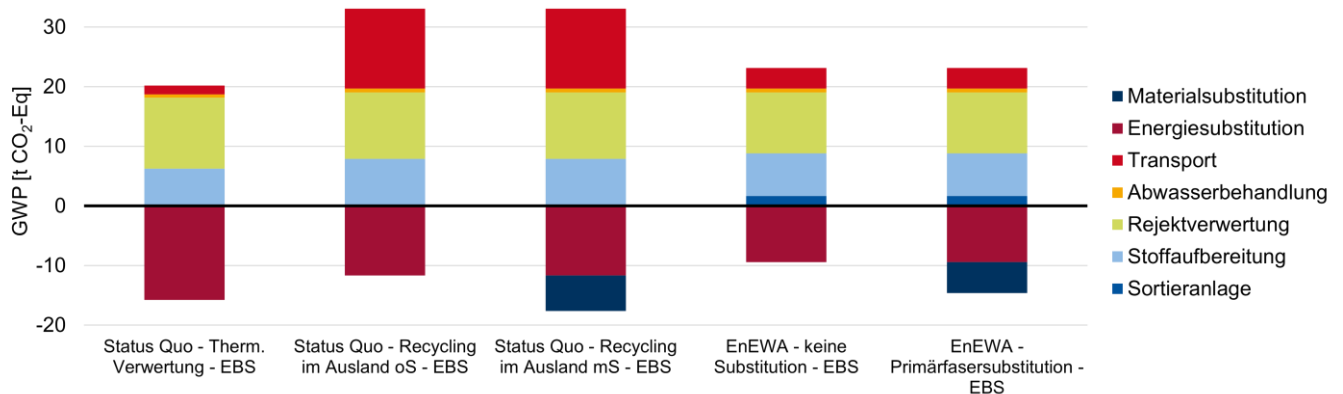


Abbildung 42: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Treibhausgasemissionen

Kumulierter Energieaufwand (CED):

Die Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse für den kumulierten Energieaufwand sind in Abbildung 43 dargestellt. Die stoffliche Verwertung im Ausland weist durch die weiten Transportwege den höchsten Energieaufwand auf. Dies deckt sich mit den Ergebnissen zum GWP, da die Energiebereitstellung für den Transport über Diesel erfolgt. Neben dem Energieaufwand für Transporte ist auch der Energieaufwand für das Recycling höher als bei der thermischen Verwertung, da ein erhöhter Aufwand durch Sortierung und Aufbereitung besteht. Die Energiesubstitution vom Markt durch die thermische Verwertung von PPK aus LVP und Rejekten zeigt positive Auswirkungen auf den Energieaufwand, da Primärenergieträger ersetzt werden.

Im Gegensatz zum GWP zeigt sich beim kumulierten Energieaufwand (CED) ein deutliches Energieeinsparpotential durch die Substitution von Primärfasern. Dies ist zum einen auf die energieintensive Primärproduktion zurückzuführen und zum anderen auf den Energiegehalt der Primärfasern, der im Indikator CED miteinbezogen wird.

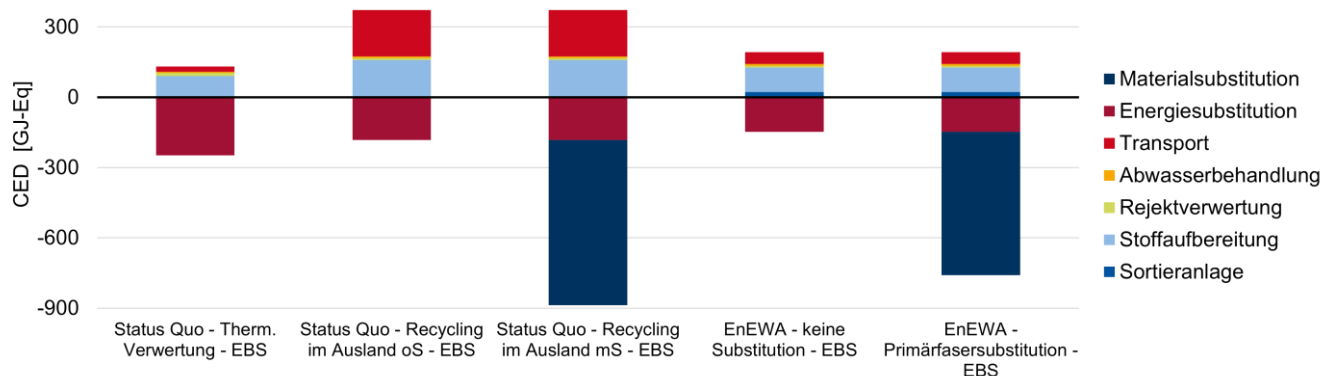


Abbildung 43: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Kumulierter Energieaufwand

Wasserverbrauch (WCP):

Die Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse für den Wasserverbrauch sind in Abbildung 44 dargestellt. Der Wasserverbrauch ist während der Stoffaufbereitung am höchsten, da hier Wasser zur Auflösung zugegeben werden muss. Da im Status Quo Szenario mit thermischer Verwertung von PPK aus LVP weniger Papier aufgelöst werden muss, ist auch der Wasserverbrauch im Vergleich zu den anderen Szenarien reduziert. Dafür ist in diesem Szenario der Wasserverbrauch für die thermische Verwertung durch den zusätzlichen Materialeinsatz von PPK aus LVP höher, da für den Verbrennungsprozess Prozesswasser benötigt wird. Der Wasserverbrauch für Transporte ist analog zum GWP und CED für das Recycling im Ausland höher, fällt hier jedoch weniger ins Gewicht. Einsparpotenziale bestehen insbesondere durch die Substitution von Primärfasern, da der Wasserbedarf zur Primärfaserherstellung entfällt. Auch die Substitution von Energie aus dem deutschen Energiemix führt zu einem Einsparpotenzial.

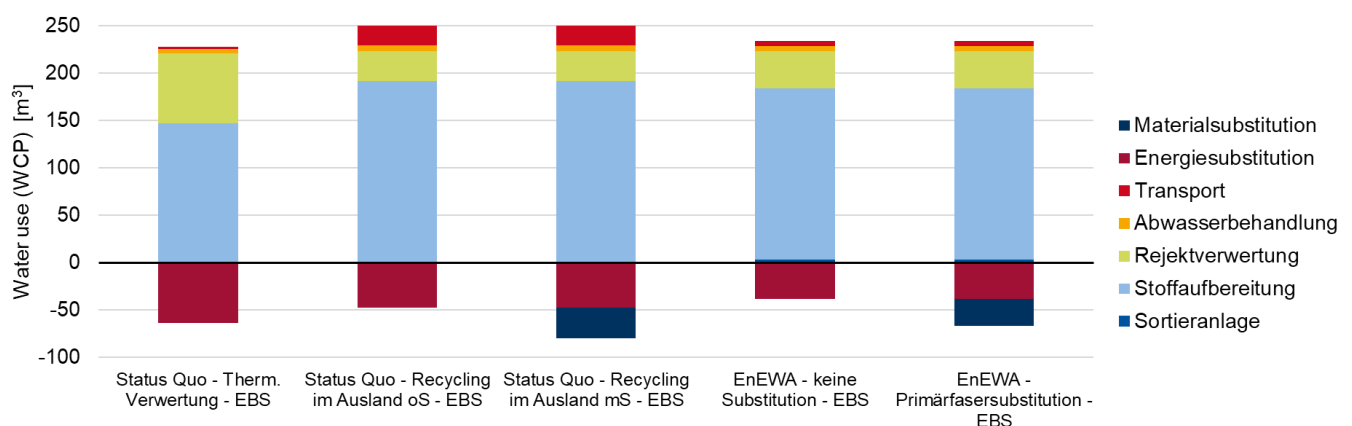


Abbildung 44: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Wasserverbrauch

Landnutzung (LOP):

Die Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse für die Landnutzung sind in Abbildung 45 dargestellt. In allen Szenarien ist die Landnutzung gering, da die eingesetzten Rohstoffe

größtenteils sekundär bzw. fossilbasiert sind und keine großen Flächen beanspruchen. Eine leicht erhöhte Landinanspruchnahme ergibt sich jedoch bei der stofflichen Verwertung im Ausland ebenfalls aufgrund weiter Transportwege, die mit der Verkehrsfläche verbunden sind. Gleichzeitig bietet die Substitution von Primärfasern ein großes Einsparpotenzial, da der Anbau der biogenen Rohstoffe für die Primärfaserherstellung sehr landintensiv ist.

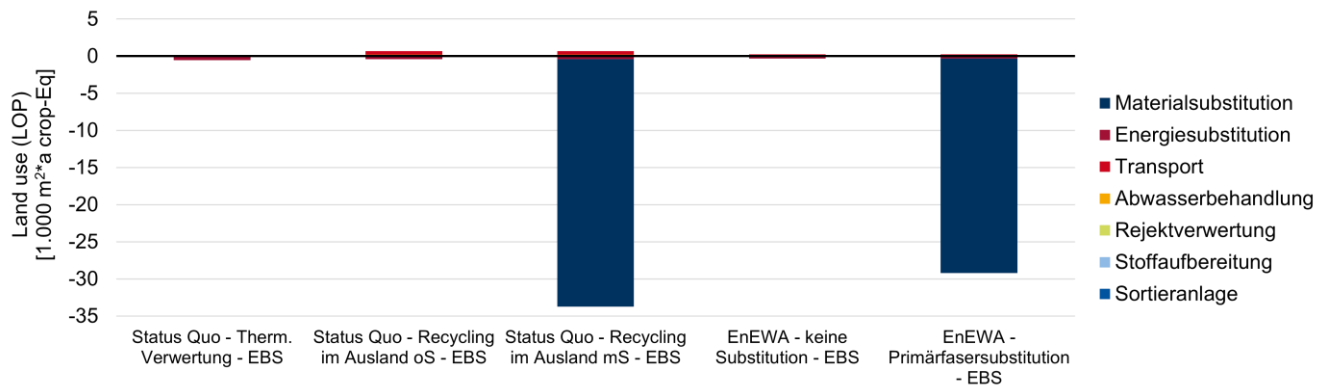


Abbildung 45: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Landnutzung

Optimierte Aufbereitung

Die Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse für die optimierte Aufbereitung sind für alle vier Indikatoren in Abbildung 46 dargestellt. Die optimierte Stoffaufbereitung, insbesondere durch den Einsatz der Flotation und der Heißdispergierung, hat die größten Auswirkungen auf die Umwelt, da der Energieaufwand sehr hoch ist. Zusätzlich erhöhen sich die Faserverluste durch die Flotation deutlich, was die Umweltauswirkungen pro Tonne erhöht. Am GWP machen die Flotation und das Heißdispergieren je ca. 20% der Treibhausgasemissionen des Systems aus.

Die Zerfaserungstrommel ist aufgrund ihres hohen Durchsatzes weniger energieintensiv, während der HC-Pulper durch seinen geringeren Durchsatz und den hohen Stoffgehalt einen höheren Energieverbrauch aufweist. Beide Aggregate führen aber zu geringeren Faserverlusten, was das Substitutionspotenzial erhöhen könnte.

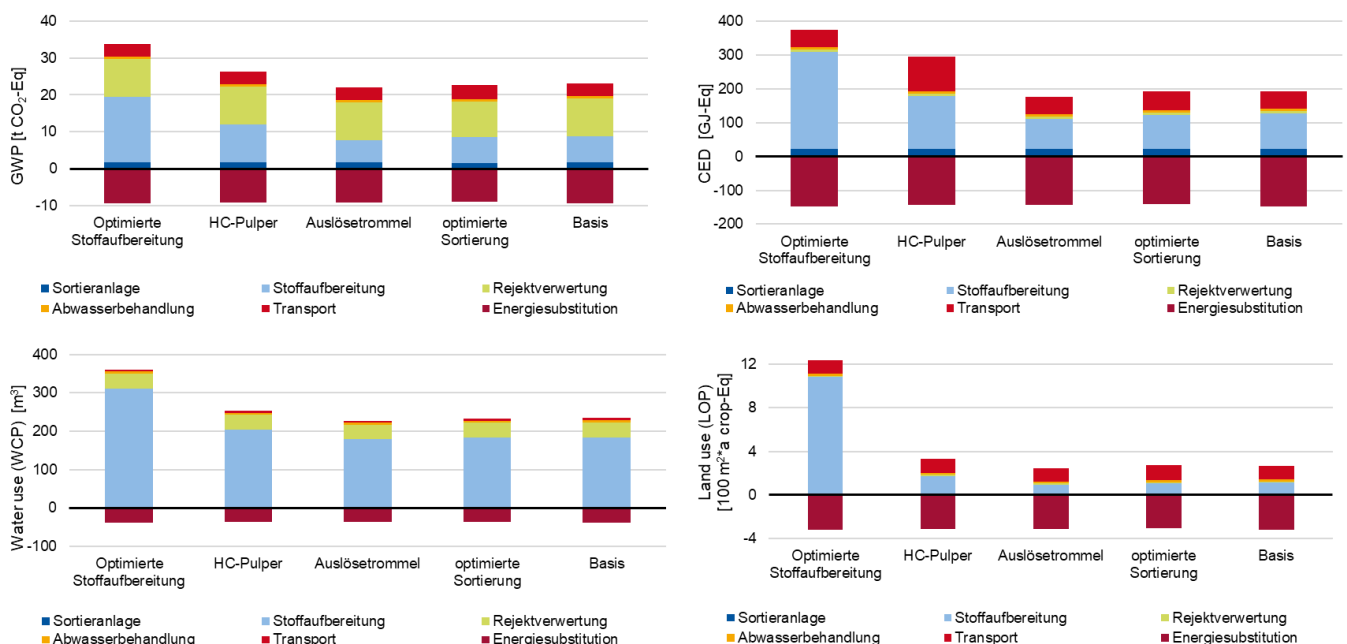


Abbildung 46: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse – Indikatoren GWP, CED, LOP und WCP

Die optimierte Sortierung könnte ebenfalls die Faserverluste reduzieren, da weniger gutes Material zuvor schon ausgeschleust wird, was ebenfalls das Potenzial zur Materialsubstitution erhöht. Außerdem können Störstoffe so schon vorher besser abgetrennt werden, was den Vorteil mit sich bringt, die Anlage zu entlasten und weniger nasse Rejekte behandeln zu müssen.

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zeigen, dass der entwickelte Prozess vor allem im Vergleich zur derzeit üblichen stofflichen Verwertung im Ausland Umweltvorteile mit sich bringt, da die Transportwege deutlich reduziert werden können. Hier ist zu empfehlen, die aktuelle Lenkungswirkung von Quoten und weiteren gesetzlichen Vorgaben zu hinterfragen. Beim Vergleich der stofflichen und thermischen Verwertung im Inland, hängen die Ergebnisse stark von den zugrundeliegenden Substitutionsmöglichkeiten ab. Solange durch thermische Verwertung biogener Materialien ein fossilbasierter Energiemix substituiert werden kann, bietet diese ökologische Vorteile. Jedoch werden biogene Treibhausgasemissionen nicht berücksichtigt und Papier könnte bei optimaler Kaskadennutzung zunächst stofflich verwertet und nach abnehmender Qualität immer noch einer thermischen Verwertung zur Energiegewinnung zugeführt werden. Können durch die erhöhte Faserstoffausbeute bei stofflicher Verwertung von PPK aus LVP direkt oder indirekt durch eine Verlagerung der Nutzung verschiedener Altpapiersorten Primärfasern substituiert werden, bietet die stoffliche Verwertung im Inland Vorteile für die Umwelt für CED, LOP und WCP und ist vergleichbar mit den Treibhausgasemissionen der thermischen Verwertung für das GWP.

2.6.1.3 Bewertung der Zirkularität

Innerhalb der betrachteten Systemgrenzen kann die Recyclingquote im Vergleich zum Status Quo Szenario mit thermischer Verwertung von PPK aus LVP gesteigert werden. Durch eine Optimierung der Prozesse (s. optimierte Aufbereitung) könnte diese noch weiter gesteigert werden.

$$\text{Recyclingquote Status Quo, therm.} = \frac{79 \text{ t Faserstoff}}{112,5 \text{ t PPK}} = 70\%$$

$$\text{Recyclingquote EnEWA} = \frac{95 \text{ t Faserstoff}}{112,5 \text{ t PPK}} = 84\%$$

Bei einer Abschätzung der deutschlandweit anfallenden Mengen an LVP und aus Quick-Service-Bereichen tragen diese jedoch nur geringfügig zur Gesamtquote bei, da sie einen kleinen Massenanteil am Gesamtsystem ausmachen. Dennoch fallen diese Abfälle bereits an und können mit entsprechender Technologie effizient recycelt werden, wodurch eine leichte Erhöhung der Verwertungsquote möglich wäre.

Status Quo:

$$\text{Altpapierrücklaufquote, Status Quo, therm.} = \frac{13.188 \text{ Tsd. t Altpapieraufkommen}}{17.856 \text{ Tsd. t Papierverbrauch}} = 73,9\%$$

$$\text{Altpapiereinsatzquote, Status Quo, therm} = \frac{17.032 \text{ Tsd. t Altpapierverbrauch}}{21.632 \text{ Tsd. t Papiererzeugung}} = 78,7\%$$

$$\text{Altpapierverwertungsquote, Status Quo, therm} = \frac{17.032 \text{ Tsd. t Altpapierverbrauch}}{17.856 \text{ Tsd. t Papiererzeugung}} = 95,4\%$$

EnEWA:

$$\text{Altpapierrücklaufquote, EnEWA} = \frac{13.298 \text{ Tsd. t Altpapieraufkommen}}{17.856 \text{ Tsd. t Papierverbrauch}} = 74,47\%$$

$$\text{Altpapiereinsatzquote, EnEWA} = \frac{17.142 \text{ Tsd. t Altpapierverbrauch}}{21.632 \text{ Tsd. t Papiererzeugung}} = 79,2\%$$

$$\text{Altpapierverwertungsquote, EnEWA} = \frac{17.142 \text{ Tsd. t Altpapierverbrauch}}{17.856 \text{ Tsd. t Papiererzeugung}} = 96,0\%$$

2.6.1.4 Produktvergleich

Treibhausgaspotential (GWP):

Für das GWP sind alle PET-Szenarien mit höheren Treibhausgasemissionen verbunden als die PPK-Szenarien (Abbildung 47). Dabei hat die Primärgranulatgewinnung bei der PET-Schale den höchsten Einfluss auf das Treibhausgaspotential. Durch das Recycling von PET können die Auswirkungen reduziert werden, jedoch sind die Recyclingquoten für PET aus LVP zurzeit mit 20-35% noch recht gering. Eine Verbesserung der Kreislaufführung bietet hier noch hohes Potenzial und könnte im Vergleich zur Pappschale dann auch besser abschneiden. Ebenfalls positiv wirkt sich das Recycling von PET auf das GWP aus, indem weniger PET thermisch verwertet wird und somit weniger CO₂-Emissionen ausgestoßen werden.

Bei der Pappschale hat die thermische Verwertung aufgrund des biogenen Rohstoffs einen geringeren Einfluss auf das GWP im Vergleich zur PET-Schale. Durch die Substitution von Primärfasern in den Recyclingszenarios von PPK kann nur ein geringer Teil der Treibhausgasemissionen eingespart werden, da die Primärfasern für die Pappschalen vor allem aus Skandinavien und Brasilien stammen, wo erneuerbare Energien einen großen Anteil am Strommix ausmachen. Den größten Anteil am GWP hat bei den Pappschalen die Papierherstellung, da diese durch die Trocknungsvorgänge sehr energieintensiv ist. Das ist für Primär- und Sekundärherstellung identisch. Bei der beschichteten Pappschale geht die Herstellung der PE-Beschichtung mit in die Schalenherstellung ein, wodurch diese im Vergleich zu den anderen PPK-Szenarien mit höheren Treibhausgasemissionen verbunden ist. Da das Pappschalen-System aufgrund des geringeren Heizwerts weniger Energie bereitstellt, müssen hier höhere Anteile vom Energiemarkt bereitgestellt werden, um die Systeme vergleichbar zu machen.

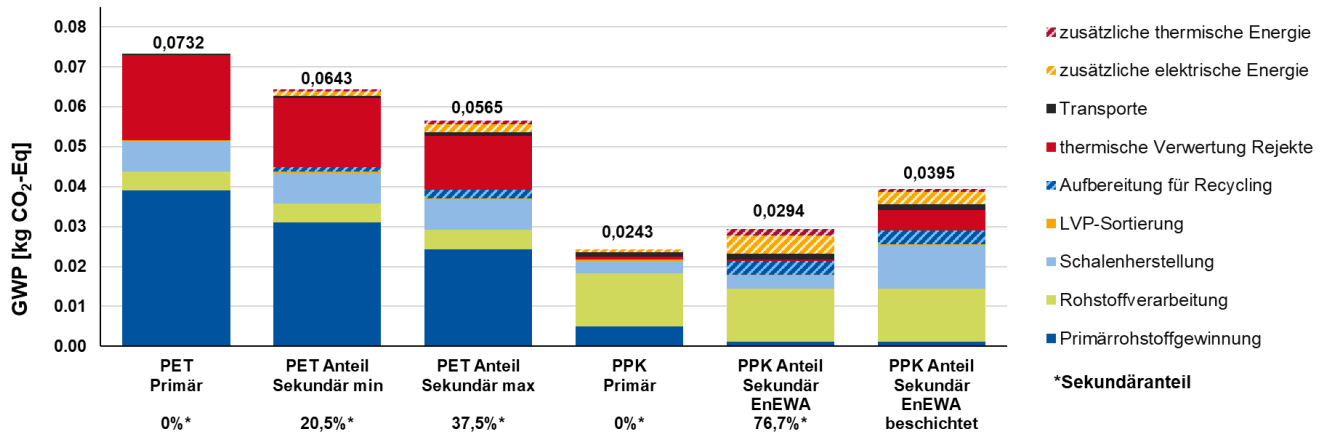


Abbildung 47: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Treibhausgaspotential

Kumulierter Energieaufwand (CED):

Beim kumulierten Energieaufwand zeigt sich ein anderes Ergebnis für den Szenarienvergleich (Abbildung 48). Hier weisen die beiden Primär-Szenarien den höchsten Energieaufwand auf, was vor allem auf die Einberechnung des Energiegehalts der Materialien und den höheren Energieaufwand zur Gewinnung zurückzuführen ist.

Durch Recycling kann der Energieaufwand zur Schalenherstellung für beide Materialien deutlich gesenkt werden. Besonders vorteilhaft ist das PPK-Recycling-Szenario, das den geringsten Gesamtenergiebedarf aufweist. Für die beschichtete Sekundär-Pappschale ist der Energieaufwand aufgrund des Energiegehalts und der Produktion der PE-Folie deutlich höher.

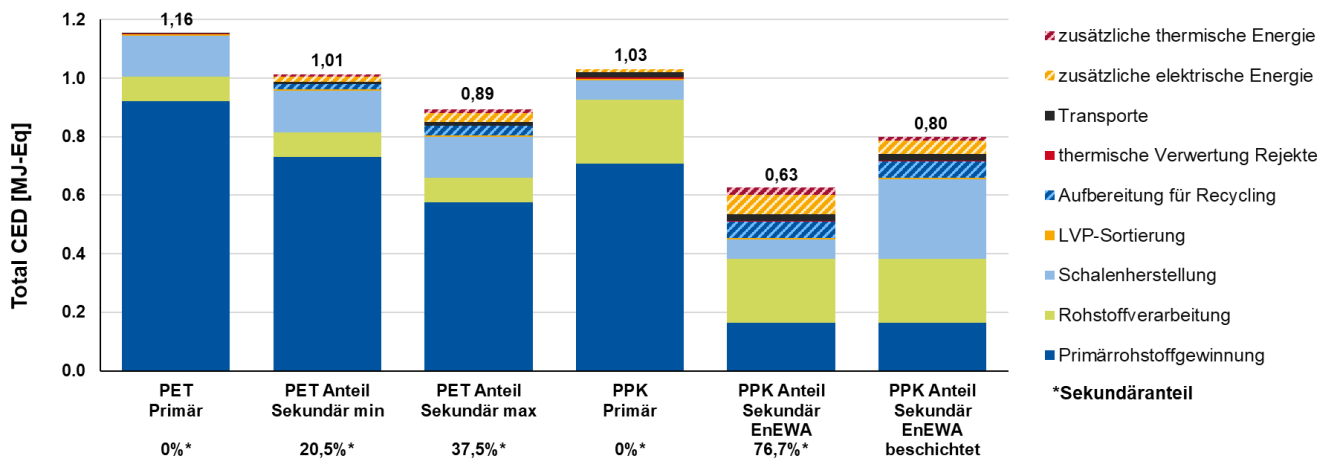


Abbildung 48: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Kumulierter Energieaufwand

Wasserverbrauch (WCP):

Der Wasserverbrauch hängt stark von der Kreislaufführung bei der Papierherstellung und -aufbereitung ab (Abbildung 49). Beim EnEWA-Produktionsversuch war der Wasserverbrauch mit 1,5 l/kg Karton aufgrund des geschlossenen Wasserkreislaufs niedrig im Vergleich zum durchschnittlichen Verbrauch der Papierindustrie. Bei PET-Schalen besteht vor allem während des Kühlens und Schneidens beim Thermoformen ein hoher Wasserbedarf. Zwischen den Primär- und Sekundärszenarien bestehen nur geringe Unterschiede im Wasserverbrauch.

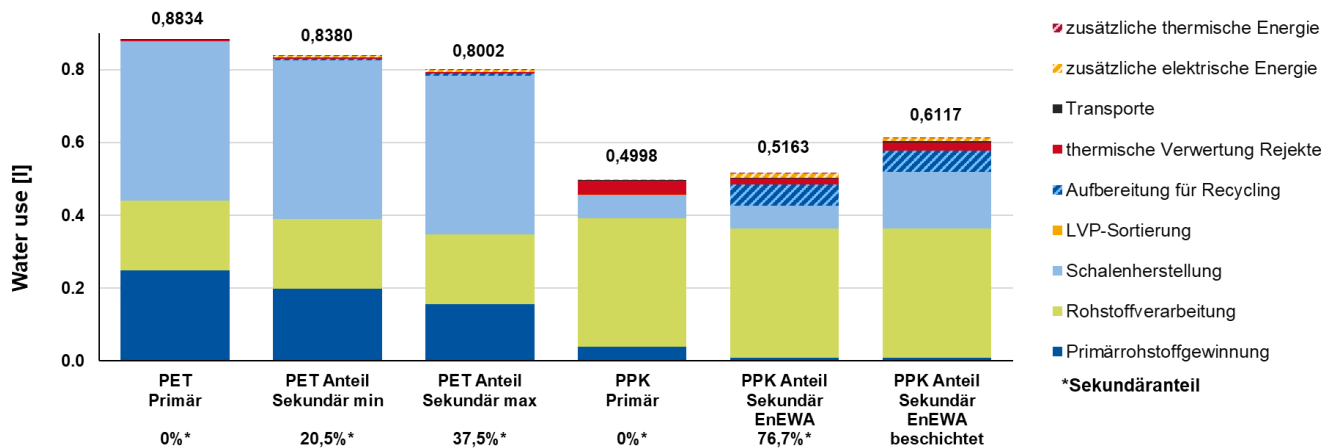


Abbildung 49: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Wasserverbrauch

Landnutzung (LOP):

Die Primärfasergewinnung für Pappschalen verursacht die signifikant höchste Landnutzung, die jedoch durch das Recycling von PPK reduziert werden kann (Abbildung 50). Für die PET-Schalenherstellung wird nur eine geringe Fläche benötigt, da PET als fossiler Rohstoff nur eine geringe Landnutzung aufweist. Da nie eine 100%ige Kreislaufführung möglich ist, müssen immer Primärfasern ins System eingebracht werden, sodass die Pappschalen für LOP die höheren Auswirkungen aufweisen.

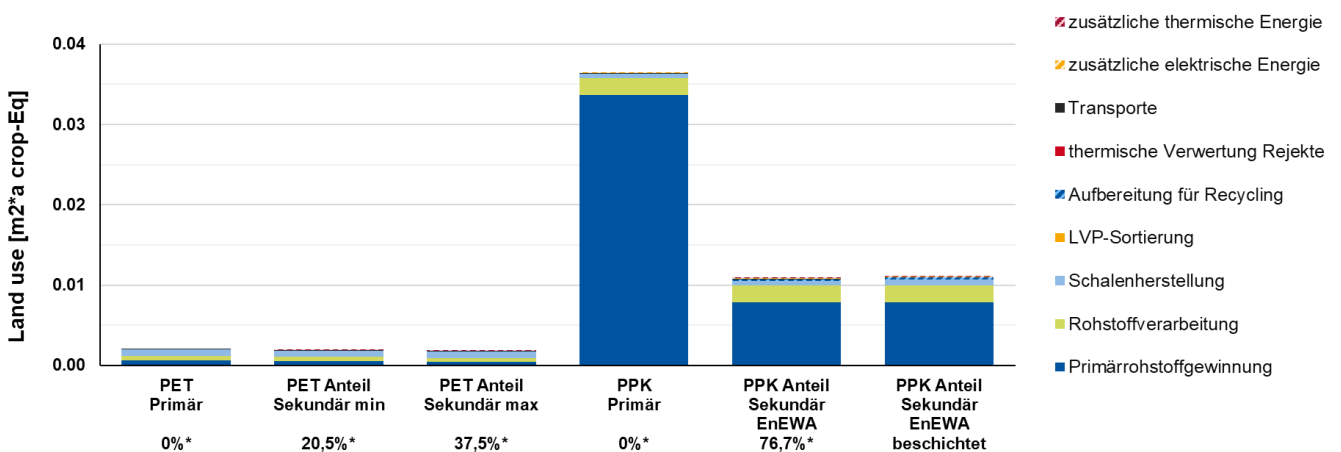


Abbildung 50: Ergebnisse der Umweltwirkungsanalyse - Landnutzung

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass beide Materialien spezifische Vor- und Nachteile haben. Während die Umweltauswirkungen von PET-Schalen durch verbessertes Recycling reduziert werden können, bietet die Pappschale insbesondere im Recycling-Szenario Vorteile beim CED und GWP. Allerdings bleibt die Landnutzung für die Gewinnung von Rohstoffen für die Primärfaserherstellung ein kritischer Punkt bei Pappschalen, während PET in diesem Bereich weniger belastend ist. Beim Wasserverbrauch hängt der Vergleich stark von der Kreislaufwasserführung der Papierfabrik ab.

2.6.2 Methodische Vorgehensweise und Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

Parallel zur ökologischen Analyse wurde in AP6.3 eine ökonomische Bewertung des

Aufbereitungsprozesses durchgeführt. Diese umfasste die Ermittlung der relevanten Kosten, Erlösstrukturen sowie Investitions- und Instandhaltungsausgaben als auch eine Marktanalyse, um die Akzeptanz von Recyclingpapierprodukten aus alternativen Quellen zu bewerten.

Ziel der Bilanzierung war es, sämtliche relevante Kostenfaktoren transparent zu erfassen und in einem ganzheitlichen System abzubilden. Dabei wurde der definierte Bilanzierungsrahmen aus AP6.1 genutzt, um alle relevanten Kosten zu erfassen. Dies umfasst sowohl die Investitionskosten für Anlagen und Infrastruktur als auch die laufenden Betriebskosten wie Energie- und Wartungskosten. Grundlage für die Erfassung und Berechnung bildeten definierte Prozessstufen sowie Daten aus den Produktionsversuchen in AP2, AP3 und AP4. Die Kostenberechnungen umfassen Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten sowie Kosten für Energie-, Wasser- und Chemikalienverbrauch (siehe Abbildung 51).

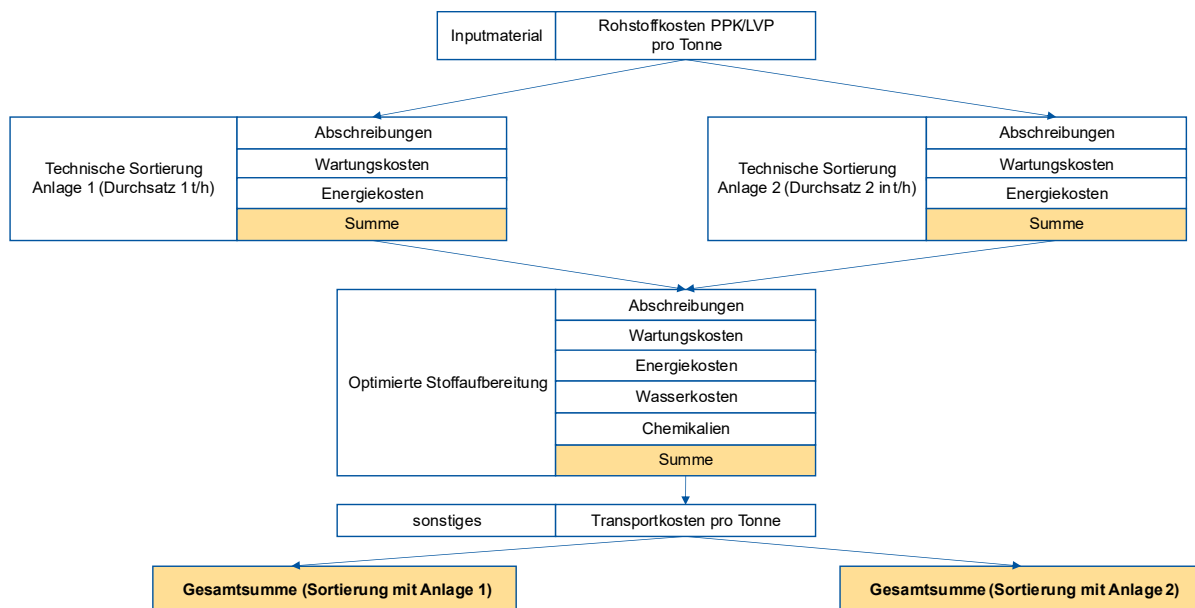


Abbildung 51: Erhebung der Kosten für die ökonomische Bilanzierung

Für die „Trockenmechanische Sortierung“ und die „Optimierte Stoffaufbereitung“ wurden die relevanten Prozessschritte und Aggregate, wie Gebindeöffner, Ballistikseparator, LC-Pulper und NIR-Sortierung, betrachtet. Die Energiedaten der einzelnen Aggregate wurden mit aktuellen Industriepreisen multipliziert, um die resultierenden Kosten pro Prozessschritt zu ermitteln. Ähnlich wurde für die Technische Sortierung verfahren, wobei hier spezifische Aggregate wie LC- und HC-Pulper, Trommel, IC-Cleaner, Heizschnecke, Disperger und Flotation in die Analyse einbezogen wurden. Zur Ermittlung der Investitionskosten wurden Daten der jeweiligen Projektpartner erhoben bzw. Angebote eingeholt. Die Energiedaten der einzelnen Aggregate wurden mit aktuellen Industriepreisen multipliziert, um die resultierenden Kosten pro Prozessschritt zu ermitteln. Bei der technischen Sortierung wurde dabei zwischen zwei Entwürfen für Sortieranlagen unterschieden: eine kleinere und eine größere Aufbereitungsanlage, die sich jeweils im Durchsatz (t/h) unterscheiden. Diese Entwürfe beinhalteten die komplette Maschinenteknik, den Stahlbau sowie die notwendige Infrastruktur. Auf Basis der jährlichen Nutzung in Stunden und einer definierten Nutzungsdauer in Jahren wurden die Abschreibungen berechnet, wodurch sich die spezifischen Investitionskosten pro Tonne ableiten ließen. Wartungskosten wurden auf Grundlage von Erfahrungswerten veranschlagt. Entsprechende Annahmen wurden auch für die optimierte Stoffaufbereitung und die zugehörigen Anlagen getroffen. Ein weiterer Bestandteil der ökonomischen Analyse waren die Transportkosten, die für den spezifischen Anwendungsfall

berechnet wurden. Die Berechnung zeigt, dass die Kostenunterschiede für die funktionelle Einheit zwischen den beiden Sortieranlagen nur marginal sind. Zudem zeigt sich, dass die optimierte Stoffaufbereitung den größten Kostenblock darstellt.

Eine Marktanalyse wurde durchgeführt, um die Akzeptanz des entwickelten Produkts auf dem Markt zu untersuchen. Hierbei wurden sowohl industrielle als auch Endverbraucherinteressen berücksichtigt. Zu diesem Zweck wurden gezielte Fragestellungen formuliert, die sowohl den aktuellen Verbrauch von Recyclingpapier analysierten als auch den Einfluss des neuen Aufbereitungsverfahrens untersuchten. Mithilfe spezifischer Fragen ließ sich ermitteln, welche Produkteigenschaften von Recyclingpapier für Konsumenten besonders relevant sind und welche Faktoren ihre Kaufentscheidungen maßgeblich beeinflussen. Dies bildet die Grundlage für eine fundierte Einschätzung, ob diese Eigenschaften auch bei veränderten Produkten beibehalten werden müssen, um die Akzeptanz der Verbraucher sicherzustellen.

Dabei wurden folgende Fragestellungen adressiert:

- Inwiefern verändert sich die Verwendung von Recyclingpapierprodukten, wenn diese aus alternativen Altpapierquellen hergestellt werden?
- Welche Produkte oder Produktverpackungen sind für Konsumenten besonders relevant, wenn Recyclingpapier verwendet wird?
- Verändert sich die Präferenz für bestimmte Produkte oder Verpackungen, wenn Altpapier aus alternativen Quellen eingesetzt wird?
- Welche spezifischen Eigenschaften von Recyclingpapierprodukten sind den Konsumenten am wichtigsten?
- Welche Gütesiegel, falls relevant, beeinflussen die Kaufentscheidung der Konsumenten maßgeblich?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurde eine Primärforschung durchgeführt, bei der sowohl Online- als auch Präsenzumfragen zum Einsatz kamen. Diese Methodenkombination ermöglichte die direkte Erhebung von Daten zur Akzeptanz der Konsumenten sowie zu deren Präferenzen im Hinblick auf die Nutzung von Recyclingpapierprodukten aus neuen. Um eine breite und heterogene Stichprobe zu gewährleisten, wurden die Daten im Rahmen einer Kombination aus Online- und Präsenzbefragungen erhoben. Dazu wurden 250 Personen befragt, wobei 216 Antworten über eine Online-Umfrage und 34 durch persönliche Befragungen erhoben wurden. Die demografische Verteilung zeigt eine breite Streuung hinsichtlich Geschlechts, Alter und Bildungsgrad, was eine fundierte Analyse ermöglicht. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen Abbildung 52 bis Abbildung 57 zusammengefasst:

Nutzungshäufigkeit:

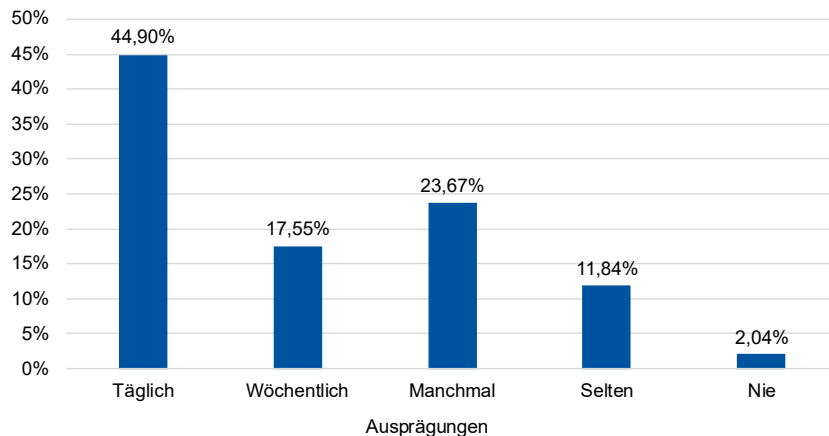


Abbildung 52: Nutzungshäufigkeit

Die Mehrheit der Befragten (62,45 %) nutzt Recyclingpapierprodukte regelmäßig (täglich oder wöchentlich). Nur 2 % gaben an, diese nie zu verwenden, wobei unbewusste Nutzung nicht ausgeschlossen werden kann. Produkte wie Toilettenpapier oder Druckpapier sind besonders verbreitet.

Wahrnehmung und Präferenz:

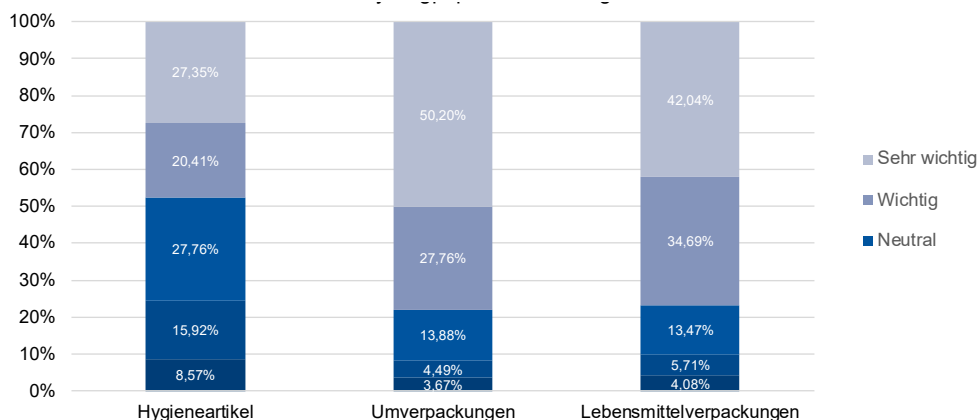


Abbildung 53: Präferenz Recyclingpapierverwendung

Die Frage zur Verwendungspräferenz von Recyclingpapier wurde in drei Produktgruppen unterteilt, um die Einstellungen der Teilnehmenden gezielt zu analysieren. Die Präferenzen für Recyclingpapier variieren je nach Produktgruppe:

- Hygieneartikel: 47,76 % der Teilnehmenden bewerten die Verwendung von Recyclingpapier als wichtig oder sehr wichtig, während 24,49 % dies als weniger wichtig oder unwichtig einstufen.
- Umverpackungen: Hier ist die Zustimmung mit 77,96 % besonders hoch. Nur 8,16 % sehen Recyclingpapier in dieser Kategorie als weniger wichtig oder unwichtig an.
- Lebensmittelverpackungen: 76,73 % halten die Verwendung von Recyclingpapier für wichtig oder sehr wichtig. Lediglich 9,79 % bewerten es als weniger wichtig oder unwichtig.

Grundsätzlich kann also zusammengefasst werden, dass rund 67 % der Befragten die Verwendung von Altpapierfasern in der jetzigen Konstellation als wichtig bis sehr wichtig erachten. Hygieneartikel erhielten dort allerdings deutlich weniger Zuspruch als die Kategorien

Umverpackungen und Lebensmittelverpackungen.

Entscheidungskriterien

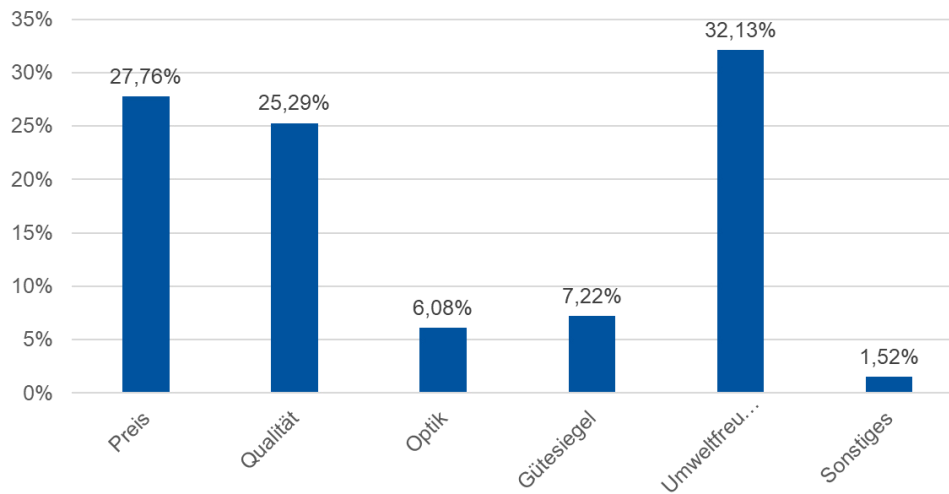


Abbildung 54: Entscheidungskriterien

Die wichtigsten Faktoren bei der Kaufentscheidung sind Umweltfreundlichkeit (32,13 %), Preis (27,76 %) und Qualität (25,29 %). Gütesiegel wie der Blaue Engel (42,5 %) und FSC (35 %) spielen eine unterstützende Rolle. Aspekte wie Optik (6,08 %) oder Haptik sind weniger relevant.

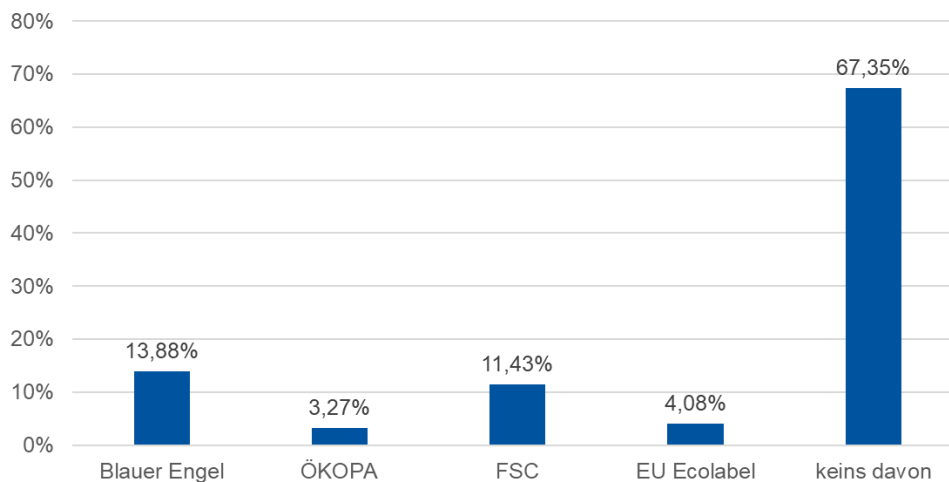


Abbildung 55: Gütesiegel zur Entscheidungsfindung

In der Anschlussfrage sollten die Gütesiegel näher betrachtet werden. Die Teilnehmenden sollten auswählen, auf welche Gütesiegel sie achten, wenn dies ein Entscheidungskriterium darstellt. Auch hier war wieder eine Mehrfachauswahl möglich. Dabei konnte zwischen „Blauer Engel“, „ÖKOPA“, „FSC“, „EU Ecolabel“ und „keins davon“ gewählt werden. Die am häufigsten genannten Gütesiegel sind sowohl der Blaue Engel (42,5 %) sowie das FSC-Label (35 %). 12,5 % der Stimmen erhielt zudem das EU Ecolabel, weitere 10 % das ÖKOPA-Label.

Akzeptanz alternativer Quellen

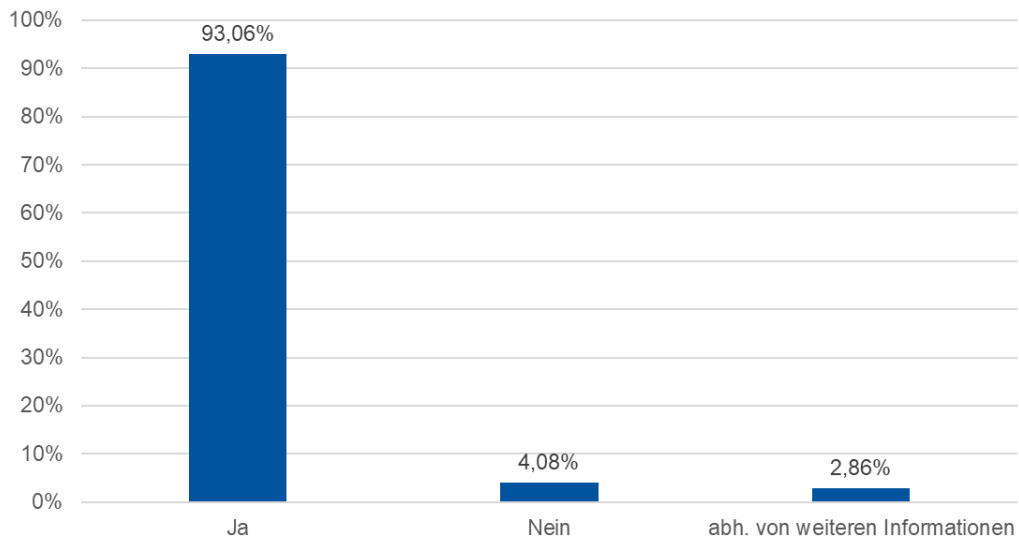


Abbildung 56: Akzeptanz von Recyclingpapier aus alternativen Quellen

Zum Schluss wurden die Teilnehmende befragt, ob sie weiterhin Recyclingprodukte nutzen würden, wenn die verwendeten Fasern aus dem Restabfall oder der gelben Tonne gewonnen werden. Eine Mehrheit von 93,06 % würde Recyclingpapierprodukte auch dann akzeptieren, wenn die Fasern aus alternativen Quellen wie Restabfall oder der gelben Tonne stammen. Einige Teilnehmer wünschten jedoch zusätzliche Informationen zur Materialqualität und möglichen Kunststoffanteilen. Informationen, welche von den Teilnehmern gewünscht sind, waren zum einen eine genauere Einordnung des Verwendungszwecks der gewonnenen Altpapierfasern. Eine Möglichkeit wäre hier die Kennzeichnung möglicher Quellen auf den Produkten, wenn dies differenziert werden kann. So hat der Kunde die Möglichkeit eine Kaufentscheidung hinsichtlich seiner Präferenzen zu treffen. Weiterhin ist der mögliche Kunststoffanteil im Endprodukt von Interesse. Ein Teilnehmer gab an, gegen verschiedene Kunststoffarten allergisch zu sein. Hier sollte sichergestellt werden, dass entweder die Kennzeichnung besteht oder die Kontamination der Endprodukte durch das Aufbereitungsverfahren ausgeschlossen werden kann. Zudem gab eine Person an, die Produkte verwenden zu wollen, wenn diese günstiger und „besser“ sind als bisherige Recyclingpapierprodukte.

Grenzen der Akzeptanz

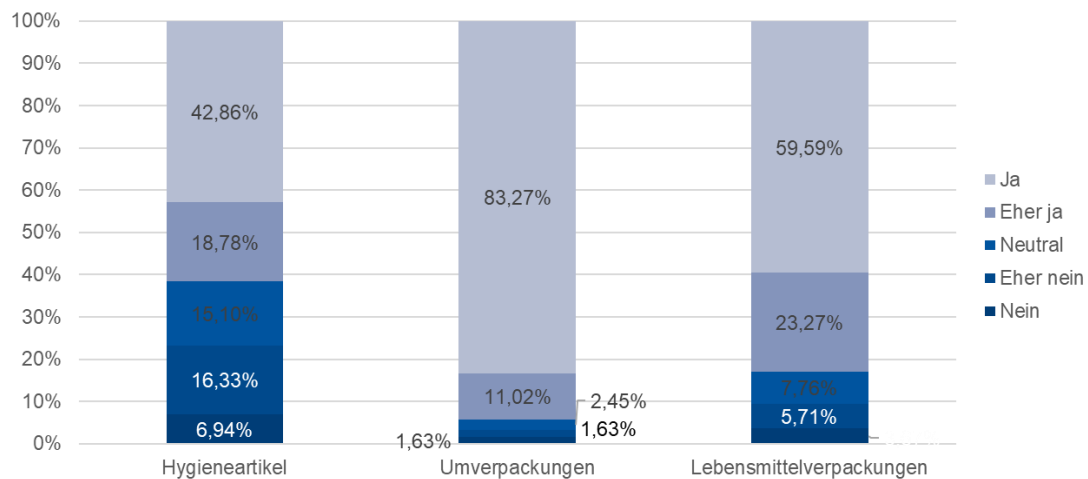


Abbildung 57: Präferenz Recyclingpapierverwendung

Um ermitteln zu können, ob die Verwendung von Recyclingpapierprodukten aus alternativen Quellen einen Einfluss auf die Verwendung der unterschiedlichen Produktgruppen hat, konnten die Teilnehmenden in der letzten Frage angeben, ob sie diese weiterhin nutzen würden. Die Akzeptanz variiert je nach Produktgruppe:

- Hygieneartikel: 61,64 % würden Produkte aus alternativen Quellen weiterhin verwenden; 23,27 % äußerten Skepsis.
- Umverpackungen: Mit 94,29 % Zustimmung zeigt diese Kategorie die höchste Akzeptanz.
- Lebensmittelverpackungen: Hier liegt die Zustimmung bei 82,86 %, wobei einige Bedenken hinsichtlich Sicherheit und Qualität geäußert wurden.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen eine hohe Bereitschaft der Konsumenten zur Nutzung von Recyclingpapierprodukten aus alternativen Quellen. Besonders ausgeprägt ist die Akzeptanz bei Umverpackungen und Lebensmittelverpackungen. Die Analyse ergab, dass Umweltfreundlichkeit, Qualität und Preis die wichtigsten Entscheidungskriterien der Konsumenten sind. Gütesiegel spielen eine untergeordnete Rolle, wobei der Blaue Engel und das FSC-Siegel für VerbraucherInnen die größte Bedeutung haben. Außerdem wurde deutlich, dass eine klare Kennzeichnung der Herkunft der Materialien auf den Produkten die Akzeptanz weiter erhöhen könnte. Insgesamt zeigte die Marktanalyse eine hohe Bereitschaft der Verbraucher, Recyclingpapier aus alternativen Quellen zu nutzen, solange die Qualität und die Umweltfreundlichkeit gewährleistet sind.

Die ökonomische Bewertung des Gesamtprozesses zeigte, dass trotz der höheren Anfangsinvestitionen die langfristigen Kosteneinsparungen und die positive Marktakzeptanz den entwickelten Prozess zu einer wirtschaftlich attraktiven Alternative zur thermischen Verwertung machen.

2.6.3 Zusammenfassung AP6

- Ökologische Bewertung: Die ökologische Bewertung ergab, dass der in EnEWA entwickelte Recyclingprozess sowie die thermische Verwertung von PPK aus LVP im Vergleich zum

Status Quo-Szenario mit Recycling im Ausland Einsparpotenziale in allen untersuchten Wirkungskategorien bieten. Hier ist es sinnvoll, die aktuelle Lenkungswirkung von Quoten und gesetzlichen Vorgaben zu hinterfragen. Im Vergleich des EnEWA-Prozesses zur thermischen Verwertung von PPK aus LVP hängt das Ergebnis stark von den angenommenen Substitutionsmöglichkeiten ab. Bei der thermischen Verwertung wirken sich vor allem der reduzierte Aufwand für die Verwertung und die Gutschriften vom fossilbasierten deutschen Energiemarkt positiv auf die Bilanz aus. Das Recycling von PPK aus LVP bietet im Vergleich Einsparpotenziale, wenn direkt oder indirekt Primärfasern ersetzt werden können.

- **Bezifferung der ökonomischen Auswirkungen:** Die ökonomische Bilanzierung lieferte eine detaillierte Analyse der Betriebskosten entlang der Prozesskette und verdeutlichte insbesondere die zentrale Rolle von Energieaufwendungen und Materialeinsatz. Potenzielle Vorteile können durch zukünftige Optimierungen wie Energieeinsparungen und eine effizientere Nutzung von recyceltem Material realisiert werden.
- **Marktakzeptanz:** Die Marktanalyse ergab eine positive Akzeptanz der entwickelten Produkte sowohl aus der industriellen Perspektive als auch bei Endkunden, was auf eine erfolgreiche Implementierung des Prozesses hindeutet.

2.7 Arbeitspaket 7: Wissenstransfer

Das Arbeitspaket 7 (AP7) fokussiert sich auf den Wissenstransfer und die gezielte Kommunikation der im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse. Dieser Transfer ist von zentraler Bedeutung, um die entwickelten Verfahren zur Aufbereitung von Altpapier aus den Abfallströmen LVP, RA und GA in der Praxis umzusetzen. Besondere Bedeutung hat hierbei die Änderung der Empfehlung XXXVI des BfR, die aktuell die stoffliche Verwertung von Altpapier aus den genannten Abfallströmen einschränkt. Eine Anpassung dieser Empfehlung ist für die wirtschaftliche Umsetzung und das langfristige Erfolgspotential des Projekts entscheidend. Daher wurde ein strukturiertes Konzept für den Wissenstransfer entwickelt, das Workshops, Dokumentationen und Handlungsempfehlungen umfasst.

2.7.1 Methodische Vorgehensweise und Ergebnisse

1. Akteurs-Management (AP7.1)

Ein zentraler Bestandteil des Projekts war die Identifikation und Akquise relevanter Akteure aus der Papierindustrie, der Kreislaufwirtschaft und der Produktsicherheit, die für den Projekterfolg notwendig sind. Diese Akteure wurden nicht nur in die Projektaktivitäten eingebunden, sondern auch regelmäßig über die Fortschritte des Projekts informiert. Die relevanten Akteure aus Industrie, Forschung und Regulierung wurden identifiziert und in die Projektaktivitäten integriert. Dies umfasst Unternehmen der Papierproduktion, Recyclinganlagen sowie Entscheidungsträger aus regulatorischen Stellen, die über die Empfehlung XXXVI des BfR entscheiden. Eine Projektwebsite wurde eingerichtet, um die Akteure kontinuierlich über den aktuellen Stand des Projekts zu informieren und sicherzustellen, dass alle Beteiligten stets auf dem neuesten Stand der wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen sind.

2. Akteursworkshops (AP7.2)

Ein zentrales Instrument für den Wissenstransfer waren die halbjährlich stattfindenden Akteurs-Workshops. Diese Workshops dienen dem intensiven Austausch zwischen den Projektpartnern und den relevanten Akteuren und ermöglichen die Diskussion und Definition von Kennwerten sowie die Präsentation des Projektfortschritts. In den Workshops wurden die gewonnenen technischen Erkenntnisse vorgestellt, insbesondere in Bezug auf die technische Sortierung, die Aufbereitung und die Hygienisierung von Altpapier. Darüber hinaus wurden auch die Ergebnisse zur Reststoffverwertung und der ökonomischen sowie ökologischen Bilanzierung thematisiert. Jeder Akteurs-Workshop wurde detailliert vorbereitet und nachbereitet. Die Ergebnisse und Diskussionspunkte wurden dokumentiert und flossen in die weiteren Projektaktivitäten ein. Dies ermöglichte es, die Entwicklung des Verfahrens eng mit den praktischen Anforderungen der Industrie und der regulatorischen Stellen abzustimmen.

Gerne sollen an dieser Stelle noch einmal die expliziten Arbeitsergebnisse aus den Akteursworkshops dargestellt werden:

Der erste Akteursworkshop fokussierte die Identifikation von Herausforderungen beim Recycling von PPK aus gemischten Abfallsammlungen. Diese Herausforderungen wurden in gesetzlich/organisatorische, ökonomische/ökologische und technische Herausforderungen klassifiziert (siehe Abbildung 58 und Abbildung 59).

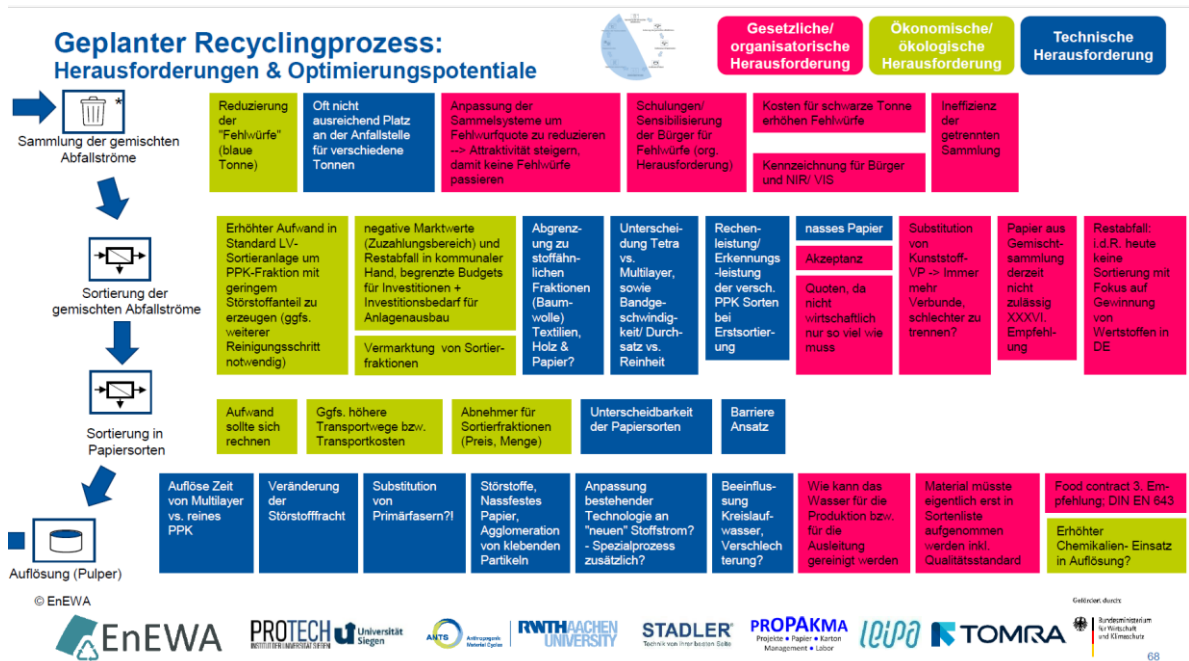


Abbildung 58: Ergebnis des 1. Akteursworkshops – Herausforderungen und Optimierungspotenziale (1/2)

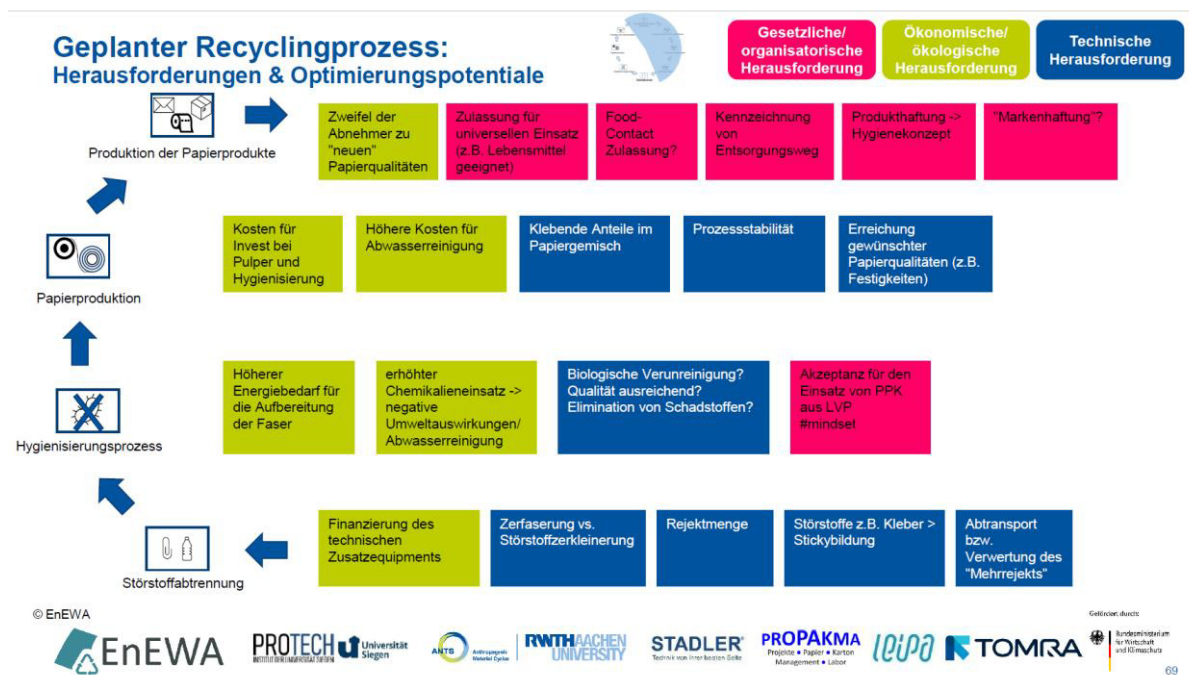


Abbildung 59: Ergebnis des 1. Akteursworkshops – Herausforderungen und Optimierungspotenziale (2/2)

Darauf basierend wurde mit den anwendenden Entsorgern diskutiert, welche Vorgaben von der Papierindustrie benötigt werden, um die Erzeugung der zu erreichenden Produktqualitäten sicherstellen zu können (siehe Abbildung 60).

Welche Vorgaben benötigen die Entsorger von der Papierindustrie zur Erzeugung der Produktqualitäten?

Sortendefinition "realistisch" Vgl. EN843	Klassifizierung von Papierprodukten - Rezepturen Verpackungsmittelhersteller (Recyclingweg)	Schaffung einer Datenbank mit Recyclingfähigkeit, Objektkennungsdaten, Recyclingweg, NIR-Daten, bspw. Holy Grail	Was darf rein - und was nicht!	Investitionssicherheit- Abnahmegarantien - langfristige Partnerschaften - Stützung der Verwertungskette durch duale Systeme (LVP) / Gesetzgebung (Gewerbeabfall)	Benchmarks für Gewerbebetriebe und Verantwortliche, um eigenes Verhalten (Entsorgung) werten zu können. DNK
(Kommune) Hinweis zu Anfallmengen bzgl. Bevölkerungsdichte, Sozialstruktur, Baustruktur	Welche Anforderung hat die Industrie an das Material (Leitfaden - erweiterte EN 843)	Erklärung zur Auswirkung von Lagerung im Gemischten Zustand sowie als Sortierware (Innen, Außen, Sonne, Zeitraum, Jahreszeit)	Informationsaustausch Kommune, Entsorger - Priorisierung der Kreislaufwirtschaft Informationsaustausch Kommune, Entsorger - Priorisierung der Kreislaufwirtschaft	Ermöglichung von Sogwirkung durch die Papierindustrie - Schaffung von Produkten, Anlagen, Verwertungswegen	
Welche Fraktionen stören sich nicht - was kann zusammen gesammelt werden (Batch-Weiße)	Leitfaden zur Bündelerfassung g bspw. Oslo, Bern, etc. - Störpotentiale bspw. in eigenem Gebinde (Tüte)	Mögliche Öffnung der grünen/ blauen Tonne für weitere Papiersorten (Trade off der Zwänge bzw. Bedürfnisse)			

© EnEWA



Geflügel, direkt



70

Abbildung 60: Benötigte Vorgaben der Papierindustrie für die Entsorger

Zudem wurden erste Gedanken bezüglich möglicher Differenzierungsmerkmale zwischen den betrachteten Abfallströmen Leichtverpackungen, Restabfall und Gewerbeabfall gesammelt (siehe Abbildung 61).

Was könnten Unterschiede/Besonderheiten bei der Gewinnung und Qualität von PPK aus LVP, RA und GA sein?

Unterschiedliche Wassergehalte (RA je nach Sammelsystem den höchsten Gehalt - Erfahrungssystem aus anderen Ländern)	Hoher Organik Anteil -> Nicht unmöglich da Papierfraktionen draus herzustellen	Restabfall mehr Virenlast, pathogene Keime und Kolibakterien als bei LVP und GA (z.B. Hygiene-papiere)	Unterschiede in der Zusammensetzung der Papierarbeiten (Anteile Kartonagen, grafische Papiere, ...)	Gewerbeabfall eher Kunststoffe als Beisstoffe, im Restabfall alles möglich, im LVP vor allem Folien und Leichtverpackungen	Im RA normalerweise größenabhängige Sortierung, etabliertes Konzept -> unterschiedliche Siebschritte (erste qualitative Trennung)	Korngrößen des PPKs der drei Quellen unterschiedlich (große Kartonage im GA und RA) -> LVP eher kleinere Korngrößen im Verhältnis (Kornungsband ist enger)
			Gewerbeabfall-Zusammensetzung vermutlich eher konstant, hängt eher davon ab was für ein Gewerbe (Kaufhof vs. Schlachterei) -> Überraschungskiste, wo und wie gesammelt wird und welche Unternehmen angeschlossen sind	Oder Hausmüll konstanter, wenn wir Gewerbeabfall generell über mehrere Sammelgebiete kategorisieren	Chance: manche GA müssten nicht hygienisiert werden -> Wieso gibt es keine Trennung an der Quelle? Papiererfassung? Chance: Tourenplanung für "saubere" Ware	Container aufstellen für bestimmte Gruppierungen in im GA?
			In manchen Städten konkurrierende Sammler/Sortierer (Berlin)	Bürger motivieren besser und konsequenter zu trennen ist das eigentliche Endziel -> schwer vorstellbar	Gehen wir über Sortierung oder über Sammlung direkt in die Papierfabrik? (Inklusion der Transportkosten)	Umschlagsplätze müssen geeigneten Platz für trennende Lagerung haben. -> Problem der Mischung
			Auch bei RA und LVP gibt es Unterschiede in der Herkunft (Art des Wohnraums, Siedlungsstruktur)	Je anonym der schlechter wird getrennt (Qualität des Stoffstroms)	Sortierfestlegung vermutlich notwendig?	Idee zur Komplexität S-reduzierung: Food und Non Food
			Städtisch vs. ländlich? oder ist es innerstädtisch schon unterschiedlich? welcher Detaillierungsgrad ist überhaupt logistisch handelbar? vermutlich zu komplex, Anlieferbereich ist auch hinsichtlich Bunkeranzahl nicht ausgelegt	NIR Erfassung in der Schütte vom Sammelwagen -> statistische Erfassung der Qualität und dadurch Routenplanung		Schichtweise gutes Material und schichtweise schlechtes Material bei GA benutzen (Schwierig dem Sammler das zu erklären)
Leerungsrhythmen? -> Qualitätseinfluss auf PPK-Anteil - wegen vollem Behälter - wegen Viren, Schadstoffen, ...						

© EnEWA



Geflügel, direkt



72

Abbildung 61: Brainstorming von Differenzierungsmerkmalen

Der zweite Akteursworkshop fokussierte die Untersuchung möglicher Ursachen für Verbraucher-Fehlwürfe sowie die daran angeschlossene gemeinschaftliche Entwicklung von zukünftigen Lösungsstrategien, um diese zu reduzieren und die damit verbundene, notwendige Öffentlichkeitsarbeit zu stärken (siehe Abbildung 62 und Abbildung 63).

2. Akteursworkshop Ergebnisse

» Fokusthema: Verbraucher-Fehlwürfe (nach DIN EN 643) und deren Reduzierung

	Wissen/Verbraucherverhalten	Organisatorisch	Verpackungsbeschaffenheit	Sonstiges
Ursachen	<ul style="list-style-type: none"> Fehlende Trennhinweise Fehlinformationen Regionale Unterschiede der Entsorgungssysteme Fehlende Kriterien Unzureichend informiert bzgl. Bedeutung der einzelnen Tonnen ("Plastikmüll vs. Verpackungsmaterial,") 5%-Regelung (Verbunde) ist für Verbraucher nicht nachvollziehbar Fehlende Motivation Ignoranz / Gleichgültigkeit Bequemlichkeit / Faulheit Keine Trennung im öffentlichem Raum 	<ul style="list-style-type: none"> Mangelnde Entsorgungsmöglichkeiten <ul style="list-style-type: none"> Sammelbehälter; Abholrhythmus Regulatorien werden nicht scharf genug verfolgt <ul style="list-style-type: none"> Wettbewerbssituation bei Verpackungen Keine Trennung im öffentlichen Raum Richtiges Tonnen-Volumen & richtiger Abfuhrhythmus an Großwohnanlagen Reinheitsgrad in Papiertonne sehr hoch (Erfahrung HH: Fehlwurfquote ~3%) Bringsysteme sorgen für Verluste Entsorgung vor Ort funktioniert nicht / oder es kümmert sich keiner um Qualität -> Mülltrennung egal Fehlwurfarten 	<ul style="list-style-type: none"> Mischformen von Verpackungsmaterial <ul style="list-style-type: none"> Kartonhülle + Kunststoff mit Lebensmittel Corona-Tests PaperSeal Verpackung Klare Zuordnung zum richtigen Stoffstrom fehlt bzw. ist unmöglich Keine einheitlichen oder eindeutigen Trennhinweise Komplexität Verunsicherung der richtigen Zuordnung von faserbasierten Verpackungslösungen durch Beschichtungen etc. Klassiker: Tiefkühlverpackung Händisch trennbare Verpackungen sind zu kompliziert Materialbeschaffenheit 	<ul style="list-style-type: none"> Einfluss der Schichtungen, Anonymität kann nicht beeinflusst werden Schichtungen bzw. Gebiete stellen Grenzen der Kampagnen dar Problemfall: Hygienepapier "Epizentrum" GWA - Einstieg über Vermieterbunde gesucht Unterschied Sack - Tonne, Perspektive: Abschaffung Sack Zukünftige Problematik: neue Umstellung, wenn Wertstoff-Tonne eingeführt werden sollte Beispiel Gewerbeabfall zeigt: wirtschaftliche Motivation reicht allein nicht aus Umsetzung der GewerbeabfallV hinkt Andienungspflicht verschiebt sich regulatorische Ursachen -> welcher Grad an Verunreinigung ist noch zugelassen? z.B. Pizzakarton

© EnEWA



Supported by:
Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action

4

Abbildung 62: Sammlung potenzieller Ursachen für Verbraucherfehlwürfe

2. Akteursworkshop Ergebnisse

» Fokusthema: Verbraucher-Fehlwürfe (nach DIN EN 643) und deren Reduzierung

	Wissen/Verbraucherverhalten	Organisatorisch	Verpackungsbeschaffenheit	Sonstiges
Lösungsstrategien	<ul style="list-style-type: none"> Aufklärungskampagnen Mehr Öffentlichkeitsarbeit/Mehr Budget Stärkung der Effizienz in der Beratung Bessere Vernetzung & Bündelung aller Aktivitäten der Öffentlichkeits-Arbeit aller Beteiligten (ÖRE, Entsorger, duale System etc.) Stärkung der Abfallberatung / mehr Budget / mehr Effizienz Vernetzung anderer Kampagne (z.B. wir für bio, E-P-lan etc.) Unklarheiten lösen, aber Verunsicherung vermeiden Bedeutung Kommunen und öRE berücksichtigen 	<ul style="list-style-type: none"> Höhere Sammelkapazität Abfuhrzyklen erhöhen öffentliche Sammelstellen für Altpapier (ausbauen) Ortsnahe Trennmöglichkeiten Anreizsysteme Entsorger für bessere Qualitäten & weniger Fehlwürfe Zusätzliche / Verdichtung der Standplätze (Systeme nutzen z.B. Unterflursysteme) Einheitliche Trennhinweise konsequente Prüfung der erzielten Qualitäten und entsprechende Sanktionierung passgenaues Volumen mit passgenauem Abfuhrhythmus für Anfallstellen Bessere operative Dienstleistung an den Anfallstellen Vereinheitlichung der Sammelsysteme (Deutschland und Europaweit) 	<ul style="list-style-type: none"> Klare Definitionen der Bewertungsregeln & Prüfung Intuitiv, lesbar, öffentlichkeitswirksam, konkret „Verbot“ von Greenclaming Piktogramm einfaches Verpackungsdesign Neuartige Verwertungsmöglichkeiten auch für kontaminierte Produkte (heute Fehlwürfe = morgen Rohstoff) und somit Unabhängigkeit vom Sammelpfad Einheitliche/ verpflichtende Kennzeichnung nur noch Design for Recycling mit klarer Zuordnung zum Stoffstrom mit der besten Recyclingausbeute Kennzeichnung der Recycelbarkeit mit Recyclingcodes 	<ul style="list-style-type: none"> Design for Recycling <ul style="list-style-type: none"> Alle Stakeholder berücksichtigen (Inverkehrbringer, Produzenten, Entsorger,...) Bei Verbunden: alle Komponenten stofflich verwertbar Rückmeldung/Nachverfolgung für Produzenten Stärkere finanzielle Begleitung (Bonus/Malus) der Inverkehrbringer EnEWA: Lösung durch verbesserte Sortierung Klare Regeln für faserbasierte Verpackungen Zuordnung der Beteiligungsentgelte der Verpackungen synchron zur besten Entsorgungsmöglichkeit Konflikt 95/5 zu Recyclingfähigkeit und Ausbeute lösen Umsetzung Gewerbeabfallverordnung

© EnEWA



Supported by:
Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action

5

Abbildung 63: Lösungsstrategien zur Reduzierung von Verbraucherfehlwürfen

Im dritten Akteursworkshop stand die Diskussion der Auswirkungen der Rejektbildung, die bei der stofflichen Verwertung von PPK aus gemischten Abfallsammlungen vermehrt anfallen sowie deren Sortierbarkeit im Fokus. Dabei konnten sechs Rejekte/ Verunreinigungen herauskristallisiert werden, die potenziell die größten Auswirkungen auf den Prozess haben:

- Schwarze Kunststoff-Papieretikett-Verpackungen
- Folien
- Chemikalien-Kontaminanten (bspw. die in der 36. Empfehlung aufgeführten Chemikalien und Chlor)

- Kritische Kombi-Verpackungen (mit Metall)
- Deluierte Stoffe (in Wasser gelöste Feinfraktionen wie bspw. Mikroplastik)
- Nassfeste Papiere/ doppelseitig beschichtet

Diese sechs Rejekte wurden anschließend hinsichtlich der damit verbundenen Problemstellung, der Anfallstelle, der zugrundeliegenden Ursache der Problemstellung, dem Inhaltsstoff, der Klassifizierung, ob es sich um ein spezifisches Problem für PPK aus LVP handelt oder nicht, einer Skizzierung der Handhabung zum Status quo, die Identifikation möglicher Lösungsansätze und einer Wunschvorstellung detailliert diskutiert (siehe Abbildung 64 und Abbildung 65).

Ergebnis-Dokumentation Gruppe 1

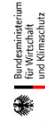
» Rejektklassifizierung + Umgang mit Rejekten/ Verunreinigungen und Verwertungswege

Weiches Rejekt/ Weiche Verunreinigung?	Problemstellung inkl. Bewertung des Risikos	Aufbereitungs- schritt / Anfallstelle	Ursache der Problemstellung (z. B. Wasser- gehalt, Geruch, Lagerdauer, ...)	Inhaltsstoff	Spezifisches Problem für PPK aus gemischten Abfallströmen -ja/nein?	Status quo, reale Handhabung	Mögliche Lösungsansätze (z. B. Aus- sortierung, Maskierung, ...)	Wunsch- vorstellung
Schwarze Kunststoff- Papierelikt Verpackung	<ul style="list-style-type: none"> Nicht sortierfähig, Durchgang ins Gutmaterial 	<ul style="list-style-type: none"> Aussortierung aus gemischten Abfallströmen 	<ul style="list-style-type: none"> Rußgeschwärzte, schwarze Kunststoffe mit NIR nicht erkennbar 	<ul style="list-style-type: none"> Kleber Thermoreaktionschemikalie unterschiedliche Kunststoffarten (PET, PT, ...) 	Ja, (spezifisch für gemischte Sammlung)	<ul style="list-style-type: none"> Fehlsortierung Austrag über Aufloserelekt thermische Verwertung 	<ul style="list-style-type: none"> DIA (Laser) ->Marker Geringerer Flächenanteil schwarz (25 %) Carbon-free Kunststoffe (nicht Ruß geschwärzt) 	<ul style="list-style-type: none"> Fluoreszierender Kunststoff Sinnvolle Produktgestaltung
Folien	<ul style="list-style-type: none"> Flugfähigkeit der Folie (Bandgeschwindigkeit) Schwerer Austrag Etikett -> Papier Überlagerungseffekte, Fehlererkennung als Verbunde (z.B. Texte) 	<ul style="list-style-type: none"> NIR, Sortierung gemischte Abfallströme Vorkonditionierung -> wird nicht aussortiert 	<ul style="list-style-type: none"> Überlagerung Beschaffenheit der Folie (sehr klein, leicht) Überfahren der Anlage 	<ul style="list-style-type: none"> Polyolefine Etiketten 	Ja, aber generell für alle Fraktionen und nicht nur für PPK	<ul style="list-style-type: none"> Fehlsortierung Austrag über Aufloserelekt thermische Verwertung 	<ul style="list-style-type: none"> Aussortierung nutzbarer Folie + werkstoffliche Bewertung Sensorfusion 	<ul style="list-style-type: none"> Bessere Abtrennung in Sortierung (gem. Abfallströme + Papersortierung) Weniger stofffremde Etiketten
Chemikalien- Kontaminanten (36. Empfehlung + Chlor)	<ul style="list-style-type: none"> Funktionsumfänge in Papier werden ohne Überlegung die Recyclingfähigkeit geraubt Aufkonzentration in Recycling Stoffe in fertigem Papier -> Beeinträchtigung der Nutzung (PFAS, obwohl in Papier selbst nicht eingesetzt) 	<ul style="list-style-type: none"> Fertigpapier (Schnittstelle zu Verbrauchern) Gasformiger Übergang in Lebensmittelfeld 	<ul style="list-style-type: none"> Produktdesign Diffuse Einbringung der Produkt- verarbeiter/ -veredler, auch: Maschinentechnik, Fehlwurfe 	<ul style="list-style-type: none"> PFAS Bisphenole Dippen, Chlor Liste 56. Empfehlung 	Nein, generelles Problem	<ul style="list-style-type: none"> Mikroflotation in Abwärme Flotation in Deinking Aufkonzentration in Stoffkreislauf 	<ul style="list-style-type: none"> Chemische Fällung Floccung (Abwasser- behandlung) und Abtrennung 	<ul style="list-style-type: none"> Problematische Stoffe verbieten Produktdesign anpassen

© EnEWA



Gefördert durch:



57

Abbildung 64: Rejektklassifizierung (1/2)

Ergebnis-Dokumentation Gruppe 2

» Rejektklassifizierung + Umgang mit Rejekten/ Verunreinigungen und Verwertungswege

Welches Rejekt/ Welche Verunreinigung?	Problemstellung inkl. Bewertung des Risikos	Aufbereitungs- schritt / Anfallstelle	Ursache der Problemstellung (z. B. Wasser- gehalt, Geruch, Lagerdauer, ...)	Inhaltsstoff	Spezifisches Problem für PPK aus gemischten Abfallströmen - ja/nein?	Status quo, reale Handhabung	Mögliche Lösungsansätze (z. B. Aus- sortierung, Maskierung, ...)	Wunsch- vorstellung
Kritische Kombi- Verpackung (mit Metall)	<ul style="list-style-type: none"> Sortierbarkeit, Auflösbarkeit (Metall, Nassfest) 	<ul style="list-style-type: none"> Sortierung, Auflösung 	<ul style="list-style-type: none"> Design (Rund, Metall) Nassfest 	<ul style="list-style-type: none"> Materialkombi Metall und Papier 	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Austrag in Dossenschrott 	<ul style="list-style-type: none"> Design für Recycling einheitliche Bewertung der Sortierbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Separate Aussortierung Sortierbarkeit für Verpackung Bewertbarkeit Kritischer Verpackungen Standardisierung
Delbuierte Stoffe	<ul style="list-style-type: none"> Anreicherung im Kreislaufwasser Rechtlicher Rahmen 19-33 Umwelt-> Abwasser-richtlinie 	<ul style="list-style-type: none"> Zerfaserung 	<ul style="list-style-type: none"> Technische Beschichtung -> Funktional Persistenz / Akkumulation 95-5 	<ul style="list-style-type: none"> Gemäß 36 Empfehlung MDSH/MOAH, PFAS etc. 	Ja, teilweise erhöht (z.B. für Plastik erhöht, für PFAS nicht erhöht)	<ul style="list-style-type: none"> Abwasserreinigung Mikro-Flotation 	<ul style="list-style-type: none"> Senken -> Zerstoren 	<ul style="list-style-type: none"> Eindämmen -> Vermeiden
Nassfeste Papiere / doppelt beschichtet	<ul style="list-style-type: none"> Beneizbarkeit -> Fasertrennung nicht möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Zerfaserung 	<ul style="list-style-type: none"> Nassfestmittel Barrierebeschichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> Kunststoff Papier Nassfestmittel 	Nein	<ul style="list-style-type: none"> Nur Verarbeitbar mittels Pulper 	<ul style="list-style-type: none"> Spezielle Zerfaserung -> Müssen sortierbar sein Label Restriktionen 	<ul style="list-style-type: none"> Möglichst Sorterein (> 90%) Clustern für Mengenstrom

© EnEWA



PROTECH Universität Siegen
INSTITUT FÜR UNIVERSITÄT SIEGEN



RWTH AACHEN
UNIVERSITY

STADLER
Technik von Ihrer besten Seite

PROPAKMA TOMIRA
Projekte • Papier • Karton
Management • Labor

Gefördert durch:

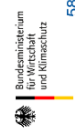
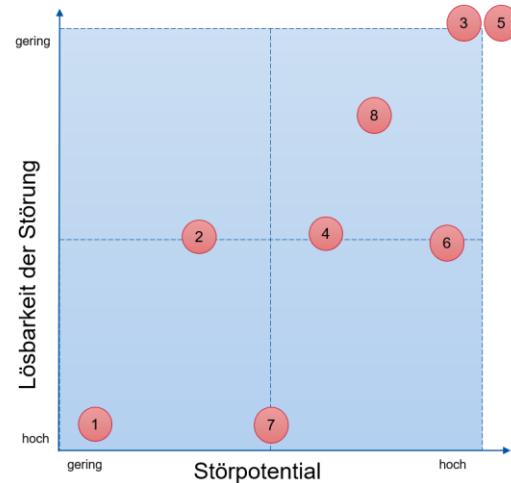


Abbildung 65: Rejektklassifizierung (2/2)

Anschließend konnten diese Rejekte hinsichtlich ihrem Störpotenzial sowie der Lösbarkeit der Störung klassifiziert werden (siehe Abbildung 66).

Einordnung der Rejekte

1	Schwarze Kunststoff- Papieretikett Verpackung
2	Folien
3	Chemikalien-Kontaminanten (36. Empfehlung + Chlor)
4	Kritische Kombi-Verpackungen (mit Metall)
5	Delouierte Stoffe (in Wasser gelöste Feinfraktionen, wie z.B. Mikroplastik)
6	Nassfeste Papiere / doppelseitig beschichtet
7	Mikrobiologie
8	Textil



© EnEWA



Gelbilder: darcht



59

Abbildung 66: Einordnung der Rejekte hinsichtlich Lösbarkeit und Störpotential

Der nächste Akteursworkshop thematisierte die Entwicklung von Ansätzen für das Design von marktfähigen Verpackungen unter Beachtung der damaligen PPWR-Anforderungen und des Mindeststandards.

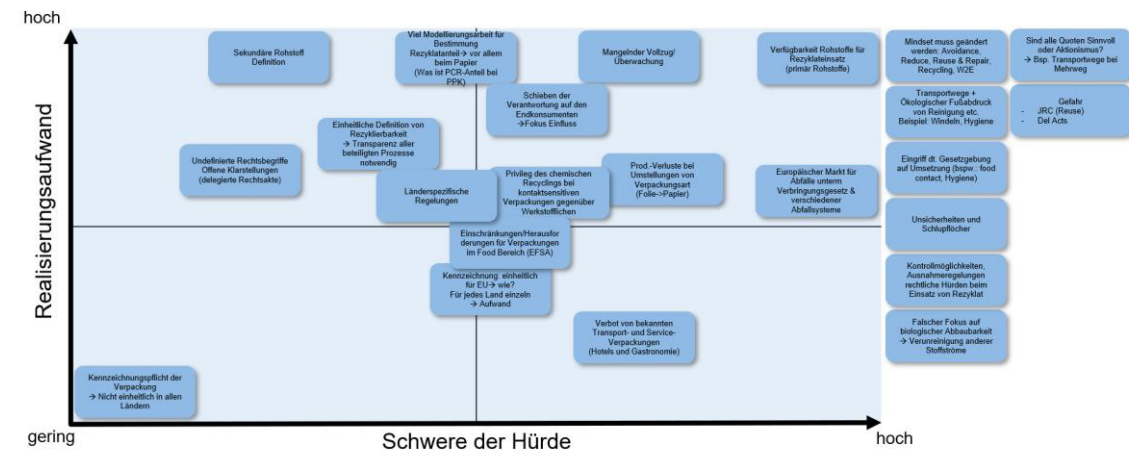
Im Hinblick auf die Designanforderungen der PPWR sollen Verpackungen so gestaltet werden, dass sie wiederverwendbar oder recyclingfähig sind. Bis 2030 sollen alle Verpackungen auf dem EU-Markt wirtschaftlich wiederverwendbar oder recycelbar sein. §21 des Verpackungsgesetzes (VerpackG) stellt einen rechtlichen Rahmen dar, um durch die gestaffelte Beteiligungsentgelte der dualen Systeme Anreize für Erstinverkehrbringer (Hersteller) zu schaffen. Ziel ist es, die grundsätzliche Recyclingfähigkeit sowie den Anteil von Rezyklaten und nachwachsenden Rohstoffen in Verpackungen zu verbessern.

Das Forschungsprojekt EnEWA bietet eine Recyclingoption für Verbundverpackungen im Leichtverpackungsmüll (LVP). Es ermöglicht unter anderem, die Gesamtrecyclingquote der Papierfraktionen zu erhöhen und liefert eine datenbasierte Grundlage, um den Einsatz von Papier in höherwertigen Anwendungen mit Lebensmittelkontakt zu ermöglichen.

Die Ziele der Teil-Workshops umfassten die Identifizierung von Hürden bei der Umsetzung von §21 VerpackG sowie der PPWR (siehe Abbildung 67). Außerdem wurden Ansatzpunkte entwickelt, wie der neue rechtliche Rahmen zu realen Verbesserungen führen kann (siehe Abbildung 68). Ein weiterer Fokus lag auf der Evaluierung der Anwendbarkeit der Ergebnisse des EnEWA-Projekts sowie der Identifikation weiterer Handlungsfelder und Übertragungsmöglichkeiten.

Workshopergebnisse

» Klassifizierung der Hürden (1/2)

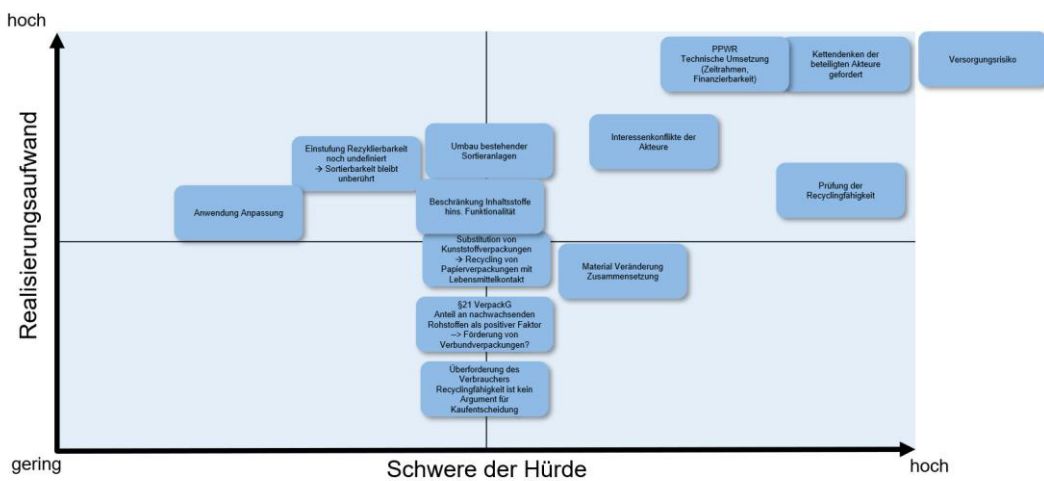


© EnEWA

Gefördert durch:

Workshopergebnisse

» Klassifizierung der Hürden (2/2)



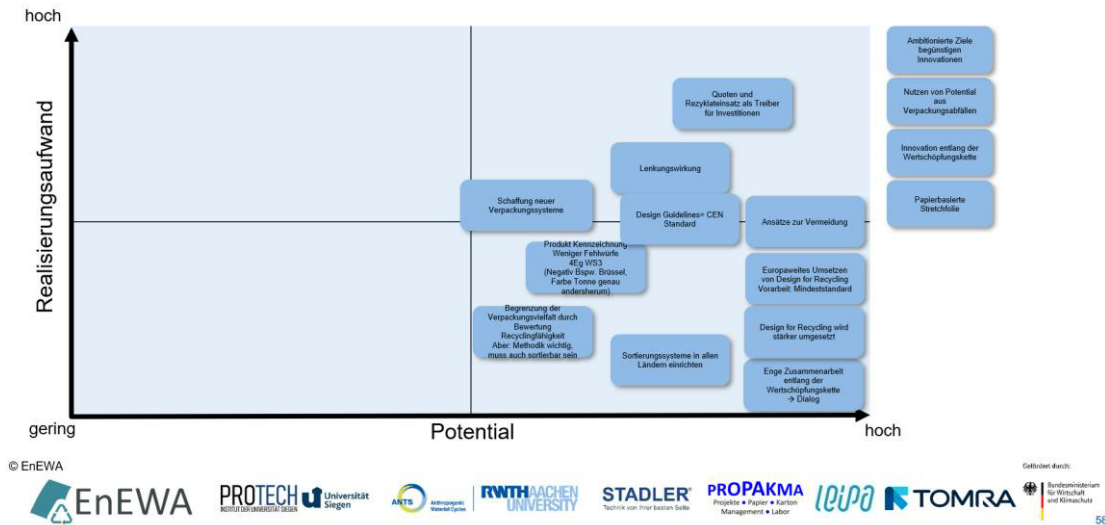
© EnEWA

Gefördert durch:

Abbildung 67: Klassifizierung der Hürden

Workshopergebnisse

» Klassifizierung der Chancen (1/2)



Workshopergebnisse

» Klassifizierung der Chancen (2/2)

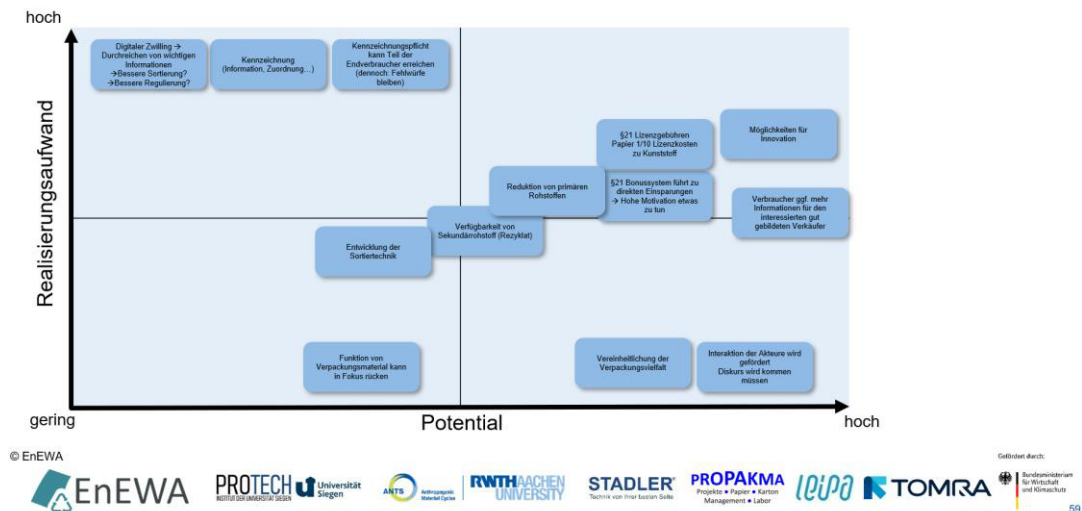


Abbildung 68: Klassifizierung der Chancen

Die PPWR sieht in Artikel 26 diverse Mehrwegquoten für verschiedene Produktgruppen vor. Der Einsatz von lebensmittelnahen Sekundärverpackungen aus Papier ist heutzutage überwiegend ausgeschlossen. Die Papierindustrie erfüllt diese Quote jedoch durch den Einsatz von Wellpappenkisten und Kartonagen. Zudem wird diskutiert, ob Wirtschaftsaktionen eine Ausnahme von der geforderten Mehrwegquote gewährt werden könnte, sofern der Recyclingquote des Verpackungsmaterials oder -formats ein entsprechender Prozentsatz entspricht.

Die EU plant darüber hinaus ambitionierte Ziele für den Rezyklateinsatz. Diese sollen bis 2040 auf 50-65 % in verschiedenen Verpackungskategorien erhöht werden (Artikel 7 PPWR: Verpflichtende Mindestrezyklateinsatzquoten für den Kunststoffanteil von Verpackungen). Für Papier sind solche verpflichtenden Rezyklateinsatzquoten derzeit jedoch nicht vorgesehen.

Einwegverpackungen mit Lebensmittelkontakt werden im Rahmen des Artikels 22 der PPWR diskutiert, wobei bestimmte Verbote und/oder Einschränkungen im Fokus stehen.

Ziele des Teil-Workshops umfassten die Diskussion des Umgangs mit Mehrweg-, Rezyklateinsatz- und Erfassungsquoten (siehe Abbildung 69). Dabei wurden folgende Fragen behandelt:

- Welche Quoten haben einen realen Einfluss?
- Welche konkreten Auswirkungen haben diese? (Ein Austausch über realisierbare Quoten für verschiedene Verpackungstypen sowie deren Lenkungswirkung)
- Wie könnte mit Rezyklateinsatzquoten für Papier umgegangen werden, wenn diese in Anlehnung an Kunststoff (beispielsweise produkt- oder verpackungsklassenspezifisch) definiert würden?

Workshopergebnisse

<p>Kontext – Welche Quoten könnten in welchem Umfang potenziell auch für PPK angewendet werden?</p> <ul style="list-style-type: none"> 70 % Allpapier-Rücklauf europaweit Gesamtrecyclingfähigkeit von Verbunden Gradierung A bis E versch. Produkte → Interessant jeweils Quote festzulegen Mehrwegquote Transport- & Umverpackungen Vermeidungsquoten Trend: Weniger Gewicht an Verpackung 	<p>Auswirkungen – Welche Auswirkungen auf die Praxis waren mit den Quoten für verschiedene Verpackungstypen verbunden?</p> <ul style="list-style-type: none"> Kleinere Mengenströme werden auch interessant (Rezyklat-/Substitutionsquote) Wie soll Outputquote erfüllt & gemonitored werden? <ul style="list-style-type: none"> Methode Abhängig von Inputquote (Verpackungen landen oft in Restmüll) Mehr Verpackungsmaterial (z.B. Obst/Gemüse) → Energieeinsatz Papiertüte > dünne Kunststoffolie/-tüte Mehr oder weniger Komplexität der Verpackungen → alle Elemente müssen erfüllt sein Nur steuerbar mit Herkunftspass komplette Daten
<p>Ursache – Was sind Ursachen für die Festlegung der Quoten? Warum könnte der Gesetzgeber diese Quoten vorgeben?</p> <ul style="list-style-type: none"> Vielfalt Kein Vollzug Green Deal 	<p>Lösungsansätze – Wie könnte mit den Quoten umgegangen werden?</p> <ul style="list-style-type: none"> Schwarze Liste von bestimmten Additiven Maßgeschneiderte Quoten für Papier
<p>Zusätzliche Anmerkungen</p> <ul style="list-style-type: none"> Quote CO₂- & Wirtschaftlichkeitsberechnung (z. B. Logistik) Neutrale Stelle zu Datenbank → Unternehmen sieht nur seine Ebene & kann nur von dieser Ebene Daten erlangen 	
<p>© EnEWA</p> 	

Abbildung 69: Ergebnisse zu Mehrweg-, Rezyklateinsatz- und Erfassungsquoten

Im fünften Akteursworkshop wurden der Kundennutzen sowie damit einhergehenden Kundenerwartungen beim Recycling von PPK aus LVP diskutiert (siehe Abbildung 70).

Workshopergebnisse

» Recycling von PPK aus LVP – Kundennutzen und- Erwartungen

<p>1 TECHNISCHE MACHBARKEIT/WIRTSCHAFTLICHKEIT</p> <p>Wie wird die technische Machbarkeit bewertet? Wie ist das Verhältnis von Kosten zu Nutzen?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Motivation: Quotenvorgabe ≠ Qualität. ▪ Menge in LVP: Vermutlich reichen 1-2 hybride Sortierer. ▪ Spezialbetriebe: Sinnvoll, diese zwischenschalten? ▪ Abnehmer für PPK aus LVP: Gesicherte Abnehmer fehlen ▪ An DSD oder LVP Sortieranlage testen (An LVP dran hängen) 	<p>2 KUNDENNUTZEN</p> <p>Welche spezifischen Erwartungen und Bedürfnisse der Kunden werden (nicht) erfüllt?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Material „verpönt“ / Image Problem & Inhaltsproblem → schwere Abnahme prognostiziert ▪ Hoher Druck durch Quoten: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Viele Veränderungen. ▪ Schlechtere Inputqualität.
<p>3 UMWELTAUSWIRKUNGEN</p> <p>Welche Umweltauswirkungen sehen Sie?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Extra Transporte 	<p>4 SKALIERBARKEIT</p> <p>Auf welche verschiedenen Betriebsgrößen ist das Konzept skalierbar? Gibt es Ihrer Ansicht nach beschränkende Bedingungen?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ultravolatilier Markt (Preise Altpapier) ▪ Mengentwicklung → reicht die Bandbreite? ▪ Quotenerfüllung → Duales System ▪ Qualität heutzutage schon problematisch (Deinking, Verpackungen, Störstoffe) ▪ Rohstoffe in richtiger Qualität → Strom zu qualifizieren, Abnehmer muss investieren

© EnEWA



Abbildung 70: Kundennutzen und -erwartungen beim Recycling von PPK aus LVP

Im sechsten Akteursworkshop wurden Monetarisierungsstrategien zur Vermarktung von PPK aus LVP diskutiert. Hierbei wurde insbesondere die Rolle der Brand Owner als Stellschraube identifiziert, um den Einfluss der Verpackungen zu diskutieren. Da die Umstellung einer Verpackung oft Jahre dauert, ist eine rechtzeitige Sensibilisierung und Austausch notwendig.

3. Wissenstransfer für Pilotanlage (AP7.3)

Alle relevanten Daten und Erfahrungen, die aus den Teilarbeitspaketen AP2 bis AP4 zu Sortierprozessen und Aufbereitungstechniken gewonnen wurden, wurden gesammelt und für die Planung und Umsetzung einer Pilotanlage aufbereitet. Diese Dokumentation bildet die Grundlage für den Aufbau einer Pilotanlage, mit dem Ziel, das Verfahren unter realen Produktionsbedingungen zu validieren.

4. Wissensdokumentation Reststoffrecycling (AP7.4)

Die im AP5 gewonnenen Erkenntnisse zur stofflichen Verwertung von Reststoffen, die während der Aufbereitung von Altpapier anfallen, wurden dokumentiert und aufbereitet. Diese Erkenntnisse sind von hoher Relevanz für die Kreislaufwirtschaft und sollen in Anschlussprojekten weiter genutzt werden. Die Untersuchung der Verwertungsmöglichkeiten von Rejekten, wie beispielsweise Kunststofffolien, wurde dokumentiert und bietet eine wertvolle Grundlage für weiterführende Projekte zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft, insbesondere in der Papier- und Kunststoffverwertung.

5. Handlungsempfehlung (AP7.5)

Ein zentrales Ergebnis des Projekts war die Erarbeitung einer Handlungsempfehlung zur Änderung der XXXVI. Empfehlung des BfR. Diese Empfehlung befasst sich mit den Risiken und Potenzialen der stofflichen Verwertung von Altpapier aus den untersuchten Abfallströmen. Eine Anpassung dieser soll die wirtschaftliche Nutzung der entwickelten Technologien

ermöglichen. In enger Zusammenarbeit mit den relevanten Akteuren wurde eine fundierte Handlungsempfehlung entwickelt, die als Grundlage für die Regulierungsbehörden dienen soll, um eine Änderung der gesetzlichen Empfehlungen zu erreichen. Das soll ermöglichen, die Energieeinsparung und Reduktion von Treibhausgasemissionen durch die stoffliche Verwertung von Altpapier zu fördern und eine wirtschaftliche Nutzung der Stoffströme zeitnah nach Projektabschluss zu ermöglichen.

6. Projektbegleitende Dokumentation (AP7.6)

Die gesamte Projektdurchführung wurde durch eine kontinuierliche Dokumentation unterstützt, die die Erreichung wichtiger Meilensteine erfasste und aufzeichnete. Dies umfasste alle ebenfalls Probleme und Herausforderungen, die während der Projektarbeit auftraten. Diese Informationen sind für die zukünftige Weiterentwicklung der Technologie von hoher Bedeutung. Zudem wurde in der Dokumentation kontinuierlich die Verwertbarkeit und die Praktikabilität der Ergebnisse geprüft, um sicherzustellen, dass die entwickelten Verfahren in der Praxis umsetzbar sind.

2.7.2 Ergebnisse und Ausblick

- Wissenstransfer und Kommunikation: Die regelmäßige Durchführung von Akteurs-Workshops und die kontinuierliche Information der Akteure trugen dazu bei, dass alle relevanten Stakeholder frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingebunden wurden und das Interesse an der wirtschaftlichen Nutzung der Ergebnisse gesteigert wurde.
- Dokumentation und Handlungsempfehlungen: Alle gewonnenen technischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse, insbesondere zur Reststoffverwertung und den Aufbereitungsprozessen, wurden dokumentiert und aufbereitet. Die Handlungsempfehlung zur Änderung der BfR-Empfehlung stellt eine wichtige Grundlage für die zukünftige gesetzliche Anpassung dar.
- Pilotanlagenerstellung: Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Teilarbeitspaketen zu Sortierung, Aufbereitung und Hygienisierung bilden die Grundlage für die Planung und den Aufbau einer Pilotanlage, die den entwickelten Prozess unter realen Bedingungen testen wird.

2.7.3 Verwertungsmöglichkeiten

- Während der Laufzeit des Vorhabens wurde ein weiteres Forschungsvorhaben „KIBAPap (KI-basiertes Bedienerassistenzsystem im Wertstoffkreislauf Papier)“ gestartet. Hier sind Synergien im Bereich der Verwendung von Altpapier, insbesondere der weißen Faser aus Sekundärquellen, zu erwarten.
- Im Anschluss an EnEWA werden Teile der Projektinhalte im Forschungsprojekt „SPaRe (Steigerung der Energieeffizienz des Wertstoffkreislaufs Papier durch Erschließung anfallender Rejektströme)“ weitergeführt. Projektstart von „SPaRe“ war der 01.11.2024.
- Für eine industriell skalierbare Lösung bedarf es noch viel Arbeit, die geleistet werden muss, besonders in Abstimmung mit dem BfR. Diese Gegebenheiten resultieren in hohen Investitionskosten und machten somit eine schnelle Umsetzung bisher nicht möglich. Diese Schwierigkeiten werden durch LEIPA im Nachgang detailliert betrachtet

und die prototypische Lösung weiterentwickelt.

- Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt werden seitens des Konsortiums fortlaufend bei potenziellen Kunden entlang der gesamten Wertschöpfungskette präsentiert. Bei den meisten Gesprächen mit Kunden wird die Notwendigkeit einer solchen Lösung hervorgehoben. Allerdings ist auch hier die Einführungshürde groß, da z. B. bereits die Bereitstellung des Materials mit größerem Aufwand verbunden ist.

2.7.4 Angabe des voraussichtlichen Nutzens - Energieeinsparung

Grundsätzlich ist die stoffliche Verwertung aufgrund der zusätzlichen Aufbereitungsschritte zunächst mit einem höheren Aufwand verbunden als die thermische Verwertung, sodass der kumulierte Energieaufwand steigt. Zusätzlich kann die Energie aus der thermischen Verwertung zur Substitution auf dem Energiemarkt dienen, was den Energieaufwand des Systems senkt. Vorteilhaft ist die stoffliche Verwertung von PPK aus gemischten Abfallsammlungen dann, wenn der gewonnene Faserstoff entweder direkt oder indirekt zur Substitution von Primärfasern dient. Dann kann der kumulierte Energiebedarf durch die stoffliche Verwertung im Vergleich zur thermischen Verwertung um 4,7 GJ/t Faserstoff reduziert werden. Auch durch den Ersatz von Kunststoffverpackungen durch papierbasierte Verpackungen hat sich in einem Fallbeispiel ein Einsparpotenzial von 20 GJ/t gezeigt, was den Mehraufwand durch die optimierte Aufbereitung ausgleicht.

Die Energieeinsparungen sind mit einer Reduktion der Treibhausgasemissionen verbunden, die allerdings geringer ausfallen. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass der nach Deutschland importierte Zellstoff zu großen Teilen aus Ländern wie Schweden kommt, die einen hohen Anteil erneuerbarer Energien im Strommix haben. Zum anderen werden die Treibhausgasemissionen bei der thermischen Verwertung von biogenen Materialien methodisch als Null-Emissionen gewertet, sodass diese ökologisch vorteilhaft wirkt. Steht das biogene Material aufgrund der stofflichen Verwertung nicht zur Energiegewinnung zur Verfügung, muss die Energie vom zurzeit noch fossilbasierten deutschen Strommix substituiert werden. Der Unterschied in den Treibhausgasemissionen ist somit vor allem methodisch begründet. Dieser Vorteil der thermischen Verwertung ist allerdings nur eine Momentaufnahme. Durch Ausschleusungen in künftigen Lebenszyklen steht das Material am Ende der Kaskadennutzung wieder zur Energiegewinnung zur Verfügung, es verschiebt sich lediglich um ein paar Lebenszyklen. Außerdem wird ein erneuerbarer Strommix angestrebt, sodass eine Substitution der Energie vom Markt künftig mit weniger Treibhausgasemissionen verbunden sein wird. Die ökonomische Bewertung zeigt, dass trotz hoher Investitions- und Betriebskosten langfristige Einsparungen möglich sind. Die Optimierung der Stoffaufbereitung führt zu effizienteren Prozessen, die den Energieverbrauch pro Tonne Faserstoff senken. Darüber hinaus reduziert die Substitution von Primärfasern die Abhängigkeit von kostenintensiven Rohstoffimporten, was sich positiv auf die Gesamtkostenstruktur auswirkt. Zudem ergab eine Marktanalyse eine hohe Akzeptanz von Recyclingpapierprodukten aus alternativen Quellen (93 % Zustimmung), was die wirtschaftliche Attraktivität des Prozesses unterstreicht.

3 Veröffentlichung der Ergebnisse

Journal Paper

- Raulf, Karoline; Spies, Alena; Greiff, Kathrin (2025). *Recycling von Papier aus Leichtverpackungsabfällen - Herausforderungen und Lösungsansätze für den Umgang mit faserbasierten Verbunden*. Müll und Abfall, Band: 2/25, Seite(n)/Artikel-Nr.: 74-79; Erich Schmidt Verlag, Berlin
- Spies, Alena Maria; Kroell, Nils; Ludes, Annika; Küppers, Bastian; Raulf, Karoline; Greiff, Kathrin (2024): *Assessing the resource potential of paper and board in lightweight packaging waste sorting plants through manual analysis and sensor-based material flow monitoring*. Waste Management. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.07.034>
- Spies, Alena Maria; Scherling, Tabea; Ludes, Annika; Küppers, Bastian; Kroell, Nils; Raulf, Karoline; Greiff, Kathrin (2024): *Assessing the Process Performance of Ballistic Separators in Waste Sorting Plants Using Sensor-Based Process Monitoring (Pre-Print)*. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5026820> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5026820>.

Konferenzbeiträge

- Vortrag: Raulf, Karoline; Spies, Alena Maria; Köhler, Hannah; Krolle, Arne; Huesmann, Robin; Ludes, Annika; Küppers, Bastian; Kaufeld, Sebastian; Lambertz, Oliver; Winter, Jens; Atapin, Alexander; Greiff, Kathrin (2025). *EnEWA - Was ist mit Altpapier aus gemischten Abfallströmen noch möglich?* Kreislaufwirtschaftstage Münster, Münster, 11. und 12.02.2025
- Vortrag: Raulf, Karoline (2025). *Das Projekt EnEWA: Drei Jahre intensive Forschung – und dann?* INGEDE-Symposium, München, 25.02.2025
- Beiträge zur Recy&Depotech Konferenz, 13.-15.11.2024
 - Vortrag und Beitrag zum Konferenzband: Spies, Alena Maria; Köhler, Hannah; Raulf, Karoline; Krolle, Arne; Huesmann, Robin; Ludes, Annika; Küppers, Bastian; Kaufeld, Sebastian; Lambertz, Oliver; Faul, Andreas; Winter, Jens; Atapin, Alexander; Greiff, Kathrin (2024): *Recycling of paper and board from mixed waste collections: Potential, technical feasibility and future challenges*. In: Vorträge-Konferenzband zur 17. Recy & DepoTech-Konferenz. Leoben: AVAW.
 - Vortrag und Beitrag zum Konferenzband: Köhler, Hannah; Spies, Alena Maria; von Behr, Rosalie; Raulf, Karoline; Greiff, Kathrin (2024): *Recycling paper and board from mixed waste streams: Determining data requirements for a reliable environmental assessment*. In: Vorträge-Konferenzband zur 17. Recy & DepoTech-Konferenz. Leoben: Montanuniversität Leoben.
- Postervorstellung auf der OpenLCA Konferenz, 15. und 16.04.2024: Köhler, Hannah; Spies, Alena Maria; Hegemann, Natalie; Raulf, Karoline; Greiff, Kathrin

(2024): *Comparing waste treatment options: A LCA case study on paper and board from lightweight packaging waste*. In: Proceedings of the First openLCA User Conference: openLCA.conf, Berlin, Germany, 15–16 April 2024. Page 19. Berlin: GreenDelta GmbH.

- Vortrag: Spies, Alena; Köhler, Hannah (2024). *Rejects from the recycling of paper from mixed waste collections – Analysis and potentials*. INGEDE-Symposium, München, 13.03.2024
- Veröffentlichungen im Rahmen des 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft, Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., 15. und 16.02.2024
 - Vortrag und Beitrag zum Konferenzband: Spies, Alena Maria; Scherling, Tabea Anne-Marie; Ludes, Annika; Kroell, Nils; Küppers, Bastian; Kaufeld, Sebastian; Raulf, Karoline; Greiff, Kathrin (2024): *Abtrennung von Papier aus Kunststoffgemischen: Parameterstudie mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring zur optimierten Einstellung eines Ballistikseparators*. In: 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft, TU Wien, 15–16 February 2024. Innsbruck: innsbruck university press. Pages 71–76.
 - Scherling, Tabea Anne-Marie; Spies, Alena Maria; Ludes, Annika; Kroell, Nils; Küppers, Bastian; Raulf, Karoline; Greiff, Kathrin (2024): *Modellierung eines Ballistikseparators mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring und Machine-Learning*. In: 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft, TU Wien, 15–16 February 2024. Innsbruck: innsbruck university press. Pages 77–84.
- Vortrag und Veröffentlichung bei der CIRP CMS 2023: Burggräf, Peter; Steinberg, Fabian; Sauer, Carl; Nettesheim, Philipp; Wigger, Marius; Becher, Alexander; Greiff, Kathrin; Raulf, Karoline; Spies, Alena; Köhler, Hannah; Huesmann, Robin; Atapin, Alexander; Kaufeld, Sebastian; Krolle, Arne; Faul, Andreas; Winter, Jens; Küppers, Bastian; Ludes, Annika. (2024). *Boosting the Circular Manufacturing of the Sustainable Paper Industry - A First Approach to Recycle Paper from Unexploited Sources such as Lightweight Packaging, Residual and Commercial Waste*. Procedia CIRP. 120. 10.1016/j.procir.2023.09.027.
- Vortrag: Spies, Alena Maria; Köhler, Hannah; Hegemann, Natalie; Huesmann, Robin; Kaufeld, Sebastian; Krolle, Arne; Raulf, Karoline (2023): *Lost fibers – 100% recycling? New sources for paper recycling – An insight into the EnEWA project*. Presentation. PTS Conference: Paper & Board Recycling – Smart & Circular, Dresden, 23–24 May 2023.
- Vortrag: Raulf, Karoline (2023). *Herausforderung Circular Economy – aktuelle Forschungsfragen zum Stoffstrom Papier*. INGEDE-Symposium, München, 08.03.2023
- Vortrag: Spies, Alena Maria; Sauer, Carl René; Raulf, Karoline; Köhler, Hannah; Wigger, Marius; Krolle, Arne; Faul, Andreas; Winter, Jens; Küppers, Bastian; Ludes, Annika; Huesmann, Robin; Kaufeld, Sebastian; Lambertz, Oliver (2024): *Increasing paper recycling in Europe through recycling of paper from mixed waste streams*.

Presentation. Paper & Beyond Conference, Brussels, 29–30 November 2022.

- Vortrag: Spies, Alena Maria (2022). *Ein erster Einblick in das Projekt EnEWA: Wie Stoffstromanalysen helfen das Wertstoffpotenzial zu identifizieren*. INGEDE-Symposium, München, 09.03.2022

Patentanmeldungen

- *Verfahren und Vorrichtung zur Klassifizierung zumindest eines neuen Artikels / Rechercheantrag gestellt / Erfinder: Robin Huesmann / Withers & Rogers (Mai 25) W&R Ref: P609211DE00*
- *Vorrichtung und Verfahren zur Aufbereitung eines wertstoffhaltigen Stoffstroms / Rechercheantrag gestellt / Erfinder: Robin Huesmann / Withers & Rogers (September 24) W&R Ref: P606795DE00*

Sonstige Projektvorstellungen

- Workshop Kommission/BDE: Robin Huesmann: *Workshop zur Definition "(non) recyclable" – Faserverbunde*, 20.05.2025
- BDE Regionalverbandstagung: Robin Huesmann: *„Die perfekte Scheidung -wie Al dem Recycling von Papier & Papierverbunden eine Zukunftsperspektive bietet“*, 29.10.2024
- Postervorstellung von EnEWA bei der DACE-Auftaktveranstaltung in Aachen, 05.09.2024
- Interaktive Vorstellung von EnEWA auf der Woche der Umwelt des Bundespräsidenten, Schloss Bellevue, 4. und 5.06.2024
- Durchführung eines Vortrags und anschließender Podiumsdiskussion auf der IFAT, in Kooperation mit dem Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V. (BDE): *„Closing the fiber loop: Recycling von Papier aus Leichtverpackungsabfällen“*, 14.05.2024
- Vortrag auf der Veolia-Bühne auf der IFAT: *„Wie können wir Papier und Papierverbunde aus Leichtverpackungsabfällen recyceln?“*, 16.05.2024
- BVSE Altpapiertag Berlin: Robin Huesmann: *„back to the (paper) future" - „Doc, hören Sie! ...alleswas wir brauchen, ist konsequente Kreislaufwirtschaft“*, 16.04.2024
- Spies, Alena Maria; Köhler, Hannah; Raulf, Karoline (2023): *Aktuelle Fragestellungen und Lösungsansätze für die Stoffströme Altpapier und Alttextilien auf dem Weg zu einer Circular Economy*. Nonwoven+Paper Network Treffen (Plenary/Keynote), Aachen, 12 October 2023.
- Vorstellung von EnEWA beim Arbeitskreis „Altpapier“ vom Verband DIE PAPIERINDUSTRIE: Raulf, Karoline; Spies, Alena Maria (2023): *Papier aus gemischter Sammlung – Potential für das Papierrecycling – Ein Einblick in die Forschungsfragen des EnEWA Projekts*. Strategiemeeting Die Papierindustrie e.V. (Plenary/Keynote), Frankfurt, 2 June 2023.

Preise und Nominierungen:

- 2022 ist das Projektteam von EnEWA in Brüssel mit der höchsten Auszeichnung des European Paper Recycling Council (EPRC) in der Kategorie „Innovative Technologien und Forschung & Entwicklung“ ausgezeichnet worden.
 - Vortrag bei der Verleihung: Spies, Alena; Sauer, Carl; Raulf, Karoline; Köhler, Hannah; Wigger, Marius; Krolle, Arne; Faul, Andreas; Winter, Jens; Küppers, Bastian; Ludes, Annika; Huesmann, Robin; Atapin, Alexander; Kaufeld, Sebastian; Lambertz, Oliver. (2022). *Energy savings in paper production by opening up the value chains of recovered paper from lightweight packaging, residual waste and commercial waste*. 10.13140/RG.2.2.35900.21123.
- Nominierung als TOP5-Finalist der „The Sustainability Awards“, Packaging Europe (<https://packagingeurope.com/sustainability-awards>), „*Recycling of Paper, Board and Paper Composites from Lightweight Packaging Waste (research project EnEWA)*“

4 Literaturverzeichnis

DIE PAPIERINDUSTRIE - Leistungsbericht PAPIER 2025 (2025). Online verfügbar unter https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07_Dateien/XX-LB/PAPIER_2025_Leistungsbericht_digital_FINAL.pdf.

DIN EN 643:2014-11 - Papier, Karton und Pappe - Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten.

Köhler, Hannah; Spies, Alena Maria; Greiff, Kathrin; Raulf, Karoline (2025): Is increased and high-quality recycling environmentally beneficial? Assessing the recycling of paper and board from lightweight packaging waste in a case study in Germany. – noch nicht veröffentlicht, in Review