



INFOR-Projekt Nr. 204

Rezyklierbarkeit und Recycling von Hybrid-Materialien

Schlussbericht

August 2019

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Papierfabrikation und
Mechanische Verfahrenstechnik

Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Projektleiter:
M. Sc. Tobias Krebs
Dr.-Ing. Hans-Joachim Putz

Schlussbericht INFOR-Projekt 204

Rezyklierbarkeit und Recycling von Hybrid-Materialien

Fachgebiet Papierfabrikation und
Mechanische Verfahrenstechnik (PMV)
Technische Universität Darmstadt

Projektbearbeiter:

M.Sc. Tobias Krebs (PMV)

Dr.-Ing. Hans-Joachim Putz (PMV)

August 2019



Projektbegleiter:

Herr Bernd Seger / Glatfelter Gernsbach GmbH, Gernsbach

Herr Boris Rotter / Weig GmbH & Co. KG, Mayen

Herr Hans-Henning Junk / A.Köhler GmbH & Co.KG

Herr Heiner Grussenmeyer / Stora Enso GmbH

Kontakt:

Technische Universität Darmstadt

Fachgebiet Papierfabrikation und

Mechanische Verfahrenstechnik

Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Alexanderstr. 8

D-64283 Darmstadt

Telefon: +49 – 61 51 – 16 22 580

Fax: +49 – 61 51 – 16 22 581

E-Mail: schabel@papier.tu-darmstadt.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abkürzungsverzeichnis.....	3
1 Ausgangssituation.....	4
2 Forschungsziel und Lösungsweg.....	5
3 Material und Methodik.....	7
3.1 Probematerial.....	7
3.2 Bekannte Methoden zur Messung der Rezyklierbarkeit.....	9
3.2.1 PTS-Methode RH 021/97	9
3.2.2 ZM-Methode RECO 01/2014 / EcoPaperLoop-Methode 1	11
4 Ergebnisse	13
4.1 Definition von Hybrid-Materialien	13
4.2 Mengenabschätzung relevanter Hybrid-Materialien.....	13
4.3 Identifikation und Abtrennung von Hybrid-Materialien in Altpapiertrennprozessen	17
4.4 Rezyklierbarkeitsbewertungen ausgewählter Hybrid-Materialien anhand etablierter Labormethoden.....	19
4.4.1 PTS-Methode RH 021/97	19
4.4.2 ZM-Methode RECO 01/2014.....	23
4.4.3 Fazit der Laboruntersuchungen.....	29
4.5 Verbesserung der Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien durch Anpassung der Stoffaufbereitungsprozesse	31
4.6 Bewertung der Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien	35
4.6.1 Literaturrecherche	35
4.6.2 Vorschlag für Maßstab zur Bewertung von Hybrid-Materialien.....	38
5 Literaturverzeichnis.....	41

Zusammenfassung

Die Herstellung und Verbreitung von Papierprodukten mit Komponenten, die nicht aus Papier sind, nimmt deutlich zu. Bereits weit verbreitete Beispiele sind Verpackungspapiere mit Barrierebeschichtungen gegen Fett oder Mineralöl, Getränkekartons oder Papiere zur Herstellung von Kaffeebechern, aber auch Papierprodukte mit synthetischen Fasern. Es ist zu erwarten, dass die Verwendung solcher Produkte weiter zunehmen wird, so dass diese Hybrid-Materialien auch in größerem Umfang in den Altpapierkreislauf gelangen und die Notwendigkeit für ein wertstoffliches Recycling steigt. Für die Rezyklierbarkeit und das Recycling solcher Materialien gibt es heute keine Standards. Es fehlen Kriterien, Messmethoden und Maßstäbe zur Bewertung. Dabei enthalten solche Hybrid-Materialien oft wertvolle (gebleichte) Langfasern, sind frei von Füllstoffen und damit eine wertvolle Sekundärfaserquelle. Papierhersteller erhalten zunehmend Anfragen von Großkunden nach der Rezyklierbarkeit von z. B. Kaffeebechern. Es ist zu erwarten, dass hier in absehbarer Zeit Zertifikate gewünscht bzw. gefordert werden.

In diesem Projekt wurden Fragestellungen bearbeitet, die das Recycling von papierbasierten Hybrid-Materialien betreffen. Zunächst wurde Hybrid-Materialien als „eine absichtliche Kombination von zwei oder mehr Materialien mit neuen Funktionen“ definiert und die wichtigsten Produktgruppen identifiziert, die im Rahmen des Projekts betrachtet wurden. Dabei handelt es sich um Flüssigkeitskartons, Tiefkühlverpackungen, Food-Service-Board, Vliestapeten und Sackmaterialien. In einer Recherche konnten die jährlich in Deutschland anfallenden Mengen für die genannten Produktgruppen ermittelt bzw. abgeschätzt werden. Insgesamt ergab sich dabei eine Menge von über 800.000 Tonnen pro Jahr.

Hybrid-Materialien bedürfen meist eines gesonderten Aufbereitungsprozesses. Da Hybrid-Materialien aber häufig nicht als Monostrom vorkommen und stattdessen Teil eines anderen Recycling- oder Abfallstroms sind, ist es notwendig, diese in gemischten Stoffströmen zu identifizieren und anschließend zu separieren. In einem Tastversuch konnte gezeigt werden, dass ein Hybrid-Material mit gängiger NIR-Sortiertechnik aus einem gemischten Materialstrom von Papier, Kunststoff und Hybrid-Material aussortiert werden konnte.

In Laboruntersuchungen wurden typische Vertreter aus den fünf ausgewählten Produktgruppen nach zwei etablierten Methoden, der PTS-Methode RH 021/97 und der ZM-Methode RECO 01/2014, zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Papierprodukten getestet. Es stellte sich heraus, dass die Zerfaserbarkeit der Produkte eine Herausforderung im Stoffaufbereitungsprozess darstellt. Häufig verhindern Beschichtungen, z. B. aus Kunststoff oder Aluminium, das Eindringen von Wasser und somit das Aufbrechen der Wasserstoffbrückenbindungen. Die ermittelten Sortierrückstände bei den beiden angewandten Labormethoden unterschieden sich zwar erheblich, jedoch konnte in beiden Fällen für alle Produkte der gleiche Trend festgestellt werden.

Es wurde außerdem deutlich, dass die beiden verwendeten Methoden auf die Verwendung reiner Papierprodukte ausgelegt und für Hybrid-Materialien nicht geeignet sind, weil die Verwertung weiterer Komponenten in den Methoden keine Berücksichtigung finden. In einem Tastversuch konnte ebenfalls gezeigt werden, dass durch Optimierung von Prozessparametern die Faserausbeute im Stoffaufbereitungsprozess deutlich verbessert werden konnte. Dies ist eine Bestätigung dafür, dass Hybrid-Materialien einen gesonderten Aufbereitungsprozess zugeführt werden sollten.

Zum Schluss wurde ein Entwurf für einen Bewertungsmaßstab zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Hybrid-Materialien erarbeitet. Das vorgeschlagene Verfahren orientiert sich an fünf Leitfragen, in denen es um das Vorhandensein von rezyklierbaren Anteilen im Verpackungsprodukt, die Sortierbarkeit und die Trennbarkeit des Produkts in Materialfraktionen, die Verluste im Recyclingprozess und die Qualität des Rezyklats geht. Das Verfahren ist modular aufgebaut und kann dadurch einfach um weitere Faktoren ergänzt werden. Als Ergebnis erhält man einen Wert für die Recyclingfähigkeit zwischen 0 % und 100 %.

Abkürzungsverzeichnis

otro	Ofentrocken
NIR	Nahinfrarot
PE	Polyethylen
PMV	Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik
PTS	Papiertechnische Stiftung
PPK	Papier, Pappe und Karton
ZM	ZELLCHEMING

1 Ausgangssituation

Die Herstellung und Verbreitung von Papierprodukten mit Komponenten, die nicht aus Papier sind, nimmt deutlich zu. Bereits weit verbreitete Beispiele sind Verpackungspapiere mit Barrierebeschichtungen gegen Fett oder Mineralöl, Getränkekartons oder Papiere zur Herstellung von Kaffeebechern, aber auch Papierprodukte mit synthetischen Fasern wie einige Vliestapeten. Es ist zu erwarten, dass die Verwendung solcher Produkte weiter zunehmen wird, so dass diese Hybrid-Materialien auch in größerem Umfang in den Altpapierkreislauf gelangen und die Notwendigkeit für ein wertstoffliches Recycling steigt.

Für die Rezyklierbarkeit und das Recycling solcher Materialien gibt es heute keine Standards. Es fehlen Kriterien, Messmethoden und Maßstäbe zur Bewertung. Aus Mangel an Alternativen wird üblicherweise auf die PTS-Methode RH 021/97 "Kennzeichnung der Rezyklierbarkeit von Packmitteln aus Papier, Karton und Pappe sowie von graphischen Druckerzeugnissen" zurückgegriffen. Im EU-Projekt EcoPaper-Loop wurde außerdem eine Rezyklierbarkeitsprüfmethode für Verpackungsmaterialien entwickelt, die papierfremde Bestandteile, Stippen und Makro-Stickys erfasst. Kriterien für recyclinggerechte Verpackungen existieren hierfür allerdings noch nicht. Diese beiden Methoden zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von Papierprodukten sind für Hybrid-Materialien alleine nicht ausreichend. Hybrid-Materialien enthalten oft wertvolle, gebleichte Langfasern, sind frei von Füllstoffen und damit eine wertvolle Sekundärfaserquelle. Aktuell gehen viele dieser Fasern verloren, weil die entsprechenden Produkte aus Hybrid-Materialien entweder über den Restmüll entsorgt werden oder weil das Material nach dem Durchlaufen des Papierrecycling-kreislaufs im Rejekt der Papiermaschinen landet, da es im Standard-Stoffaufbereitungsprozess nicht verarbeitet werden kann. Mit einer weiteren Zunahme der Produktionsmenge von Hybrid-Materialien entsteht so eine Faserquelle, auf die die Papierindustrie nicht verzichten sollte.

Doch nicht nur die potenzielle Wiederverwertbarkeit der Fasern spielt eine Rolle in diesem Zusammenhang. Papierhersteller erhalten zunehmend Anfragen von Großkunden nach der Rezyklierbarkeit ihrer Produkte, wie z. B. Kaffeebechern. Das öffentliche Interesse an Nachhaltigkeit und einer damit verbundenen veränderten Produktgestaltung steigt, was insbesondere auch die Verpackungen betrifft. Nicht rezyklierbare Produkte werden sich den Kunden schlechter vermarkten lassen und werden somit zum Wettbewerbsnachteil. Es ist außerdem zu erwarten, dass in absehbarer Zeit Zertifikate gewünscht bzw. gefordert werden, die eine Rezyklierbarkeit der verwendeten Verpackungen nachweisen.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

Nachfolgend sind die Hauptziele des Projekts aufgeführt, die in Abstimmung mit den Projektbegleitern im Kick-off Meeting formuliert worden sind:

- Abschätzung der in absehbarer Zeit mengenmäßig relevanten Hybrid-Materialien.
- Aussage zur grundsätzlichen Machbarkeit, ob Hybrid-Materialien mit bestehender Technik aus der Altpapier- bzw. Restoffsartierung (z. B. durch NIR-Sortieraggregate) identifiziert und damit separiert werden können.
- Für typische Produkte aus den identifizierten relevanten Produktgruppen sollen in Tastversuchen die Rezyklierbarkeit nach den gängigen Methoden PTS RH 021/97 und EcoPaperLoop bestimmt werden.
- Ein neuer Vorschlag zur besseren Bewertung der Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien soll ausgearbeitet werden.
- Das Projekt soll als Vorarbeit und Fokussierung der Fragestellung für einen größeren Projektantrag genutzt werden, das sich mit der Entwicklung von Messmethoden, Bewertungsmaßstäben und Ansätzen für ein stoffliches Recycling solcher Produkte beschäftigt.

Lösungsweg:

Da bisher nicht bekannt ist, welche Arten von Hybrid-Materialien in welchen Mengen anfallen, soll eine erste Abschätzung über die jährlich anfallenden Mengen an Hybrid-Materialien durchgeführt werden. Hierfür müssen zunächst die relevanten Produktgruppen identifiziert werden. Für die Abschätzung der Mengen werden Literaturquellen, wie z. B. öffentliche Studien, genutzt und Experten, Verbände und Hersteller der entsprechenden Hybrid-Materialien befragt.

Für Hybrid-Materialien gibt es aktuell nur in wenigen Ausnahmefällen gesonderte Stoffströme. Die meisten dieser Materialien werden über die gängigen Altpapier- bzw. Reststoffströme entsorgt. Um diese Materialien zu recyceln, ist es notwendig, diese aus den genannten Stoffströmen zu separieren und einem individuellen Aufbereitungsprozess zuzuführen. Gängige Sensorprinzipien, die bereits als Stand der Technik in vielen Sortieranlagen Anwendung finden, sind potenziell in der Lage, eine Trennung zwischen Papier-, Kunststoff- und Hybrid-Materialien zu vollziehen. Der praktische Nachweis soll in diesem Projekt an einer Technikumsortieranlage erbracht werden. Beispielhaft wird versucht, Hybrid-Material aus einem Stoffstrom aus Papier und Kunststoff zu separieren.

Die wichtigsten Hybrid-Materialien sollen mit den gängigen Methoden zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von Papierprodukten untersucht und somit eine Aussage über deren Rezyklierbarkeit in den heute üblichen Stoffaufbereitungsprozessen in den Papierfabriken getroffen werden. Mit Stichversuchen soll des Weiteren untersucht werden, ob mit angepassten Stoffaufbereitungsprozessen, z. B. durch Chemikalien-dosierung oder Anpassung von Prozessparametern wie die Verweilzeiten im Pulper

oder den spezifischen Energieeintrag, die Aufbereitung von Hybrid-Materialien verbessert werden kann.

Abschließend soll auf Grundlage der in diesem Projekt gewonnen Erkenntnisse ein Vorschlag zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien ausgearbeitet werden. Eine Recherche soll Aufschluss darüber geben, welche Bewertungskriterien und -maßstäbe bereits existieren. Im Rahmen des Projektes ist eine Skizze auszuarbeiten, da die umfassende Behandlung dieses Themas für ein INFOR-Projekt vermutlich zu umfangreich ist. Mit Hilfe dieser Vorarbeiten kann jedoch eine angemessene Bearbeitung im Rahmen eines gestellten weiteren Projektantrags vorbereitet und erleichtert werden.

3 Material und Methodik

Zur Bearbeitung dieses Projektes werden verschiedene Papier- und Kartonprodukte eingesetzt, die in Kapitel 3.1 aufgeführt und beschrieben sind. Die verwendeten Methoden werden in Kapitel 3.2 näher erläutert.

3.1 Probematerial

In diesem Projekt wird bei der Bearbeitung von zwei unterschiedlichen Teilaufgaben Probenmaterial eingesetzt. Bei den Versuchen zur Abtrennung von Hybrid-Materialien aus einem Papierstoffstrom kommen drei Materialien zum Einsatz: Ein Frischfaserkarton, eine PE-Folie und ein beidseitig mit PE beschichteter Karton. Das Probenmaterial wird in ca. 25 mm x 25 mm große Stücke geschnitten (**Abbildung 1**), da die für die Versuche verwendete Sortieranlage auf Sortierung von Objekten in dieser Größenordnung ausgelegt ist. Ein weiterer Effekt ist, dass die Form der Objekte keinen Einfluss auf die Sortiierungsergebnisse hat.

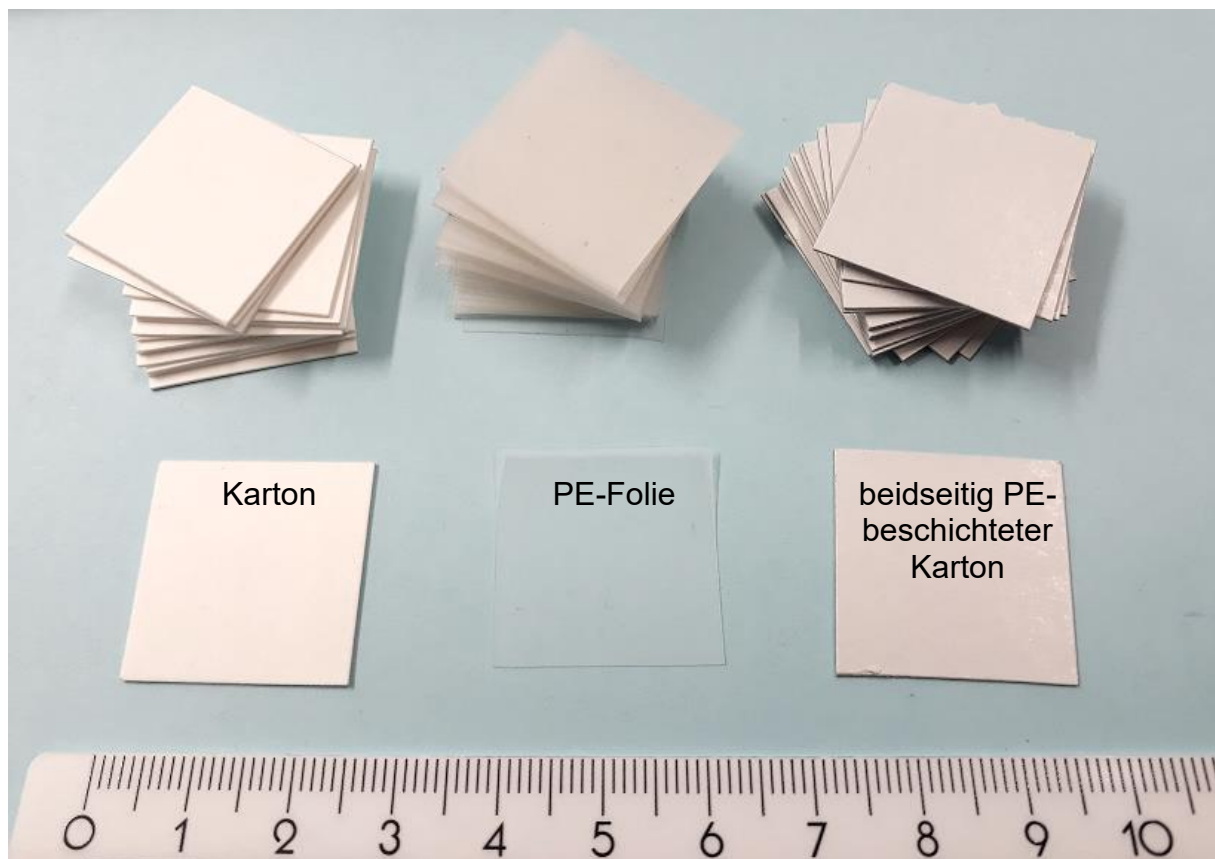


Abbildung 1: Eingesetztes Probenmaterial für die Versuche zur Identifikation und Abtrennung von Hybrid-Materialien in Altpapiertrennprozessen

In einer weiteren Versuchsreihe soll die Rezyklierbarkeit ausgewählter Hybrid-Materialien anhand etablierter Labormethoden bestimmt werden. Die hierfür ausgewählten Produkte sind in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Eingesetzte Papier- und Kartonprodukte

Die zur Verfügung stehenden Produkte unterscheiden sich zum einen im Ausgangsmaterial (Papier, Karton) und zum anderen in dem eingesetzten Beschichtungsmaterial. In **Tabelle 1** sind alle vorhandenen Informationen über die Produkte zusammengefasst.

Tabelle 1: Grundinformationen der verwendeten Papier- und Kartonprodukte

Bezeichnung im Projekt	Beschreibung
Karton 1	Karton (250 g/m ²), auf einer Seite mit LDPE-Beschichtung und auf der anderen Seite bedruckt
Karton 2	Karton (1.200 g/m ²), auf einer Seite mit PE-Beschichtung
Karton 3	Karton (1.150 g/m ²), auf beiden Seiten mit PE-Beschichtung
Getränkekarton	Karton (350 g/m ²) auf einer Seite mit LDPE-Beschichtung und auf der anderen Seite Aluminiumfolie
Kaffeebecher	Auf der Innenseite mit LDPE-Beschichtung und auf der Außenseite bedruckt
Sackmaterial 1	Geklebte Kreuzbodensäcke mit PE-Beschichtung
Sackmaterial 2	Geklebte Ventilsäcke mit PE-Beschichtung
Tapete 1	Vliestapete mit beigemischten Kunststofffasern
Tapete 2	Vliestapete mit aufgeschäumten Kunststoff

3.2 Bekannte Methoden zur Messung der Rezyklierbarkeit

3.2.1 PTS-Methode RH 021/97

Eine etablierte Methode zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von Papierprodukten ist die PTS-Methode RH 021/97. Diese wird in zwei Kategorien eingeteilt und wird zum einen für grafische Druckerzeugnisse (Kategorie 1) und zum anderen für Packmittel aus Papier, Karton und Pappe (Kategorie 2) angewendet. In diesem Projekt erfolgt die Untersuchung nach Kategorie 2, wie in **Abbildung 3** dargestellt. Kennzeichnend für diese Methode ist eine 20-minütige Zerfaserung in einem Standard-Desintegrator bei 40 °C unter Einsatz von 50 g otro Faserstoff bei einer Stoffdichte von 2,5 %. Das Probematerial wird zuvor in 2 x 2 cm große Stücke geschnitten. Durch eine Sortierung im Brecht-Holl-Sortierer mit einer 0,7 mm Lochplatte, wird der Stippengehalt der auf 0,5% Stoffdichte verdünnten Suspension bestimmt.

Mittels der PTS-Methode RH 021/97 werden die folgenden Parameter getestet und bewertet:

- Qualität der Zerfaserung,
- Rückstand (Anteil papierfremder Bestandteile) in %,
- Blattklebetest des sortierten Stoffs,
- Blattklebetest des unsortierten Stoffs.

Bei der Rezyklierbarkeitsbewertung nach der PTS-Methode RH 021/97 wird lediglich eine relativ geringe Menge an Faserstoff analysiert. Die Bewertung der Klebrigkeit erfolgt visuell und es erfolgt keine Bewertung des Filtrats.

Abhängig von den Untersuchungsergebnissen ergeben sich nachfolgende Bewertungsmöglichkeiten eines untersuchten Produktes:

- „wegen klebender Verunreinigungen nicht rezyklierbar“, falls:
 - der Blattklebetest des sortierten Stoffes positiv ausfällt (Blatt weist klebende Stellen auf).
- „im Papierrecycling nicht sinnvoll verwertbar“, falls:
 - der Anteil papierfremder Bestandteile über 50 % liegt.
- „rezyklierbar aber hinsichtlich der Produktgestaltung verbesserungsbedürftig“, falls
 - der Anteil papierfremder Bestandteile zwischen 20 % und 50 % liegt.
- „bedingt rezyklierbar wegen optischer Inhomogenitäten im aufbereiteten Stoff“, falls
 - das optische Erscheinungsbild als visuell störend empfunden wird.
- „rezyklierbar“, falls
 - der Blattklebetest des sortierten Stoffes negativ ausfällt (Blatt weist keine klebenden Stellen auf),
 - der Anteil papierfremder Bestandteile unter 20 % liegt und
 - das optische Erscheinungsbild als visuell störend empfunden wird.

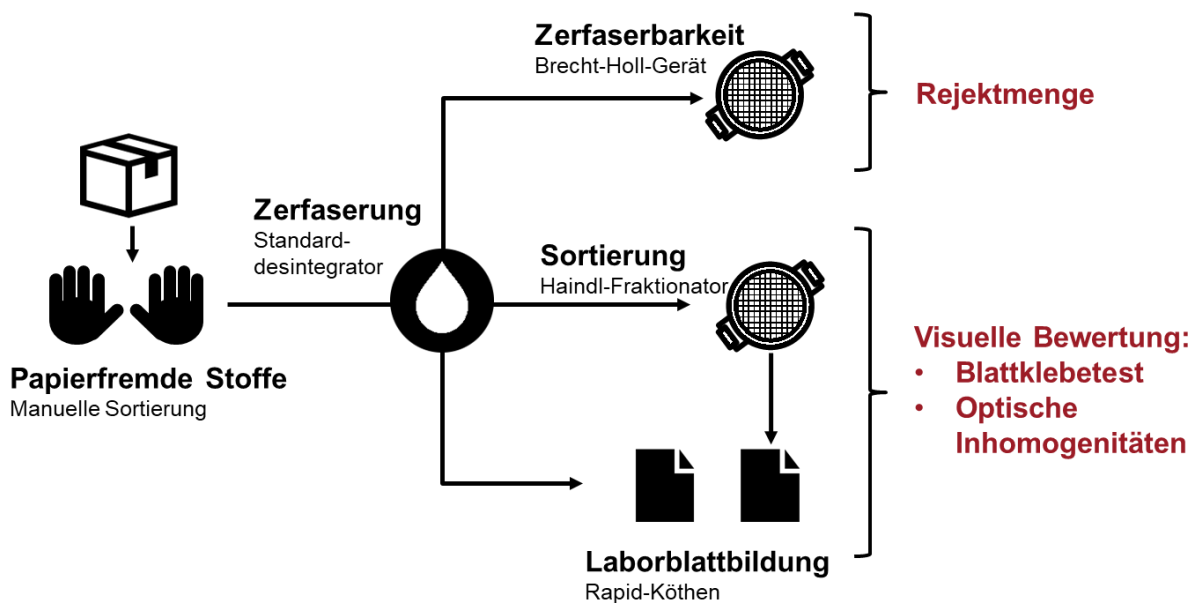


Abbildung 3: Rezyklierbarkeitsmethode gemäß PTS-Methode RH 021/97

3.2.2 ZM-Methode RECO 01/2014 / EcoPaperLoop-Methode 1

Der Prozessablauf der in dem EU-Projekt EcoPaperLoop entwickelten Rezyklierbarkeits-Prüfmethode für Verpackungsmaterialien ist in **Abbildung 4** dargestellt. In Anlehnung an die industrielle Praxis wird bei einer höheren Stoffdichte von 4 % zerkleinert und eine größere Probenmenge von 480 g o.t.o. eingesetzt. Das Probematerial wird vorbereitend in handtellergröße Stücke geschnitten. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zur PTS-Methode dar, bei der lediglich 50 g Probematerial in der Größe 2 cm x 2 cm Faserstoff benutzt wird.

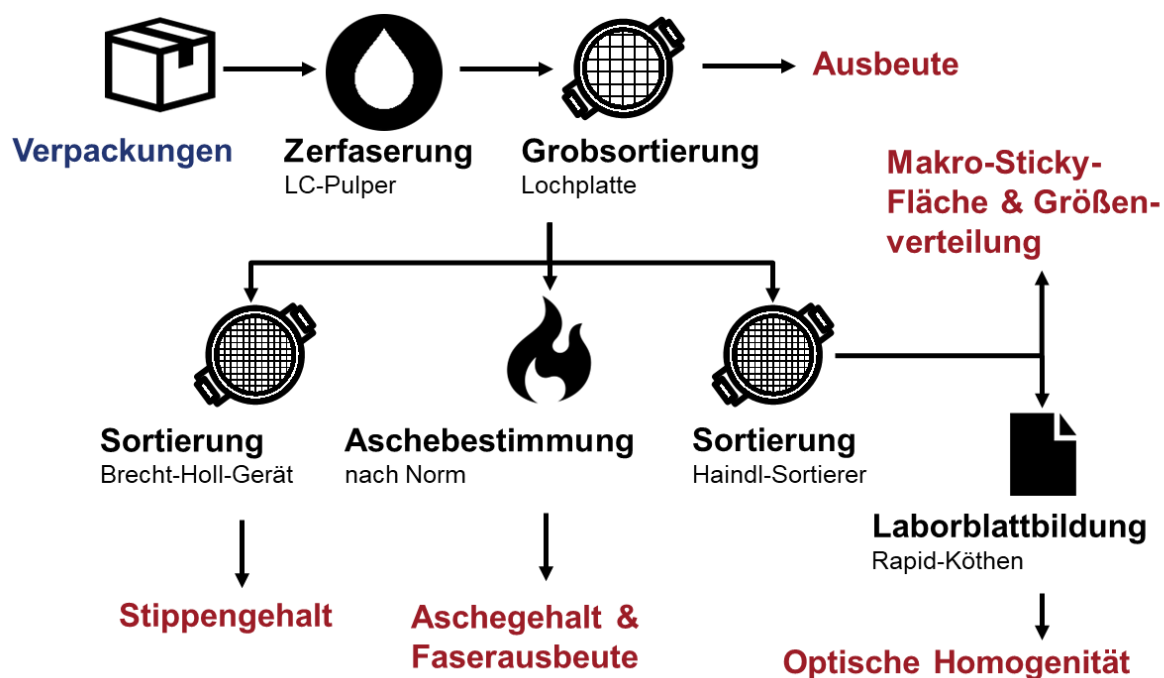


Abbildung 4: Prüfung des Rezyklierungsverhaltens von Verpackungen gemäß EcoPaperLoop (5th Draft)

Bei dieser Methode werden 480 g o.t.o. einer zu untersuchenden Verpackung bei 40 °C niederkonsistent zerkleinert und die dabei entstehende Suspension über ein Lochblech mit Lochdurchmessern von 10 mm sortiert. Durch eine Sortierung im Brecht-Holl-Sortierer mit einer 0,7 mm Lochplatte wird der Stippengehalt Suspension bestimmt.

Bei der ZM-Methode RECO 01/2014 werden die folgenden Parameter getestet und bewertet:

- Grobrejekt in %,
- Stippengehalt in %,
- Makro-Stickyfläche < 2.000 µm äquivalentem Kreisdurchmesser in mm²/kg,
- Optische Inhomogenität.

Bei der Rezyklierbarkeitsbewertung nach der EcoPaperLoop-Methode wird der Aufbereitungsprozess in der Stoffaufbereitung einer Papierfabrik industrienah simuliert, jedoch erfolgt keine Bewertung der Klebrigkeit des Faserstoffs und der Filtratqualität.

Es existiert ein nicht offizielles Bewertungsschema, das in Analogie zum Deinkability Score des EPRC aufgebaut ist. Insgesamt werden maximal 100 Punkte vergeben. Davon entfallen jeweils maximal 35 Punkte auf den Anteil des Grobrejekts, 15 Punkte auf den Stippengehalt, 40 Punkte auf die Makro-Stickyfläche und 10 Punkte auf die Bewertung der optischen Homogenität der Laborblätter. Für eine gute Rezyklierbarkeit sind jeweils möglichst niedrige Werte für den Grobrejektanteil, den Stippengehalt und die Makro-Stickyfläche erforderlich. Für jeden dieser Parameter sind zwei Grenzwert festgelegt. Liegt der gemessene Wert oberhalb des oberen Grenzwerts, führt dies zu einer negativen Punktzahl, für gemessene Werte unterhalb des unteren Grenzwerts zu einer positiven Punktzahl. Liegt der gemessene Wert zwischen den beiden Grenzwerten, erhält das Produkt in dieser Untersuchung null Punkte.

Abhängig von der Summe der erreichten Punkte in den vier Kategorien ergibt sich für das getestete Produkt eine der folgenden Bewertungen:

- 71 – 100 Punkte: gute Rezyklierbarkeit
- 51 – 70 Punkte: angemessene Rezyklierbarkeit
- 0 – 50 Punkte: tolerierbare Rezyklierbarkeit
- < 0 Punkte: Produkt ungeeignet für die Papierindustrie.

4 Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren teilweise auf Ergebnissen von einer studentischen Arbeit [1], die am PMV innerhalb dieses Projektes durchgeführt wurde, und einer Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut IWKS in Alzenau.

4.1 Definition von Hybrid-Materialien

Papier und Karton werden aus den verschiedensten Gründen mit anderen Materialien kombiniert, die nicht aus Fasern bestehen. Oft handelt es sich bei den anderen Materialien um Kunststoffe, Metalle oder Wachse. Häufig fallen im Zusammenhang mit der Kombination verschiedener Materialien die Begriffe „Verbundwerkstoff“ und „Hybrid-Material“. In der Literatur findet man viele verschiedene Definitionen für beide Begriffe [2, 3, 4]. Im Rahmen des Kick-Off Meetings dieses Projekts wurde in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss die folgende Definition von Hybrid-Materialien für die Bearbeitung dieses Projekts festgelegt:

„Hybrid-Materialien sind eine absichtliche Kombination von zwei oder mehr Materialien, die einander ergänzen, um neue Funktionen zu realisieren, die die Komponenten alleine nicht besitzen.“

Bei genauer Betrachtung dieser Definition fällt auf, dass auch die Verwendung von Additiven im oder auf dem Papier, wie beispielsweise Mineralien, nach dieser Definition in die Kategorie der Hybrid-Materialien einzustufen wäre. Da es in diesem Projekt aber um Papierprodukte gehen soll, deren Aufbereitung im Recyclingkreislauf zu Problemen führen kann, wurden diese „trivialen“ Fälle explizit ausgeschlossen und werden dementsprechend nicht in die Überlegungen mit einbezogen.

4.2 Mengenabschätzung relevanter Hybrid-Materialien

Papierbasierte Hybrid-Materialien werden in den unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt. Die Menge des eingesetzten Materials wird aber aktuell in keiner Statistik direkt erfasst. Um das Potenzial dieser Produktgruppe für das Recycling abzuschätzen, erfolgte im Rahmen des Projektes eine Recherche über Verbrauchsmengen für relevante Produktgruppen an Hybrid-Materialien in Deutschland. Die relevanten Produktgruppen wurden im Kick-Off-Meeting mit dem projektbegleitenden Ausschuss besprochen und festgelegt:

- Flüssigkeitskartons
- Tiefkühlverpackungen
- Food-Service-Board-Produkte
- Vliestapeten
- Sackmaterialien.

Es wird davon ausgegangen, dass diese fünf Produktgruppen bereits einen großen Anteil der auf dem Markt verfügbaren papierbasierten Hybrid-Materialien ausmachen. Darüber hinaus werden diese Materialgruppen als kritisch für den Stoffaufbereitungsprozess angesehen, wenn sie in zu großen Mengen im Altpapier vorkommen, oder

werden aktuell noch gar nicht über den Altpapierkreislauf rezykliert. Sie stellen somit ein bisher ungenutztes Faserpotenzial dar. Nachfolgend werden die fünf oben genannten Gruppen eingegrenzt und die verfügbaren Zahlen für deren Marktvolumen dargestellt.

Ein Flüssigkeitskarton (oft auch als Getränkekarton bezeichnet) ist eine Verpackung für Getränke und flüssige Nahrungsmittel, die aus einem Karton besteht, der mit Kunststoff laminiert ist. Als Kunststoff wird in vielen Fällen Polyethylen (PE) verwendet, der die Verpackung abdichtet. Je nach Anwendung kommt auch noch eine Schicht aus Aluminium zum Einsatz, die verhindern soll, dass das Produkt durch die Einwirkung von Sauerstoff verändert wird.

Tabelle 2 zeigt die aktuellsten Zahlen des Umweltbundesamts aus einer jährlich veröffentlichten Studie zu den in Deutschland angefallenen Verpackungsabfällen in der Kategorie Flüssigkeitskartons [5]. Zudem sind Zahlen aus den vorangegangenen Jahren aufgeführt. Es wird ersichtlich, dass sich die Menge im Zeitraum von 2011 bis 2016 nur wenig verändert hat. 2016 lag die Menge der angefallenen Flüssigkeitskartonabfälle bei etwa 181.000 Tonnen.

Tabelle 2: Entwicklung der angefallenen Verpackungsabfälle in der Kategorie Flüssigkeitskartons in Deutschland nach [5]

Jahr	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Flüssigkeitskartons [kt]	191,9	185,3	177,1	178,9	174,4	180,7

Tiefkühlverpackungen können in eine beschichtete und eine unbeschichtete Variante unterschieden werden. Bei den unbeschichteten Tiefkühlverpackungen ist das Gefriergut zusätzlich verpackt, z. B. in Form einer zusätzlichen Kunststoffolie, wie beispielsweise viele Fertigpizzen. Während die unbeschichteten Tiefkühlverpackungen normal über das Altpapier entsorgt werden können, stellen die beschichteten Tiefkühlverpackungen aufgrund von Lebensmittelresten an der Verpackung und der zusätzlichen Barrierebeschichtung aus Kunststoff eine Belastung des Altpapierkreislaufs dar und werden oft anderweitig entsorgt.

Für die Tiefkühlverpackungen konnten keine expliziten Mengenangaben ermittelt werden. Aus diesem Grund war lediglich eine Abschätzung der jährlich anfallenden Menge möglich. Nach Angaben des Deutschen Tiefkühlinstituts werden in Deutschland im Jahr etwa 3,6 Millionen Tonnen Tiefkühlprodukte verkauft [6]. Geht man davon aus, dass etwa die Hälfte davon in Kunststoff und die andere Hälfte in Karton verpackt ist, bleiben 1,8 Millionen Tonnen Tiefkühlprodukte, die mit Karton verpackt sind. Typische Verhältnisse von Verpackungsgewicht zum Gewicht des Inhalts werden mit 1:5 bis 1:10 abgeschätzt, was im Mittel einer Tiefkühl-Verpackungsmenge auf Kartonbasis von etwa 250.000 Tonnen entspricht.

Unter den Begriff Food-Service-Board sollen in dieser Recherche alle Produkte verstanden werden, die zur kurzfristigen Verpackung, zum Transport oder sofortigen Verzehr von Getränken und Speisen verwendet werden. Typischerweise finden solche Produkte in Fast-Food-Restaurants Anwendung. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist

der private Picknick- und Partybedarf. Die meisten Produkte besitzen eine Kunststoffbeschichtung, um sie gegen das Durchdringen von Fett und Flüssigkeiten abzdichten.

Eine Studie des Naturschutzbunds Deutschland [7] liefert Informationen zum Abfallaufkommen für Einweggeschirr und To-Go-Verpackungen. In diese Kategorien fallen alle oben genannten Produkte. Aus dieser Studie geht hervor, dass die angefallene Abfallmenge für Einweggeschirr und To-Go-Verpackungen in Deutschland im Zeitraum vom 1994 bis 2017 um 44 % auf knapp 350.000 Tonnen gestiegen ist. Papier, Pappe und Karton (PPK) haben mit über 220.000 Tonnen einen Anteil von über 64 %. Der größte Anteil geht mit 190.000 Tonnen auf Einweggeschirr und Verpackungen für den To-Go und Softverzehr zurück. Picknick und Partybedarf spielen mit etwas mehr als 30.000 Tonnen jährlich eine kleinere Rolle.

Abbildung 5 zeigt eine detaillierte Übersicht zu den Abfällen durch Einweggeschirr und To-Go-Verpackungen in Deutschland im Jahr 2017. Der Größte Anteil geht mit 93.000 Tonnen im Jahr auf Menü- und Snackboxen (z. B. Lunchboxen, Nudelboxen, Pizzaschachteln) zurück. In der Öffentlichkeit ist aber auch insbesondere der „Coffee-To-Go“-Becher in die Kritik geraten. Der NABU stellt in der Studie jedoch auch besonders heraus, dass in Deutschland sogar etwas mehr Einwegbecher für Kaltgetränke (3 Milliarden Becher jährlich) als für Heißgetränke (2,9 Milliarden Becher jährlich) verbraucht werden, von denen etwa zwei Drittel aus Papier hergestellt werden.

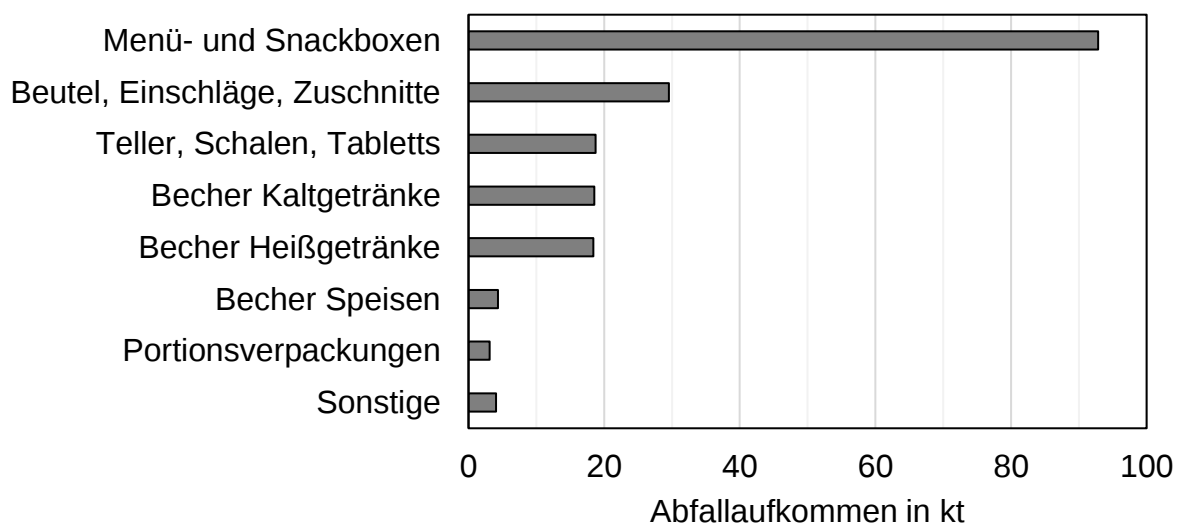


Abbildung 5: Abfallaufkommen durch Einweggeschirr und To-Go-Verpackungen aus Papier, Pappe und Karton in Deutschland 2017 nach [7]

Die Vliestapete ist ein Wandbelag mit einem Trägermaterial aus Zellstoff. Sie gilt als besonders strapazierfähig, leicht zu verarbeiten und schwer entflammbar. Der wesentliche Unterschied von Vliestapeten im Vergleich zu herkömmlichen Tapen liegt im Trägermaterial. Dieses besteht hier meist aus einer dampfdiffusionsoffenen Kombination von Zellulose und Textilfasern, die für einen strapazierfähigen Wandbelag sorgen. Die strukturierten Oberflächen kommen je nach Hersteller unterschiedlich zustande, durch Prägung des Basismaterials oder auch durch aufgeschäumte Kunststoffe (PVC).

Aus einer Pressemitteilung des Deutschen Tapeten-Instituts geht hervor, dass 2017 65 Millionen Rollen Tapeten in Deutschland produziert wurden [8]. Der Marktanteil von Vliestapeten ist mit etwa 80 % sehr hoch [9], was 52 Millionen Rollen entspricht. Unter der Annahme von etwa 1 kg pro Tapetenrolle lässt sich die Produktionsmenge von Vliestapeten in Deutschland pro Jahr auf etwa 52.000 Tonnen abschätzen.

Für die Herstellung von Sackmaterialien wird in der Regel Kraftpapier verwendet. Aufgrund der besonders langen Fasern ist der Sack deshalb sehr reißfest. Für einige Anwendungen sind besondere Eigenschaften des Sacks gewünscht. Abhängig von der Art des Füllguts, kann das Sackpapier mit anderen Materialien, wie beispielsweise Kunststoff- oder Aluminiumschichten kombiniert werden. Märkte für die Verwendung von Papiersäcken sind in erster Linie Baustoffe und Mineralien, Lebensmittel, Futtermittel sowie Chemie und Pharmazie.

Für das Sackmaterial konnte keine öffentliche Statistik gefunden werden. Nach Informationen von der Gemeinschaft Papiersackindustrie e.V., die schriftlich angefragt wurden, wurden 2017 in Deutschland knapp über 800 Millionen Papiersäcke und damit eine Menge von etwa 114.000 Tonnen produziert.

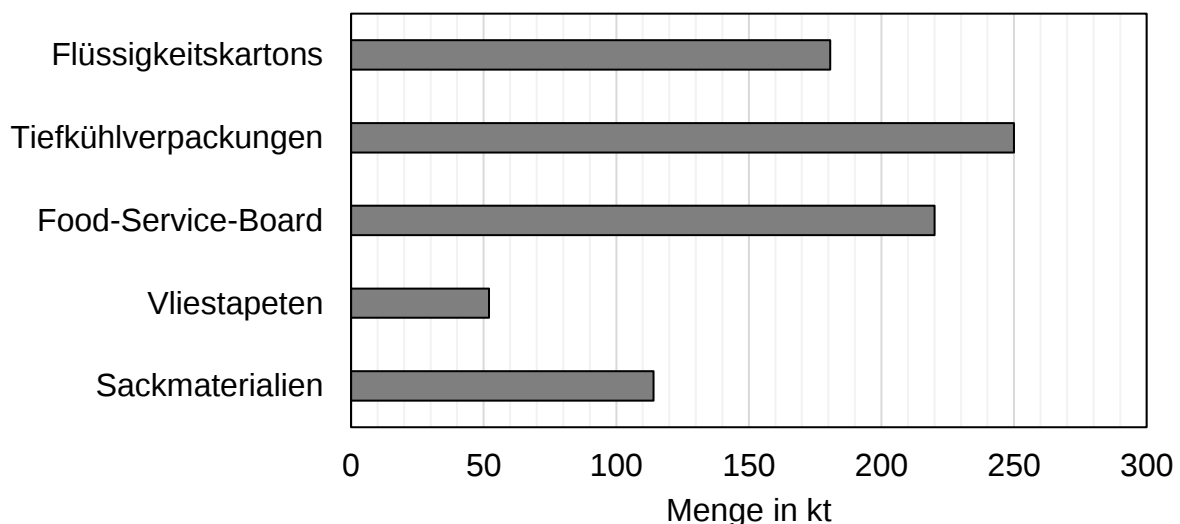


Abbildung 6: Abgeschätzter jährlicher Verbrauch der fünf untersuchten Produktgruppen in Deutschland (in Summe 2016/17 ca. 817 kt)

Abbildung 6 fasst die Ergebnisse der Recherche zusammen. Die Gesamtmenge der fünf untersuchten Produktgruppen umfasst somit in Deutschland pro Jahr über 800.000 Tonnen Hybrid-Materialien. In Deutschland wurde im Jahr 2017 von privaten und kommunalen Entsorgern 15,3 Millionen Tonnen Altpapier gesammelt [10]. Bezogen auf diese Menge ergibt sich ein Anteil von 5,4 %. Hybrid-Materialien stellen somit ein zu beachtendes Faserpotenzial für die Papierindustrie dar.

4.3 Identifikation und Abtrennung von Hybrid-Materialien in Altpapiertrennprozessen

Hybrid-Materialien kommen häufig nicht als Monostrom vor. Stattdessen sind sie Teil eines anderen Recycling- oder Abfallstroms. Um Hybrid-Materialien gesondert aufzubereiten ist es daher notwendig, diese in gemischten Stoffströmen zu identifizieren und anschließend zu separieren. Für die gezielte Ausschleusung einer Stoffgruppe eignen sich insbesondere sensorgestützte Sortieraggregate. **Abbildung 7** zeigt den Aufbau einer solchen Sortiereinheit. Die Objekte werden von einem Förderband transportiert und an einer definierten Stelle von Sensoren analysiert. Häufig kommen hier NIR-Zeilenkameras zum Einsatz, die für jeden Pixel spektroskopische Informationen aus dem Wellenlängenbereich knapp oberhalb des sichtbaren Bereichs aufnehmen. Auf Grundlage dieser spektroskopischen Daten können Algorithmen entscheiden, ob ein Objekt in den Akzept- oder Rejektstrom gelangen soll. Zur Umsetzung befinden sich Druckluftdüsen an geeigneter Stelle, um durch Beeinflussung der Flugbahn am Ende des Förderbands die Objekte dem richtigen Stoffstrom zuzuführen.

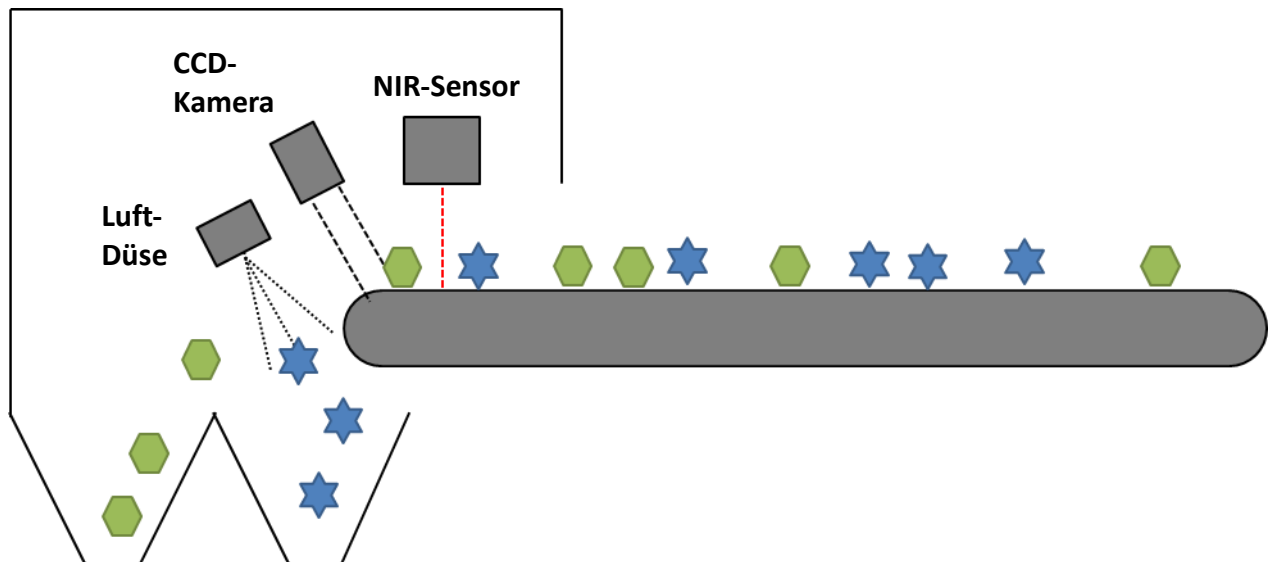


Abbildung 7: Prinzip eines sensorgestützten Sortieraggregats

Umfangreiche Versuchsreihen hätten den Rahmen dieses Projekts gesprengt. Ziel der durchgeführten Versuche war es daher, durch einen Tastversuch an einer Technikanlage eine möglichst fundierte Aussage darüber zu erhalten, ob es grundsätzlich möglich ist, Hybrid-Materialien aus dem Altpapierstrom zu identifizieren und zu separieren.

Die Versuche wurden in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut IWKS in Alzenau durchgeführt. Als Untersuchungsmaterial standen drei verschiedene Objektklassen zur Verfügung: Ein Frischfaserkarton, ein Frischfaserkarton mit beidseitiger Polyethylenbeschichtung und eine dünne Folie aus Polyethylen. Von jeder Klasse wurde eine größere Anzahl von etwa 25 mm x 25 mm großen Quadraten zugeschnitten. Der reine Frischfaserkarton steht stellvertretend für die Papierfraktion im Altpapierstrom und die Folie aus Polyethylen für die Verunreinigungen aus Kunststoff. Der beidseitig mit

Kunststoff beschichtete Karton ist ein typischer Vertreter für ein papierbasiertes Hybrid-Material, da viele solcher Hybrid-Materialien aus einer dickeren Papierschicht und einer dünneren Kunststoffschicht aufgebaut sind (z. B. Getränkekartons, Kaffeebecher, Pappteller, beschichtete Tiefkühlverpackungen, usw.). Lässt sich der beschichtete Karton von dem reinen Karton. bzw. Kunststoffstrom trennen, zeigt dies, dass man grundsätzlich Hybrid-Materialien aus dem Altpapierstrom abtrennen kann. Für eine tiefere Aussage müssen dann noch weitere Versuche folgen.

Bevor die Trennversuche auf der Technikumssortieranlage durchgeführt werden konnten, wurden die drei Objektklassen im Labor unter einem NIR-Spektrometer analysiert. **Abbildung 8** zeigt die dabei aufgenommen Spektren im Wellenlängenbereich von 1300 nm bis 1900 nm. Polyethylen zeigt insbesondere im Bereich zwischen 1700 nm und 1900 nm sehr charakteristische Banden. Das Spektrum des Kartons lässt sich fast über den gesamten aufgenommenen Spektralbereich deutlich von dem Spektrum des Kunststoffs unterscheiden. Besonders interessant ist allerdings das Spektrum des Hybrid-Materials. Es folgt im Wesentlichen dem Verlauf des Kartons. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass die beiden äußeren Lagen des Materials aus Polyethylen bestehen. Daher kann man sehen, dass die Strahlung durch die Beschichtung in das darunterliegende Material eindringt und Informationen über die mittlere Schicht des Materials liefert. Gleichzeitig sind jedoch auch die charakteristischen Banden des Kunststoffs zwischen 1700 nm und 1800 nm im Spektrum des Hybrid-Materials vorhanden. Durch die Analyse mehrerer spektraler Merkmale, lässt sich somit das Hybrid-Material eindeutig von dem Karton und der Kunststoffolie unterscheiden.

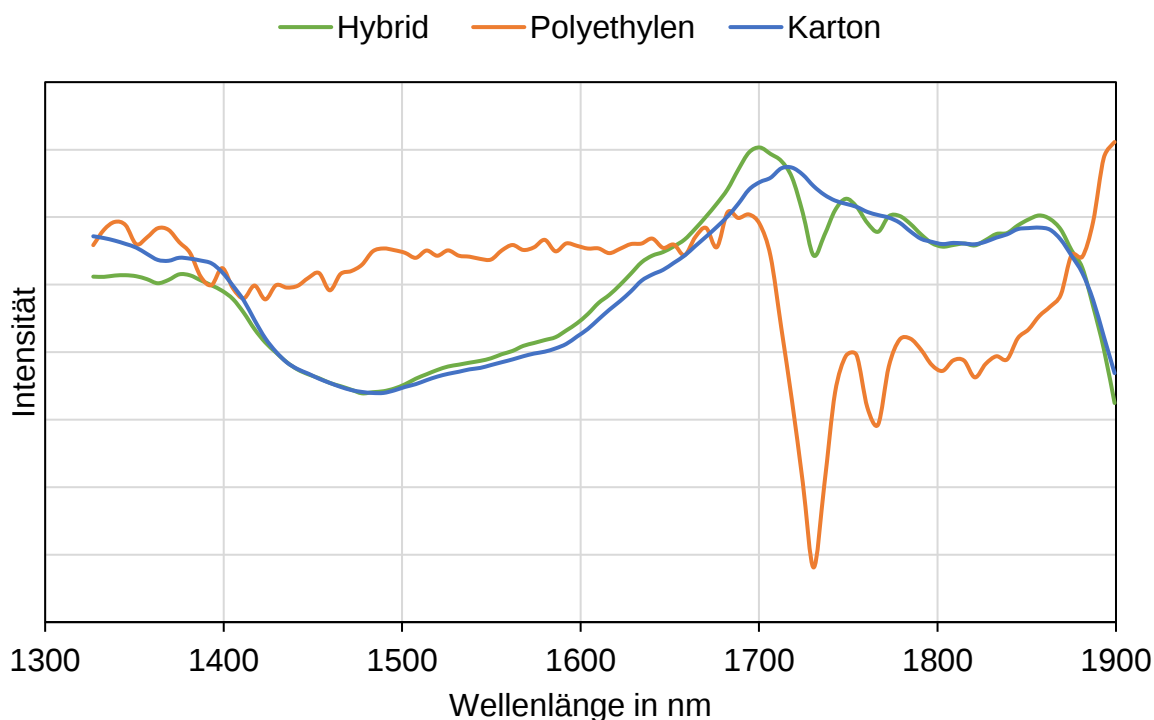


Abbildung 8: Nahinfrarot-Spektren der drei untersuchten Proben

Die tatsächlich durchgeführten Untersuchungen auf der Sortieranlage bestätigten diese Aussage. Das Hybrid-Material konnte fast vollständig ohne Fehler aus dem Materialstrom aussortiert werden. Der Bericht des Fraunhofer-Instituts ist im Anhang zu finden. Es ist daher davon auszugehen, dass es potenziell möglich ist, Hybrid-Materialien aus einem Altpapierstrom zu isolieren.

Weitere Untersuchungen sind jedoch notwendig. Beispielsweise sollte untersucht werden, wie sich der Einfluss von Schichtdicken oder Druckfarben auf die Sortierbarkeit auswirkt. Des Weiteren wäre interessant zu ermitteln, ob dies auch mit anderen Beschichtungsmaterialien wie z. B. Aluminium in gleicher Weise möglich ist.

4.4 Rezyklierbarkeitsbewertungen ausgewählter Hybrid-Materialien anhand etablierter Labormethoden

4.4.1 PTS-Methode RH 021/97

Zur Bewertung der Rezyklierbarkeit des Probenmaterials, wurden die Produkte sowohl nach der PTS-Methode RH 021/97 (siehe Kapitel 3.2.1) als auch nach der ZM-Methode RECO 01/2014 (siehe 3.2.2) getestet und bewertet.

Bei der PTS-Methode RH 021/97 erfolgt die Bewertung der Rezyklierbarkeit in die drei Kategorien „rezyklierbar“, „bedingt rezyklierbar“ und „nicht rezyklierbar“, wobei eine bedingte Rezyklierbarkeit auf ein eindeutiges Verbesserungspotenzial wie z. B. die Produktgestaltung oder optische Homogenität hinweist. Grundlage dieser Bewertung sind im Labor bestimmte Daten zur Qualität der Zerfaserung, dem Rückstand und dem Ergebnis von Blattklebetests am sortierten Stoff. Die Ergebnisse der Rezyklierbarkeit für die in diesem Projekt verwendeten Papiere und Kartons sind in **Tabelle 3** entsprechend der Rezyklierbarkeitsergebnisse zusammengefasst. Die abschließende Bewertung ist farblich hervorgehoben (grün für rezyklierbar, gelb für bedingt rezyklierbar und rot für nicht rezyklierbar). In Hinblick auf die Zerfaserbarkeit wird ein sehr heterogenes Bild deutlich. Einige Produkte ließen sich gut, andere hingegen nur schlecht zerfasern. Dies wird deutlich beim Betrachten des Brecht-Holl Sortierrückstandes auf der 0,7 mm Lochplatte nach der Zerfaserung (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Tapete 1 konnte überhaupt nicht zerfasert werden und lag nach der vorgeschriebenen Zeit im Desintegrator immer noch im Ausgangszustand vor. Es war lediglich eine Schaumbildung zu beobachten (**Abbildung 10**). Auch der Rückstand von Getränkekartons, Kaffeebechern und Tapete 2 war auffällig hoch.

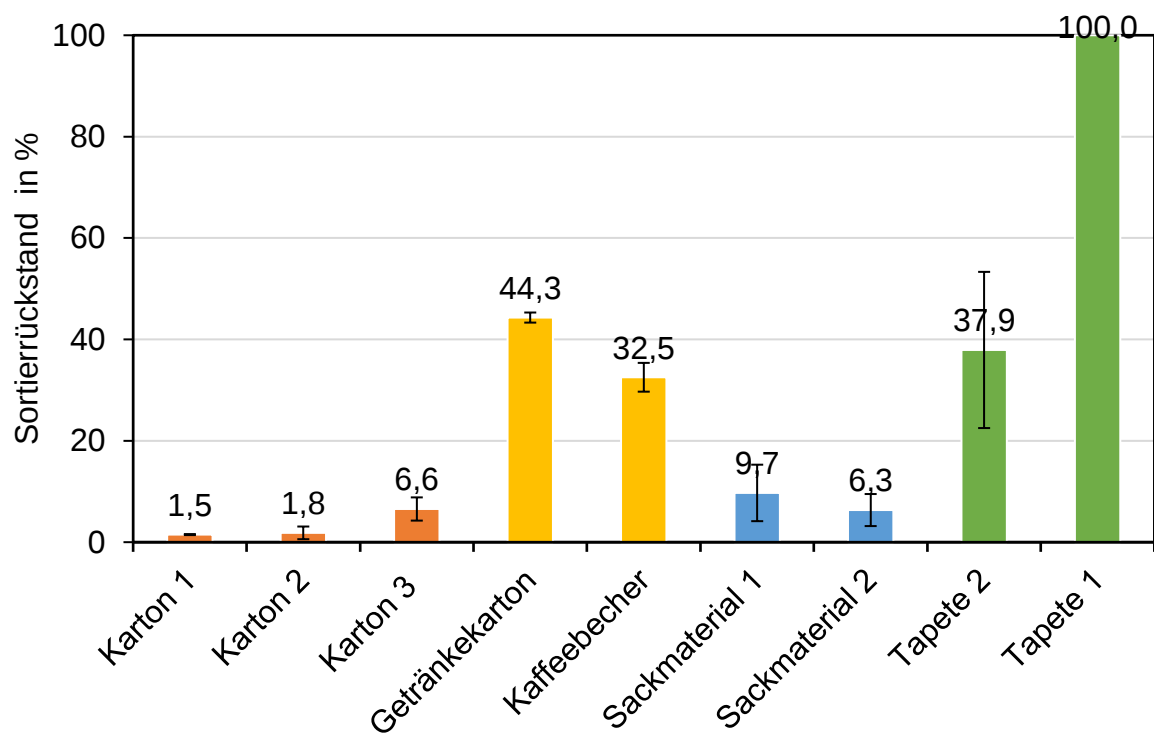


Abbildung 9: Stippengehalt nach der PTS-Methode RH 021/97

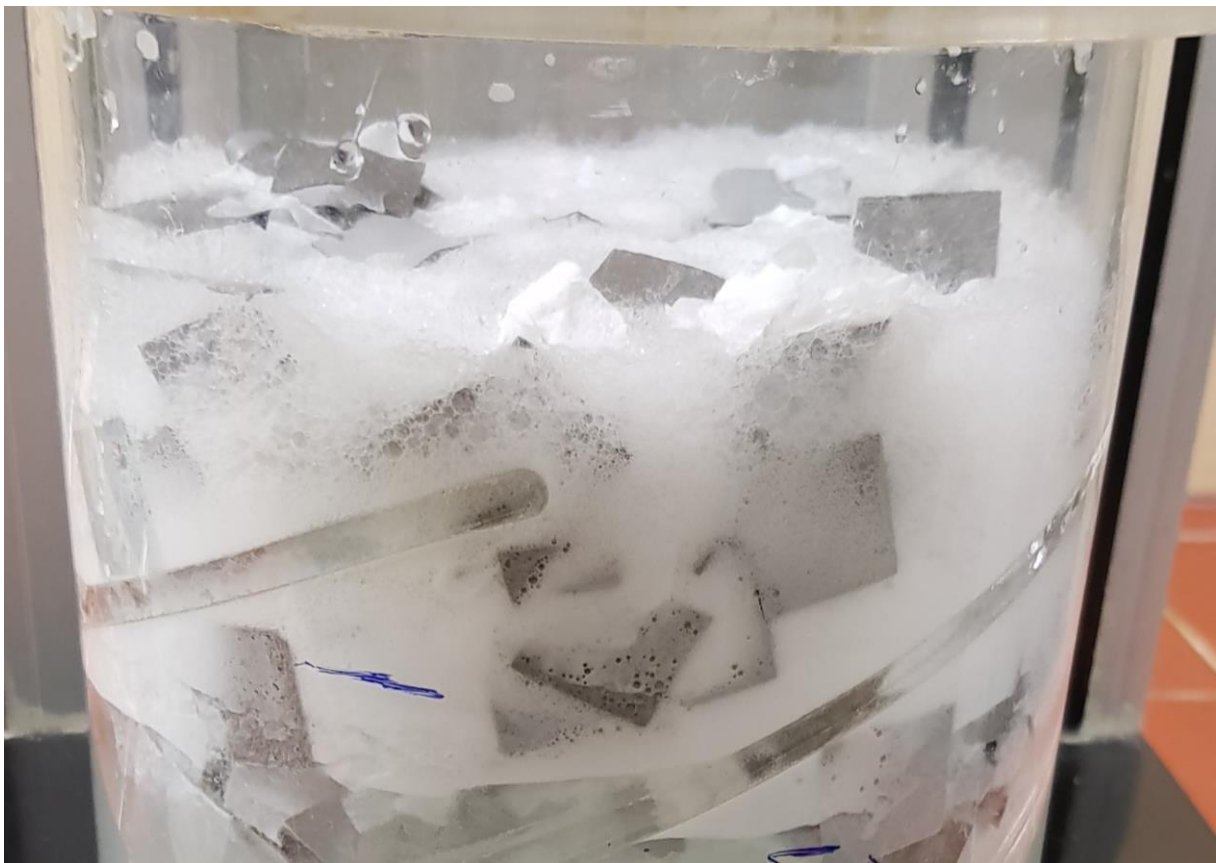


Abbildung 10: Tapete 1 im Desintegrator nach dem Versuch der Zerkleinerung

Tabelle 3: Bewertung der Rezyklierbarkeit der getesteten Produkte nach der PTS-Methode RH 021/97

Bezeichnung	Rückstand in %	Blattklebetest unsortierter Stoff	Blattklebetest sortierter Stoff	Bewertung
Karton 1	1,5	Positiv	Negativ	Rezyklierbar
Karton 2	1,8	Positiv	Negativ	Rezyklierbar
Karton 3	6,6	Positiv	Negativ	Rezyklierbar
Getränkekarton	44,3	Positiv	Negativ	Bedingt Rezyklierbar
Kaffeebecher	32,5	Positiv	Negativ	Bedingt Rezyklierbar
Sackmaterial 1	9,7	Positiv	Negativ	Rezyklierbar
Sackmaterial 2	6,3	Positiv	Negativ	Rezyklierbar
Tapete 2	37,9	Positiv	Negativ	Bedingt Rezyklierbar
Tapete 1	100,0	Positiv	Negativ	Nicht Rezyklierbar

Für den Blattklebetest werden Laborblätter gebildet. Nach einer Lagerung im Exsikkator der Gautschkarton und das Deckblatt abgezogen. Bewertet wird, ob Beschädigungen an den Oberflächen von Laborblatt, Gautschkarton oder Deckblatt auftreten. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Blattklebetests lässt sich ein eindeutiges Muster erkennen. Während der Blattklebetest am unsortierten Stoff immer positiv ausfiel, wurde beim Blattklebetest am sortierten Stoff immer ein negatives Ergebnis erzielt. Daraus kann geschlossen werden, dass die klebenden Substanzen über die durchgeführte Sortierung ausreichend abgetrennt werden konnten. **Abbildung 11** zeigt zwei Beispiele eines positiven Blattklebetests am unsortierten Stoff.

In der Gesamtbewertung nach dem Bewertungsschema der PTS-Methode RH 021/97 erhielten 5 der 9 untersuchten Produkte die Bewertung „rezyklierbar“. Bei diesen Produkten handelte es sich um die Kartons 1 bis 3 sowie die Sackmaterialien 1 und 2. Weitere 3 Produkte wurden als „bedingt rezyklierbar“ eingestuft. Neben dem Getränkekarton und dem Kaffeebecher betraf dies auch die Tapete 2. Grund für die Herabstufung der Rezyklierbarkeit ist in diesen Fällen der hohe Rückstand nach der Zerkleinerung. Liegt dieser zwischen 20 % und 50 % sieht die Methodenbeschreibung das Urteil „rezyklierbar, aber hinsichtlich der Produktgestaltung verbesserungsbedürftig“ vor. Da sich Tapete 1 überhaupt nicht zerkleinern ließ und somit der Rückstand nach der Zerkleinerung als 100 % gewertet wird, erhielt dieses Produkt die Gesamtbewertung „nicht rezyklierbar“.

Anhand der dargestellten Ergebnisse lassen sich bereits einige allgemeine Aussagen zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien ableiten. Grundsätzlich fällt auf, dass insbesondere die Zerkleinerbarkeit der Produkte eine große Hürde zur Bewertung als rezyklierbares Produkt darstellt. Die Klebrigkeit der Produkte scheint, zumindest bei den ausgewählten Materialien, keine Probleme zu verursachen. Des Weiteren wird ein grundsätzliches Problem bei der Anwendung der PTS-Methode RH 021/97 für die Bewertung von Hybrid-Materialien deutlich. Hybrid-Materialien bestehen zu einem nicht unerheblichen Teil aus papierfremden Materialien, wie beispielsweise Kunststoffen oder Metallen, die häufig in Form von Folien auf das Basispapier aufgebracht werden. Diese lassen sich im Desintegrator offensichtlich nicht zerkleinern und sorgen deshalb für hohe Werte bei der Bestimmung des Rückstands nach der Zerkleinerung. Rückstände über 20 % bzw. über 50 % sorgen direkt zu einer Herabstufung der Rezyklierbarkeit, sodass einige Hybrid-Materialien bereits methodenbedingt gar nicht als rezyklierbar eingestuft werden können.



Abbildung 11: Beispiel für ein positives Ergebnis beim Blattklebetest, hier für den unsortierten Stoff von Sackmaterial 1 (links) und Sackmaterial 2 (rechts)

4.4.2 ZM-Methode RECO 01/2014

Für die Bewertung der Rezyklierbarkeit nach der EcoPaperLoop-Methode (ZM-Methode RECO 01/2014) gibt es zum aktuellen Zeitpunkt noch keinen offiziell gültigen Bewertungsmaßstab. Allgemein ist jedoch zu erwarten, dass für ein gutes Abschneiden ein geringer Grobrejektanteil sowie ein geringer Stippen- und Makro-Stickygehalt erforderlich ist. Des Weiteren ist eine optische Homogenität der Laborblätter nach der Sortierung wünschenswert. Für die Bewertung wurde der in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Bewertungsmaßstab verwendet.

Karton 1 und 2 waren gut zerfaserbar, was sich an geringen Grobrejektanteilen (**Abbildung 12**) und Stippengehalten (**Abbildung 13**) zeigt. Karton 3 schnitt in diesen Kategorien im Vergleich dazu etwas schlechter ab. Dies ist auf die doppelseitige Kunststoffbeschichtung zurückzuführen, die das Eindringen von Wasser deutlich erschwert. Noch extremer trat dieser Effekt beim Getränkekarton auf. Hier landeten fast 80 % im Grobrejekt. Der Kaffeebecher fiel besonders durch einen besonders hohen Stippengehalt von über 50 % auf. Ähnlich wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, ließ sich Tapete 1 auch bei der Untersuchung nach der ZM-Methode RECO 01/2014 nicht zerfasern, sodass keine weiteren Untersuchungen an diesem Material durchgeführt wurden. Der größte Teil des Grobrejekts von Tapete 2 lässt sich auf den Kunststoffschaum zurückführen. Das zerfaserte Material wies jedoch auch noch einen Stippengehalt von fast 50 % auf.

Der Gesamtrückstand der nach der EcoPaperLoop-Methode ermittelten Materialien setzt sich aus dem Grobrejekt und dem Stippengehalt zusammen, wobei der Gutstoffanteil aus der Grobrejektbestimmung berücksichtigt werden muss. **Abbildung 14** zeigt den Gesamtrückstand nach EcoPaperLoop-Methode, der direkt mit dem Rückstand aus der PTS-Methode verglichen werden kann (siehe nachfolgender Abschnitt), da das jeweils kleinste Trennelement die 0,7 mm Lochplatte der Brecht-Holl-Sortierung darstellt.

Stickymessungen waren nur für die Produkte möglich, die sich entsprechend gut genug zerfasern ließen. **Abbildung 15** zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung. Dargestellt ist die Fläche der Makro-Stickys, die kleiner als 2.000 µm sind. Alle Produkte erreichten hierbei ein positives Ergebnis. Lediglich Karton 1 wies eine im Vergleich zu den anderen Produkten etwas höhere Stickyfläche auf, was in der Bewertung zu leichten Punktabzügen führte. Aber auch dieser Wert lag noch deutlich unter den Grenzwert.

Zusätzlich zur Bestimmung des Grobrejekts, des Stippengehalts, der Makro-Stickys sowie der optischen Homogenität wurde der Aschegehalt der untersuchten Produkte gemessen. Der Aschgehalt fließt jedoch nicht in die Bewertung mit ein. Zusammen mit dem Grobrejekt lässt sich damit aber eine Aussage über die Faserausbeute der Produkte treffen. Die gemessenen Aschegehalte sind in **Abbildung 16** dargestellt.

Bei der Beurteilung der optischen Homogenität erhielten alle untersuchten Laborblätter gute bis sehr gute Bewertungen. **Abbildung 17** zeigt einige dieser Laborblätter.

Tabelle 4 fasst alle Ergebnisse der Untersuchungen nach der ZM-Methode RECO 01/2014 zusammen. Die letzte Spalte enthält die Gesamtpunktzahl und eine Bewertung der Rezyklierbarkeit. 5 der 9 untersuchten Produkte erhielt die Beurteilung „Nicht im Standardprozess rezyklierbar“ und die beiden einseitig beschichteten Kartons 1 und 2 wurden als „rezyklierbar“ eingestuft. Die Rezyklierbarkeit der beiden Sackmaterialien 1 und 2 wurden aufgrund der bestimmten Grobrejektanteile zwischen dem oberen und unteren Grenzwert lediglich als „tolerierbar“ bewertet.

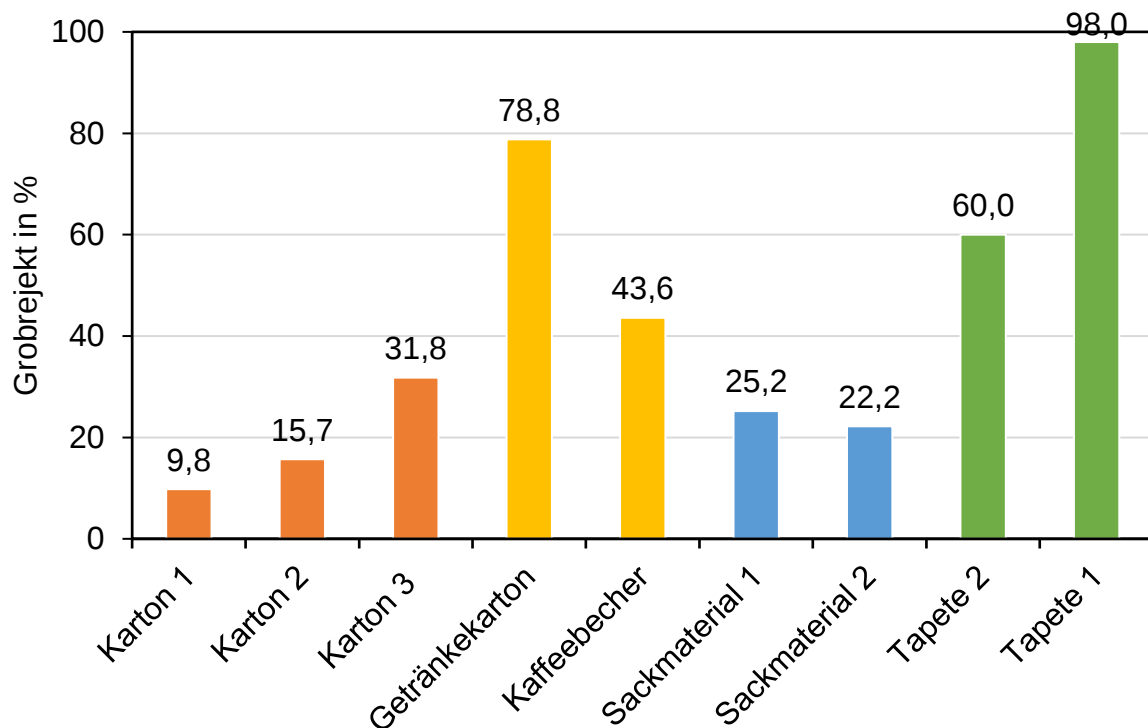


Abbildung 12: Grobrejekt nach der ZM-Methode RECO 01/2014

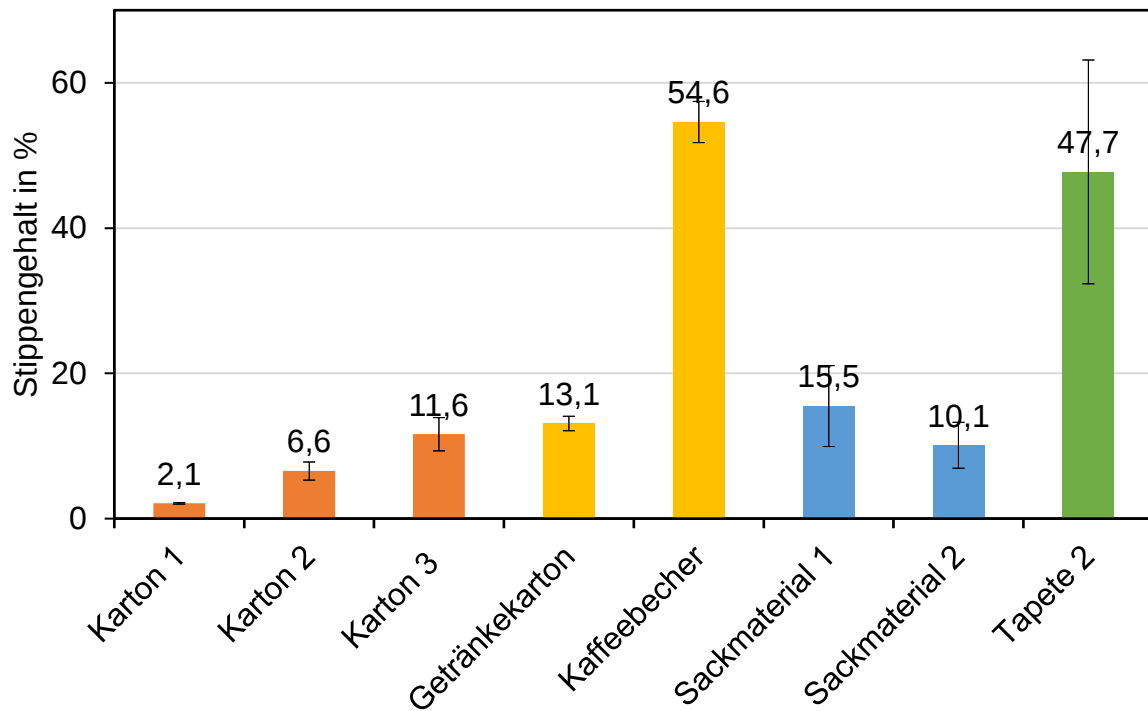


Abbildung 13: Stippengehalt nach der ZM-Methode RECO 01/2014

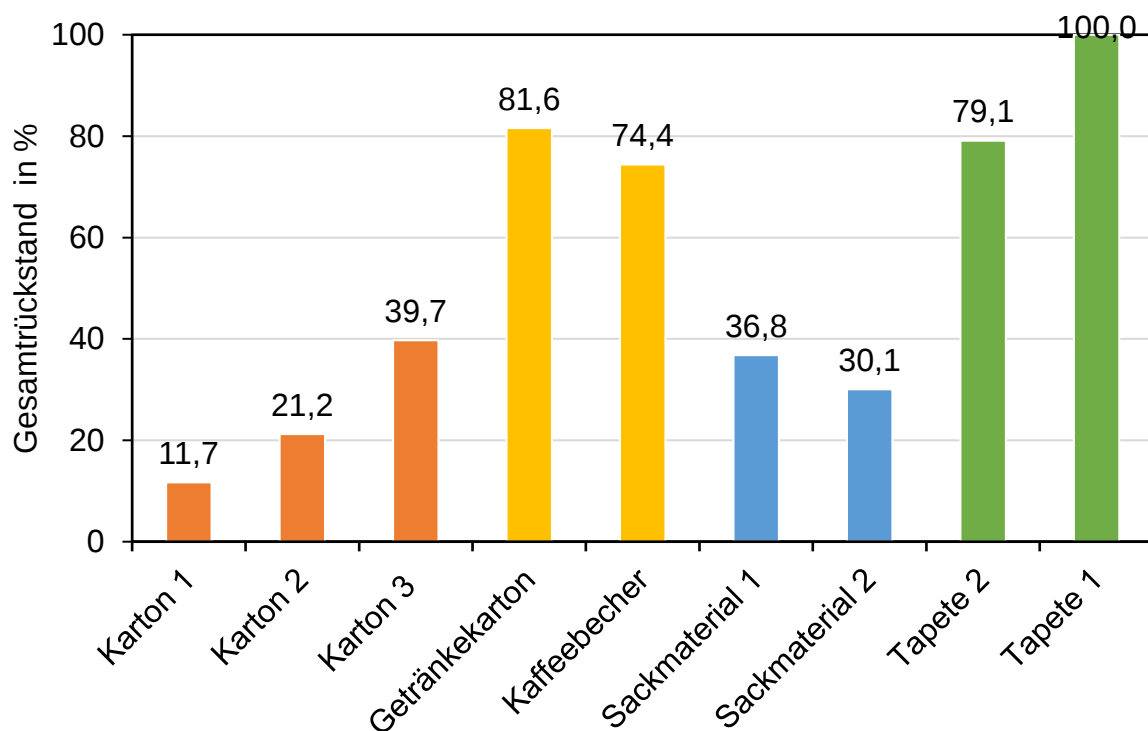


Abbildung 14: Gesamttrückstand nach der ZM-Methode RECO 01/2014, ermittelt aus dem Grobrejekt und dem Stippengehalt

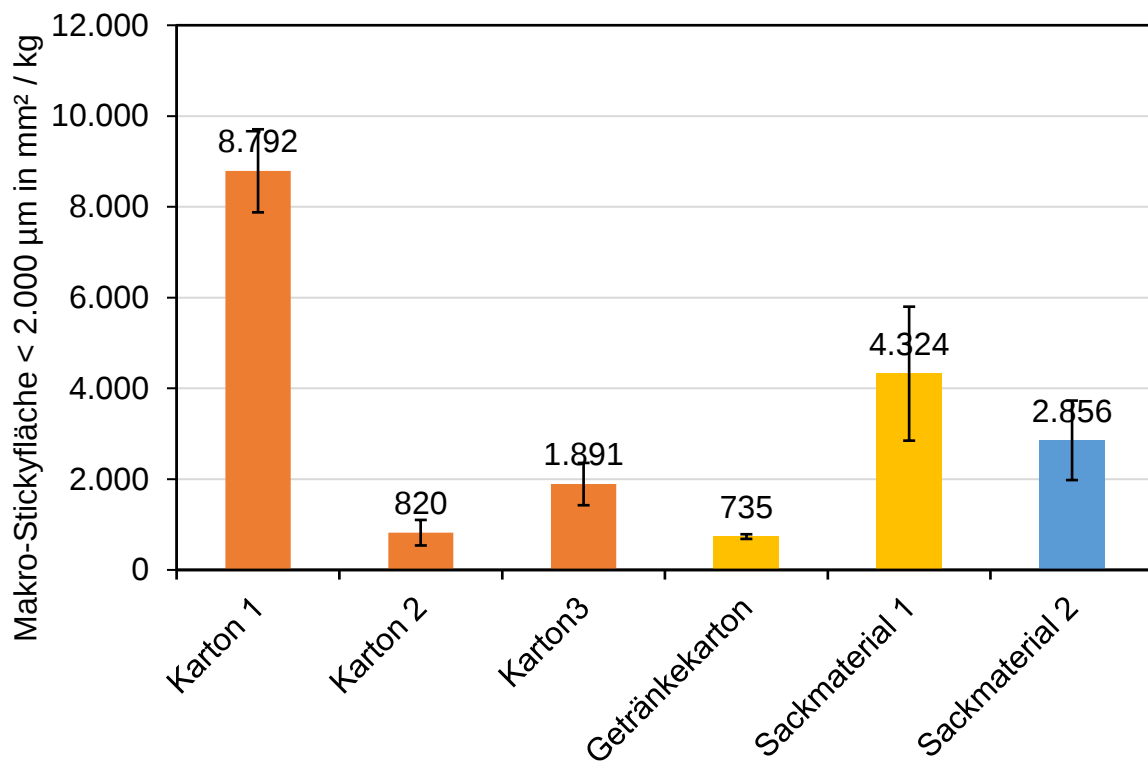


Abbildung 15: Fläche der Makro-Sticks < 2.000 µm nach der ZM-Methode RECO 01/2014

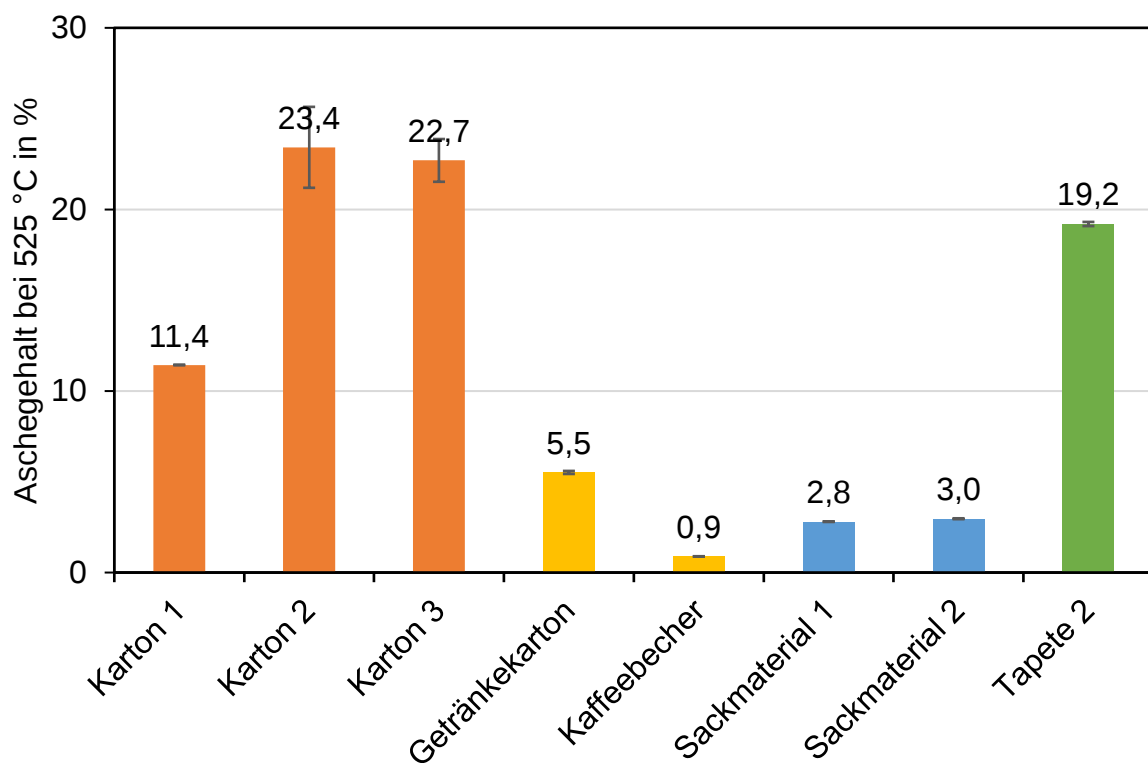


Abbildung 16: Aschegehalt nach der ZM-Methode RECO 01/2014



Karton 1



Karton 2



Getränkekarton



Sackmaterial 1



Sackmaterial 2



Tapete 2

Abbildung 17: Laborblätter zur Untersuchung der optischen Homogenität nach der ZM-Methode RECO 01/2014

Tabelle 4: Bewertung der Rezyklierbarkeit der getesteten Produkte nach der ZM-Methode RECO 01/2014 und dem inoffziellen Bewertungsschema

Bezeichnung	Punkte Grobprojekt	Punkte Stippen- gehalt	Punkte Makro- Stickyfläche < 2.000 µm	Punkte optische Homogenität	Gesamt- punktzahl / Bewertung
Karton 1	35	15	24	5	84
Karton 2	15	15	40	5	75
Karton 3	-3	12	39	5	nicht im Standardprozess rezyklierbar
Getränke- karton	-35	12	40	10	nicht im Standardprozess rezyklierbar
Kaffeebecher	-27	-7	/	5	nicht im Standardprozess rezyklierbar
Sackmaterial 1	0	10	35	10	55
Sackmaterial 2	0	13	37	10	60
Tapete 1	-35	/	/	/	nicht im Standardprozess rezyklierbar
Tapete 2	-23	-4	/	10	nicht im Standardprozess rezyklierbar

4.4.3 Fazit der Laboruntersuchungen

In den beiden vorangegangenen Abschnitten wurden 9 Hybrid-Produkte aus 5 Produktkategorien nach den beiden gängigen Bewertungsmethoden auf ihre Rezyklierbarkeit untersucht. **Tabelle 5** stellt für jedes Produkt die beiden Gesamtbewertungen gegenüber. Es ist auffällig, dass die PTS-Methode die meisten Produkte bzgl. ihrer Rezyklierbarkeit besser bewertet als die ZM-Methode. Hauptursache für mittlere und schlechte Bewertungen sind fast ausschließlich auf die schlechte Zerfaserbarkeit der untersuchten Materialien zurückzuführen. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Methoden ist die Probengröße. Während bei der PTS-Methode 2 cm x 2 cm große Stücke verwendet werden, sind die Stücke bei der Zellcheming Methode handtellergroß. Insbesondere bei beschichteten Materialien erleichtert eine kleinere Teilchengröße das Eindringen von Wasser und damit die Zerfaserung, was einen Hauptgrund für die unterschiedlichen Bewertungen der beiden Methoden darstellt. Durch Anpassung der Parameter im Stoffaufbereitungsprozess, die die Zerfaserbarkeit von schwer zerfaserbaren Materialien begünstigen, ist somit zu erwarten, dass auch Hybrid-Materialien besser recycelt werden können. Eine entsprechend Prüfmethodik existiert dafür aber leider noch nicht.

Abbildung 18 stellt die Gesamtrückstände der beiden Labormethoden für die getesteten Produkte gegenüber. Auffällig sind die deutlich höheren Rückstandsmengen zwischen 82 % und 74 % nach der EcoPaperLoop-Methode im Vergleich zu 44 % bis 33 % nach der PTS-Methode für Getränkekarton, Tapete 2 und Kaffebecher. Die Unterschiede in den ermittelten Masseprozenten für die Rückstandsbestimmung liegen selbstverständlich im verwendeten Pulperaggregat und seinen erzeugten spezifischen Scherkräften aber nicht zuletzt auch in der unterschiedlichen Probenvorbereitung. Das nach PTS-Methode wesentlich kleiner geschnittene Probematerial weist deutlich mehr Schnittkanten auf, durch die Wasser in das Papiergefüge eindringen und den Faserverbund auflösen kann. Daraus resultieren dann schlussendlich auch die im Vergleich zur EcoPaperLoop-Methode niedrigeren Sortierrückstände. Abbildung 19 zeigt eine andere Darstellung der gemessenen Gesamtrückstände. Die Darstellung lässt eine nichtlineare Korrelation zwischen den Rückständen der beiden Labormethoden vermuten.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass zumindest für das untersuchte Probematerial keine größeren Probleme mit der Klebrigkeit bzw. Stickys oder optische Beeinträchtigungen im Sinne von Inhomogenitäten festgestellt werden konnten.

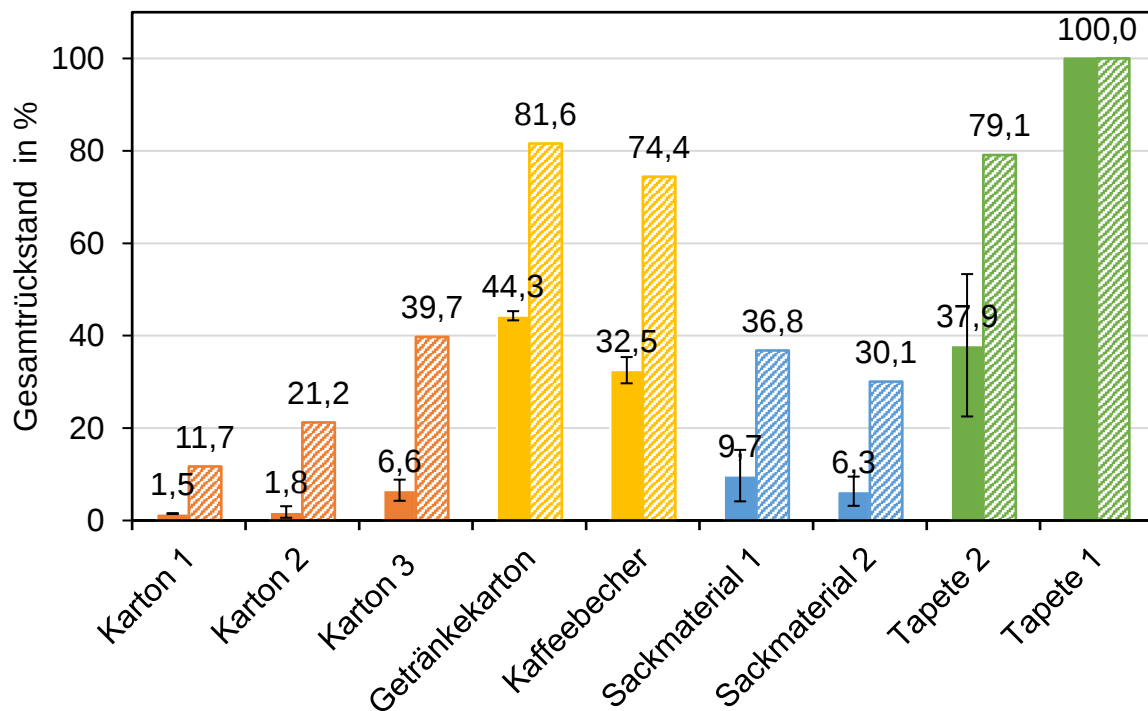


Abbildung 18: Gegenüberstellung des Gesamtrückstands nach der PTS-Methode (gefüllt) RH 021/97 und der ZM-Methode RECO 01/2014 (schraffiert)

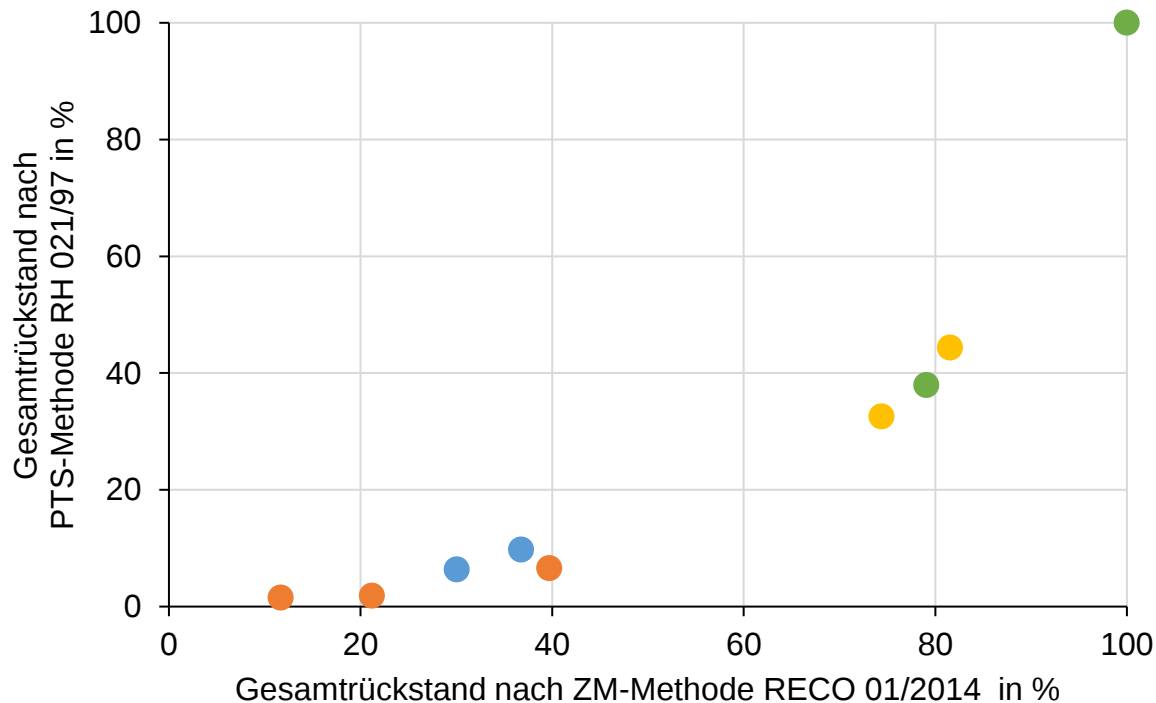


Abbildung 19: Korrelation zwischen den Gesamtrückständen nach der PTS-Methode RH 021/97 und der ZM-Methode RECO 01/2014

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Bewertung der Rezyklierbarkeit der untersuchten Produkte nach PTS-Methode RH 021/97 und ZM-Methode RECO 01/2014

Probenmaterial	Rezyklierbarkeit nach PTS-Methode RH 021/97	Rezyklierbarkeit nach ZM-Methode RECO 01/2014
Karton 1	rezyklierbar	rezyklierbar
Karton 2	rezyklierbar	rezyklierbar
Karton 3	rezyklierbar	nicht im Standardprozess rezyklierbar
Getränkekarton	bedingt rezyklierbar	nicht im Standardprozess rezyklierbar
Kaffeebecher	bedingt rezyklierbar	nicht im Standardprozess rezyklierbar
Sackmaterial 1	rezyklierbar	tolerierbar
Sackmaterial 2	rezyklierbar	tolerierbar
Tapete 2	bedingt rezyklierbar	nicht im Standardprozess rezyklierbar
Tapete 1	nicht rezyklierbar	nicht im Standardprozess rezyklierbar

4.5 Verbesserung der Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien durch Anpassung der Stoffaufbereitungsprozesse

Wie sich im letzten Abschnitt gezeigt hat, ist für die Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien insbesondere eine ausreichend gute Zerkleinerung eine große Hürde. Bei der Entwicklung der beiden angewandten Labormethoden bestand die Absicht, die Bedingungen im Standard-Stoffaufbereitungsprozess in den Papierfabriken zu simulieren. Möchte man Produkte aufbereiten, die aufgrund ihrer Eigenschaften für den Standard-Prozess ungeeignet sind, besteht die Möglichkeit diese in einem gesonderten Stoffaufbereitungsprozess zu verarbeiten. Mit Hilfe eines Stichversuchs soll im Folgenden gezeigt werden, dass sich durch Anpassung einiger Prozessparameter die Zerkleinerung der Hybrid-Produkte deutlich verbessern lässt. Als Referenz wird die ZM-Methode RECO 01/2014 gewählt. Aufgrund der Punkteskala lassen sich hier Verbesserungen in der Bewertung der Rezyklierbarkeit einfacher erkennen.

Für die Versuche wurden drei Hybrid-Produkte ausgewählt, die im vorhergehenden Abschnitt als „nicht rezyklierbar“ eingestuft wurden. Ausgewählt wurden:

- Karton 3
- Getränkekarton
- Kaffeebecher.

Tabelle 6: Übersicht der geänderten Parameter im Vergleich zur ZM-Methode RECO 01/2014 zur Verbesserung der Zerfaserung

Parameter	ZM-Methode RECO 01/2014	Angepasster Stoffaufbe- reitungsprozess
Objektgröße	ca. 1.000 mm ²	80 mm ²
Wassertemperatur	40 °C	60 °C
pH-Wert	Neutral	11
Einweichzeit	-	30 min

Tabelle 6 stellt die geänderten Parameter für den Tastversuch im Vergleich zu den Ursprünglichen Parametern der ZM-Methode RECO 01/2014 dar. Die ursprünglich in handtellergroßen Stücke zerkleinerten Hybrid-Produkte wurden vor den Versuchen mit einem Aktenvernichter in Streifen der Größe 20 mm x 4 mm geschnitten. Die kleineren Teile begünstigen das Eindringen des Wassers bei der Zerfaserung. **Abbildung 20** zeigt Karton 3 nach der Zerkleinerung. Zusätzlich wurde die Wassertemperatur von 40 °C auf 60 °C erhöht und die Papierstreifen vor der Zerfaserung zunächst eine halbe Stunde eingeweicht. Als letzte Änderung wurde der Suspension Natronlauge hinzugefügt, da aus Industrieprozessen bekannt ist, dass sich schwer zerfaserbare Produkte im alkalischen Milieu besser zerfasern lassen.

In **Abbildung 21** ist deutlich zu erkennen, dass der Gutstoffanteil durch die Anpassung der Parameter erheblich erhöhen lässt. Insbesondere bei Getränkekartons und Kaffeebecher kann der Anteil des zerfaserten Materials bezogen auf die Produktmasse um Faktor 3 gesteigert werden.



Abbildung 20: Karton 3 nach der Zerkleinerung mit dem Aktenvernichter

Diese Tatsache führt dementsprechend auch zur einer Verbesserung der Gesamtbewertung der Produkte. **Abbildung 20** zeigt die vergebenen Rezyklierbarkeitspunkte für die relevanten Kategorien Grobrejekt und Stippengehalt sowohl der ursprünglichen Untersuchungen als auch der Untersuchungen mit modifizierter Stoffaufbereitung. Legt man den gleichen Maßstab zugrunde, kann man die drei untersuchten Produkte, die ursprünglich als „nicht rezyklierbar“ eingestuft worden waren, unter Verwendung des beschriebenen Stoffaufbereitungsprozesses als „rezyklierbar“ einstufen. Der Tastversuch bringt daher zum Ausdruck, dass auch Hybrid-Materialien die unter Standard-Aufbereitungsbedingungen sich nur ungenügend zerfasern lassen, in einem auf sie zugeschnittenen Stoffaufbereitungsprozess mit entsprechend angepassten Randbedingungen stofflich rezykliert werden können.

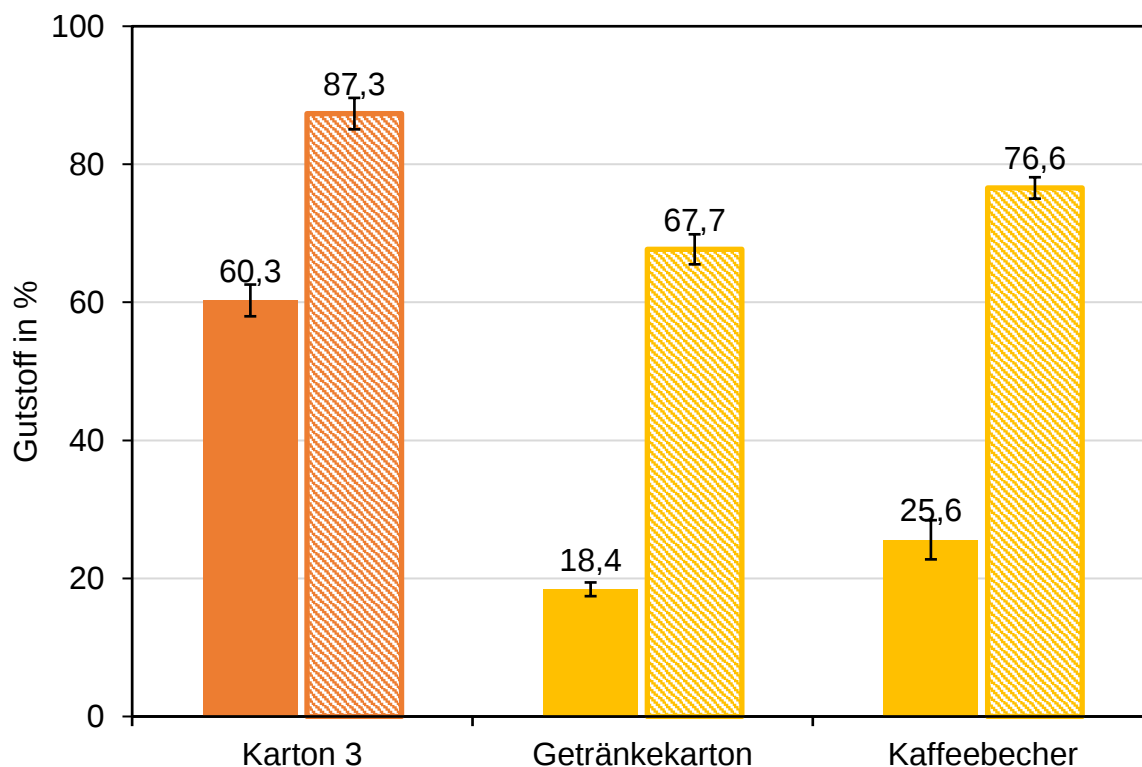


Abbildung 21: Gutstoffanteil der getesteten Produkte für die ZM-Methode RECO 01/2014 (gefüllte Balken) und die Versuche mit angepassten Parametern (schraffierte Balken)

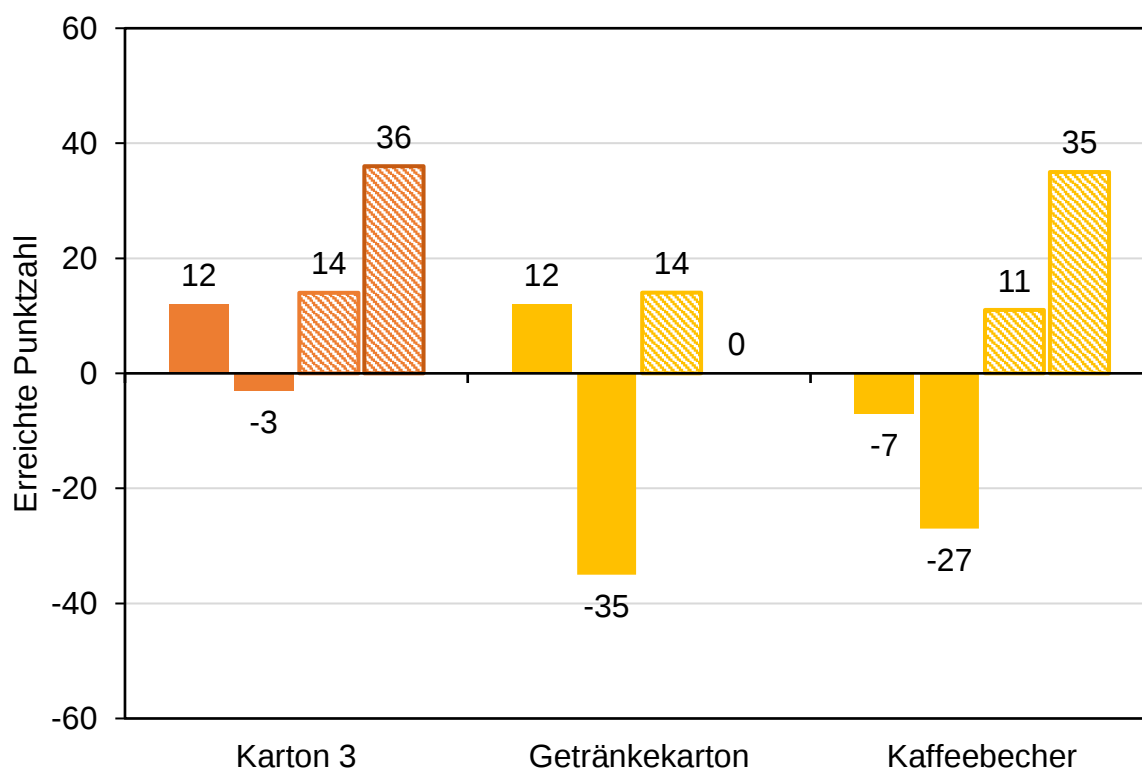


Abbildung 20: Vergleich der erreichten Punktzahl der drei untersuchten Produkte in den Kategorien Stippengehalt (jeweils links) und Grobprojekt (jeweils rechts)

rechts) zwischen der ursprünglichen ZM-Methode RECO 01/2014 (gefüllte Balken) und der Methode mit angepassten Parametern (schraffierte Balken)

4.6 Bewertung der Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien

4.6.1 Literaturrecherche

Die Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungsprodukten spielt in vielen Bereichen eine wichtige Rolle. Von der gesetzlichen Seite wird dies durch die Europäische Verpackungsrichtlinie 94/62/EG bekräftigt. Darüber hinaus fördert das am 01. Januar 2019 in Kraft getretene neue Verpackungsgesetz in §21 durch die vorgeschriebene Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit für die Lizenzgebühren der dualen Systeme auch die ökologische Gestaltung von Verpackungen.

Vor diesem Hintergrund wurden bereits einige Methoden entwickelt, die eine Bewertung von Verpackungsprodukten hinsichtlich ihrer Recyclingfähigkeit ermöglichen. Die im Rahmen dieses Projekts angewandten Methoden (PTSRH 021/97 und ZELLCHEMING RECO 01/2014) sind Maßstäbe, die für „reine“ Papierprodukte entwickelt und optimiert wurden. Die Ergebnisse der Anwendung dieser beiden Methoden auf ausgewählte Hybrid-Materialien hat in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, dass diese beiden Methoden alleine keinen geeigneten Maßstab für die Bewertung der Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien darstellen. Sie können nur einen Baustein in der endgültigen Bewertung der Produkte darstellen.

Neben den genannten papierspezifischen Methoden findet man auch eine ganze Reihe an Bewertungsmethoden und Tools zur Bewertung von Kunststoffverpackungen [11, 12, 13].

Darüber hinaus gibt es Bewertungskataloge, die für alle Verpackungsarten angewendet werden können. Die Interseroh GmbH bietet beispielsweise Dienstleistungen zur Prüfung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen an. Die Bewertung erfolgt für drei Stufen (Registrierungssystem, Sortierung, Recycling), die jeweils mit 0-20 Punkten bewertet werden.

Auch das Institut cyclos-HTP GmbH beschreibt ein Verfahren zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungsprodukten [14]. Das Institut hat einen Anforderungs- und Bewertungskatalog zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen und Waren erarbeitet. Verpackungen werden aufgrund ihrer Zusammensetzung und Eigenschaften einem bestimmten Recycling-Pfad und damit einem Referenzmodell zugeordnet. Die Referenzmodelle sind im Anforderungs- und Bewertungskatalog für 13 Pfade wie z. B. PPK, PE, PP oder Flüssigkeitskartons definiert. Anschließend werden im Abgleich mit der Zusammensetzung der zu beurteilenden Verpackungen Bewertungskriterien im Detail analysiert. Dabei handelt es sich u. a. um die Bestimmung der recyclingfähigen Gewichtsanteile sowie Verhalten der Verpackungen hinsichtlich Identifizierbarkeit per Nahinfrarot-Spektroskopie, Leitfähigkeit, Dichte und Auflösegeschwindigkeit. Die Gesamtbewertung der Recyclingfähigkeit erfolgt durch Multiplikation der für jedes Bewertungskriterium

ermittelten Einzelfaktoren und wird als prozentuale Kennzahl angegeben. **Abbildung 22** zeigt das Ablaufschema der Prüfung.

Orientierung geben auch die nachfolgenden Mindeststandards, die bei der Bemessung der Recyclingfähigkeit einzuhalten sind und jährlich von der Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister im Einvernehmen mit dem Umweltbundesamt veröffentlicht werden [15]. Für die Bemessung der Rezyklierbarkeit ist mindestens der Wertstoffgehalt einer Verpackung zu berücksichtigen, der sich für ein Recycling eignet. Bei der Bestimmung dieses Wertstoffgehalts sind außerdem mindestens die drei nachfolgenden Anforderungen zu berücksichtigen:

1. Das Vorhandensein von Sortier- und Verwertungsinfrastrukturen für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling für diese Verpackung.
2. Die Sortierbarkeit der Verpackung sowie ggf. die Trennbarkeit ihrer Komponenten.
3. Unverträglichkeiten von Verpackungskomponenten oder enthaltenen Stoffen, die nach der Verwertungspraxis einen Verwertungserfolg verhindern können.

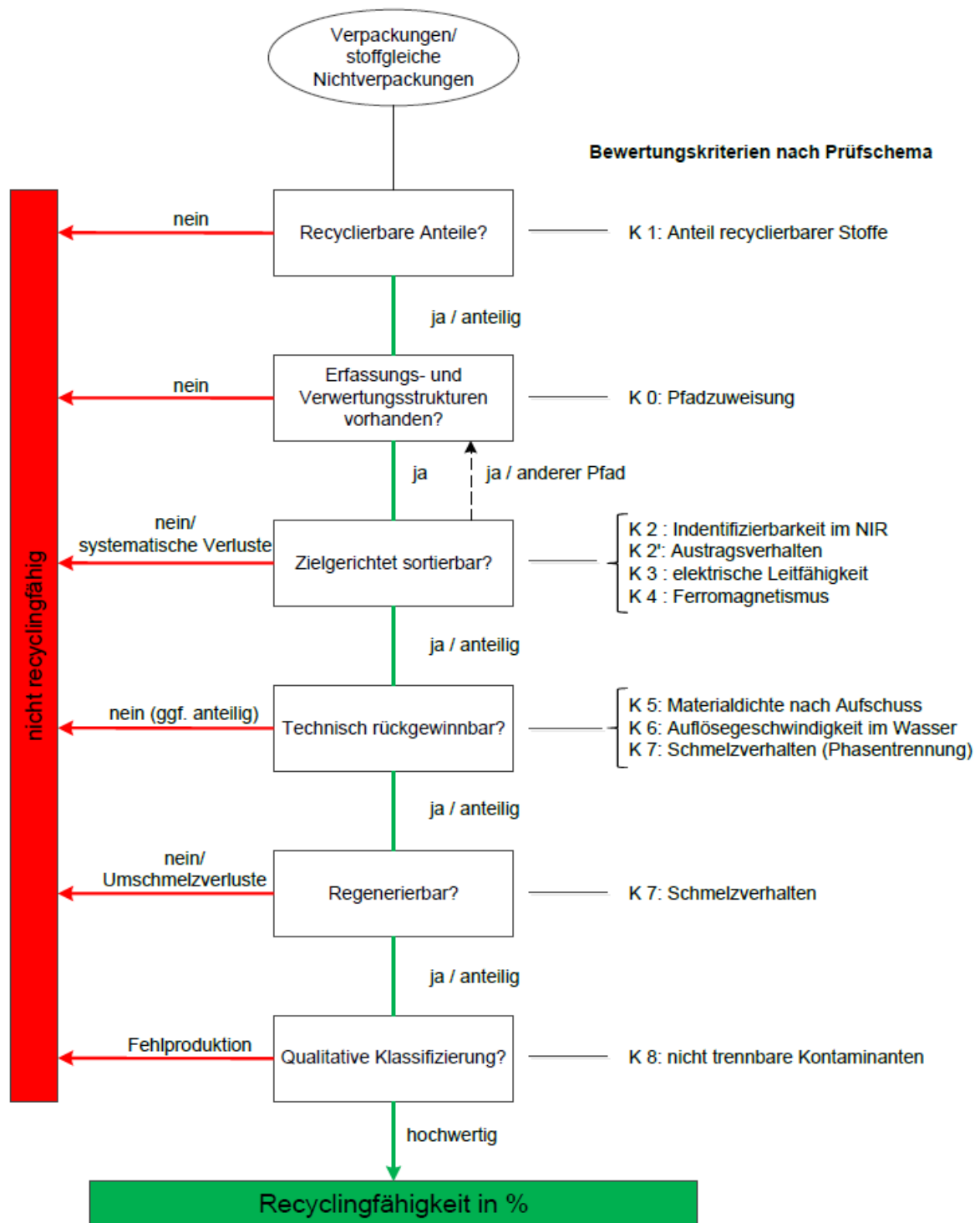


Abbildung 22: Ablaufschema zum Prüfprozess von cyclos-HTP nach [14]

4.6.2 Vorschlag für Maßstab zur Bewertung von Hybrid-Materialien

Ein weiteres Ziel des Projekts war die Erarbeitung eines ersten Diskussionsvorschlags zur Definition eines Maßstabs zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von Hybrid-Materialien. Die Reduzierung auf einen Diskussionsvorschlag ist der Tatsache geschuldet, dass eine vollständige Ausarbeitung eines Bewertungsmaßstabs den Rahmen eines INFOR-Projekts sprengen würde. Auf der Grundlage der nachfolgenden Überlegungen kann in einem nachfolgenden, umfassenderen Projekt ein Maßstab definiert werden.

Das im Folgenden vorgeschlagene und in **Abbildung 23** dargestellte Verfahren ist an das in [14] beschriebene Verfahren von cyclos-HTP angelehnt. Es trägt jedoch zusätzlich der Tatsache Rechnung, dass insbesondere Hybrid-Materialien nicht einem einzigen Recycling-Pfad zugeordnet werden können. Vielmehr muss die Trennbarkeit in die verschiedenen Materialkomponenten betrachtet werden und für jede Fraktion eine Aussage über die Wiederverwertbarkeit getroffen werden.

Das vorgeschlagene Bewertungsmaßstab orientiert sich an folgenden Leitfragen:

1. Gibt es grundsätzlich rezyklierbare Anteile im Verpackungsprodukt?
2. Lässt sich das Verpackungsprodukt in den richtigen Recyclingkreislauf bringen?
3. Lässt sich das Verpackungsprodukt in rezyklierbare Fraktionen trennen?
4. Welche Verluste treten im Recyclingprozess auf?
5. Welche Qualität hat das Rezyklat?

Die erste Leitfrage stellt prinzipiell die Frage, ob eine Betrachtung der Rezyklierbarkeit überhaupt sinnvoll ist. Eine solche Betrachtung macht nur dann Sinn, wenn es potenziell rezyklierbare Anteile im zu untersuchenden Produkt gibt. Wird dies verneint, kann die Prüfung an dieser Stelle abgebrochen und die Rezyklierbarkeit mit 0 % bewertet werden. Gibt es rezyklierbare Anteile, nimmt der erste Faktor A den Wert 1 an.

Verpackungsprodukte können nur dann rezykliert werden, wenn sie einem dafür vorgesehenen Kreislauf zugeführt werden. Insbesondere Hybrid-Materialien kommen in den meisten Fällen nicht als Monostrom vor und müssen daher erst aus einem anderen Wertstoff- oder Abfallstrom aussortiert werden. Der zweite Faktor B gibt prozentual an, inwieweit sich diese Verpackung aus einem Stoffstrom abtrennen und somit einem Recyclingkreislauf zuführen lässt, der für die Aufbereitung des Hybrid-Produkts geeignet ist.

Hybrid-Materialien bestehen aus verschiedenen Komponenten. Daher müssen die Verpackungen in Fraktionen getrennt werden. Die Faktoren C_i geben für jede der Fraktionen den auf die Gesamtmasse des Produkts normierten prozentualen Anteil der Fraktion an.

Beim Trennprozess der Komponenten der Verpackung in verschiedene Fraktionen, wird es immer zu Verlusten kommen, weil ein gewisser Teil der Komponenten in der falschen Fraktion landen wird. Beispielweise beim Abtrennen von Folien könnten

Papieranteile an der Folie hängen bleiben und so in den Recyclingkreislauf der Folie gelangen. Der Faktor D_i ist daher ein Maß für die Reinheit der i -ten Fraktion, der berücksichtigt, dass durch Fehlaustragungen im Sortierprozess Fremdmaterialien in der Fraktion vorkommen.

Im Recyclingprozess kann es zu weiteren Verlusten kommen, die bei Verwendung von Primärrohstoffen nicht anfallen würden. Diese hauptsächlich prozessbedingten Verluste werden in einem Faktor E_i zusammengefasst.

Ein ganz entscheidender Faktor bei der Aufbereitung ist die Qualität des Rezyklats. Der Qualitätsfaktor F_i der Fraktion berücksichtigt die Tatsache, dass durch den Recyclingprozess die Qualität des Rohstoffs vermindert werden kann. Im Falle von Papier kann es z. B. durch Kürzungen von Fasern, das Vorhandensein von Stickys, optische Beeinträchtigungen, zu einer verminderten Verwendbarkeit des rezyklierten Materials kommen. Hierfür könnte z. B. die EcoPaperLoop-Methode mit einem geeigneten, noch zu definierenden Bewertungsmaßstab genutzt werden.

Für jede Fraktion lässt sich durch Multiplikation aller vorherigen Faktoren entlang des Pfades ein Beitrag zur Rezyklierbarkeit der Verpackung berechnen. Die Rezyklierbarkeit der Verpackung ergibt sich aus der Summe aller Beiträge durch die Fraktionen.

Das beschriebene Verfahren ist wie bereits beschrieben nur ein erster Entwurf für eine Bewertung von Hybrid-Materialien. Durch den modularen Aufbau können weitere Faktoren einfach berücksichtigt werden. Im projektbegleitenden Ausschuss wurden beispielweise weitere Faktoren für den Energie- und Wasserbedarf im Recyclingprozess diskutiert. Eine detaillierte Ausarbeitung eines Bewertungsmaßstabs benötigt jedoch den Rahmen eines eigenständigen Projekts.

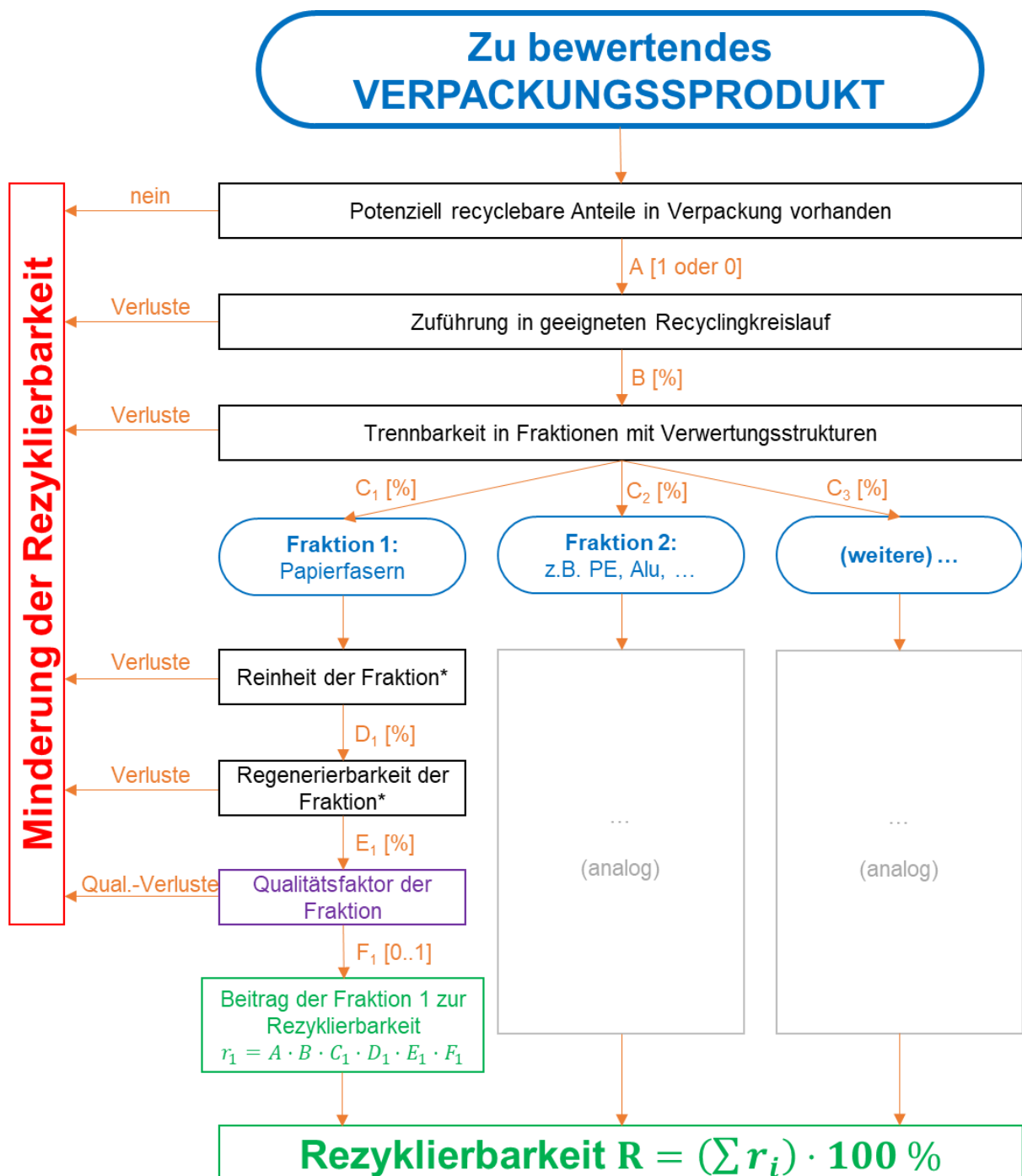


Abbildung 23: Darstellung des Vorschlags für einen Maßstab zur Bewertung von Hybrid-Materialien

5 Literaturverzeichnis

1. **Schimmelpfennig, P.:** Untersuchung zur Rezyklierbarkeit von papierbasierten Hybrid-Materialien. - Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV), 2019.
2. **Nanko, M.:** Definitions and categories of hybrid materials. - In: AZojomo. - 6(2009)- S. 1-8.
3. **Kickelbick, G.:** Hybrid materials: synthesis, characterization, and applications. -: John Wiley & Sons, 2007. - ISBN 3527610480.
4. **Hagiwara, Y. ; Suzuki, H.:** Fracture Mechanics. - Tokyo, Japan: Ohmsha, 2000. - S. 135-138.
5. **Schüler, K.:** Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2016. - GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, 2018.
6. **N.N.:** Absatzstatistik für Tiefkühlprodukte 2018. - Deutsches Tiefkühlinstitut e.V, 2019.
7. **Istel, K. ; Detloff, K.:** Einweggeschirr und To-Go-Verpackungen - Abfallaufkommen in Deutschland 1994 bis 2017. - Naturschutzbund Deutschland e.V, 2018.
8. **Brandt, K. ; Reich, U.:** Tapetenbilanz 2017: Umsätze rückläufig, Ausblick positiv. - Deutsches Tapeten-Institut GmbH, 2018.
9. **Meyer, C.:** Wall Street. - In: Selbst ist der Mann - Das Do-it-yourself-Magazin. - 1(2017)Januar. - S. 44-48.
10. **Moldenhauer, T. ; Burkard, A. ; Geiger, G. A.:** Papier 2018 - ein Leistungsbericht. - Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 2018. -
11. **COTREP: Recyclability of Plastic Packaging.** [Zugriff am: 20.08.2019]. Verfügbar unter: <https://www.cotrep.fr/content/uploads/sites/3/2019/02/cotrep-guidelines-recyclability.pdf>
12. **EPBP: Design for Recycling Guidelines for PET Bottles.** [Zugriff am: 20.08.2019]. Verfügbar unter: <https://www.epbp.org/design-guidelines>
13. **RecyClass: Das Recycling-Tool für Kunststoffverpackungen.** [Zugriff am: 20.08.2019]. Verfügbar unter: <https://recyclclass.eu/de/>
14. **N.N.:** Prüfung und Testierung der Recyclingfähigkeit. - Institut cyclos-HTP GmbH 2019.
15. **N.N.:** Orientierungshilfe zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen. - Zentrale Stelle Verpackungsregister, 2018.

Thema: Untersuchung diverser Hybrid-Materialien im Papierbereich	Fraunhofer IWKS	Joachim Knierim Wladislaw Benner
<u>Ausführung IWKS</u> Ort: Alzenau Brentanostraße 2 Technikum Sortieranlage Datum: 18.03.2019 – 09.04.2019 <u>Auftraggeber</u> Technische Universität Darmstadt Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel Alexanderstraße 8 64283 Darmstadt pmv@papier.tu-darmstadt.de www.pmv.tu-darmstadt.de Verantwortlicher WMA TuD: Tobias Krebs Tel. +49 6151 16-22720 krebs@papier.tu-darmstadt.de		
Zielsetzung:	Spektralaufnahmen (NIR) und Sortierung von Hybrid-Materialien	
<u>Aufgabenstellung</u> AP1: Aufnahme von Nahinfrarot-Spektren Das vom AG zur Verfügung gestellte Material (Altpapier und Hybrid-Materialien) wird in der Sortieranlage des IWKS eingelesen. Konkret werden die Nahinfrarot-Spektren des Materials aufgenommen. Die Spektren werden durch entsprechende Software aufbereitet. Nachfolgend werden diese dem entsprechenden Material (Hybrid-Material und Nicht-Hybrid-Material) zugeordnet. Die aufgenommenen Spektren werden mit den entsprechenden Spektren aus der Literatur verglichen. AP2: Sortierversuche Die zuvor aufgenommenen Spektren zur sensorgestützten Sortierung sollen durch praxisnahe Experimente dazu genutzt werden, die Hybrid-Materialien und Nicht-Hybrid-Materialien voneinander zu trennen. Dies geschieht vollautomatisch im sensorgestützten Sorter. Hierbei werden die Spektren ggf. nachbearbeitet, um die Ausschleusung der Hybrid-Materialien zu optimieren. Der Sortiererfolg wird anhand des Fehlwurfanteils bewertet. AP3: Zusammenfassung der Ergebnisse Die aufgenommenen Spektren und die Ergebnisse aus den Sortierversuchen werden in Form einer kurzen Präsentation zusammengestellt.		

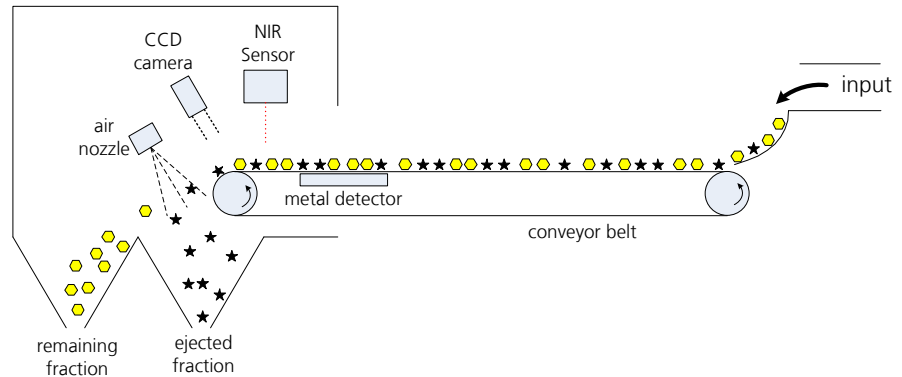
Inhaltsverzeichnis

1.	Daten zum Versuchsequipment	3
1.1	Sortieranlage mit Multi-Sensorsortiersystem	3
1.2	Software	3
1.3	FT-IR / NIR – Spektrometer Nicolet iS50	3
2.	Versuchsmaterial	4
3.	Durchschnittsspektren für Vergleich mit Labormessgerät	5
3.1	NIR-Spektren Aufnahmen Sortieranlage	5
3.2	NIR-Spektren Vergleichsaufnahmen mit Labormessgerät Nicolet iS50	6
4.	Versuche und Ergebnisse	7
4.1	Sortierversuche	7
4.2	Versuchsergebnisse	8
4.3	Interpretation der Versuchsergebnisse	9

1. Daten zum Versuchsequipment

1.1 Sortieranlage mit Multi-Sensorsortiersystem

+ sesotec
VARIOSORT COMPACT



Arbeitsbreite	1024 mm
Geräteabmessung	L = 2815 mm B = 1895 mm
Ausscheideeinheit	320 Hochgeschwindigkeitsventile mit einem Düsenraster von 3,2 mm
Materialinput	Korngröße von 2-50 mm
Förderbandgeschw.	1,6 - 2,6 m/sec.
Durchsatz	bis zu 2,5 t/h (Materialabhängig)

Sensoren

- C** ■ 2 CCD-Zeilenskameras zur Farb- und Formerkennung
 - Auflösung 0,375 mm
- M** ■ zur Erkennung von FE/NE-Metallen
 - lineare Auflösung 16 mm
- N** ■ NIR-Erfassungsbereich von 1330 - 1900 nm
 - 96 Messpunkte

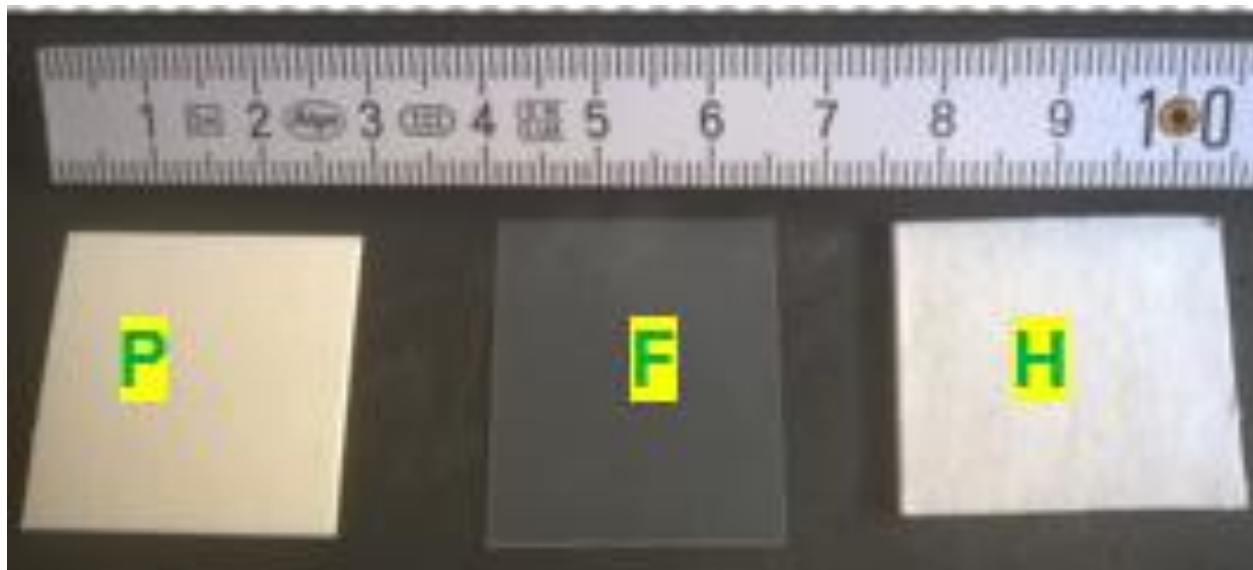
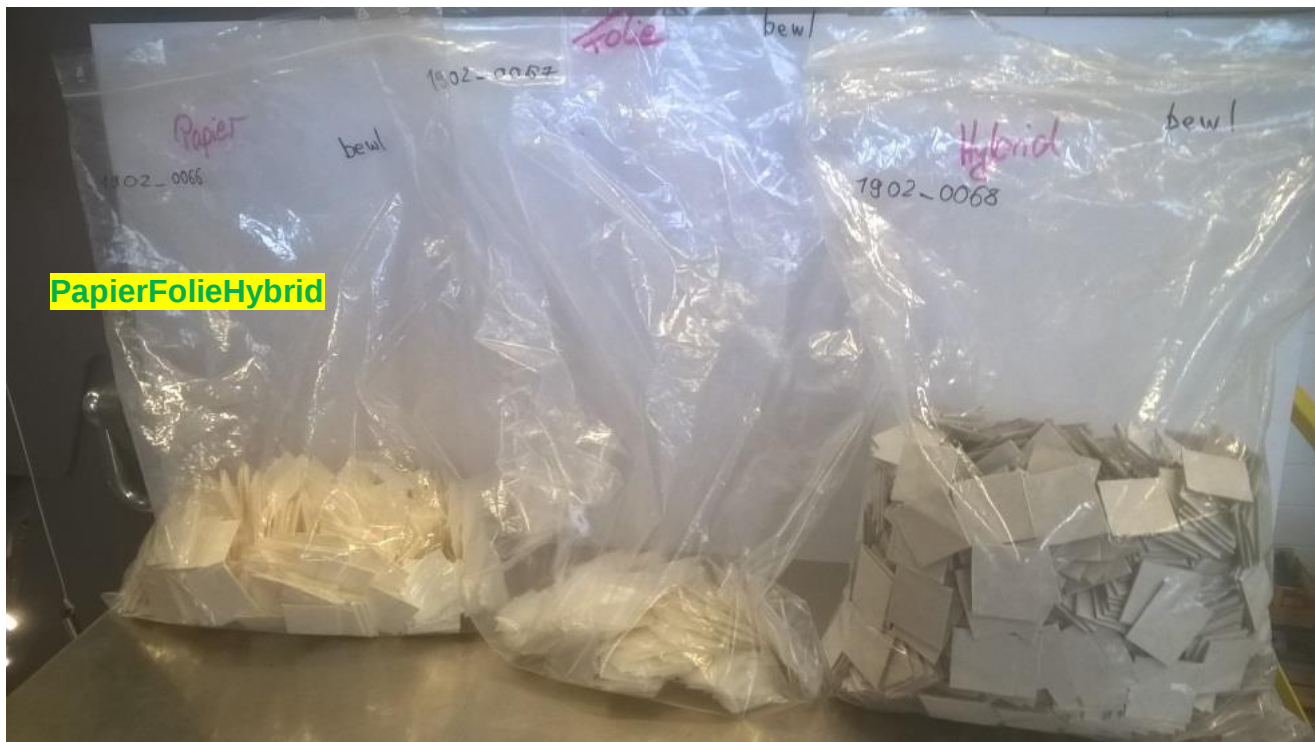
1.2 Software

Für die NIR- Spektrenuntersuchung und Auswertung wurde die Anwendungssoftware vom Kamerahersteller LLA verwendet. Mit Hilfe dieser Software können mathematische und statistische Methoden auf spektrale Fragestellungen angewendet werden, sodass ein Maximum an Informationen aus den Messdaten gewonnen werden kann. Die Versuchsauswertungen werden somit optimiert.

1.3 FT-IR / NIR – Spektrometer Nicolet iS50

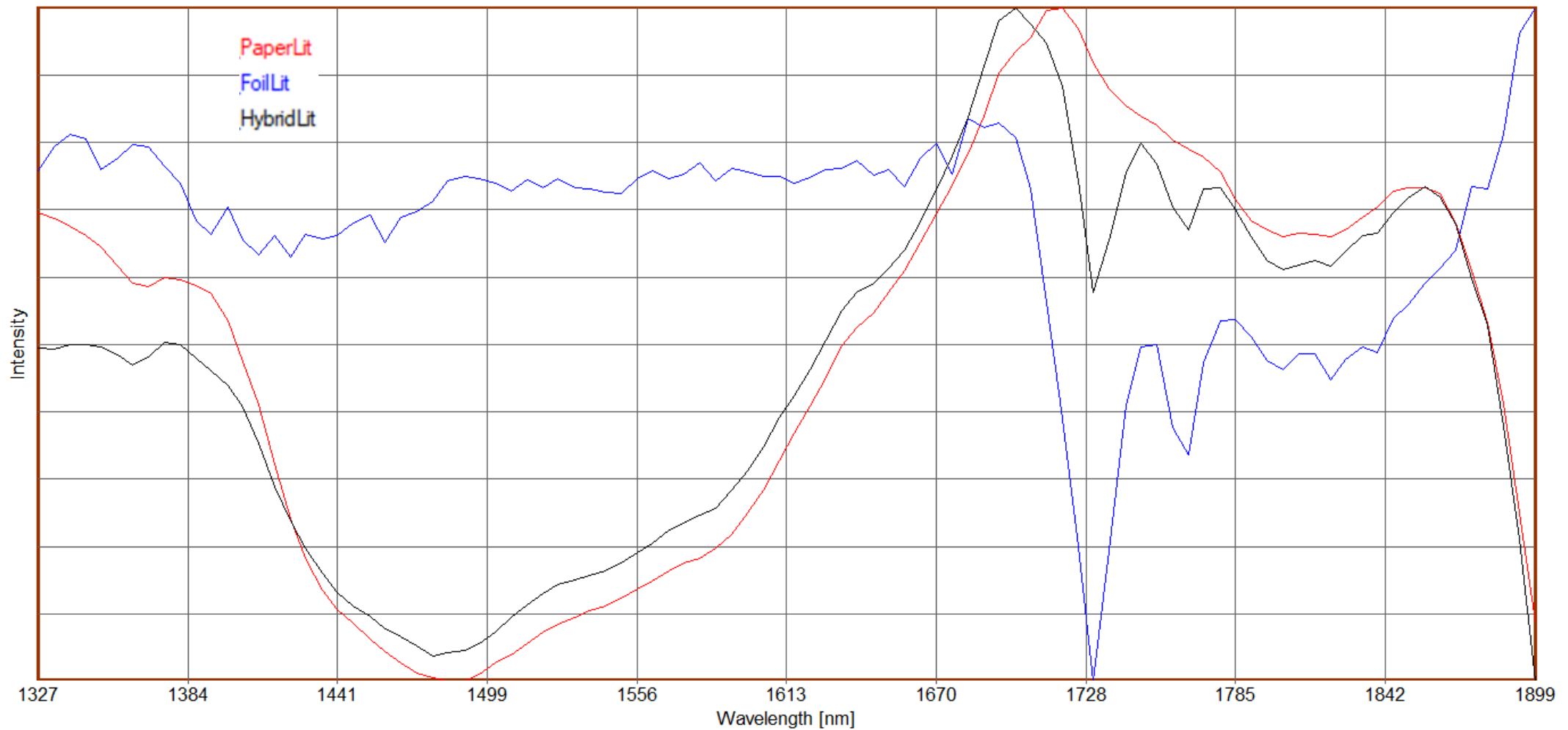
Das Nicolet iS50 ist ein FT-IR-Spektrometer mit adaptierter NIR-Einheit. Es verfügt über eine IR-Literaturdatenbank für die vergleichende Interpretation von IR und NIR-Spektren. Hier wurde das Gerät als unabhängige Methode zur Identifizierung der erfassten NIR-Spektren eingesetzt.

2. Versuchsmaterial

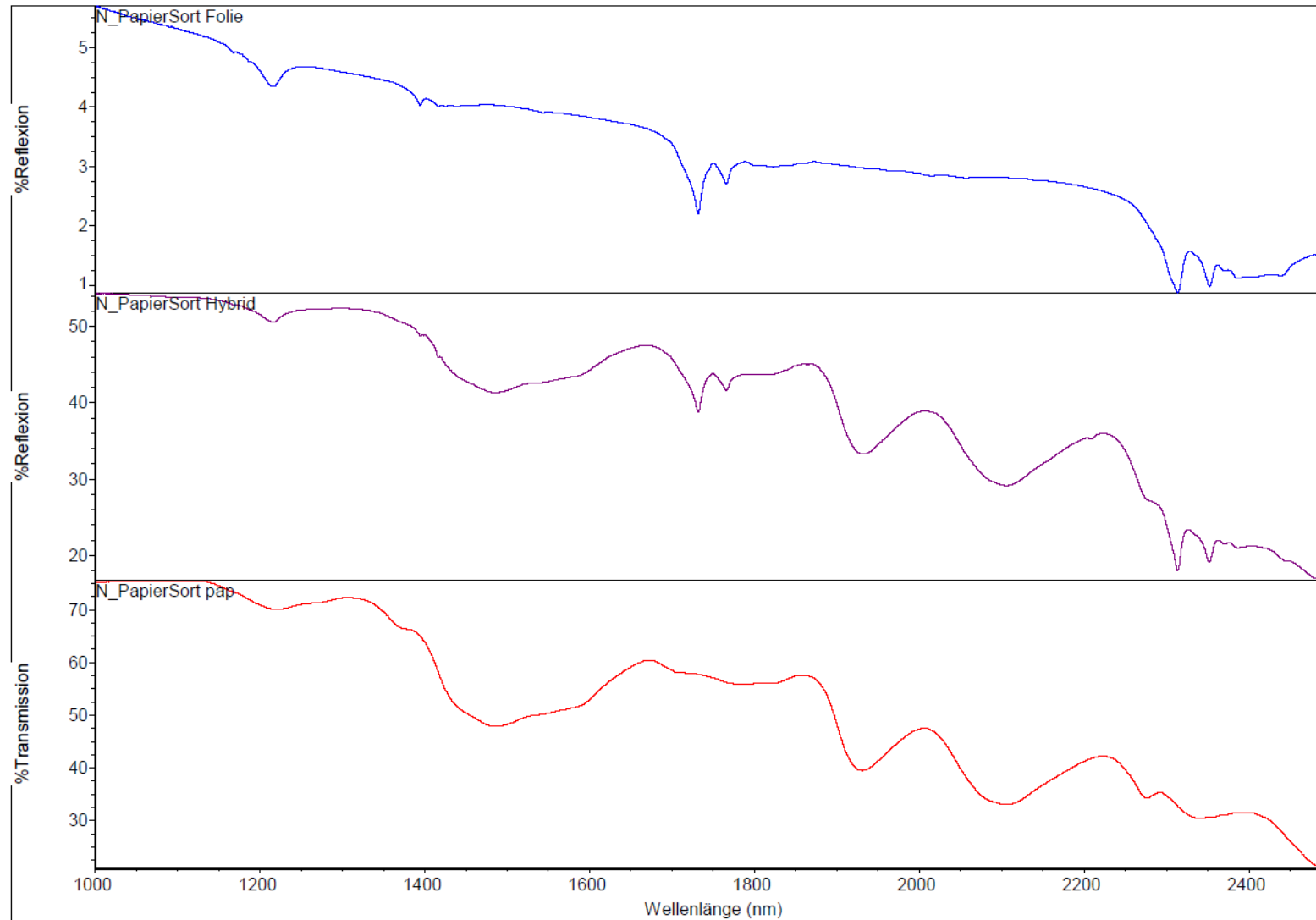


3. Durchschnittsspektren für Vergleich mit Labormessgerät

3.1 NIR-Spektren Aufnahmen Sortieranlage



3.2 NIR-Spektren Vergleichsaufnahmen mit Labormessgerät Nicolet iS50



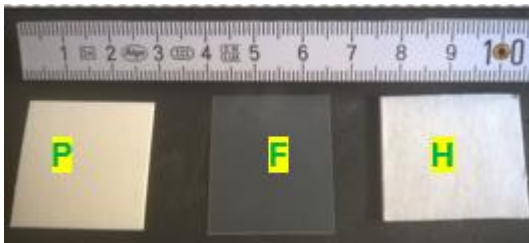
4. Versuche und Ergebnisse

4.1 Sortierversuche

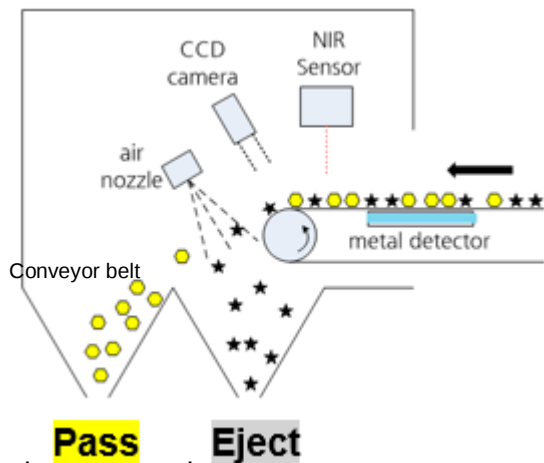
Materialzuführung:

Nr.	Eject Sort.-Ziel	Pass	Materialzuführung
01	Papier	Rest	Gemisch aus Papier und Hybrid
02	Hybrid	Rest	Gemisch aus Papier und Hybrid
03	Folie	Rest	Gemisch aus Papier und Hybrid und danach die Folie in Sequenz

Die Folie wurde aufgrund der ungünstigen Flugeigenschaften nicht im Gemisch, sondern in Sequenz nach dem Gemisch (Papier/Hybrid) in einzelnen Stücken, aufgegeben. Akustisch (Geräusch bei der Ansteuerung der Blasdüse) konnte dann identifiziert werden, ob die Folie ausgeblasen wurde (Eject).



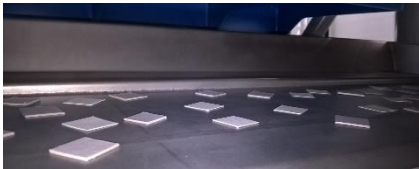
Sortierprinzip Auswurf



! gegen die Wurfparabel gezielt blasen
! Wurfparabel ohne äußere Beeinflussung (Rest)

4.2 Versuchsergebnisse

Nr.	Eject	Pass	Materialzuführung										
01	Papier	Rest	Gemisch aus Papier und Hybrid										
02	Hybrid	Rest	Gemisch aus Papier und Hybrid										
03	Folie	Rest	Gemisch aus Papier und Hybrid und danach die Folie in Sequenz										



Nr.	Sort-Ziel Eject Fraktion	Aufgabe Total [Stk.]	Aufgabe Papier [Stk.]	Aufgabe Hybrid [Stk.]	Aufgabe Folie [Stk.]	Eject Papier [Stk.]	Eject Hybrid [Stk.]	Eject Folie [Stk.]	Pass Papier [Stk.]	Pass Hybrid [Stk.]	Pass Folie [Stk.]	Sort.Quote Sort-Ziel	
01Σ	Papier	120	60	60	X	58	0	X	2	60	X	96,6	%
01.01	Papier	40	20	20	X	19	0	X	1	20	X		
01.02	Papier	40	20	20	X	20	0	X	0	20	X		
01.03	Papier	40	20	20	X	19	0	X	1	20	X		
02Σ	Hybrid	120	60	60		4	60	X	56	0	X	100	%
02.01	Hybrid	40	20	20	X	2	20	X	18	0	X		
02.02	Hybrid	40	20	20	X	0	20	X	20	0	X		
02.03	Hybrid	40	20	20	X	2	20	X	18	0	X		
03Σ	Folie	180	60	60	60	0	0	58	60	60	2	96,6	%
03.01	Folie	60	20	20	20	0	0	20	20	20	0		
03.02	Folie	60	20	20	20	0	0	19	20	20	1		
03.03	Folie	60	20	20	20	0	0	19	20	20	1		

4.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Die Versuchsmaterialien sind als Gemisch in ihren unterschiedlichen Flugeigenschaften nicht optimal für das Sortierprinzip (Material in Gegenrichtung aus Wurfparabel über Luftstöße ausschließen). Die Gewichtsverhältnisse betragen $\approx 9:1$ Hybrid / Folie und $\approx 3:1$ Hybrid / Papier. Die Folie wurde wegen ihrer ungünstigen Flugeigenschaften nicht im Gemisch aufgegeben, sondern in Sequenz nach dem Gemisch (Papier/Hybrid). Akustisch (Blasdüsenansteuerung) konnte so identifiziert werden, ob die Folie ausgeblasen würde (Eject).

Papier wurde mit einer Sortierquote von 96,6 % aus dem Gemisch Papier/Hybrid getrennt. Die Fehlquotelag bei 3,4%.

Hybrid wurde mit einer Sortierquote von 100 % aus dem Gemisch Papier/Hybrid getrennt. Es ergab sich eine Übersortierung von 2,4% Papier.

Folie wurde mit einer Sortierquote von 96,6 % erkannt. Die Fehlquote lag bei 3,4%. Vereinzelt wurde beobachtet, dass sich Folienteile auf dem fahrenden Gurtband hochkant stellten, was eine Erklärung für die Nichterkennung sein könnte.

Im Spektrum des Hybrid-Materials lassen sich Charakteristika von beiden Komponenten finden. Das Material ist somit eindeutig als Hybrid identifizierbar.

Zwischen den Spektren der Vor- und Rückseite des Hybrid-Materials wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Der NIR-Sortierer im Technikumsmaßstab kann das Hybrid-Material von den reinen Komponenten unterscheiden und aussortieren.