

# **PROPAKMA**

Projekte • Papier • Karton  
Management • Labor

**Studie**

**Grundlagen zu faserbasierten  
Verpackungen mit Barrierebeschichtung  
Anforderung an die Barriere**

**03.07.2023**

von: Dr. techn. Arne Krolle

## **Aufgabenstellung**

Faserbasierte Verpackungen benötigen in vielen Fällen Barrieren zum Schutz der Produkte. Nach Ihrem Gebrauch sollen und müssen diese Verpackungen zu einem möglichst großen Anteil stofflich verwertet werden. Standardprozesse in der Altpapieraufbereitung sind dafür oft nur bedingt oder überhaupt nicht geeignet. Eine angepasste Aufbereitungstechnologie ist im Wesentlichen nur für gebrauchte Flüssigkeitskartons etabliert. Durch die Schließung der Produktion bei den Delkeskamp Verpackungswerke wird ein wesentlicher Abnehmer spezieller Altpapierqualitäten nicht mehr zur Verfügung stehen.

Zweck der Studie ist eine Zuordnung der Barriereverpackungen und ihrer Ausgestaltung zur Aufbereitungstechnik und zu erwartenden Hindernissen. Die Studie kann damit eine Grundlage für die Produktgestaltung, für das Sammel- und Sortierkonzept, die Auslegung und den Betrieb von Aufbereitungsprozessen sowie zur Eignung für die aus den Halbstoffen herzustellenden Rezyklate bieten.

Die Allianz 4evergreen hat im Frühjahr 2022 einen Leitfaden zur Gestaltung faserbasierter Verpackungen veröffentlicht, der sich allerdings nur auf die Eignung in einem Standard-Aufbereitungsprozess bezieht.

### **Ergebnis:**

Die Anwendung des Designguides für die Herstellung von faserbasierten Verpackungen und die Bewertung des Übergangs auf das Wasser ist ein richtiger, aber unvollständiger Ansatz. Die geeigneten Instrumente zur Verpackungsbewertung nach der 2022 vorgestellten Bewertung nach CEPI weiter spezifiziert. Eine Erweiterung der Methode RH 025 der PTS gilt aktuell als unzureichend. Die INGEDE arbeitet gerade an einer weiteren Methode, um die gesetzlich geforderte Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen auf die Papierherstellung zu verbessern.

### **Ersteller:**

Dr. techn. Arne Krolle, Papieringenieur mit über 30-jähriger Erfahrung in der internationalen Papierindustrie. Er ist Mitglied im Bundesverband deutscher Gutachter und Sachverständigen für Papierherstellung, Papierverarbeitung und Papierrecycling. Er ist Senior Projektmanager bei der PROPAKMA GmbH Gerokstrasse 40, 71234 Bietigheim–Bissingen.

[Arne.Krolle@Propakma.com](mailto:Arne.Krolle@Propakma.com); (+49 (0) 172 21 300 55)

### **Auftraggeber:**

Veolia Umweltservice GmbH; Hammerbrookstrasse 69, 20097 Hamburg  
Forum Rezyklat, % GS1 Germany GmbH, Maarweg 133, 50825 Köln

### **Inhalt:**

1. Rechtlicher Rahmen	Seite 5
2. Entsorgungswege für Verpackungen	Seite 10
3. Grundlagen der Barrieren im Verpackungsbereich	Seite 13
4. Altpapiersorten in der Altpapieraufbereitung	Seite 24
5. Beschreibung der Altpapieraufbereitung	Seite 26
6. Bestimmung der Rezyklierbarkeit	Seite 37
7. Fazit	Seite 40

## Einleitung:

Die Verpackungsindustrie muss sich in zunehmendem Maß mit der Technologie der Barrieren in den faserbasierte Barriere - Verpackungen beschäftigen, da sich die rechtlichen Rahmenbedingungen, aber auch der Marktdruck der Käufer zunehmend mit dem Thema Plastikvermeidung beschäftigt.

Das Hauptproblem für die Haltbarkeit von Lebensmitteln ist die Durchlässigkeit der Verpackung gegenüber Sauerstoff und Wasserdampf, sodass sich die Forschung vielfach auf die Optimierung dieser Barriereigenschaften konzentriert. Es wurde gezeigt, dass ein Polymerfilm den Schutz des Lebensmittels verbessern kann

Die Design-Guideline „Kreislaufwirtschaft durch Design von faserbasierten Verpackungen“ von 4evergreen weist den Bestandteilen von Verpackungen eine Ausrichtung für die Rezyklierbarkeit zu. In dieser Guideline werden zwischen Standard – Altpapierstoffaufbereitungen und speziellen Stoffaufbereitungen unterschieden. Dementsprechend werden Bewertungen zu den einzelnen Bestandteilen aus der

- Papierherstellung
- Papierbeschichtung
- Drucken
- Kleben
- Applizieren

Im Hinblick auf die Rezyklierbarkeit vorgenommen. Insbesondere werden auch Papierverbunde, bzw. Barrieren in Verpackungen explizit betrachtet. In dieser Studie werden die Aspekte des Designguides vertieft und erläutert. Damit soll es den Inverkehrbringern von Verpackungen erleichtert werden zwischen unterschiedlichen Verpackungen zu unterscheiden, um deren Rezyklierbarkeit besser einstufen zu können.

Die Anforderungen an die Verpackungen entstehen sowohl aus

- Marktanforderungen der Kunden (Umweltbewusstsein)
- Rechtlichen Rahmenbedingungen
- Technischen Rahmenbedingungen der Verarbeitbarkeit
- Rahmenbedingungen der Lagerfähigkeit der verpackten Produkte
- Rahmenbedingungen in den Entsorgungswegen und den Entsorgungskosten

Aus diesem Grund werden bei faserbasierten Verpackungen multilayer Filme oder Polymerblends eingesetzt, welche zum Teil den Zusatz von weiteren Additiven erfordern. Dies erhöht die Produktionskosten erheblich und sorgt für einen komplizierteren Zulassungsprozess. Um dies zu vermeiden, ist die industrielle Nachfrage an einschichtigen Barriersystemen ungebrochen hoch.

Die industrielle Praxis zeigt, dass bereits neue Verpackungen z.B. für flüssige Lebensmittel mit anderen polymeren Barrieren auf den Markt gekommen sind, welche dieser Definition nicht mehr vollständig entsprechen. Verpackungen für Kühlware, insbesondere Joghurt, Pudding und andere milchhaltige Produkte sind nur noch an ihren Verschlüssen als Material-Kombinationen (PPK und einseitige Barriere oder PE-Film) erkennbar.

Die industrielle Praxis und die einschlägigen Studien unterscheiden bei den PPK-Verbunden in

- Einseitig beschichtete PPK-Verbunde
- Zweiseitig beschichtete PPK-Verbunde

Die Beschichtung von Papieren mit einer geschlossenen wasserundurchlässigen Schicht reduziert die Penetrationsgeschwindigkeit von Wasser in das Fasernetzwerk. Das eindringende Wasser zerstört die vorhandene chemisch-physikalische Verbindung und ermöglicht die Vereinzelung der Fasern durch die mechanische Zerfaserung.

Teilweise wird diese Unterscheidung durch eine Definition von nassfestem Papier ergänzt. Als nassfest werden Papiere bezeichnet, bei denen die Zerfaserung durch spezielle chemische Verbindungen im Faserverbund aktiv behindert ist. Nassfeste Additive bilden eine feste chemische Bindung, welche sich durch die Zugabe von Wasser nur erschwert auflösen. Die Penetration des Wassers in das Fasergefüge wird behindert. Die Unterscheidung unterschiedlicher Stufen von Nassfestigkeit beziehen sich vor allem auf die mögliche Zerfaserbarkeit der Produkte in einer repräsentativen Stoffaufbereitung. Diese Materialien könnten ggf. den Prozess der Zerfaserung stören und erhöhen den Anteil an ausgetragenen Prozessrejektes.

Die Mindestanforderungen als jährlicher Kommentar zur Umsetzung der Verpackungsverordnung in Deutschland zeigt in 2022 erstmalig eine Verantwortung des Inverkehrbringers von Verpackungen gegenüber den Bestandteilen in der Verpackung auf, welche den Recyclingprozess stören können. Explizit sind auch die Bestandteile der wässrigen Phase nach der Zerfaserung von Verpackungen zu bewerten. Damit erhöht sich der Fokus von der Betrachtung der verwertbaren Faserstoffe aus dem Zerfaserungsprozess auf eine holistische Betrachtung des Gesamtprozesses.

Die Einführung von neuen Rohstoffen, insbesondere im Bereich der Barrieren und Klebstoffe hat bereits in Einzelfällen negative Auswirkungen auf den Papierherstellungsprozess gezeigt. In diesen Fällen wurde eine kritische Menge an Barriereverpackungen überschritten, sodass die bestehenden Systeme voller klebriger Verunreinigungen in der Trockenpartie der Papiermaschine waren. Das führt zu Löchern und zu Bahnabrissen. Eine Produktion ist nicht möglich.

# 1. Rechtlicher Rahmen

## 1.1 Begriff Verpackung

Verpackungen sind aus beliebigen Materialien hergestellte Erzeugnisse zur Aufnahme, zum Schutz, zur Handhabung, zur Lieferung oder zur Darbietung von Waren, die vom Rohstoff bis zum Verarbeitungserzeugnis reichen können, vom Hersteller an den Vertreiber oder Endverbraucher weitergegeben werden und

1. typischerweise dem Endverbraucher als Verkaufseinheit aus Ware und Verpackung angeboten werden (Verkaufsverpackungen); als Verkaufsverpackungen gelten auch Verpackungen, die erst beim Letztvertreiber befüllt werden, um die Übergabe von Waren an den Endverbraucher zu ermöglichen oder zu unterstützen (Serviceverpackungen) oder b) den Versand von Waren an den Endverbraucher zu ermöglichen oder zu unterstützen (Versandverpackungen),
2. eine bestimmte Anzahl von Verkaufseinheiten nach Nummer 1 enthalten und typischerweise dem Endverbraucher zusammen mit den Verkaufseinheiten angeboten werden oder zur Bestückung der Verkaufsregale dienen (Umverpackungen) oder

die Handhabung und den Transport von Waren in einer Weise erleichtern, dass deren direkte Berührung sowie Transportschäden vermieden werden, und typischerweise nicht zur Weitergabe an den Endverbraucher bestimmt sind (Transportverpackungen); Container für den Straßen-, Schienen-, Schiffs- oder Lufttransport sind keine Transportverpackungen<sup>1</sup>.

Verpackungen erfüllen unterschiedliche Funktionen im Bereich:

- Funktionalität (Transport, Lagerung und Handhabung)
- Marketing (Identifikation, Information, Präsentation)
- Recyclingfähigkeit (Entsorgungswege, Wertstoffverwertung)
- Rechtskonformität (Kreislaufwirtschaft, Verbraucherschutz)

Die technischen Anforderungen an Verpackungen sind vielfältig:

- Barriere-Eigenschaften (Wasser, Wasserdampf, Fett, Sauerstoff und Aroma)
- Lichtschutz (Haltbarkeit Produkt)
- Mechanische Festigkeit (Stapelbarkeit, Verarbeitbarkeit)
- Spezifische Eigenschaften (Bedruckbarkeit, Sterilisierbarkeit, Siegelfähigkeit)

Die Summe dieser Eigenschaften lassen sich häufig mit einem Monowerkstoff nicht erfüllen.

<sup>1</sup>(Quelle: Gesetz zur Fortentwicklung der haushaltsnahen Getrennterfassung von wertstoffhaltigen Abfällen 2017)

Verbundverpackungen kombinieren verschiedene Materialien, um eine ökonomische technische Lösung für diese Forderungen zu erfüllen. Dabei werden zwischen verschiedenen Herstellverfahren unterschieden.

1. Beschichten von Papier oder Karton mit Barrieremitteln, welche eine eigene Schicht bilden, um die Penetration oder Migration des Verpackungsgutes oder auch von Wasser zu behindern.
2. Kaschieren, sowie Extrudieren von zwei flächigen Materialien (Papier, Folie) durch einen kraftschlüssigen Verbund. Einseitige oder zweiseitige Kaschierung ist möglich.
3. Metallisieren ist der Auftrag von Metall (meist Aluminium) über eine Bedampfung auf eine Trägerschicht. Diese Schicht ist Aroma- und Sauerstoffundurchlässig.

In der Industriellen Praxis wird bei einem Verbund von einem Auftrag einer geschlossenen nicht porösen Schicht mit spezifischen Materialeigenschaften auf der Faserschicht ausgegangen.

Die gesetzliche Basis für die Identifikation ist im Verpackungsgesetz geregelt.

- Das VerpackG ist ein Gesetz zur Regelung der Produktverantwortung nach § 23 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) für Verpackungen. Begriffsbestimmungen (Verkaufs-, Service- und Umverpackungen, restentleert etc.) sind § 3 VerpackG zu entnehmen.
- Der Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG.
- Die europäische Norm DIN EN 643 legt Sorten für Altpapier und ihre Zusammensetzung fest, die als Rohstoff für das Recycling bei der Herstellung von Papier- und Kartonprodukten in der Papierindustrie genutzt werden.

Die Definition von Verbundverpackungen ist in den Gesetztexten und einschlägigen Normen nicht exakt gleich definiert.

1. Verbundverpackungen sind Verpackungen aus zwei oder mehr unterschiedlichen nicht von Hand trennbaren Materialarten (§3 Abs.5 VerpackungsG). Zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von Verbundverpackungen werden hierunter solche Verpackungen verstanden, bei denen keine Materialart einen Masseanteil von 95% überschreitet (§16 Abs.3 VerpackG). Wenn die Hauptmaterialkomponente einen Masseanteil von 95 % an der Verbundverpackung überschreitet, ist die nach Satz 3 einer Verwertung zugeführte Verbundverpackung vollständig auf die Quote der Hauptmaterialart anzurechnen.
2. Der Mindeststandard beschreibt sonstige Verbundverpackungen als systemverträgliche Artikel aus PPK (Papier, Pappe, Karton), sowie Verbunde auf PPK-Basis inkl. Nebenbestandteilen. Dabei werden Getränkeverpackungen, Wachsbeschichtungen und Bitumenpapier exkludiert.
3. Getränkeverpackungen, sind geschlossene oder überwiegend geschlossene Verkaufsverpackungen für flüssige Lebensmittel, die zum Verzehr als Getränk bestimmt sind (§3 Abs.2 VerpackungsG).
4. Flüssigkeitskartons nach dem Mindeststandard sind, systemverträgliche Verkaufsverpackungen aus Kartonverbundmaterialien bestehend aus Karton/PE oder Karton/Aluminium/PE zur Abfüllung von flüssigen oder fließfähigen Produkten (flüssig, pastös oder fließfähig-stückig) inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüsse etc.
5. Getränkekartons nach DIN EN 643 sind gebrauchte Getränkekartonverpackungen mit Kunststoffbeschichtung (mit oder ohne Aluminiumanteil), die mindestens 50 % Massenanteile an Fasern beinhalten
6. Eine weitere Definition für PPK-Verbunde findet sich in der DIN 13193, die zwischen Packmittelkomponenten und Verpackungsbestandteilen unterscheidet. Diese sind wie folgt

definiert: Packmittelkomponenten sind ein Teil der Verpackung, der von Hand oder unter Verwendung einfacher mechanischer Mittel getrennt werden kann. Verpackungsbestandteile sind Teile der Verpackung, aus denen die Verpackung oder die Packmittelkomponenten hergestellt sind und die nicht von Hand oder unter Verwendung einfacher mechanischer Mittel getrennt werden können.

7. Die DIN 55405 wählt eine ähnliche Definition, die allerdings die Begriffe Verbundpackmittel und Verbundpackstoffe einführt, die wie folgt definiert werden: Verbundpackmittel sind Packmittel, die für eine Eigenschaftsoptimierung aus mindestens einem Verbundpackstoff, verschiedenen Werkstoffen oder beiden zuvor genannten dauerhaft zusammengefügt sind. Sie sind nicht von Hand oder mit einfachen physikalischen Mitteln zu trennen. Der Begriff Verbundverpackung wird hier synonym verwendet. Verbundpackstoff beschreibt einen Packstoff, bei dem mindestens zwei Werkstoffe flächig zum Zwecke zur Eigenschaftsoptimierung verbunden sind. Verfahren der Oberflächenveredelung, wie z.B. Bedruckung, Bedampfen, Lackieren, Papierstreichen, führen im Allgemeinen nicht zu Verbundpackstoffen<sup>1</sup>.
8. Im Anhang B.15 der DIN 55405 wird die Definition der Verbundverpackung konkretisiert: „Verbundverpackungen im Sinne dieser Verordnung sind Verpackungen aus unterschiedlichen, von Hand nicht trennbaren Materialien, von denen keines einen Masseanteil von 95 von Hundert überschreitet. Unter Verbundverpackungen sind Verpackungen zu verstehen, die sich aus verschiedenen Materialien zusammensetzen, deren Bestandteile nicht manuell getrennt werden können; keiner dieser Bestandteile darf einen festgelegten Prozentsatz des Gewichts überschreiten. Dieser wird gemäß dem Verfahren des Artikels 21 der Richtlinie 94/62/EG festgesetzt.

## 1.2 Rechtlicher Rahmen für Verpackungen

Gemäß dem Verpackungsgesetz (VerpackungsgG) müssen die erfassten restentleerten Verpackungen nach Maßgabe des §8 Absatz 1 des KreislaufwG vorrangig einer Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zugeführt werden.

Dabei ist gemäß des §16 des VerpackungsgG die Verwertungsquote von (Stand 01.01.2022)

- 90% bei Papier, Pappe, Karton (PPK)
- 80% bei Getränkekartonverpackungen
- 70% bei sonstigen Verbundverpackungen

nachzuweisen. Verbundprodukte, welche als Hauptkomponente einen Wertstoff mit mehr als 95% Masseanteil besitzen, können dem Massenstrom der Hauptkomponente zugeordnet werden. In diesem Zusammenhang ist es wesentlich den Massenstrom von PPK-Verbunden in die haushaltsnahe Sammlung zu betrachten. Die zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) hat die Aufgabe diesen Massenstrom an restentleerten Verbundverpackungen und Flüssigkarton zu dokumentieren.

Nach §14 müssen die Systeme den Haushalten eine vom gemischten Siedlungsabfall getrennte flächendeckende Sammlung zur Verfügung stellen. Diese Sammelsysteme müssen geeignet sein alle bei den privaten Endverbrauchern anfallenden restentleerten Verpackungen aufzunehmen. Die Systeme haben nach §17 die Verpflichtung die Verwertung der nach §14 erfassten restentleerten Verpackungen in nachprüfbarer Form zu dokumentieren.

<sup>1</sup> (Quelle: DIN-Normenausschuss Verpackungswesen, DIN 55405: Verpackung–Terminologie–Begriffe, Berlin, 2014.)

Das Umweltbundsamt (UBA) gibt als Reaktion auf aktuelle Veränderungen der Verpackungen in der industriellen Praxis mit der Zentralen Stelle Verpackungsregister (ZVSR) jährlich einen **Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß §21 Abs.3 VerpackG** heraus. Das UBA sieht den verbindlichen Mindeststandard als wichtige methodische Basis für die Ermittlung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen an. Er gibt Mindestkriterien unter Berücksichtigung der Praxis der Sortierung und Verwertung vor. Bei der Ermittlung der Recyclingfähigkeit sind danach mindestens folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

1. Vorhandensein von Sortier- und Verwertungsinfrastruktur für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling für diese Verpackung,
2. Sortierbarkeit der Verpackung sowie, bei technischer Notwendigkeit, Trennbarkeit ihrer Komponenten,
3. Keine Unverträglichkeiten von Verpackungskomponenten oder enthaltenen Stoffen, die nach der Verwertungspraxis einen Recyclingerfolg verhindern können.

Die Anforderungen für diese Kriterien wurden entsprechend den Entwicklungen im Verpackungssektor aktualisiert und geschärft. Zudem wurde ergänzt, dass Verpackungen aus mehreren Bestandteilen immer als Ganzes zu bewerten sind, wenn ihre Komponenten beim Ge- oder Verbrauch bzw. bei Transport- und Sortiervorgängen nicht zwangsläufig getrennt werden.

Die prognostizierte Zunahme von faserbasierten Verbundverpackungen wird den Anteil an Verbundverpackungen in der haushaltsnahen Sammlung voraussichtlich erhöhen. Eine verpflichtende eindeutige Kennzeichnung des Entsorgungsweges auf der Verpackung ist bisher nicht eingeführt. Die gültige Kennzeichnung wird in den Entsorgungsleitlinien der Kommunen wenig verwendet.

### **1.3 Barrierschichten im rechtlichen Rahmen**

Konzept der funktionellen Barriere wurde in der vierten Änderungsrichtlinie 2007/19/EG (Artikel 7a) Kunststoffrichtlinie 2002/72/EG der die Anforderungen an Materialien und Artikel festlegt, die dazu bestimmt sind mit Lebensmittel in Kontakt zu kommen.

#### **Rechtliche Definition der Barriere:**

Eine funktionelle Barriere aus Kunststoff besteht aus einer oder mehreren Schichten Kunststoff und stellt sicher, dass das Material oder der Gegenstand im fertigen Zustand Artikel 3 der Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 EG der Kunststoffrichtlinie entspricht

Kunststoffe können als partielle funktionelle Barrieren fungieren, wobei deren Merkmale und Wirksamkeit zu bewerten sind. Ist eine funktionelle Barriere aus Kunststoff vorhanden, so können nicht zugelassene Stoffe verwendet werden, sofern sie bestimmte Kriterien erfüllen und ihre Migration unter einer bestimmten Nachweisgrenze liegt.

Funktionelle Barriereigenschaften sind als spezifische Materialkonstanten und thermodynamische Stoffkonstanten beschrieben und ermöglichen eine Materialauswahl. Eine funktionelle Barriere dient dazu, dass die fertiggestellte Lebensmittelverpackung den rechtlichen Anforderungen entspricht. Hierbei handelt es sich um eine Verpackungsstruktur, die es ermöglicht, den Übergang eines bestimmten Teils der potenziell auf das Füllgut migrierenden Stoffe zu verhindern

Die funktionellen Barriereigenschaften von Materialien bilden mit dem Verpackungsaufbau einen Massnahmenplan um das Verpackungsgut zu schützen und eine Migration von Materialien in faserbasierten Mehrschichtverbunden zu definieren.



Die Rahmenverordnung Nr. 1935/2004 gilt entsprechend Artikel 1 für Materialien und Gegenstände, einschliesslich aktiver und intelligenter Lebensmittelkontakt-Materialien und Gegenstände als Fertigerzeugnis:

- a) dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, oder
- b) bereits mit Lebensmitteln in Berührung sind und dazu bestimmt sind, oder
- c) vernünftigerweise vorhersehen lassen, dass sie bei normaler oder vorstellbarer Verwendung mit Lebensmitteln in Berührung kommen oder ihre Bestandteile an Lebensmittel abgeben.

Verpackungen im direkten oder indirekten Lebensmittelkontakt dürfen keine Stoffe in Mengen abgeben, die a) die menschliche Gesundheit gefährden und b) die Zusammensetzung, das Aussehen, den Geruch oder den Geschmack des Lebensmittels beeinträchtigen. In diesem Zusammenhang steht auch die geeignete Auswahl aller Ausgangsmaterialien, so dass diese den vorab festgelegten Spezifikationen und den geltenden Regeln entsprechen. Die Rahmenverordnung EU Nr. 1935/2004 regelt solche Materialien und Stoffe, die mit dem Lebensmittel in Kontakt kommen dürfen. Zugelassene Rohstoffe müssen gemäß den Reinheitsanforderungen von hoher technischer Qualität sein. Gesamtmigrationswerte - für die Summe aller Bestandteile, die maximal auf das Lebensmittel übergehen dürfen - sowie spezifische Migrationsgrenzwerte sind einzuhalten. Materialien müssen auf allen Stufen der Lieferkette rückverfolgbar sein. Diese Prinzipien sind auch mit dem LFGB (Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch) im deutschen Recht verankert

Die Kunststoffrichtlinie EU Nr. 10/2011 (PIM) stellt eine Einzelmaßnahme im Sinne der Rahmenverordnung EU Nr. 1935/2004 dar.

- Lebensmittelkontaktmaterialien setzen keine Kontaminanten in Konzentrationen frei, die als gesundheitsschädlich für den Verbraucher angesehen werden.
- Materialien wirken sich nicht negativ auf die Zusammensetzung, den Geruch oder den Geschmack des Lebensmittels aus.
- Keine CMR (kanzerogen, Mutagen, reproduktionstoxisch) verwendet werden
- Gesamtmigration 10 mg/dm<sup>2</sup>
- Bestimmung der Migration speziell für Verpackungsmaterialien erstellte Prüfnormen- und Verfahren DIN 2002/72/EG. Prüfstimulazien, -dauer, -temperatur
- Optische Aufheller dürfen nicht auf Lebensmittel überwandern. Die Prüfung erfolgt nach DIN EN 648
- Farbmittel dürfen nicht auf Lebensmittel überwandern. Die Prüfung erfolgt nach DIN EN 646
- Hinter einer funktionellen Barriere dürfen in der VO aufgeführte Stoffe verwendet werden, es ist zu prüfen, ob der Grenzwert von 0,01 mg/kg für Stoffe eingehalten wird.

Zwar enthält sie keine direkten Vorgaben für die Prüfung von Lacken im Kontakt mit Lebensmitteln, legt aber für Kunststoff-Materialien im direkten Lebensmittelkontakt die geltenden Grundregeln fest. Dies beinhaltet die Migrationsprüfung, das Konzept der funktionellen Barriere sowie Anforderungen an die Konformitätserklärung. Auch schreibt sie den Globalmigrations-Grenzwert von 60mg/ kg (EU Würfel-Model), substanzspezifische Migrationslimits (SML) und die Einhaltung der Unionspositivliste in der jeweils aktuellen Form vor. Die Einhaltung einer Guten Herstellungspraxis (GMP) fordert die EU Verordnung Good Manufacturing Practice Regulation (EC) No. 2023/2006 für die Herstellung von Lebensmittelverpackungen. Sie beschreibt Anforderungen an die Produktherstellung sowie das Qualitätsmanagement. Die gesetzten Anforderungen kommen insbesondere in zwei Bereichen zum Tragen: in der Produktion und auf Ebene der Produktsicherheit. Gerade hier ist es wichtig, ein gutes Risikomanagementsystem aufzubauen. In dessen Rahmen müssen Stoffe bewertet werden, die dem Produkt absichtlich (Intentionally Added Substances), aber auch unabsichtlich (Non Intentionally

Added Substances) zugegeben werden. Die „Gute Herstellungspraxis“ wird für alle Materialien im Kontakt zu Lebensmitteln gemäß der EU Nr. 1935/2004/EG verbindlich festgelegt. Bindend ist auch die Schweizer Bedarfsgegenständeverordnung (SR 817.023.21), gültig für alle im Schweizer Inland hergestellten Lebensmittelverpackungen, sowie für solche, die aus dem Ausland importiert werden. Hier enthalten ist eine zweiteilige Positivliste an Stoffen, welche für die Bedruckung von Lebensmittelverpackungen verwendet werden dürfen. Durch die Nominierung als Basisanforderung in der Nestlé Guidance Note on Packaging Inks besitzt die Schweizer Bedarfsgegenständeverordnung Relevanz auch über die Landesgrenzen der Schweiz hinaus

Mit dem Verordnungsentwurf zu Kunststoffrecyclingmaterialien im Kontakt mit Lebensmitteln (Ablösung der bisherigen Verordnung Nr. 282/2008) ordnet die EU-Kommission dem Rezyklateinsatz eine hohe Bedeutung zu. Die Beschleunigung und die Erweiterung des Rezyklateinsatzes in Verpackungen mit Lebensmittelkontakt ist ein richtiges und dringend notwendiges Unterfangen und leistet einen Beitrag zur Umsetzung des Green Deals. In diesem Zusammenhang werden auch Barrieren aus PET-Rezyklat verwendet.

## 2. Entsorgungswege für faserbasierte Verpackungen

Die Altpapiersorten sind in der DIN EN 643 in ihren spezifischen Materialzusammensetzungen definiert. Aktuelle Studien zeigen jedoch, dass die Zusammensetzung von Altpapier aus haushaltsnahen Sammlungen sich in der Zusammensetzung verändert. Der reduzierte Verbrauch an gedruckten Informationsträgern und Formularen verschiebt sich zu digitalen Medien. Andererseits verursacht der verstärkte Onlinehandel eine Anreicherung an Verpackungsmaterialien. Die erfolgreiche Trennung der PPK-Verbunde in den gelben Sack, im Gegensatz zu der klaren 95/5 Regelung bei faserbasierten Verpackungen in der blauen Tonne wird vom Verbraucher nur teilweise eingehalten. Eine Verantwortung des Inverkehrbringers oder der Systeme an den Verpackungsbestandteilen auch bei einer ungeplanten Entsorgung in die blaue Tonne ist noch nicht vollständig geklärt.

Die Entsorgungswege der einzelnen Verpackungsarten sind in den unterschiedlichen Ländern bzw. auch in den einzelnen Kommunen innerhalb Deutschlands nicht eindeutig definiert.

	Zeitungen	Magazine	Handzettel/ Flyer	Kataloge	Schulhefte/ -blöcke	Karton- & Papierverpackung	Wellpappe/ Schachteln	Geschenkpapier	Verpackungspapier	Eier-Kartons	Umschläge	Bücher	Verbundmaterial (>5%)	Flüssigkeitskarton	Tiefkühlverpackungen	Tapeten/ Baumaterial	Gewachstes & Metallisiertes Papier	Thermopapier (Kassenzettel)	Selbstdurchschreibepapier	Post-it, selbstklebend	Photopapiere	Hygienepapiere	Nassketten & Etikettenrückseiten	Hygienepapiere (Papierhandtücher)
Umweltbundesamt (D)	+	+	+		+	+	+	+	+	+		+	-	-		-	-	-	-	-		-	-	-
Bild.de	+	+				+	+		+		+					-							-	-
T-online.de	+	+		+		+	+		+		+		-	-		-							-	-
Veolia.de	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-					-	-	-
ALBA.info	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				-						-	-	-
REMONDIS.de	+	+			+	+	+	+	+			+	-	-			-	-	-					
ZAK Kempten	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+												
Stadt Ingolstadt	+	+	+	+	+	+	+	+	+															
Stadt Augsburg	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-					-	-	-

Abbildung 1: Zuordnung von Fraktionen in die Entsorgungswege

	UK	FR	IT	DE	SE	PL	CZ	AT
Graphisches Papier	Restmüll	Gemischtsammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Sonstige Sammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung
Faltschachteln	Restmüll	Gemischtsammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung
Wellpappenverpackungen	Restmüll	Gemischtsammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung
Pizzaschachteln mit Lebensmittelresten	Restmüll	Restmüll	Restmüll	Restmüll	Papiersammlung	Restmüll	Restmüll	Restmüll
Flüssigkeitskartons	Restmüll	Gemischtsammlung	Papiersammlung	Verpackungsabfall	Papiersammlung	Verpackungsabfall	Sonstige Sammlung	Verpackungsabfall
Pappbecher (Einmalgeschirr)	Restmüll	Gemischtsammlung	Restmüll	Verpackungsabfall	Papiersammlung	Restmüll	Restmüll	Restmüll
Beschichtetes (bspw. gewachstes) Papier	Restmüll	Gemischtsammlung	Restmüll	Verpackungsabfall	Papiersammlung	Restmüll	Restmüll	Verpackungsabfall
Lamine (Papierlamine)	Restmüll	Gemischtsammlung	Restmüll	Verpackungsabfall	Sonstige Sammlung	Restmüll	Restmüll	Restmüll
Brief- & Versandumschläge	Restmüll	Gemischtsammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Restmüll	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung
Eierkartons/ Becherhalter	Restmüll	Gemischtsammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung	Papiersammlung

Restmüll
  Gemischtsammlung
  Papiersammlung
  Verpackungsabfall
  Sonstige Sammlung

Abbildung 2: Zuordnung der Verpackungen an die Entsorgungswege. Quelle Vortrag R. Huesmann LEIPA

### Tabelle1 Aufzählung der Entsorgungswege für faserbasierte Verpackungen

#### Was gehört in die (blaue) Papier-Tonne?

In den/die Papiercontainer/-tonne beziehungsweise ein entsprechendes Sammelsystem gehören:

1. Zeitungen/Zeitschriften
2. Verpackungen aus Papier, Pappe und Karton (Lebensmittelkartons müssen unbedingt restentleert sein!)
3. Papiere, Kartons und Pappen aus Büros und Verwaltungen
4. Schulmaterial aus Papier
5. Broschüren/Bücher
6. Unbeschichtetes Geschenkpapier
7. Eierkartons
8. Geschenkkartons

#### Nicht in die blaue Papiertonne gehören:

- Getränkekartons
- Tapeten
- Wachs-, Paraffin-, Bitumen- und Ölpapiere beziehungsweise -pappen
- Selbstdurchschreibepapiere
- Thermopapiere (beispielsweise entsprechende Kassenbons, Parktickets, Belegpapiere und so weiter)
- Nassfest imprägnierte und/oder geleimte Papiere und Pappen
- Mit Kunststofflacken oder -folien hergestellte Lack-, Glacé- und Chromopapiere und -pappen
- Papiere, mit Kleber, der sich nicht durch Wasser lösen lässt (Haftnotizen, Adresstiketten, Selbstklebeverschluss bei Kuverts)

Quelle: Bundesministerium für Umweltschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Im Gegensatz zu den Einstufungen in den unterschiedlichen Systemen gibt das Umweltbundesamt eine scheinbar eindeutige Zuordnung heraus. Die kritische Betrachtung von Barrierepapiere bzw. von Papierverbunden werden in dieser Aufstellung nicht erschöpfend dargestellt. Insbesondere die Vielzahl der neuen Verpackungsvariationen lassen sich da nur schwer zuordnen. Die neuen Biokunststoffe lassen sich einerseits nicht einstufen, andererseits sind sie auch schlechter für den

Verbraucher identifizierbar. Weiterhin sind Materialkombinationen von besser oder schlechter rezyklierbaren Materialien nicht zuzuordnen. Einstufungen von händisch trennbaren Materialkompositionen und Materialkombinationen welche sich nicht offensichtlich einer der genannten Gruppen zuordnen lassen.

- Fasergussvariationen mit hohem Stärkeanteil, und/oder Beschichtung
- Keine Unterscheidung in die unterschiedlichen Stufen der Nassfestigkeit
- Verbundverpackungen
  - Einseitige Verbundverpackungen
  - Zweiseitige Verbundverpackung
- Biokunststoffe
- Polymerkombinationen von Biokunststoffen mit mineralölbasierten Kunststoffen
- Überschreitungen von 95/5% Materialverteilungen #

Die korrekte Identifizierung von Zuordnungen in den gelben Sack, bzw.in die Tonne ist damit schwierig. Versuche zur Kennzeichnung der Zugehörigkeit in begrenzten Gebieten bzw. eindeutige Kennzeichnung auf allen faserbasierten Verpackungen sind nicht durchgängig. Aufgrund der Praxis der Selbsteinschätzung werden dort auch fehlerhafte Zuordnungen dem Verbraucher zugewiesen. Studien haben nachgewiesen, dass ca. 50% der Verbundverpackungen in der blauen Tonne landen.

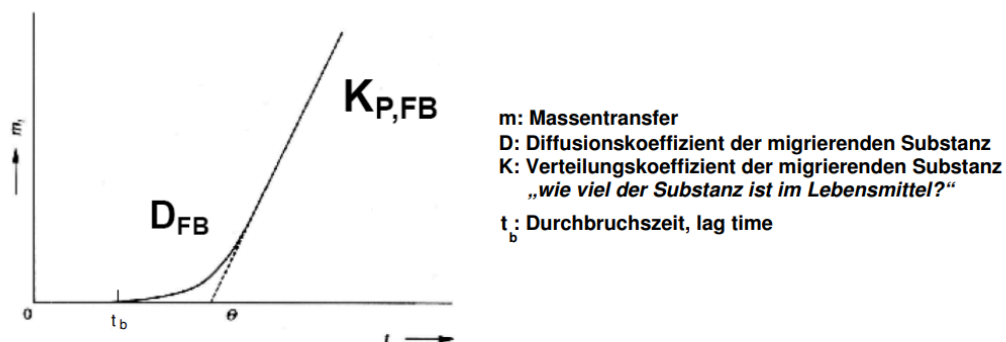
### 3. Grundlagen der Barrieren im Verpackungsbereich

#### 3.1 Definition von Barrieren

Barrieren sind allgemein ein Hindernis zwischen Objekten, welche den Materialfluss zwischen diesen Objekten verhindert, abschwächt begrenzt oder anderweitig steuert.

Die verpackungstechnisch undurchdringliche Barriere wie bei Glas oder Stahl wird bei den faserbasierten Barrieren nicht gleichwertig betrachtet, da die Barrierschicht in allen Fällen einen Materialtransport durch die Barriere zulässt. Barrieren im faserbasierten Verpackungsbereich verhindern nicht generell eine Migration von Bestandteilen sondern verzögern eine Migration einer Substanz.

„Eine funktionelle Barriere ist eine Mehrschichtverpackungsstruktur, bei der eine Schicht den Massentransferprozess einer migrierenden Substanz durch die Verpackung in das Lebensmittel verhindert oder verzögert.“



Anforderung an funktionelle Barriere erfüllt wenn:  $t_b > t_{\text{Haltbarkeit Lebensmittel}}$

Quelle: Pieringer, O., et. al.: Plastic Packaging, Wiley-VCH, Weinheim, 2008 S. 350

Abbildung 3: funktionelle Barriere

Das bedeutet eine Barrierschicht wird bei ihrer Bewertung immer auf den Massentransfer/Fläche und Zeit definiert, wobei bestimmte Lagerbedingungen (Klima), sowie funktionelle Ziel bewertet werden. Damit ist die Materialschichtdicke von wesentlicher Bedeutung, also wie lang der Weg ist welches das Material durch die Barriere zurückzulegen hat. Eine dickere Materialschicht weist erst einmal eine bessere Barriereeigenschaft auf.

Hauptproblem für die Haltbarkeit von Lebensmitteln ist die Durchlässigkeit der Verpackung gegenüber Sauerstoff und Wasserdampf, sodass sich die Forschung vielfach auf die Optimierung dieser Barriereeigenschaften konzentriert.

Folgende Barrieren bilden in der Lebensmittelverpackung die wesentlichen Anforderungen:

- Gegen Wasser
- Gegen Wasserdampf
- Transfer von Mineralöl
- Sauerstoff
- Licht
- Aroma

Je nach Anwendung werden die funktionellen Barrieren mit spezifischen Messmethoden untersucht. Die Messmethoden bewerten damit die Menge an Materialfluss durch die Verpackung. Die Permeation (Durchdringung) des Materials durch die Fläche. Ein faserbasierter Untergrund bildet eine strukturierte Oberfläche, besitzt Kapillaren. Daher ist die eine ideale gleichmäßige Schichtdicke nicht gegeben.

Zusätzlich wird die Barrierschicht bei der Herstellung der Verpackung vielfältig beansprucht:

1. Mechanische Beanspruchungen bei der Rillung und Formung der Verpackung dehnt die Oberfläche. Daher benötigt die Schicht eine Flexibilität
2. Heißsiegelung der Verpackung bildet eine thermische Belastung der Barrierschicht.
3. Chemische Belastung aus dem Füllgut, z.B. Säuren bei Obst oder Alkohol können die ebenfalls die Barriere negativ beeinflussen.

Damit ist die Messung der Barriere einerseits durch den Materialtransport (Diffusion) der unverletzten (idealen) Barriere Schicht nur eine Charakterisierung der verwendeten Lösung gegenüber der Anforderung. Ein Durchbruch der Barriere in den realen Bedingungen wird nur teilweise abgebildet. Die Messungen stellen immer eine Modellierung der Anwendung unter Laborbedingungen dar. Daher sind Anwendungstests bei funktionellen Barrieren notwendig.

### **3.2 Messung des Materialdurchbruchs:**

Funktionelle Barrieren sind nicht alle gleich wirksam. Die Materialkombinationen haben unterschiedliche Wirkungen an die Anforderungen. Aluminium und PET sind sehr gut geeignet, um eine Barriere gegen Mineralöl zu bilden. Zur Prüfung von Barrieren gegen die Mineralölmigration (MOSH/MOAH) wurden eine Testflüssigkeit und ein Absorbermaterial (z.B. Tenax) entwickelt. Die Testmethoden stellen damit eine idealisierte Situation dar, da insbesondere natürliche Produkte eine gewisse Materialvariation haben. Kleine Moleküle penetrieren schneller durch eine Barriere als große Moleküle. Beispielsweise migrieren Palmfett und Hühnerfett deutlich schneller durch Verpackungen als andere Fette.

Grundsätzliche Überlegungen zur Messung von Barrieren

Der naturwissenschaftliche Ansatz betrachtet die Migration von definierten Stoffklassen auf eine ideale Barriere auf einem Trägermaterial. Als Einflussgröße auf die Migration werden ermittelt:

- Die Konzentration des Materials in der Gasphase oder im Material (Karton, Verpackungsgut)
- Das Verteilungsgleichgewicht zwischen Gasphase über dem Karton und der Konzentration im Füllgut.

Die Gleichgewichtskonstante ist eine spezifische Materialkonstante zwischen den Partnern Gasphase/Barriere bei einer bestimmten Temperatur. Die Gleichgewichtskonstante zwischen der Barriere und dem Füllgut wird bei einer guten funktionellen Barriere nicht erreicht, spielt daher innerhalb der Lagerzeit und den Lagerbedingungen eine untergeordnete Rolle.

Daher werden folgende Methoden zur Bestimmung der Permeationrate von Barrieren bestimmt:

#### **3.2.1. Der Aufbau eines Migrationstests**

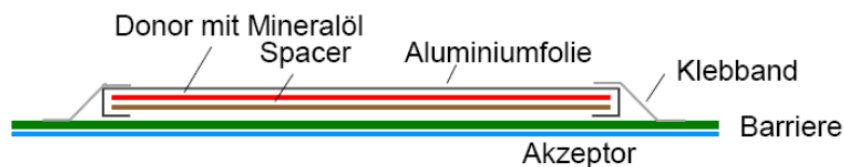
- statischer Akzeptor
- dynamischer Akzeptor

Dieser Test wird mit realem Material und realen Konzentrationen durchgeführt. Zur Verkürzung der Messzeit wird häufig die Temperatur verändert, um die Mobilität der Moleküle zu erhöhen. Bei dynamischen Akzeptoren werden kontinuierliche Stoffströme analysiert. Dabei handelt es sich in der

Regel um einen kontinuierlichen Gasstrom. Proben des Gasstroms können chromatografisch analysiert werden. Dabei kann sich ein Gleichgewicht an Materialtransport als Barrierebruch aufgezeigt werden.

Bei den verwendeten statischen Systemen werden zeitlich versetzte Stichproben verwendet um den Durchbruchzeitpunkt der Barriere (Lag-time) eindeutig zu bestimmen. Der Vorteil der statischen Stichprobe liegt in der einfachen Handhabung. Muster werden in Aluminiumschalen eingegossen, um eine eindeutige Trennfläche zu generieren. Das Prüfmaterial wird aufgegeben und der kumulierte Materialtransport periodisch durch Wägung bestimmt.

Der Migrationstest ist das einfachste Experiment zur Bestimmung der Qualität einer funktionellen Barriere. Er liefert eine Momentaufnahme einer Verpackung mit dem darin enthaltenen Lebensmittel unter den angewandten Kontaktbedingungen. Das Ergebnis eines Migrationstests ist die Menge an Kontaminanten, welche pro Verpackungsfläche und Zeit in das Lebensmittel übergegangen sind. Die Einheit des Migrationstests ist damit der Materialfluss (in  $\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{d}$ ). Alternativ wird der maximale Übergang auf das Füllgut als Menge angegeben ( $\text{mg}/\text{kg}$ ).



- Lagerung bei 60 °C (berechnete Beschleunigung gegenüber 22 °C Faktor 30)
- Periodische Entnahme von Probeschnitten der Rezeptorfolie
- Extraktion der Proben mit Hexan 2 h/RT
- On-line HPLC-GC
- Messung im Bereich 1-10 % Durchbruch

Abbildung 4: Messung der Mineralölmigration MOSH/MOAH

#### Wasserdampfpermeation (WTVR)

Die Permeation von Wasserdampf wird meist durch gravimetrische Messung bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30% und 30°C durchgeführt (GB/T 1037-88). Dazu werden Papiermuster in eine Aluminiumschale montiert und in definierten Zeitabständen die Wasseraufnahme durch das Papier gemessen. Als Akzeptor dient ein hygroskopisches Material wie z.B. getrocknetes Kupfersulfat. Eine vergleichbare Methode ist die Messmethode für beschichtetes Papier (ASTM E-96). Die Diffusion von Wasserdampf kann ebenfalls durch eine Berechnung auf andere Materialschichtdicken übertragen werden.

#### Sauerstoffpermeation (OTR)

Die Sauerstoffpermeation in die Verpackung oxidiert die meisten Lebensmittel, bzw. lässt das Füllgut altern. Die Sauerstoffpermeation wird üblicherweise in  $\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot 24\text{h}$  angegeben. Der meiste angegebene Wert liegt für Lebensmittel bei  $10 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot 24\text{h}$  bei 23°C und 50% relativer Luftfeuchtigkeit.

### 3.2.2. Der Permeationstest

Bei einem Permeationstest wird die Eigenschaft einer funktionellen Barriere nahezu unabhängig vom Lebensmittel bestimmt. Es werden in der Regel erhöhte („worst-case“) Konzentrationen verwendet. In diesen Fällen wird der Karton entweder mit Mineralöl oder mit Modellsubstanzen dotiert, welche die Mineralöl- oder andere Kartonkontaminanten repräsentieren.

Die Verwendung von Originalsubstanzen hat den Nachteil, dass es sich oft um Gemische handelt. Die Bestandteile haben jeweils eine eigene Diffusionsrate, häufig diffundieren kleine Moleküle schneller als große Moleküle. Das Gemisch verliert kleine Moleküle in der Mischung. Damit verschiebt sich die Diffusion, was die qualitative Bestimmung erschwert. Die Verwendung von systematisch definierten Ersatzstoffen als Modellsubstanzen mit einzelnen scharf trennbaren Diffusionskonstanten ist bei komplexen Gemischen vorteilhaft. Die spezifische Ermittlung von einzelnen Modellsubstanzen ermöglicht häufig eindeutiger Ergebnisse. Für messtechnisch nicht mehr erfassbare Substanzen können Diffusionskoeffizienten aus dem Molekülvolumen abgeschätzt werden.

Bei der Betrachtung der Mineralölmigration werden die unterschiedlichen Bestandteile je nach Auswirkungen auf den Menschen unterschieden

- MOSH (Mineral Oil saturated Hydrocarbons) gesättigte Kohlenwasserstoffe
- MOAH (Mineral oil aromatic Hydrocarbons) aromatische Kohlenwasserstoffe

Diese Unterscheidung zeigt die spezifische Betrachtung der funktionellen Barrieren je nachdem der Blickwinkel auf die Anwendung betrachtet wird. Hat die Barriere eine

- Optische Funktion (z.B. Fettdichtigkeit bei Tiernahrung, Ansehnlichkeit der Verpackung)
- Transportfunktion (fettdichtes Einschlagpapier, Schutz von Verschmutzungen)
- Nahrungsmittelrechtliche Funktion (Schutz der Verbraucher vor Schadstoffen)

### 3.2.3. Der Einfluss der vorhandenen Materialmenge

Ein einfaches Bewertungskriterium ist die prozentuale Menge, welche durch eine funktionelle Barriere durchdringt. Es wird hierbei die Permeation in Prozent der verfügbaren Menge im Karton angegeben. Als maximale Permeation wurde ein Übergang von maximal 1 % der verfügbaren Menge an Mineralöl im Karton festgelegt. Durch die experimentellen Prüfungen wird demnach die Lagerzeit bestimmt, bei der ein Durchbruch von 1% der dotierten Menge des kontaminierten Materials erfolgt. Bei der Festlegung dieses Kriteriums wird davon ausgegangen, dass das typische Massenverhältnis zwischen Karton und Lebensmittel etwa 1: 10 ist. Die gesamte Menge eines (Modell-)Kontaminanten geht in das Lebensmittel über. Wird eine Konzentration von 10 µg eines Mineralöls pro kg im Lebensmittel als unkritisch angenommen, dann darf somit maximal 0,1 mg/kg Mineralöl im Karton sein. Falls eine funktionelle Barriere unter gegebenen Lagerbedingungen nun lediglich 1 % der Gesamtmenge an Kontaminanten hindurchlässt, darf die maximale Konzentration im Karton nun also 10 mg/ kg betragen. Der Vorteil dieser Bewertungsmethode ist, dass die Konzentration im Karton als Kontrollparameter verwendet werden kann. Das Ziel ist daher, dass die Konzentration der Kontaminanten unterhalb von 10 mg/kg bleibt. Die Bewertung gilt allerdings nur für die angewandten Prüfbedingungen. Die Ergebnisse lassen sich theoretisch auf andere Temperaturbedingungen umrechnen.

Bei der Frage, wie der Übergang von Mineralölbestandteilen aus Kartonverpackungen auf Lebensmittel zu minimieren ist, verweist das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) darauf, dass der Übergang von Mineralölbestandteilen nicht nur durch ihren Gehalt im Verpackungsmaterial, sondern auch durch die Lagerbedingungen und die Art des Lebensmittels beeinflusst wird. „Er kann



durch den Einsatz von Frischfaserkartons, die Verwendung von mineralölfreien Druckfarben bzw. durch die Einbeziehung von funktionellen Barrieren in den Verpackungsaufbau verhindert werden. Dabei muss nicht nur die direkte Lebensmittelverpackung betrachtet werden, sondern auch die Möglichkeit des Übergangs aus Umverpackungen“. Nach dem 3. Entwurf der Mineralölverordnung sind spezifische Migrationsgrenzwerte von 2 mg/kg für MOSH beziehungsweise 0.5 mg/kg für MOAH geplant

#### **3.2.4. Lagerbedingungen und Molekülgröße bei der Migration von Mineralölkomponenten**

In einem Projekt wurden 120 Kartonschachteln verpackten und über längere Zeit bei Raumtemperatur gelagerten Produkte vom deutschen Markt untersucht, um einen Überblick über die Migration von Mineralöl, Weichmachern und Photoinitiatoren, die verwendeten Innenverpackungen und deren Auswirkung auf die Migration zu verschaffen.

Wenn gemäß BfR-Bewertung nur die im menschlichen Körper akkumulierten MOSH über mit einer Kettenlänge von größer C16 berücksichtigt werden, überschritten immer noch 61 Proben (58 %) die 0,6 mg/kg Grenze über zehnfach. Das Konzept stützt sich auf die empirische Feststellung, dass bei Raumtemperatur namhafte Migration bis n-C24 erfolgt und bis ca. n-C28 nur noch in kleinen Anteilen beobachtet wird. Als Potential wurde die Menge von MOSH oder MOAH definiert, welche bis n-C24 in der Gaschromatographie analysiert werden.

Diese Untersuchungen zeigen deutlich, dass die Untersuchungen und die Messmethoden genau betrachtet werden müssen, wenn Messergebnisse miteinander verglichen werden. Die Modellierung der Labormethoden bilden häufig nur einen Teil der realen Bedingungen bei der Anwendung von Verpackungen ab. Bei den rechtlichen Rahmenbedingungen werden die Messmethoden und die Messgrenzen nur teilweise spezifiziert.

#### **3.2.5. Praxisnahe Tests:**

Fettabweisende Eigenschaften von Papier werden mit dem ehemaligen 3M-Kit-Test geprüft, welcher Rizinusöl, n-Heptan und Toluol in verschiedenen Abmischungen enthält. Der Barrieredurchbruch wird durch das auftropfen von Testflüssigkeiten auf die Oberfläche geprüft. Der Durchbruch wird durch die transparente Farbe der Rückseite im Papier bestimmt. Je höher die Zahl der bestandenen Testflüssigkeit ist, desto fettdichter ist das Papier. Die TAAPPI-Norm 559 hat diese Methode als industriellen Standard definiert.

Der Kittest wird sowohl auf der Papierfläche als auch in einem Kreuzfalz angewendet. Die Dehnung der Barriere in der Kreuzfalzung zeigt sehr deutlich, ob eine Verarbeitung des Papiers die Barriereigenschaften verschlechtert.

Parallel wird in der Praxis auch Hühnerfett oder Palmfett als reale Fettmischung im Kreuzfalz verwendet, um eine reale Anwendung zu simulieren.

### 3.3. Grundlagen Polymere für Barrieren

Die Struktur einer Barrierschicht wird vorrangig durch die verwendeten Polymere bestimmt. Es handelt sich dabei um Thermoplaste, welche in den unterschiedlichen Verarbeitungsschritten die technischen Eigenschaften beeinflussen. Die polymeren Bestandteile lassen sich auf verschiedene Weise charakterisieren

- Monolayer Multilayer
- Monomaterial/Multimaterial
- Polarität der Moleküle, damit Durchlässigkeitswiderstand gegenüber anderen Materialien
- Glasübergangstemperatur – Temperatur bei der das Polymer erstarrt. Zusammenhang zur Flexibilität im Polymerfilm ist gegeben.
- Kristallinität des Polymers im Verarbeitungszustand
- Gehalt an Additiven zur Steuerung von Flexibilität (Weichmacher, Dispergiermittel)
- Homogenität der Polymerschicht Anteil von Variationen der Polymere (Biopolymere)
- Mechanische Stabilität der Polymere (Abrasion, Steifigkeit, Festigkeit)
- Löslichkeit im Wasser
- Molekülgrößenverteilung

Aus den vorhandenen Variationen und Kombinationsmöglichkeiten kann eine Vielzahl von technischen Lösungen erarbeitet werden. Folgende Gesichtspunkte werden bei der Materialkombination beachtet:

- Barriereigenschaften
- Filmbildung (Applikation)

#### 3.3.1. Übersicht Polymere Barrieremittel

Eine Übersicht der aktuellen verwendeten Polymere zur Barrierebeschichtung werden in der folgenden Übersicht zusammengestellt. Dabei handelt es sich nur um eine allgemeine Übersicht, da in den meisten Fällen Polymergemische verwendet werden, um sowohl technische als auch verfahrenstechnisch optimale Bedingungen zu erreichen. Die Anzahl der Anwendungen sind zahllos, die Rezepturen nicht geheim. Damit jedoch die verwendeten Abkürzungen zumindest allgemein bekannt sind, wurden zusammengestellt.

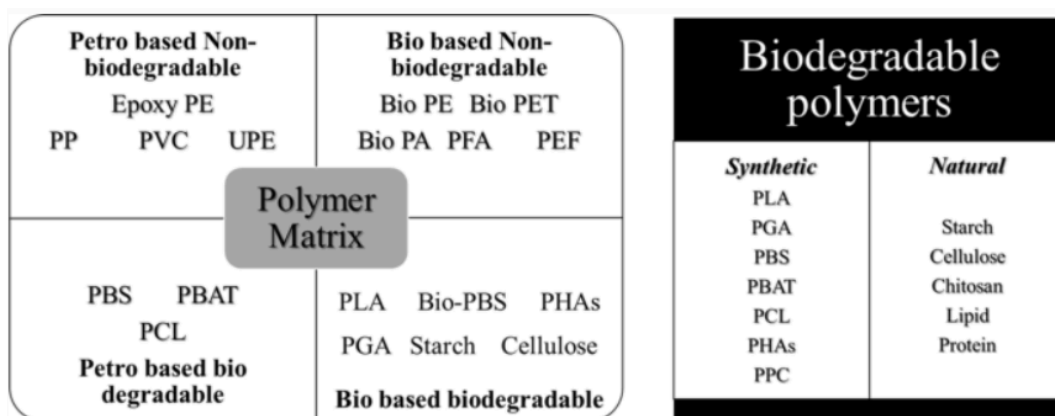


Abbildung 5: Übersicht über die Barrierpolymere

### **3.3.2. Biobasierte Polymere**

#### Polylactat (PLA)

Polylactat ist ein synthetisches Polymer, welches aus Milchsäure durch Fermentation gewonnen wird. Es ist biologisch abbaubar, sowohl in wässriger Umgebung als auch kompostierbar. Kommerzielles PLA hat eine amorphe Struktur, ist transparent und lässt sich in einer Strichapplikation auftragen. Die Barriereigenschaften können durch eine Erhöhung der Kristallinität erhöht werden. Die energieintensive Steuerung der Kristallinität kann die Wasserdampfbarriere verdoppelt werden.

#### Polyglycolsäure (PGA)

PGA hat eine ähnliche Struktur wie PLA, weist jedoch deutlich bessere Barriereigenschaften auf. Zusätzlich hat es auch hohe mechanische Festigkeit und ist damit sehr gut für Verpackungen geeignet. Die Barriereigenschaften liegt ca. zehnfach über PLA

#### Polyhydroxykantonase (PHA)

PHA gehört in die Gruppe der PHBH und PHBV. Diese Gruppe hat sehr gute Sauerstoff und Wasserdampfdichtigkeit. Die Polymere sind biologisch abbaubar, wasserunlöslich und bilden mit den hohen Barriereigenschaften eine echte Alternative zu den mineralölbasierten Polymeren. Der Kristalline Charakter von mehr als 60% von PHBV mit weniger polare Gruppen erklärt die hohen Barriereigenschaften. Diese Gruppe weist Nachteile im Bereich der Materialalterung und der schlechten Flexibilität. Dadurch ergeben sich nur sehr spezifische Prozessfenster für die Verarbeitbarkeit.

#### Polybutylensuccinat (PBS)

PBS ist ein biobasierter und kompostierbarer aliphatisches Polyester. Die Produktionskosten liegen signifikant höher als bei den mineralölbasierten Polymeren. Die Wasserdampfdichtigkeit ist vergleichbar mit PLA und die Sauerstoffbarriere mit PBS.

#### Polycaprolactone (PCL)

PCL ist ein bioabbaubares Polymer auf der Basis von Caprolactat. PCL hat eine niedrige Sauerstoff- und Wasserdampfbarriere. Meist wird PCL in Kombination mit anderen Polymeren verwendet.

#### Stärke

Stärke ist ein bioabbaubares Polysaccharid aus verschiedenen Pflanzen. Insbesondere Markersbensenstärke hat sehr gute Barriereigenschaften. Nach einer physikalischen, chemischen oder biochemischen Modifikation besitzt Stärke hervorragende filmbildende Eigenschaften. Die Verbindung mit PVOH ergibt eine gute Wasserdampfbarriere, mit Chitosan eine gute Ölbarriere.

#### Zellulose

Zellulose ist ein Polysaccharid und das am meisten verwendete natürliche Polymer auf der Erde. Zellulosederivate wie Carboxymethylcellulose in verschiedenen chemischen Varianten (CMC, EC, HPMC, MC, HPC, HPMC, HFC) werden sowohl in der Papierherstellung als auch in der Papierbeschichtung eingesetzt. Nanocellulose (CNF) ist eine weitere Modifikation, welche bei einem Auftrag von 10g/m<sup>2</sup> sehr gute Barriereigenschaften aufweist.

#### Chitosan

Chitosan ist ein weiteres bioabbaubares Polysaccharid auf der Basis von tierischen Quellen. Chitosan weist zusätzlich eine hohe Steifigkeit auf.

Weitere Funktionalisierungen von natürlichen Molekülen (Proteinen, Polysacchariden, Cutin) aus Hülsenfrüchten, Soja, Alginaten Sonnenblumen und Tomaten sind technisch verfügbar.

### **3.3.3. Mineralölbasierte Barrieremittel**

#### Polyethylen (PE)

Polyethylen ist die am weitesten verbreitete Barriere. Sie wird sowohl als Folie appliziert, als auch als wässrige Komponente in den Papierstrich aufgetragen. Polyethylen ist sowohl siegfähig als auch sehr dehnfähig. Durch das weite Verarbeitungsfenster lässt sich PE leicht in die Verarbeitungsprozesse integrieren. PE wird in unterschiedlichen Modifikationen verwendet LDPE (low density PE) oder HDPE (high density PE). Sie unterscheiden sich in ihrer Dehnbarkeit, in ihren Schrumpfungseigenschaften und der Stabilität. Die neuere Variante LLDPE (linear low density PE) weist eine extreme Dehnfähigkeit bis zu 300% auf. Daher wird dieses Material vor allem für Stretchfolien verwendet.

#### Polypropylen (PP)

PP ist sehr ähnlich zu PE, jedoch deutlich härter, und thermisch höher belastbar. Aktuell wird auch Biobasiertes PP angeboten. Dieses BIO-PP ist deutlich teurerer, wird daher häufig nur teilweise in ein PP-Compound eingesetzt. Beide Varianten lassen sich gemeinsam recyceln.

#### Polystyrol (PS)

Polystyrol wird weitgehend in der Lebensmittelverpackung als Monomaterial eingesetzt. In der Kombination mit faserbasierten Verpackungen wird es ein Polymerblend eingemischt. Im Recyclingprozess ist geschäumtes PS durch die Dichteunterschiede leicht zu trennen, wird jedoch bei der Entsorgung der Rejekte eher als problematisch eingestuft, da das Monomer Umweltkritisch ist. In Verbrennungsprozessen oder anderen Entsorgungswegen müssen die Styrolmonomere gezielt behandelt werden.

#### Paraffin

Paraffin wird bereits seit vielen Jahren als Beschichtungsmittel für Lebensmittelumschlagpapier, Obstschalen und andere Verpackungen als wasserabweisende Beschichtung verwendet. Im Recyclingprozess ist die niedriger Schmelztemperatur von ca. 55°C problematisch, da es klebrige Verunreinigungen ergibt.

#### Polyethylenterephthalat (PET)

PET reduziert signifikant die Mineralölpenetration (MOSH/MOAH) sowohl als Filmauftrag, sowie auch als Eintrag im wässrigen Strich. Durch die breite Verwendung von PET in Getränkeflaschen wird PET bereits signifikant recyclet. Der Einsatz in wässrigen Papierstrichen ist bekannt, aber nicht signifikant umgesetzt.

#### Polyvinylalkohol (PVOH, EVOH)

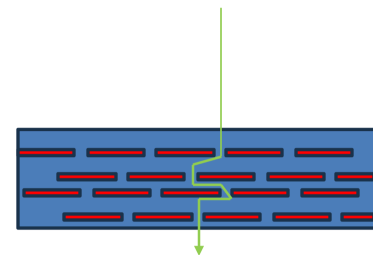
Die PVOH-Gruppe bildet sehr gute Barriereeigenschaften und Filmeigenschaften. Durch die Modifikation können spezifische Eigenschaften erzielt werden. Die Flexibilität des Films und die Siegfähigkeit ist weitgehend in der Verpackung einsetzbar. Die Klebrigkeit bei Temperaturen von > 65°C lassen nur spezifische Arbeitsfenster in der Produktion zu. In der Rezyklierung bilden sich verstärkt klebrige Verunreinigungen.

### 3.3.4. Polymerkomposite

Zur Erhöhung von Barriereigenschaften können in die Polymerstruktur anorganische oder organische Materialien eingebracht werden. Durch die Schichtstruktur verlängert sich der Weg der Permeation, so dass die Penetrationszeit verlängert wird. Diese Zuschlagstoffe müssen sich so mit den Polymeren verbinden, dass bei den Trocknungsprozessen eine rissfreie Struktur entsteht. Die Kombination wird daher mit Additiven gemischt, um eine gute Verarbeitbarkeit und Trocknung zu erreichen. Die komplexen Rezepturen können dadurch in der Rezyklierbarkeit schwierig sein. Die mechanischen Eigenschaften Barrierschicht werden verbessert. Verwendete Zuschlagstoffe sind:

- Kaolin
- Talkum
- Nanokristalline Strukturen z.B. Stärke

Aufgabe der mineralischen Bestandteile innerhalb der polymeren Matrix ist den Penetrationsweg des Materialflusses in der Barriere zu verlängern. Die Komposition der Bestandteile ergeben durch ihre chemischen Oberflächen eine eindeutige Wechselwirkung mit den Materialien. Bei der Applikation der Barrierschicht sollten sich die Bestandteile in einer laminaren Schicht in der Polymermatrix vorliegen, um ihre maximale Wirkung zu erreichen.



Theoretische Verlängerung des Penetrationsweges

Abbildung 6: Polymerkomposite

### 3.3.5. Filmbildung der Polymere

Die Filmbildung ist der Prozess bei dem aus einer Polymerdispersion durch Trocknung ein homogener, transparenter Film gebildet wird. Die minimale Filmbildungstemperatur (MFT) ist die charakteristische Größe zur Beschreibung der Filmbildung. Sie beschreibt die Temperatur ab der ein rissfreier, transparenter Film erhalten wird. Definiert ist die MFT u.a. in der ASTM D2354-98.

Die Filmbildung wird im Allgemeinen in drei Schritte eingeteilt.

- Im ersten Schritt kommt es zum Verdunsten von Wasser bis zu einem Volumenanteil der Partikel von 60-70 %, wodurch die Partikel in Kontakt miteinander kommen und sich im Idealfall eine dichteste Kugelpackung ausbildet. Hier ist die Verdunstungsrate des Wassers am größten.
- Die Deformation der Partikel erfolgt im zweiten Schritt, wenn die Trocknungstemperatur höher als die minimale Filmbildungstemperatur ist. Die stabilisierenden elektrostatischen oder sterischen Kräfte der Partikel werden überwunden und die Verdunstungsrate sinkt drastisch.
- Im dritten Schritt kommt es zur Interdiffusion der Polymerketten, wenn die Trocknungstemperatur höher als die Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) des Polymers ist. Das restliche Wasser entweicht durch Kanäle zwischen den Partikeln und durch Diffusion durch die sich bildende Polymerhaut, wobei die Verdunstungsrate nahezu konstant und sehr viel niedriger als in den vorherigen Schritten ist.

Die Haftung des Polymerfilms auf der Faser Oberfläche wird meist durch einen Basisstrich gestaltet, um eine glatte, weniger poröse Struktur zu erzielen. Mit diesem Basisstrich lassen sich in der Applikation eine gleichmäßigere Schichtdicke erreichen, sodass die Applikation des Films einen geringeren Auftrag ermöglicht. Zusätzlich wird durch die technischen Eigenschaften des Basisstriches die Eigenschaften des Barrierefilms beeinflusst. Beispielsweise wirkt sich die Flexibilität des

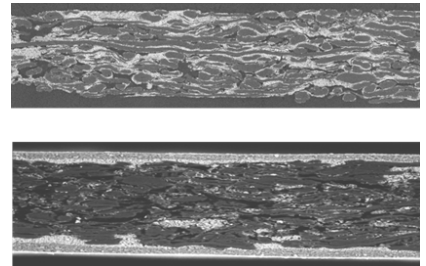
Basisstriches positiv auf die mechanische Verarbeitung wie Rillung der Barriere aus. Die Trennbarkeit der Barriere im Recyclingprozess vom Papier lässt sich deutlich besser einstellen.

### 3.3.6. Applikation eines Barrierefilms auf die faserbasierte Verpackung

Die Applikation eines Barrierefilms auf die faserbasierte Oberfläche bietet verschiedene Verfahrenstechnische Möglichkeiten. Der wesentliche Punkt ist die verwendete Maschinenbreite, bzw. Bahnbreite. Papiermaschinen haben eine Arbeitsbreite von 3-10 m und werden mit Strichgeschwindigkeiten von 800- 1800 m/min gestrichen. Bei der Erzeugung von Barrierepapieren wird also eine große Menge an gleichem Material erzeugt. Die Beschichtung offline kann auf deutlich schmaleren Bahnen vorgenommen werden, um ein spezifischeres Produkt für die Anwendung zu erzeugen.

#### 3.3.6.1 Einfluss des Rohpapiers

Die Zusammensetzung des Rohpapiers und die erreichbare Oberflächengüte ist eine wesentliche Voraussetzung für eine Barrierebeschichtung. Ziel einer Beschichtung ist es, einen möglichst gleichmäßigen rissfreien Film zu bilden, dessen Barriereigenschaften möglichst homogen ist. Dazu sind folgende Parameter wichtig:



Zusammensetzung Blatt

- Rezeptur
- Porosität
- Dimensionsstabilität
- Verarbeitbarkeit

Abbildung 7: Querschnitt Blatt

Oberfläche

- Rauigkeit
- Benetzbarkeit

Der Strichauftrag eines Standard- Papierstriches auf ein Papierrohpapier beträgt 6-12 g/m, Grundsätzlich sind Strichaufträge von 1,5 – 20 g/m<sup>2</sup> möglich

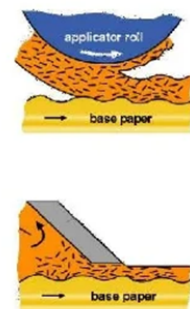


Abbildung 8: Streichen von Papier

#### 3.3.6.2 Wässrige Applikation – Streichen

Das Streichen von Barrieren innerhalb der Papierproduktion kann sowohl online, als auch offline geschehen. Barrierestriche haben häufig nur 1,5 – 4 g/m<sup>2</sup> als Mengenauftrag, werden also in hoher Verdünnung aufgebracht. Mehrschichttechnologien wie Vorhangstrich oder eine Abfolge von mehreren Schichten sind durchaus üblich, um wirtschaftlich günstigere Systeme zur Abdeckung des Rohpapiers zu verwenden. Zusätzlich können die Vorstriche auch mechanische Eigenschaften und Verarbeitungsvorteile addieren. Die Erfahrung zeigt, dass flexible Basisstriche die Barrierefunktionen in dem Falz zu verbessern. Im Druckvorgang werden einzelne Druckpunkte gedruckt, welche durch Farbverlauf zu einem Film geschlossen werden. Doppelstriche, bzw. zweifacher Druck erhöhen signifikant die Barriereigenschaften durch eine bessere homogene Schichtdicke.

- Streichen einer vordosierten Menge
- Streichen, Abrakeln des Überschusses
- Drucken von Barrieren

#### 3.3.6.3. Kaschieren von Folien

Bei der Folienkaschierung werden die faserbasierte Bahn und die Polymerbahn, oder die Aluminiumbahn flächig miteinander verklebt. Für die Rezyklierbarkeit lassen sich einer geeigneten Stoffaufbereitung die Fasern fast vollständig von den Folien entfernen. Die stoffliche Verwertung der anfallenden Aluminium- und Polyolefinfolien lassen sich verwerten. Pilotanlagen zum Waschen und Sortieren dieser Rejekte sind bereits im Betrieb. Kritisch bei diesen Kaschierten Produkten kann der Kaschierleim, bzw. weitere Applikation von Ausgießern und anderen Verpackungselementen sein. Die Wasserlöslichkeit der verwendeten Klebern hat einen deutlichen Einfluss auf den Störstoffgehalt in der Papierproduktion. Verwendete Folien können sowohl Monofolien, beispielsweise aus PE als auch Multilayerfolien sein.



Abbildung 9: Rejekt von Getränkeverpackung

- Monofolien
- Multifolien
- Metallfolien (Aluminium)

Papierverbundstoffe mit einem Folienanteil von mehr als 5% sind deutlich in der rechtlichen Kritik.

#### 3.3.6.4. Extrusion von polymeren Filmen

Bei der Extrusion von Polymeren Folien auf die Papieroberfläche wird im Gegensatz zur Kaschierung ein heißer Polymerfilm auf die Papieroberfläche gegossen. Das Polymer wird beim Gießvorgang gedehnt, so dass eine Filmdicke von 7-40 g/m<sup>2</sup> entsteht. Die heiße Folie wird mit der Papierbahn verpresst, damit eine stabile Bindung entsteht. Die Extrusionbeschichtung hat den Vorteil, dass das Papier in seinen Saugeigenschaften und Porosität nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die wesentliche Rohpapiereigenschaft ist eine

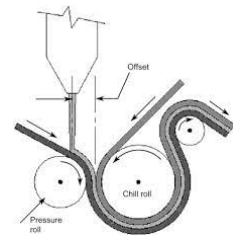


Abbildung 10: Extrusion

gute Oberflächenenergie, um eine ausreichende Lagenhaftung zu bekommen. Wesentlich bei der Zusammenstellung der Materialpartner ist eine ähnliche Dimensionsstabilität und Schrumpfungseigenschaften, damit die Bahn bei der Abkühlung des Polymers keine Falten bekommt.

Bei dem Vergleich der unterschiedlichen Verfahrensschritte zur Herstellung einer Barrierebeschichtung gibt es immer parallel verschiedene technische Lösungen, welche insgesamt Vorteile bzw. Nachteile haben. Zur Auswahl der richtigen Kombination müssen neben den technischen Leistungsanforderungen grundsätzlich Verfahrenstechnische Anforderungen entlang der Wertschöpfungskette betrachtet werden. Die Verpackungsanlagen, welche für die Verpackung von Monofolien konzipiert sind lassen sich in der Regel nicht einfach mit faserbasiertem Material bestücken. Insbesondere die Dehnungskoeffizienten von Folien und faserbasiertem Material sind deutlich unterschiedlich, so dass es ein Risiko von Bahnabrissen und Faltenbildung gibt. Es liegen auch sehr positive Erfahrungen vor, diese Probleme durch eine Produktmodifikation erfolgreich zu lösen.

#### 4. Altpapiersorten in der Altpapieraufbereitung

Die Altpapiersorten sind in der DIN EN 643 beschrieben. Diese Definition wird jedoch den neuen Entwicklungen in der Verpackung nur bedingt gerecht. Allerdings ist die Differenzierung der Altpapiersorten und ihrer Fremdbestandteile auf wenige Gruppen reduziert. Die Rezyklierbarkeit und die Auswirkung von Störstoffen auf den Herstellungsprozess sind nicht detailliert abgebildet. Es wird nur in ungeeignete und unerwünschte Materialien unterschieden:

- Ungeeignete Materialien
  - Medizinabfall
  - verunreinigte Produkte der persönlichen Hygiene
  - gefährlicher Abfall, organischer Abfall, einschließlich Lebensmittel<sup>1</sup>, Bitumen, toxisches Pulver etc.
- unerwünschte Materialien
  - papierfremde Bestandteile (Holz, Metall etc.)
  - PPK ungeeignet für die Produktion Papier, Karton und Pappe, die so erfasst oder behandelt wurden, dass sie für eine einfache oder eine normale Aufbereitungsanlage als Rohstoff für die Herstellung von Papier ungeeignet sind, Beschädigungen verursachen können oder deren Anwesenheit die gesamte Altpapierlieferung unbrauchbar macht.

Die Bewertung der angelieferten Sorten erfolgt in der Papierfabrik durch Stichproben. Bei diesen Stichproben werden aufgrund des zeitlichen Aufwandes und der notwendigen Fachkenntnis des Personals zwischen einer optischen Bewertung und einer gravimetrischen Untersuchung unterschieden. Die einschlägigen Messmethoden schreiben definierte Probemengen bei jeder Messung vor, um die Heterogenität der Zusammensetzung in der haushaltsnahen Altpapiersammlung auszugleichen.

1. Die Methode der optischen Kontrolle untersucht die Ballen oder das lose Material nach dem Augenschein. Dabei werden unerwünschte oder ungeeignete Materialien durch das Personal bewertet.
2. Die gravimetrische Methode ist die Entnahme einer Stichprobe aus dem angelieferten Material. Diese Stichprobe wird händisch in verschiedene Bestandteilgruppen sortiert. Dabei werden die ungeeigneten und die unerwünschten Materialgruppen zusammengefasst. PPK-Verbunde gehören neben anderen ungeeigneten Papieren zu den unerwünschten Materialien. Die einzelnen Materialgruppen werden ausgewogen.
3. Die Ballenbeprobung mit einem Nahinfrarotsender (NIR) untersucht die Feuchte, den Faseranteil und den Anteil an Füllstoffen im Altpapierballen. Ein Loch wird in den Ballen gebohrt und die Messsonde in das Loch eingeführt oder der Bohrkern wird an einem Sensor vorbeigeführt. Papierfremde Bestandteile werden zusammengefasst. Bei dieser Untersuchung kann zwischen Papier als Monomaterial und PPK-Verbunden nicht unterschieden werden.
4. Mit einem Feuchtesensor wird die Feuchte am Altpapierballen überprüft.

Eine differenzierte Betrachtung der Papiere in der Altpapiersortierung nach der gravimetrischen Bestimmung nicht statt. Aktuelle Versuche zu Erkennung von Barrieren und Folienapplikationen in einer Testanlage zur Altpapiersortierung ergaben keine eindeutige nachvollziehbare Unterscheidung, auf der eine Sortierung stattfinden kann.

---

<sup>1</sup> Ein kategorischer Ausschluss von Lebensmittel ist nicht praktikabel, außerdem gibt es einige Altpapiersorten, z. B. gebrauchte Flüssigkeitskartons, bei denen Lebensmittelreste unvermeidlich sind. Deshalb hat die europäische Normungsorganisation CEN eine technische Spezifikation als Interpretationshilfe erarbeitet – in Deutschland erschienen als DIN EN/TS 17830 im Dezember 2022.



Im Rahmen von wissenschaftlichen Versuchen wie z.B. ENEWA oder KIBAPAP werden aktuell die Möglichkeiten der differenzierten Betrachtung untersucht. Technisch werden jedoch nur die deinkbaren Produkte (1.11.00) von den anderen Materialströmen Mischpapier (1.02.00) und Kaufhausmischpapier (1.04.00) getrennt. Neue Technologien der KI-unterstützten Papierbewertung werden gerade erst in der Sortierung eingeführt.

#### **4.1. Messmethodik Altpapiersorten:**

Die Überprüfung der Zusammensetzung des Altpapiers wird durch eine händische Sortierung der Fraktionen vorgenommen. Die DIN 17085 schreibt bei Mischpapier 1.02.00 eine Probemenge von mindestens 100 kg (lutro) Material vor. Der differenzierte Sortierkatalog der genannten Studie der RWTH Aachen umfasst:

PPK-Fraktion

- o Papier, Kartonagen und Verpackungen ohne Kunststoffanteil

PPK-Fraktion mit Kunststoffanteil

- o Papier mit Kunststoffanteil
- o Kartonagen mit Kunststoffanteil
- o Verpackungen mit Kunststoffanteil

PPK-Verbunde

- o Verbundverpackungen (PPK-Folie; PPK-Metall; PPK-Hartkunststoff)
- o Flüssigkeitsverpackungen zur Abfüllung von flüssigen oder fließfähigen Produkten (flüssig, pastös oder fließfähig-stückig)

Unerwünschte Papiere (PPK ungeeignet für die Produktion)

- o Hygienepapier, Tapeten, Geschenkpapier, Backpapier
- o Release-Liner
- o Thermopapier

Papierfremde Bestandteile

- o Metall, Holz, Baustoffe, Glas
- o Textilien
- o Weitere ungeeignete Materialien

Eine Unterscheidung von Verbundstoffen nach der 95/5% Regel aus dem VerpackungsG ist in der Sortierpraxis nicht praktikabel. Eine Fraktionierung wird nach Augenschein, bzw. einem händischen Einriss definiert.

Ein PPK-Verbund wird in der Sortierpraxis definiert als

- Sichtbare Identifikation durch die Verpackung mit einem Kunststoff oder Metallanteil, sowie Ausgießer oder Beschriftung
- Sichtbare fest verklebte Folien- oder Kunststoffbestandteile z.B. Lebensmittelverpackungen
- Einriss – deutlich eine Folie neben den Fasern sichtbar
- Knacken einer Folie – feste Oberfläche
- Benetzbarkeit mit Wasser – eindeutige Barriere (Unterscheidung zu Nassfest durch den Tropfenwinkel)

Die Fraktionen werden direkt gewogen. Es wird von einem Feuchtegehalt von kleiner 10% ausgegangen.

## 5. Beschreibung der Altpapieraufbereitung

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, welche 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.

- **Materialannahme**

- Identifikation der Sorten nach den Lieferpapieren.
- Periodische Qualitätsbestimmung der Anlieferung nach den unterschiedlichen Methoden nach INGEDE-Methode 7 (optische Beurteilung), INGEDE-Methode 14 (gravimetrische Beurteilung nach Sortierung), Ballenfeuchte mittels eines Sensors, Ballenbeprobung unter Verwendung eines NIR Sensors.
- Optische Prüfung des Materials aufgrund von Materialzusammensetzung, Materialalter und Geruch.

- **Bandaufgabe**

Sicherstellung des Materialstroms zur Zerfaserung. Stoffmischungen oder Einzelsorten der einzelnen Altpapiersorten nach der Definition von DIN EN 643 je nach der produzierten Papierrezeptur. Mischung der einzelnen Anlieferungen.

Eintrag von Ballenware, Ballenentdrahtung. Eintrag von loser Ware auf ein Materialband. Kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Eintrag.

### 5.1 Pulper (Zerfaserer)

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 der Auflöser (Pulper, Trommel, geometrische Form)
- Verweilzeit (4- 60 Minuten)
- Wassereintrag (Menge, Dosiertechnik)
- Strömungsverhalten der Stoff/Wassersuspension, technische Strömungsbrecher, Geometrie Rotor, Einbau Rotor
- Eingetragene Energie kWh/to Eintrag
- Temperatur
- Chemikalien (Störstofffänger, Additive)
- Kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Betrieb

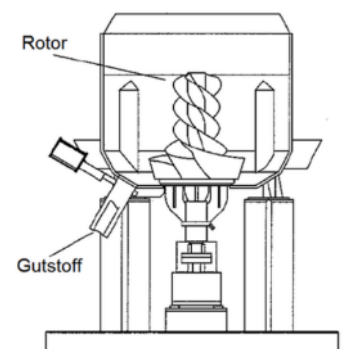
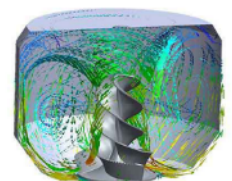


Abbildung 11: Pulper



- Rejektaustrag (Zopf, Siebrückstand)
- Stoffaustrag (Geometrie Lochsortierung)

Abbildung 12: Pulperscheibe

Die Zielsetzung des wässrigen Zerfaserung ist es möglichst alle Fasern zu vereinzeln und gleichzeitig den erzeugten Stoffstrom so sauber wie möglich zu gestalten.

Die Bandbreite der Pulper in der heutigen Altpapieraufbereitung hängt von sehr unterschiedlichen Rahmenbedingungen der einzelnen Papierfabriken ab. Folgende Bedingungen sind entscheidend für die spezifische technische Konstruktion.

- Alter der Anlage
- Einsatz des verwendeten Altpapiersorte
- Qualität der erzeugten Papiersorte, Komplexität der sortenspezifischen Stoffströme
- Vielfalt des erzeugten Papierportfolios
- Notwendiger Materialfluss (Menge)
- Beschränkungen Bauraum
- Investitionsvolumen



Abbildung 13: Trommelzerfaserer

Durch eine Lochsortierung wird der Gutstoff in die nächsten Sortierstufe ausgetragen. Die Lochung beträgt in der Regel ein Durchmesser von 24-28mm. 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. Die moderne Kombination ist eine Trommelzerfaserung, wo 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)

## 5.2. Gravitationsreinigung

Bei der Gravitationsreinigung entsteht in speziell geometrisch geformten Elementen durch die Kombination von Druck und Form ein Schwerefeld innerhalb der Stoffsuspension. In diesem Wirbelschicht- Schwerefeld trennen sich schwere Elemente (Sand, Glas) und leichte Elemente (geschäumter Kunststoff, Folienreste) von dem Faserstoff und können getrennt ausgetragen werden.

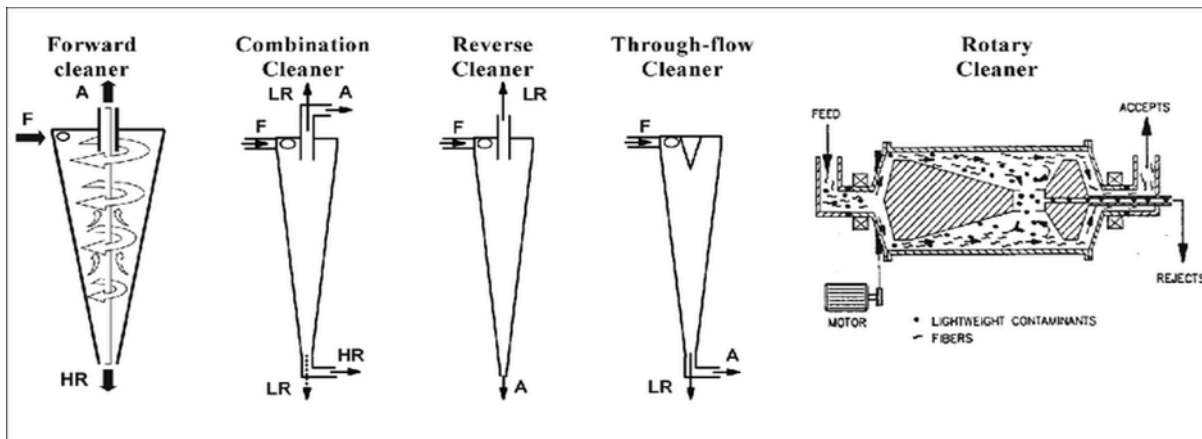


Abbildung 14: unterschiedliche Cleanersysteme

Im Regelfall sind in den Cleanerstufen viele Elemente parallelgeschaltet, um eine optimale Kombination von Druckdifferenz und Durchfluss zu gewährleisten. Je nach Stoffdichte, Durchfluss und Fraktionierung ergeben sich damit unterschiedliche Bauformen und Kombinationen.

### 5.3. Drucksiebe

Als weitere Reinigungsstufe werden Drucksieb mit rotierenden Körben eingesetzt. Die Sortierkörbe können sowohl mit Löchern als auch mit Schlitzen ausgeführt werden.

Im Gegensatz zu dem Austrag des Grobrejektes aus einem Stofflöser mit einer Stoffdichte von ca. 30-50% Trockengehalt werden über die weiteren Reinigungsaggregate Stoffdichten von unter 10% erreicht. Die Sortierqualität ist abhängig von der Stoffdichte, da Faserbündel wenig Dichtedifferenz zu den vereinzelt Fasern aufweisen. Durch den Fasergehalt von 30- 90% muss das Feinrejekt aus den Sortieraggregaten häufig aufwendig getrocknet werden, bevor es thermisch verwertet werden kann.



Abbildung 15 : Drucksieb

Die Reinigungsaggregate werden von den unterschiedlichen Herstellern in technischen Variationen hergestellt. Üblicherweise werden die Aggregate in mehreren Stufen einer Kaskadenschaltung kombiniert, um eine optimale Balance zwischen Faserausbeute und Faserqualität zu gewährleisten.

Ähnlich wie bei den Zerfasern ist die Kombination der einzelnen Aggregate

- o Der Prozessführung
- o Den erzeugten Papiersorte
- o Dem Massenstrom
- o Den eingesetzten Altpapiersorten
- o Der notwendige Reinheit

angepasst.

Betrachtung der Rejekte sind die Summe der Rejekte aus allen Sortiersystemen

- o Metall aus der Ballenentdrahtung und dem Metallabscheider
- o Grobrejekte aus dem Zerfaserer (ggf. Zopf, und mehrere Stufen bei mehrstufigen Systemen)

- o Feinrejekte der Reinigungsaggregate Stoffaufbereitung und dem Maschinenkreislauf
- o Deinkingschlamm bzw. Feinstoff aus anderen Reinigungsaggregaten

Die Rejekte werden in den Fabriken häufig zusammengeführt, und sind daher nicht mehr eindeutig einer einzelnen Reinigungsstufe zuzuordnen. Weiterhin haben die Rejekte eine große Variabilität in der Zusammensetzung, des Trockengehaltes und der inhaltlichen Zuordnung zu den Anlieferungen.

Viele Rejektsysteme entsorgen sich in der letzten Sortierstufe nicht kontinuierlich, sondern nur über eine Zeittaktung. Damit ist eine Zuordnung zu einer definierten Anlieferung nicht oder nur sehr begrenzt möglich.

Die Variation in der Zusammensetzung innerhalb der Altpapieranlieferung ist groß, da Altpapier aus haushaltsnahen Sammlungen deutlich heterogen in der Zusammensetzung ist. Zur Bestimmung des Rejektanteils ist es daher sinnvoll eines Durchschnittswertes aus einer monatlichen Erfassung zu bewerten. Eine sorgfältige monatliche Erfassung eliminiert die einzelnen Spitzen aus den Lieferungen und den zeitlichen Versatz der Altpapierauflösung und der vollständigen Umsetzung der eingesetzten Rohstoffe in der Papierproduktion.

Die Definition einer Standard Altpapieraufbereitungsanlage erscheint schwierig, da die Stoffaufbereitungen in der Papierindustrie so individuell gestaltet sind. 2020 wurde eine Forschungsstudie der Universität Darmstadt (PMV) und der Papiertechnischen Stiftung veröffentlicht, in dem die industrielle Bewertung der Zerfaserung im Vergleich zu der Laborzerfaserung bei Rezyklierungstests umfassend untersucht wurde.<sup>1</sup> Diese Studie untersucht das Zerfaserungsverhalten von

- Verpackungspapier (Testliner)
- Einseitig PE-beschichtetes Papier (PPK-Verbund)
- Nassfestes Papier
- Zweiseitig PE-beschichtetes Papier (PPK-Verbund, Flüssigkeitskarton)

im Zerfaserungsverhalten im Labor und in industriellen Versuchsanlagen. Die wesentlichen Vergleichsuntersuchungen beziehen sich auf

- Die Probengröße
- Die Rejektmenge nach der Zerfaserung
- Die Rejektzusammensetzung
- Die Zerfaserungszeit
- Die eingetragene Zerfaserungsenergie
- Den technischen Aufbau der Zerfaserungsanlagen (Drehzahl, Konstruktion)

<sup>1</sup>(Quelle: Testmethoden und Bewertung zur Evaluierung der Recyclingfähigkeit von Papier- und Papierverbundverpackungen auf dem Prüfstand INFOR Projekt 214)

Innerhalb der Untersuchungen und der anschließenden Diskussion mit Experten des Anlagenbauers Voith ergaben sich folgende Ergebnisse

- Das Zerfaserungsergebnis läuft bei dem Aufschluss gegen eine Asymptote. D.h. nach ca. 20 -35 min Zerfaserungszeit ergibt sich keine weitere Verbesserung des Zerfaserungsergebnisses
- Das Zerfaserungsergebnis von Testliner kann als Kalibrierung eingesetzt werden, da nach der Zerfaserung der Stippengehalt im Gutstoff des Pulpers bei 8-13% liegt

- Für eine Zerfaserungszeit müssen auch die weiteren Aggregate der Stoffaufbereitung (Sortierer) betrachtet werden, da die Benetzungszeit und die Vereinzelnung der Fasern auch noch in nachfolgenden Aggregaten beeinflusst wird.
- Es wird eine Penetrationsgeschwindigkeit bei beidseitig beschichteten Papieren von 0,7 cm/min ausgegangen. Flüssigkeitskartons mit einer Länge von 30 cm benötigen daher ca. 40 Minuten, um die Fasern vollständig zwischen den kaschierten Folien zu benetzen.
- Das Zerfaserungsergebnis korreliert mit dem spezifischen Energieeintrag, Industripulper benötigen einen deutlich geringeren spezifischen Energieeintrag.

Aus der Studie lässt sich für die Auswahl der beispielhaften Stoffaufbereitung die Notwendigkeit einer Anlage mit einer vorteilhaften Benetzungszeit und einem hinreichenden Energieeintrag ableiten. Als Indikator für eine technische Funktion lässt sich der Flüssigkeitskarton heranziehen. Wenn ein beidseitig beschichteter PPK-Verbund nahezu faserfrei ist, so hat die Kombination von Benetzungszeit und Energieeintrag ihre Funktion bewiesen.

Der nahezu faserfreie Flüssigkeitskarton kann damit als Indikator für den technischen Nachweis der stofflichen Verwertung in der industriellen Praxis verwendet werden.

## 5.4. Chemisch-physikalische und mechanische Behandlungsverfahren in der Stoffaufbereitung

### 5.4.1 Papierstoff

Die Stoffaufbereitung von Altpapier enthält weitere Trennverfahren zur Verbesserung des Rohstoffes. Dies dient der Verbesserung der optischen Eigenschaften, erhöht auch die Produktivität durch die Entfernung von Störstoffen aus dem Prozess. Diese Prozesse sind meist bei der Erzeugung von grafischen Papieren und die weiße Decke im Faltschachtelkarton eingesetzt, da die Wirtschaftlichkeit für andere Verpackungspapiere nicht ausreichend ist.

#### 5.4.1.1 Deinkingprozess

Der Deinkingprozess ist eine chemisch-physikalische Abtrennung von Druckfarben durch Flotation. Dem Stoff werden Tenside und Natronlauge zugegeben, um die Druckfarben von der Faser abzulösen. Durch die Eindüsung von Luft in das Stoff-Wassergemisch werden die hydrophoben Druckfarben an die entstehenden Luftblasen angelagert. Das Druckfarben/Schaumgemisch schwimmt auf und lässt sich mit Überlaufkanten von dem sauberen Papierstoff abtrennen.

Der Deinkingprozess ist wegen der notwendigen Anlagerung an die hydrophobe Luftblase nicht für alle Druckverfahren Gleichmaßen geeignet. Wässrige Druckfarben, wie Flexodruck und die meisten Inkjetverfahren sind weniger erfolgreich deinkbar. Teilweise haben sich Waschprozesse bewährt.

Abbildung 16: Deinking



Das Deinkingverfahren reduziert neben den Druckfarben auch die Anzahl an Störstoffen und klebrigen Bestandteile. Jedoch ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens an den Austrag der Druckfarbe gebunden.

Die Abtrennungsprozesse verbrauchen Energie und ergeben einen deutlich Materialverlust. Selbst bei optimierten Systemen mit einer mehrstufigen Kaskadenschaltung und Faserrückgewinnung entstehen in Deutschland über 250.000 to an Deinkingschlämmen pro Jahr welche entsorgt werden müssen.

#### 5.4.1.2 Dispergierung von sichtbaren Schmutzstoffen

In vielen Fällen wird in der Stoffaufbereitung eine Heissdispergierung eingesetzt, um die verbleibenden Schmutzpunkte nach dem Deinkingprozess unter die optische Sichtbarkeitsgrenze zu zerkleinern. Insbesondere werden verbleibende klebende Verunreinigungen und Störstoffe aus der Altpapierzerfaserung durch die Faser-Faser Reibung und den technischen Aufbau des Aggregates zerkleinert. Der Papierstoff wird in einerseits entwässert, um eine Stoffdichte von ca. 30% zu erreichen. Der Stoff wird auf 90- 105°C erhitzt. Die Störstoffe und Schmutzpunkte verbleiben im System. Es besteht die Chance, dass nach der Dispergierung die Bestandteile wieder agglomerieren und damit wieder sekundäre Stickies bilden. Das Potenzial an feindispersen klebenden Bestandteilen kann durch die Zuschlagstoffe oder Fixiermittel über das Papier ausgetragen werden.

<i>Chemische Zusammensetzung</i>	<i>Herkunft</i>
<i>Natriumsilikat</i>	Peroxid-Bleiche, Deinking, Altpapier
<i>Polyphosphat</i>	Füllstoffdispergierung
<i>Polyacrylat</i>	Füllstoffdispergierung
<i>Organische Polysäuren</i>	Harzdispergierung
<i>Carboxymethylcellulose</i>	(gestrichener) Ausschuss
<i>Anionische Stärkederivate</i>	Altpapier, Ausschuss, Verfestigung
<i>Huminsäuren</i>	Frischwasser
<i>Ligninsulfonate</i>	NSSC, CTMP
<i>sonst. Ligninderivate</i>	Sulfatzellstoff, Holzstoff
<i>Uronsäuren</i>	Holzstoff
<i>sonst. Hemicellulosen</i>	Holzstoff

Abbildung 17: Traditionelle Störstoffquellen in der Papierproduktion Quelle: Huber



### 5.4.1.3. Bleiche

Zur Aufhellung der Fasern werden Bleichchemikalien dem Stoff zugesetzt. Üblicherweise wird eine reduzierende Bleiche aus Wasserstoffperoxid und Natriumdithionit verwendet. Zur besseren Effektivität wird die Bleich häufig in Kombination mit der Heissdispargierung eingesetzt. Die Temperatur und die hohe Stoffdichte verbessern die Wirksamkeit der Bleichchemikalien.

### 5.4.2 Kreislaufwasserbehandlung

Die Papierherstellung als wässriger Prozess ist in der Produktivität wesentlich von der Wasserqualität abhängig. Die Papierindustrie hat in den letzten fünfzig Jahren durch die Kreislaufeinengung und Mehrfachnutzung der Wasserkreisläufe den Wassergebrauch sehr deutlich reduziert. Beinahe alle chemischen Prozesse in der Papierherstellung basieren auf der Oberflächenchemie von Molekülen, bzw. der Oberflächenladung der Partikel. Daraus ergeben sich für die Wasserqualität folgende Einflussfaktoren:

- Temperatur
- pH-Wert
- feindisperse Trübstoffe oder kolloidale Stoffe im Bereich von 5-1000 nm
- Salzfracht, resp. Leitfähigkeit
- Abbaubare Produkte gemessen als chemischer (CSB) oder biologischer (BSBS) Sauerstoffbedarf
- Störstoffe (klebende, farbige oder feindisperse Stoffe) welche die Blattbildung stören und Löcher oder Schmutzflecke verursachen.
- Schaumbildende Chemikalien
- Mikrobiologische Aktivität

Zur Reinigung der Wasserkreisläufe werden chemisch-physikalische Prozesse mit der

#### 5.4.2.1. Einsatz von Flockungsmitteln und Additive

In der Kreislaufwasserreinigung geht es darum alle fremden Stoffe aus dem Wasser zu entfernen. Es können allerdings nicht alle Stoffe rein durch Sedimentation, Filtration oder Flotation aus dem Rohwasser abgetrennt werden. Es stellen sich vor allem Probleme bei fein suspendierten und kolloidalen Stoffen. Kationische Flockungsmittel werden vor allem zur Unterstützung der Trennverfahren eingesetzt. Die entstehende Flocke kann aufgrund der Größe und des physikalischen Verhaltens (Entwässerung, Anlagerung an die Luftblase und Sedimentation) besser aus dem Kreislauf entfernt werden.

Zusätzlich werden auch Flockungsmittel oder anorganische Additive eingesetzt, um Störstoffe im Stoff-Wasserkreislauf zu binden. Insbesondere dienen sie dazu eine Agglomeration der Störstoffe zu verhindern, damit sie in winzigen Flocken mit dem Papier ausgetragen werden können. Eine Anreicherung im Stoffwasserkreislauf wird damit vermieden um Ablagerungen in der Trockenpartie und Abrisse, sowie erhöhte Mengen an Schmutzflecken zu vermeiden. Papierherstellung



Abbildung 18: Einsatz von Additiven in der



#### 5.4.2.2. Fitrationsverfahren

Scheibenfilter gehören zu den mechanischen Prozessen in der Wasseraufbereitung. Sie dienen zur Reinigung von Wasser, Faserrückgewinnung und -wiederverwendung und wurden für den kontinuierlichen Reinigungsprozess entwickelt. Der Frischwasserverbrauch soll durch den Einsatz des gewonnenen Klarfiltrats minimiert werden. Feststoffe werden von Flüssigkeiten durch einen porösen Körper getrennt, der flüssigkeits- aber nicht feststoffdurchlässig ist. Das Ziel ist im Klarwasser ein Feststoffgehalt von 20 mg/l zu erreichen.

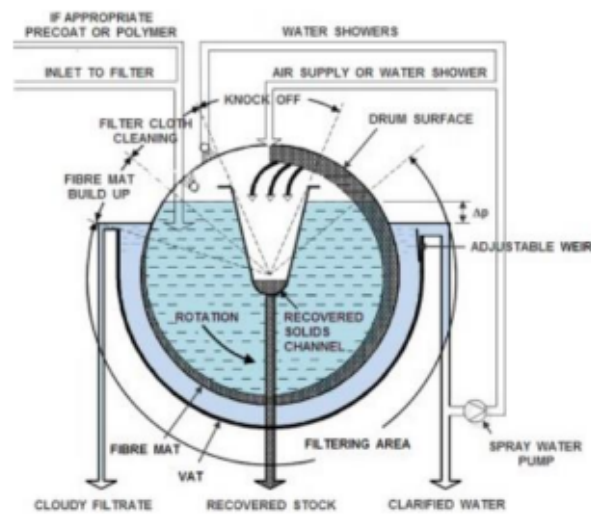


Abbildung 19: Scheibenfilter

Der Prozess der Filtration lässt sich mit der Blattbildung auf dem Papiermaschinensieb vergleichen. Dem zu reinigenden Wasser wird ein möglichst langfasriger Faserstoff hinzugefügt, um daraus eine effiziente Filterhilfsschicht zu erzeugen. Diese feinporigere Schicht erhöht die Effizienz der Filtration erheblich.

Wichtige Einflussfaktoren auf die Filtration sind:

- Porosität und Dicke der Filterschicht
- Durchmesser der Filterfläche
- Druckdifferenz Zu- und Ablauf o Verschmutzungsgrad der Trübe
- Temperatur o Stoffdichte der Trübe

#### 5.4.2.3 Flotation zu Wasserreinigung

Die Flotation gehört zu den physikalisch-chemischen Trennverfahren in der Kreislaufwasserreinigung. Nach der Druckentspannung des gesättigten Luft-Wassergemisches entstehen sehr feine Luftbläschen in einer engen Größenverteilung, die anschließend gasförmig an die Oberfläche der Suspension steigen. Die Schmutzpartikel haften sich an die Gasblasen an und steigen mit diesen an die Oberfläche, wo sie durch eine Räumsschnecke entfernt werden.

Für eine erfolgreiche Flotation sind folgende Mikroprozesse von erheblicher Bedeutung:

- Kollision – Bildung einer Mikroflokkel durch die Zusammenlagerung von Bestandteilen in der Suspension
- Adsorption an die Luftblase
- Auftrieb der Luftblase



Abbildung 20: Einflussfaktoren Flotation (Johan Gulden, 2018)

### 5.5. Zusammenfassung Altpapieraufbereitung

Ein Standard- Altpapieraufbereitung im Bereich der Papierindustrie gibt es nicht. Grundsätzlich können die Aggregate:

- Bandeintrag
- Zerkleinerung
- Mechanische Sortierung
- Wasserführung

in jeder Stoffaufbereitung. Die Unterschiede innerhalb der Module

- Stoffdichte
- Temperatur
- Zuschlagstoffe
- Zusätzliche Aggregate
- Kreislaufwasserreinigung

ergeben einen sehr spezifischen Ansatz in der Altpapieraufbereitung. Der mögliche Eintrag an Sorten, das erzeugte Produktportfolio und die Prozessanpassung ergibt eine sehr individuelle Lösung. Viele Probleme von Störstoffen durch Verpackungen ergeben sich erst bei einem signifikanten Anteil dieser Verpackung. Es sind Fälle bekannt, bei denen fälschlicherweise ein größerer Anteil von ca. >5% Barriereverpackungen in die Zerkleinerung eingetragen worden ist, hat es zu erheblichen Produktionsproblemen im Papierherstellungsprozess geführt.

#### 5.5.1 Störstoffentfernung

Die klassische Altpapieraufbereitung enthält wenig Aggregate zur spezifischen Entfernung von Stickies. Störstoffe, die eine gravimetrische oder mechanische Reinigung passieren werden in erste Linie über das Produkt wieder ausgetragen. Es gibt vereinzelt Aggregate, wie beispielsweise den Gyroclean, um klebende Verunreinigungen aus dem Altpapierkreislauf zu entfernen. Es liegen auch gute Ergebnisse vor über Additive und Flotation einen Austrag von Störstoffen zu erreichen. Der energetische Aufwand und der Faserverlust bei diesen Reinigungsverfahren bilden jedoch keine gesamtökonomische Lösung. Es ist viel sinnvoller den erheblichen Faserverlust aus den Reinigungsaggregaten zu minimieren. Damit ist die Forderung aus dem Minimalstandard und der Design-Guideline grundsätzlich berechtigt den Störstoffeintrag in das System zu minimieren.

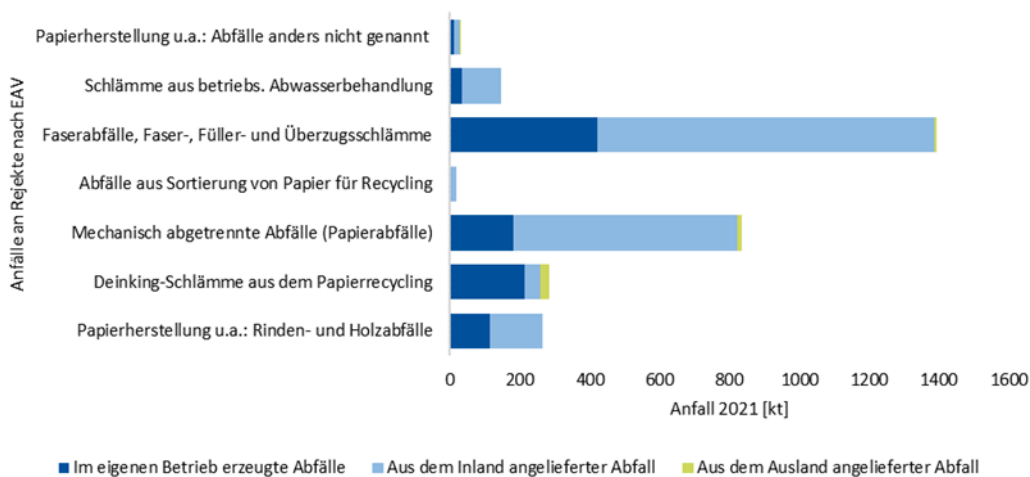


Abbildung 21: Aufkommen der Papierrejekte in Deutschland 2021

Die Gesamtsumme von ca. 4 Mio tonnen Rejekt und Sortierschlämmen aus der Papierproduktion zeigen eine Größenordnung von ca. 20% gegenüber der Papierproduktion.

## 5.5.2. Anforderungen von Verpackungsbestandteilen

### 5.5.2.1. Mechanische Sortierbarkeit

Ein wesentlicher Anspruch an die Materialien ist eine Sortierbarkeit von Materialien. Das bedeutet eine mechanische Festigkeit gegenüber der Zerkleinerung und den mechanischen Reinigungsaggregaten. Die Größenordnung sollte gemäß Zellchemie Merkblatt mindestens 2000µm sein, um eine mechanische Sortierbarkeit zu erreichen.

### 5.5.2.2 Stabilität gegenüber Wasser

Die Materialien sollten nicht in eine wässrige Lösung, oder eine wässrige Quellbarkeit besitzen. Gequollene Materialien werden weich und können die Drucksiebe passieren. Zusätzlich erhöht die Wasseraffinität eine mikrobiologische Angreifbarkeit.

### 5.5.2.3 Mikrobielle Stabilität - Kompostierbarkeit

Eine Papierfabrik mit dem Rohstoff Altpapier hat im Wasserkreislaufsystem häufig eine mikrobielle Aktivität von mehr als 1 Million Bakterien pro ml. Kompostierbare Materialien werden in wässrigen Systemen abgebaut und bieten damit zusätzliche Nahrung für die Biozönose. Insbesondere Stärke aber auch andere Biokunststoffe verändern die Biozönose und damit die Prozessstabilität. In Folge können Schaum, Geruch, Ablagerung Korrosion und Schmutzflecken entstehen. Die Biozönose baut auch die Kettenlänge der Zellulose ab, damit werden neben den optischen Eigenschaften auch mechanische Eigenschaften des Papiers negativ beeinflusst.

### 5.5.2.4 Oberflächenladung

Die chemisch-physikalischen Prozesse in der Papierherstellung basieren auf oberflächenaktiven Wechselwirkungen. Zusätzliche Ladungsträger, Dispergierhilfsmittel oder andere Additive können den Chemismus stören. Bekannt sind ein signifikanter Mehrverbrauch von Chemikalien im Prozess, ein geändertes Entwässerungsverhalten oder die Störung von nachfolgenden Prozessen, z.B. der Beschichtung. Anionische Materialien können gezielt kationisch geflockt werden. Eine leichte anionische Oberfläche kann daher von Vorteil sein.

#### **5.5.2.5 Thermisches Verhalten, Klebrigkeit**

Einige Stoffe haben einen Schmelzpunkt, der unterhalb der Prozesstemperaturen im Papierprozess (105°C) liegt. Diese Stoffe erhöhen die Anzahl an Stickies, bilden Ablagerungen in der Trockenpartie und erzeugen Bahnabrisse. Insbesondere weiche Polymere wie Paraffin oder Siegelkleber wie LDPE können in größeren Mengen zu erheblichen Störungen führen. Die Messung und die Untersuchung von Stickies ist ein sehr umfangreiches Forschungsthema. Die Messmethoden zur Bestimmung von klebrigen Bestandteilen sind immer noch industrielle Praxistests, da die labortechnische Modellierung des Prozesses schwierig ist. Die Versuche die Verpackungsbewertung, um die Bewertung von Kreislaufwasser zu ergänzen ist auch der Ansatz diese Prozesse in der Papierherstellung zu stabilisieren.

#### **5.5.2.6 Hydrophobizität**

Eine signifikante Hydrophobizität der Stoffe erleichtert eine Abtrennung in der Flotation. Die Grundsätzliche Abtrennbarkeit von Bestandteilen, wie Klebern oder lassen sich dann vereinfachen. Aktuell gibt es Entwicklungen die Chemikaliengabe in Kreislaufwasserflotationen an die neuen Verpackungen anzupassen. Die Messbarkeit der Störstoffe aus den Materialien ist mit der Anfärbbarkeit von hydrophoben Materialien nach der Flowzytometrie möglich, um die Prozesse zu verbessern.

#### **5.5.2.6 Ablösbarkeit der Barriere**

Nachdem die Verpackung ihre Aufgabe erfüllt hat, soll der Polymerfilm leicht wieder ablösbar sein, um ein erneutes Recycling zu ermöglichen. Ein weiterer Vorteil des Papierrecyclings ist, dass es nicht nur ökologisch sondern auch ökonomisch effizient ist wurde auf die Vernetzung des Polymers zurückgeführt. Ziel wäre daher eine optimale Trennung der ganzen Polymerschicht durch die Penetration des Wassers bei der Zerfaserung. Nach den Studien dringt das Wasser bei zweiseitigen PPK-Verbunden über die Stirnseite nur mit 0,3mm/Min in die Verpackung ein. Eine einseitige Wasserbarriere oder eine ausreichend lange Penetrationszeit des Wassers ist notwendig. Das bedeutet bei einem Tetrapack eine Penetration von über 30 Minuten, bei dem die eingetragene Rührenergie den Polymerfilm nicht zerschlagen sollte.

## 6. Bestimmung der Rezyklierbarkeit

Das künftige EU-Verpackungsrecht soll im Zeichen der Harmonisierung und Vereinheitlichung stehen und gleichzeitig die Kreislaufwirtschaft fördern. Die Europäische Kommission verfolgt mit ihrem Vorschlag für eine Verpackungsverordnung als eines der Ziele, dass spätestens 2030 alle Verpackungen in der EU vollständig recycelbar sind. Der aktuelle Entwurf für die Verordnung sieht dazu grundlegende Kriterien für das „Design for Recycling“ von Verpackungen vor. Um als recycelbar zu gelten, müssen Verpackungen nicht nur diese Kriterien erfüllen, sondern auch über eine einheitliche Kennzeichnung einen gültigen konkreten Entsorgungsweg innerhalb der Kreislaufwirtschaft aufzeigen.

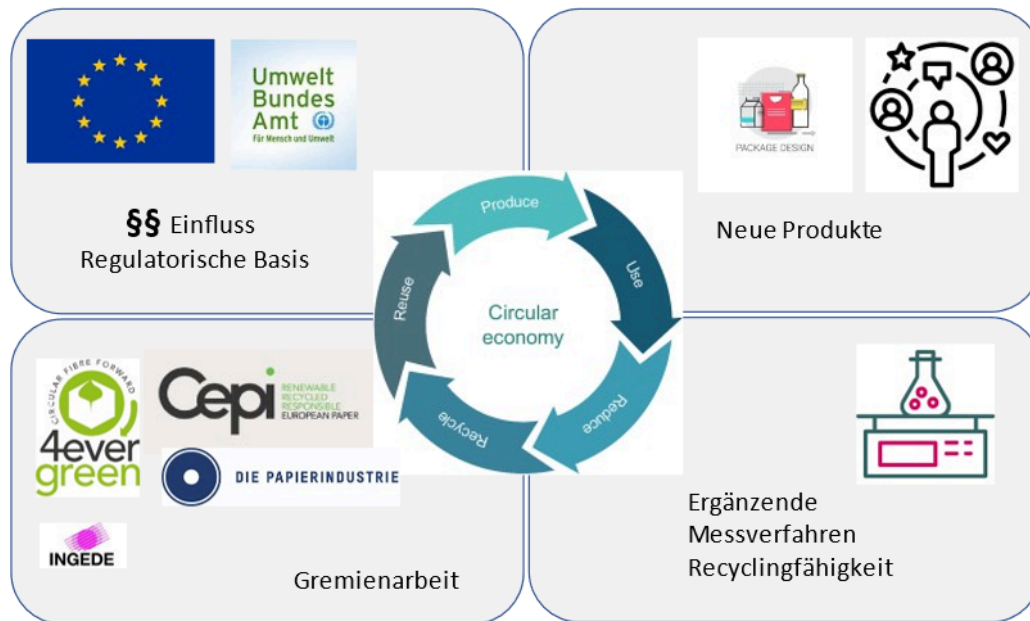


Abbildung 22: Bewertungseinflüsse auf die Rezyklierbarkeit von Verpackungen

Die Vergleichbarkeit der Methoden ist gegeben, allerdings ist es notwendig, dass es eine einheitliche Methode und Bewertungskriterien zur Recyclingfähigkeit von Verpackung geben muss. Diese Definition ist in der neuen Verordnung der EU Kommission vorgesehen.

Aktuell arbeiten mehrere Universitäten, Prüfinstitute und Firmen, um die Bewertung der Recyclingfähigkeit zu verbessern. Diese Bewertungsmethoden werden in den unterschiedlichen Gremien und Verbänden diskutiert.

Die CEPI-Methode zur Bestimmung der Rezyklierfähigkeit 12/2022 hat sich weitgehend durchgesetzt. In der folgenden Abbildung sind die kleineren Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren dargestellt. Dabei ist bei der CEPI-Methode als einzige Methode die vom Mindeststandard geforderte Wasseruntersuchung zusätzlich vorgesehen.

Labormethode	PTS RH21:2012	CTP EN 13430	Zellcheming Merkblatt RECO 1, 2/2014	ATICELCA MC 501:2017	CEPI
Bewertungs-methode	PTS RH21:2012	---	---	UNI 11743	4evergreen (ab 1.2023)
Zerfasern	Hobart (weiss)/ Desintegrator	Desintegrator	LC Pulper siehe Methode	Desintegrator	Desintegrator
	SD 15 %/2,5 %	SD 3 %	SD 4%	SD 2,5 %	SD 2,5 %
	40° C, 20 min	40° C, 15/30/45 min	40° C, 5 min	40° C, 10 min	40° C, 10 min
Vorsortierung Grobrejekte	nein	Somerville 5 mm	Lochplatte 10 mm	Somerville 5 mm	Somerville 5 mm
Sortierung 1 absortierbar	Brecht-Holl Ø 0,7 mm	Somerville // 0,15 mm	Brecht-Holl Ø 0,7 mm	Haindl-Frakt. Ø 0,7 mm	Somerville // 0,15 mm
	Haindl-Frakt. // 0,15 mm	Somerville // 0,10 mm	Haindl-Frakt. // 0,15 mm	Somerville // 0,15 mm	
Cleaner	---	HWC optional	---	---	---
Reject-Bewertung	Trockensortierbar +Stippen	Grobrejekt Feinrejekt	Trockensortierbar +Grobrejekt +Stippen	Trockensortierbar +Grobrejekt +Stippen	Trockensortierbar +Grobrejekt +Feinreje
Blattbildung	Formation	Formation	Formation	Formation	Formation
Bewertung Stickies/Schmutz	Blattklebetest /ja	Blattklebetest /ja	INGEDE Methode 4 /ja	Blattklebetest /ja	Blattklebetest opt. INGEDE Methode 4/ja

Abbildung 23: Vergleich der unterschiedlichen Bewertungen von Rezyklierbarkeit

Konkret ergibt sich für einen Entwickler von Verpackungen und Verpackungsbestandteilen folgende Situation.

- Eine Listung im Verpackungsregister mit einer Selbsteinschätzung der Verpackung erfordert einen Nachweis der Recyclingfähigkeit
- Die aktuelle Mindestanforderung inkludiert einen störungsfreien Recyclingprozess und eine moderne Kreislaufwirtschaft als essenziell zur Bewertung der Recyclingfähigkeit
- Die Kriterien zur Bewertungsmethode stehen noch aus. Die vorhandenen Designguides bilden daher nur eine Grundlage für die Einsetzbarkeit einer Verpackung
- Eine vollumfängliche Bewertung von Verpackungen ist aktuell nur in Anlehnung an verschiedene Messmethoden möglich, da es keine anerkannten umfänglichen Kriterien für die Verpackungsbewertung gibt.
- Der Verwender (Inverkehrbringer) von Verpackungen ist für die konforme Recyclingfähigkeit der Verpackung verantwortlich. Zusätzlich kann er anhand der Ergebnisse einen Recyclingcode für die Verpackung gemäß Anhang 5 der Verpackungsverordnung einstufen.

Ein neuer Standard wird EU-Weit vorbereitet. Dieser wird über die Veröffentlichung im Journal der EU zu einheitlichen Kriterien bei der Verpackungsbewertung führen.



Abbildung 24: Übersicht über die Bewertungskriterien für die Recyclingfähigkeit im Materialkreislauf von faserbasierten Verpackungen

Bis zur Harmonisierung der Kriterien und der Festlegung der industriellen Standards haben die Verpackungshersteller nur begrenzte Sicherheit für die Nachhaltigkeit ihrer Produktentwicklung. Die Erweiterung der Anforderungen im Mindeststandard und in der europäischen Gesetzgebung werden erst in zukünftigen industriellen Standards umgesetzt.

- Einstufung der Eignung (z.B. Lebensmittelunbedenklichkeit, Direktkontakt mit Lebensmitteln)
- Die Einstufung der Entsorgung (Recyclingcode, Sortierbarkeit)
- Die Einstufung nach Kreislauffähigkeit (Recyclingfähigkeit, Deinkbarkeit, Prozesstörung)
- Die Einstufung bei Umweltverschmutzung (Kompostierung)



## 7. Fazit

Die Studie sollte die wesentlichen Aspekte von barrierebeschichteten faserbasierten Verpackungen und die möglichen Risiken theoretisch betrachten. Grundlage war auch die von 4Evergreen herausgegebene Guideline for Design. Es konnte Anhand der zitierten Gesetztexte gezeigt werden, dass eine funktionelle Barriere zur Sicherung des Verpackungsgutes einerseits in den einschlägigen Gesetztestexten betrachtet wird, andererseits die Sicherstellung eines störungsfreien Recyclingsprozesses nach dem Mindeststandard ist.

Die Beurteilung der Rezyklierfähigkeit nach dem CEPI-Standard von 12/2022 geht daher explizit auf den Übergang von Verpackungsbestandteilen in die wässrige Phase bei der Zerfaserung von Verpackungen ein. Die vorliegende Messmethode der PTS RH025/2022 wird in den einschlägigen Gremien als nicht ausreichend diskutiert. In den nächsten 6-12 Monaten werden dort weitere Messmethoden zur Beurteilung des Lösewassers und einer Bewertung der Rezyklierbarkeit vorgestellt. Der Entwurf der EU in Bezug zu einer neuen Verpackungsrichtlinie plant eine europaweit gültige Messmethode zur Rezyklierfähigkeit von Verpackungen festzuschreiben.

Eine Barriere auf der Basis eines faserbasierten Materials wird immer die Migration eines Materials verzögern, jedoch nicht grundsätzlich ausschließen. Die Barrieren werden damit nach ihrer Migrationsrate in  $[\text{mg}/\text{m}^2 \text{ d}]$  bewertet. In der industriellen Praxis ist neben den Barriereigenschaften in der Fläche, die Barriere in der Verarbeitung wesentlich für die Anwendung. Testmethoden sollten daher auch die Barrierewirkung in der Falz, oder Rillung vorsehen. Die Verwendung von definierten Testflüssigkeiten erlauben reproduzierbare Werte, jedoch ist ein Praxistest unumgänglich da die reale Molekülverteilung eventuell andere Barriereigenschaften benötigen.

Die neuen Biopolymere und faserbasierten Lösungen werden aktuell nicht in der Altpapiersortierung, der Benennung der Altpapiersorten und der Aufbereitung ausreichend getrennt erfasst. Untersuchungen haben gezeigt, dass ca. 50% der Papierverbunde in der blauen Tonne landen und daher die Papierherstellung mit neuen Störstoffen aus den modernen Verpackungsmethoden konfrontiert wird. Eine Standardaltpapieraufbereitung gibt es nicht, sondern die einzelnen Module einer Aufbereitung haben so unterschiedliche Randbedingungen, dass es keinen Standard gibt. Eine Penetrationszeit und der Energieeintrag der unterschiedlichen Anlagen können durchaus verglichen werden. Ziel der Zerfaserung ist es die Fremdbestandteile möglichst unzerkleinert und damit sortierbar aus dem System auszutragen. Aktuelle Forschungsprojekte zeigen die Entwicklungen in der Sortiertechnik und den Einfluss der Zerfaserung auf die Papierqualität auf.

Die Zerfaserung der Verpackung basiert einerseits auf der Stoffdichte und dem Energieeintrag in die Anlage. Das Ziel der Faservereinzelung kann durch eine schnelle Penetration des Wassers in die Verpackung erreicht werden. Zweiseitige Verbunde, Barrieren, ein hoher Gehalt an Nassfestmitteln und eine lange Penetrationsstrecke erschweren den Wassereintrag in die Kapillaren. Erst mit dem Wassereintrag können die Faserbindung gelöst werden, um die Faser zu vereinzeln. Mangelnde Wasserpenetration erhöht den Faseranteil im Rejekt, bzw. verringert die Papierstoffausbeute aus der Verpackung.

Der Eintrag an biologisch abbaubaren Stoffen über die Verpackung verändert die Biozönose im Stoff-Wasserkreislauf. Die Abbauprodukte der mikrobiellen Tätigkeit treten als zusätzliche Störstoffe im Kreislauf aus. Thermoplastische Polymere mit niedrigem Schmelzpunkt von unter  $105^\circ\text{C}$  bilden Ablagerungen in der Trockenpartie und behindern die Produktion. Diese Störstoffe werden bei geringem Vorkommen im Mischpapier nicht auffällig. Eine signifikante Erhöhung dieser Stoffe hat in der Vergangenheit in verschiedenen Papierfabriken bereits zu erheblichen Produktionsausfällen



geführt. Bestehende Systeme zur Bekämpfung der Störstoffe sind nur bedingt geeignet um die neuen Störstoffe systematisch zu bekämpfen.

Die Entfernung der klassischen Störstoffe findet in erster Linie bei Dichteunterschieden bzw. bei einer Minimalgröße von 2000µm der Bestandteile statt. Klebrige Bestandteile werden durch die Quellung oder Temperatur oft weich und passieren die Reinigungsaggregate. Eine Entfernung von Störstoffen über eine chemisch-physikalische Sortierung findet nur in Einzelfällen, insbesondere bei Kreislaufwasserreinigungen oder Deinking statt, bei dem Papierstoffbestandteile gezielt ausgetragen werden. Diese Systeme erzeugen einen signifikanten Energieverbrauch und einen Faserverlust. Es ist von gesamtökonomischem Interesse diese Reinigung möglichst wenig zu verwenden. Der Eintrag von Störstoffen sollte deshalb geringgehalten werden. Andere wissenschaftliche Forschung befasst sich mit der online- Messbarkeit und der digitalen Steuerung, um die Prozesse in der Stoffaufbereitung gegenüber neuen Störstoffen zu stabilisieren.

Der heutige Stand der Technik in der Altpapieraufbereitung ermöglicht noch keine gezielte Gegensteuerung in Echtzeit, um die Stoff-Wasserkreisläufe zu stabilisieren und gleichzeitig den Gebrauch an chemischen Additiven, Energieeintrag und der Produktion zu optimieren.

Die Anforderungen an eine ideale Barriere aus der Sicht der Kreislaufwirtschaft in der Altpapieraufbereitung wäre demnach:

- Mechanische Sortierbarkeit
- Mikrobielle Stabilität
- Oberflächenladung (Anionisch)
- Thermisches Verhalten (Klebrigkeit > 105°C)
- Hydrophobizität
- Ablösbarkeit des Barrierefilms

Diese Anforderungen lassen sich aus heutiger Sicht nicht vollständig umsetzen, da die technischen Anforderungen, und die Verarbeitbarkeit der Barrieren es nur bedingt erfüllen können. Daher ist es wichtig gleichzeitig an der Prozessstabilität des Papierprozesses zu arbeiten. Insbesondere die Verwendung von Polymermischungen beinhalten häufig Bestandteile, welche diesen Anforderungen nicht genügen.

Hildesheim, den 10.07.2023

Dr. techn. Arne Krolle

#### Quellenangabe:

- Funktionelle Barriere von Kunststoffen R. Brandsch
- Funktionelle Barrieren gegen Mineralöl aus Papier und Kartonverpackungen DLG Expertenwissen
- Kompetenz im lebensmittelrechtlichen konformen Verpackungsdruck Actega
- Dissertation: Optimierung der barriereeigenschaften von Beschichtungen aus Emulsionspolymerisaten für Lebensmittelverpackungen
- BMEL Entwurf Stand: 24.07.2014: Zweiundzwanzigste Verordnung zur Änderung der Bedarfsgegenständeverordnung
- Ewender, J., Franz, R., Welle, F., Permeation of mineral oil components from cardboard packaging materials through polymer films. *Packaging Technology and Science* 2013, 26, 423-434.
- Schweizerisches Verpackungsinstitut SVI, SVI Guideline 2015.01 „Überprüfung und Bewertung der Barrierewirksamkeit von Innenbeuteln für Lebensmittelverpackungen in Recyclingkarton“. 2015.
- Diehl, H., Welle, F., How to determine functional barrier performance towards mineral oil contaminants from recycled cardboard. *Food Packaging and Shelf Life* 2015, 5, 41-49.
- Guazzotti, V., Limbo, S., Piergiovanni, L., Fengler, R., Fiedler, D., Gruber, L., A study into the potential barrier properties against mineral oils of starch-based coatings on paperboard for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life* 2015, 3, 10
- Fiselier, K., Grob, K., Barriers against the migration of mineral oil from paperboard food packaging: Experimental determination of breakthrough periods. *Packaging Technology and Science* 2012, 25, 285-301.
- O'Connor, G., Hudson, N., Buckley, S., Mineral oil barrier testing of cellulose-based and polypropylene-based films. *Packaging Technology and Science* 2015, 28, 75-89. [9] Biedermann-Brem, S., Biedermann, M., Grob, K., Required barrier efficiency of internal bags against the migration from recycled paperboard packaging into food: A benchmark. *Food Additives and Contaminants: Part A* 2016, 33, 725-740.
- Ewender, J., Welle, F., Determination and prediction of the lag times of hydrocarbons through a polyethylene terephthalate film. *Packaging Technology and Science* 2014, 27, 963-974.
- Ewender, J., Langowski, H.-C., Welle, F., Functional barriers towards mineral oil contaminants - Evaluation of alternatives to PET and PA. *Verpackungs-Rundschau, Technisch-wissenschaftliche Beilage*, 2015, 50-51.
- Ausmaß der mineralölbasierten Migration von Verpackungsmaterialien aus Altpapier in Lebensmittel Studie 2010