

Schlussbericht der:

- **TBP Future GmbH**

In Kooperation mit der:

- Gotic GmbH
- Rohprog GmbH

**Digitale Rohstoffplattform Phase II –  
Entwicklung einer digitalen Rohstoffplattform mit Aufberei-  
tungszentrum zur nachhaltigen stofflichen Verwendung bisher  
nicht nutzbarer Sekundärfaserquellen**

Abschlussbericht zum Projekt mit dem Aktenzeichen 37826/01. Das For-  
schungsprojekt wurde gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Tilo Gailat & Dipl.-Ing. Thomas Schrinner und Steve Schreiber

Januar 2025

## Projektkennblatt

Aktenzeichen 37826/01	Bewilligungsempfänger TBP Future GmbH	
Digitale Rohstoffplattform Phase II – Entwicklung einer digitalen Rohstoffplattform mit Aufbereitungszentrum zur nachhaltigen stofflichen Verwendung bisher nicht nutzbarer Sekundärfaserquellen “		
Projektbeginn 01.07.2022	Projektlaufzeit 24 Monate + 6 Monate	Berichtszeitraum 01.07.2022 – 31.12.2024

## Inhalt

I	Abbildungsverzeichnis .....	4
II	Tabellenverzeichnis.....	4
III	Abkürzungsverzeichnis .....	5
1	Zusammenfassung.....	6
2	Einleitung.....	7
3	Hauptteil.....	11
3.1	Zusammenfassung der Phase I.....	11
3.2	Überblick Phase II.....	14
3.3	Optimierung des Aufbereitungsprozesses.....	16
3.4	Untersuchung der erforderlichen Aufbereitungsschritte und Ableitung geeigneter Anwendungsmöglichkeiten .....	23
3.5	Entwicklung der Rohstoffplattform.....	27
3.6	Testbetrieb eines Aufbereitungszentrums.....	35
3.7	Abschließende ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand der Technik.....	38
3.8	Darstellung der geplanten Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse sowie geplante Veröffentlichungen .....	45
4	Fazit.....	47
5	Literaturverzeichnis.....	48
6	Anhang .....	49

## I Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Konzept der Rohstoffplattform .....	8
<b>Abbildung 2:</b> Übersicht der Hauptarbeitspakete der Digitalen Rohstoffplattform (Phase I + II).....	9
<b>Abbildung 3:</b> mobile Anlage DPS 40 GT (Prinzipdarstellung) .....	12
<b>Abbildung 4:</b> Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT II bei einem Tissuehersteller (siehe Anhang 3 – 6).....	12
<b>Abbildung 5:</b> Laborergebnisse zur Volumen- und Biegesteifigkeitsverbesserung durch Dosierung von Trockenfasern (KCB).....	14
<b>Abbildung 6:</b> Darstellung des Dosierbunkers mit Austragsschnecke.....	18
<b>Abbildung 7:</b> schematische Darstellung des mehrstufigen Dosierkonzepts .....	21
<b>Abbildung 8:</b> Herkunft der potenziellen Rohstoffquellen.....	28
<b>Abbildung 9:</b> Ablaufschema für die physische Datenbank sowie der zuständige Bereich der Projektpartner.....	30
<b>Abbildung 10:</b> Startseite der Website fiber-rec.com .....	33
<b>Abbildung 11:</b> Website Fiber-Rec Kategorie Rohstoff .....	34
<b>Abbildung 12:</b> Website Fiber-Rec Kategorie Verfahren.....	34
<b>Abbildung 13:</b> Aufteilung des rechnerischen Papierverbrauchs in Deutschland nach erfasstem Altpapier und nicht erfassten Papierprodukten.....	52

## II Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Meilensteine zur Phase II mit dem jeweiligen Inhalt. ....	15
<b>Tabelle 2:</b> Vergleich der Treibhausgasemissionen von Etikettenpapier aus Altpapier und Zellstoff.....	40

### III Abkürzungsverzeichnis

AP	Altpapier
BWK	Baden-Württemberg Kongress
KCB	Kraft Chemical Bleached
PPK	Papier, Pappe, Kartonagen
LVP	Leichtverpackungen (gelber Sack)
WRV	Wasserrückhaltevermögen
TZ	trockenzerfasert(er) / Trockenzerfaserung
DPS	Dry Pulping System
NZ	nasszerfasert(er) / Nasszerfaserung
M	Meilenstein
Ref	Referenz
PMAK	Papiermaschinenarbeitskreis
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
IMPS	Internationales Münchner Papiersymposium
APV	Akademischer Papierverband
CEPI	Confederation of European Paper Industries
PID	Proportional-Integral-Differential
VNOP	Verband Nord- und Ostdeutscher Papierfabriken e.V.
REA	Rauchgasentschwefelungsanlagen

## 1 Zusammenfassung

Ziel des zweigeteilten FuE-Projekts „Rohstoffplattform“ war die Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts zur Erfassung, Aufbereitung und nachhaltigen stofflichen Verwendung bisher nicht nutzbarer Sekundärfaserquellen. Als Grundvoraussetzung mussten dafür zunächst in der Phase I die erforderlichen trockenen Aufbereitungstechnologien sowie Analyse- und Bewertungsmethoden entwickelt werden, um die wertvollen Fasern aus den betreffenden Faserquellen zurückzugewinnen, zu charakterisieren und deren Nutzungs- und Papierherstellungspotenzial zu bewerten.

Zu diesem Zweck wurde in der ersten Projektphase eine mobile Trockenzerfaserungsanlage im Industriemaßstab aufgebaut, mit der durch zahlreiche Tests und Papiermaschinenversuche die Praxistauglichkeit der Aufbereitungstechnologie nachgewiesen werden konnte. Durch die Kopplung mit nachgeschalteten trockenen Sortierverfahren zur Abtrennung von Störstoffen sowie der Ableitung geeigneter Reaktivierungsmaßnahmen konnte ferner gezeigt werden, dass trocken aufbereitete Faserstoffe sogar das Eigenschaftsniveau von Zellstoff erreichen können.

Mit der erfolgreichen Entwicklung und dem Aufbau der Zerfaserungsanlage konnte in Phase I die technologische Basis für die Rohstoffplattform gelegt werden. Um das skizzierte Potenzial aus den bisher nicht nutzbaren Sekundärfaserquellen voll ausschöpfen zu können, wurden in Phase II in Zusammenarbeit mit einem Recyclingunternehmen die weiteren Schritte zum Aufbau der Rohstoffplattform vorangetrieben. Wesentliche Kernziele waren der Aufbau der Plattform mit dazugehörigem Aufbereitungszentrum sowie die Lokalisierung der Quellen, die Untersuchung der erforderlichen Aufbereitungsschritte und die Ableitung geeigneter produktspezifischer Verwertungsmöglichkeiten.

Im Ergebnis der Phase II konnte eine digitale Rohstoffplattform online gestellt werden. Außerdem konnte ein temporäres Aufbereitungszentrum zur Durchführung eines analogen Testbetriebs der Rohstoffplattform aufgebaut werden. Nicht zuletzt konnte der Aufbereitungsprozess, insbesondere hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit sowie der Prozessstabilität und -sicherheit, weiter optimiert werden.

Mit der erfolgreichen Entwicklung des Trockenaufbereitungsverfahrens sowie der Umsetzung der Rohstoffplattform konnten die erforderlichen Randbedingungen zur stofflichen Nutzung von mindestens 1.000.000 t/a Sekundärfaserquellen, die nach dem aktuellen Stand der Technik nicht aufzubereiten sind, geschaffen werden. Der damit einhergehende Verzicht auf Primärfasern, zum Beispiel bei der Papierherstellung, stellt einen wichtigen umweltrelevanten Beitrag zur Stärkung und Ausweitung der nachhaltigen Nutzung wertvoller Ressourcen im Sinne der zirkulären Bioökonomie dar.

Das Forschungsprojekt mit dem Aktenzeichen 37826/01 wurde in Kooperation mit der Gotic GmbH und der Rohprog GmbH durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

## 2 Einleitung

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Verknappung und Verteuerung von Rohstoffen und der Notwendigkeit der Substitution von Plastik durch naturfaserbasierte Produkte würde die stoffliche Verwendung bisher nicht nutzbarer Altpapierquellen zweifelsfrei einen erheblichen Beitrag zur Sicherung der Rohstoffverfügbarkeit und zur Reduktion gravierender Umweltbelastungen durch Plastikmüll leisten können. Mit der Entwicklung einer Rohstoffplattform und der dazugehörigem Aufbereitungstechnologie sollen die Voraussetzungen dafür geschaffen und die Defizite des bestehenden Erfassungs- und Recyclingsystems behoben werden.

Grundlage für einen nachhaltigen und effizienten Ressourceneinsatz ist ein funktionierender und möglichst geschlossener Stoffkreislauf, der auf mehrfach rezyklierbare Sekundärrohstoffe beruht und somit weitestgehend auf Primärressourcen verzichtet. In dieser Hinsicht kann sich die Papierindustrie mit einer Altpapiereinsatzquote von ca. 80 % bereits heute als Vorreiter auf dem Weg zur zirkulären Bioökonomie bezeichnen.

Doch obwohl eine weitere Schließung der Stoffkreisläufe möglich und ökonomisch sowie ökologisch wünschenswert wäre, hat sich die Menge an rezyklierbarem Altpapier einem Grenzwert angenähert, der vor allem auf technologische Defizite beruht. Während bestimmte Produkte wie Hygienepapiere zwar nicht mehr für eine stoffliche Nutzung in Frage kommen, existiert dennoch ein signifikanter Anteil, der stofflich durchaus verwertbar wäre, aber nach dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht aufbereitet werden kann. Zu diesen sogenannten schwer zerfaserbaren Produkten zählen zum Beispiel nassfeste Spezialpapiere wie Etiketten, Trinkbecher, beschichtete oder kaschierte Papiere, Foodtrays u.v.m. Aus diesem Grund dürfen viele Papierprodukte auch nicht im Altpapier entsorgt werden, weshalb ohne eine entsprechende Aufbereitungstechnologie auch noch kein Markt existiert oder geschaffen werden kann, auf dem sie erfolgreich gehandelt und schließlich rezykliert bzw. stofflich weiterverarbeitet werden könnten / [2]/. Im Jahr 2020 hat dieses Erfassungs- und Aufbereitungsdefizit allein in Deutschland zu einem „Verlust“ von mindestens 1.000.000 t<sup>1</sup> Papier und Karton geführt. Und tendenziell ist trotz einer zuletzt gesunkenen Gesamtpapierproduktion nicht mit einer Abnahme zu rechnen, da der Trend klar in Richtung zu noch nassfesten Papieren sowie der Entwicklung von neuen, plastikähnlichen Produkten geht.

Die Hauptursache für diesen „Verlust“ an wertvollen Fasern liegt im Fehlen geeigneter Aufbereitungstechnologien zur Gefügetrennung der nassfesten oder anderweitig schwer zerfaserbaren Papierstruktur in verarbeitungsfähige Einzelfasern. Derartige Möglichkeiten würden aber zwei wichtige, umweltrelevanten Aufgaben lösen. Einerseits können wertvolle Ressourcen weiter stofflich genutzt werden, was insbesondere dahingehend von Bedeutung ist, da es sich bei den nicht genutzten Produkten über-

---

<sup>1</sup> Siehe Anhang 7, „Betrachtung der Mengen an bisher nicht nutzbaren Faserquellen“

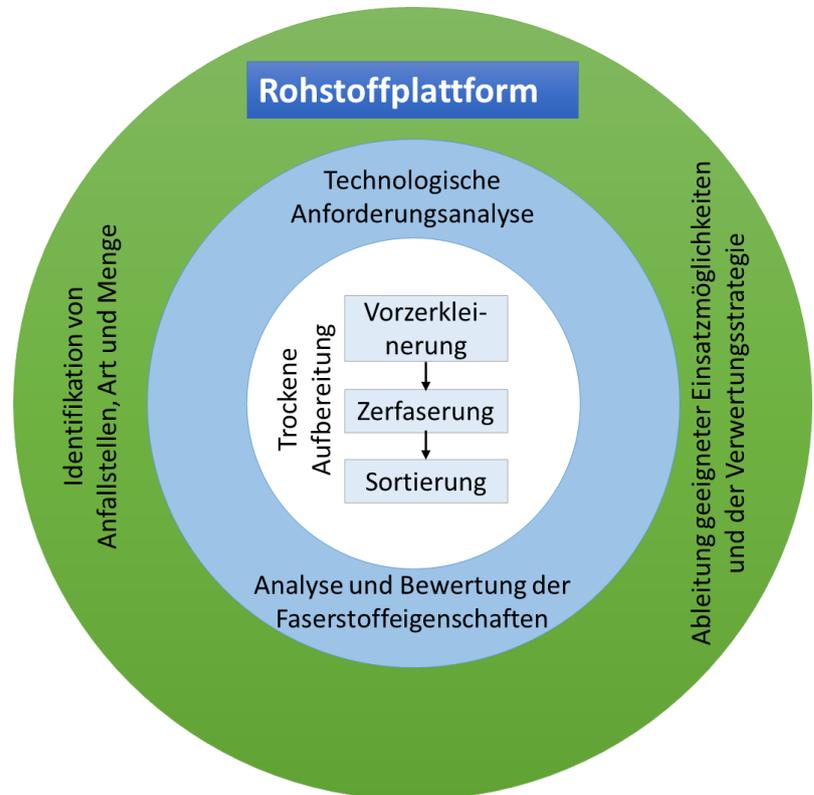
wiegend um hochwertige, primärfaserbasierte Papierprodukte handelt. Und andererseits wird durch die Herstellung faserbasierter Plastiksubstitute vermieden, dass Kunststoffabfälle unkontrolliert in die Umwelt gelangen.

Mit dem Vorhandensein einer geeigneten Aufbereitungstechnik würde somit eine volkswirtschaftlich relevante Fasermenge für die Papierindustrie und andere faserverarbeitende Industrien erschlossen werden.

Die Projektidee besteht in der Entwicklung von neuen Konzepten und geeigneten technologischen Lösungen, um diese schwer zerfaserbaren und derzeit nicht rezyklierbaren Materialien zu erfassen und einer geeigneten stofflichen Nutzung zuzuführen. Zu diesem Zweck soll eine Rohstoffplattform entwickelt werden, die in der Lage ist, Anfallquellen für schwer zerfaserbare Produkte von Erzeugern, Verarbeitern, Verbrauchern und Entsorgern zu identifizieren,

zu erfassen und zu charakterisieren, um deren Nutzungs- und Wiedereinsatzmöglichkeiten zu analysieren sowie deren Aufbereitung und die erneute stoffliche Verwertung zu organisieren. Dazu gehört auch die Erfassung der Bedingungen für die Zerfaserbarkeit und der Trennung faseriger von nichtfaserigen Anteilen nach der Trockenzerfaserung. Diese Rohstoffplattform soll dynamisch und allgemein zugänglich sein.

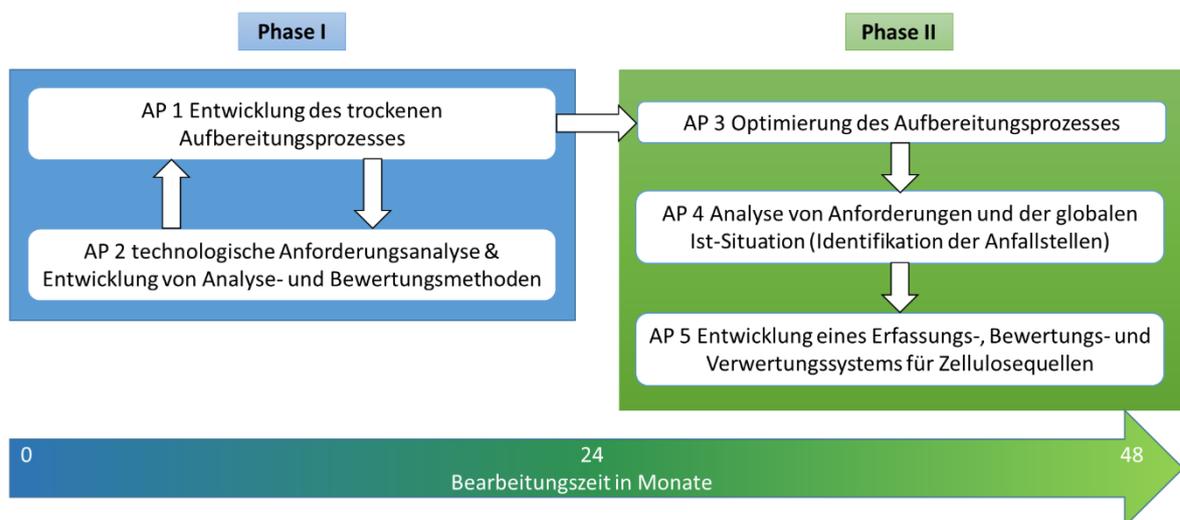
Die Projektidee basiert auf der Erfahrung, dass die hier interessierenden Produkte unter den aktuellen Gegebenheiten weder durch das etablierte Altpapiersammelsystem erfasst werden können noch geeignete Aufbereitungstechnologien existieren, weshalb sie in der Regel keiner stofflichen Verwertung zugeführt werden. Dafür ist es notwendig die verschiedenen Faserquellen, die wahrscheinlich sehr unterschiedliche Charakteristika aufweisen, zunächst zu identifizieren und in eine überschaubare Zahl klar definierter Kategorien einzuteilen. Dies setzt einerseits voraus, dass die Produkte schonend vereinzelt werden können und ohne Qualitätseinbußen lager- und transportfähig sind, da oftmals nicht die Produkte selbst, sondern der aufbereitete Faserstoff bereitgestellt werden soll. Darüber hinaus gilt es entsprechende Methoden zu entwickeln, mit denen die Faserstoffe ausreichend charakterisiert werden können, um das Faserpotenzial zur



**Abbildung 1: Konzept der Rohstoffplattform**

Ableitung besonders geeigneter Einsatzmöglichkeiten zu bestimmen. Der Handel der aufbereiteten Fasern soll dann über eine internetgestützte Plattform erfolgen, über die sich Abnehmer und Kunden verständigen.

Aufgrund der Komplexität und des hohen Entwicklungsbedarfs des ambitionierten Vorhabens haben wir uns auch auf Anraten der DBU dazu entschieden das Projekt in zwei Phasen durchzuführen. Zentrales Anliegen der Phase I war die Entwicklung der notwendigen neuen Aufbereitungstechnologien (AP1) sowie die Entwicklung von Analyse- und Bewertungsmethoden zur zuverlässigen Charakterisierung der trocken aufgeschlossenen Fasern und der Bewertung des Faserreaktivierungs- und Bindungspotenzials zur Ableitung von besonders geeigneten Einsatzmöglichkeiten (AP2). In der Phase II stand die eigentliche Entwicklung der digitalen Rohstoffplattform im Vordergrund, mit der die bisher nicht nutzbaren Rohstoffquellen erfasst, analysiert und anforderungs- und einsatzgerecht einer stofflichen Wiederverwertung zugeführt werden sollen. Darüber hinaus haben sich im Verlauf der Phase I noch prozesstechnologische Defizite herausgestellt, die in einem zusätzlichen Arbeitspaket in Phase II durch eine Optimierung des Aufbereitungsprozesses behoben werden sollten.



**Abbildung 2: Übersicht der Hauptarbeitspakete der Digitalen Rohstoffplattform (Phase I + II)**

In der erfolgreich abgeschlossenen Phase I wurden die erforderlichen Kerntechnologien entwickelt und in Form einer mobilen Testanlage für die notwendigen Grundlagenuntersuchungen zur Charakterisierung der Trockenfasern bereitgestellt. Auf Grundlage dieser technologischen Basis sollten in Phase II die weiteren Entwicklungsarbeiten zum Aufbau der eigentlichen Rohstoffplattform erfolgen. Die notwendigen Schritte zum Aufbau der Rohstoffplattform und des dazugehörigen Aufbereitungszentrums sind dabei in drei Arbeitspakete unterteilt, die parallel zueinander bearbeitet wurden.

Das Arbeitspaket AP 3 „Optimierung des Aufbereitungsprozesses“ musste zusätzlich entgegen der ursprünglichen Planung in den Arbeitsplan der Phase II mit aufgenommen werden, um die noch vorherrschenden Defizite im Hinblick auf die Sicherstellung

eines wirtschaftlichen Betriebs sowie der erforderlichen Prozesssicherheit und -stabilität zu beheben. Der Fokus lag dabei einerseits auf der Entwicklung einer speziellen Dosiervorrichtung, um eine kontinuierliche Beschickung des Prozesses zu realisieren. Die Herausforderung bestand hierbei im unterschiedlichen Produktverhalten, da die verschiedenen Papier- und Kartonprodukte in Abhängigkeit ihrer Größe, flächenbezogenen Masse, Dichte und weiterer Eigenschaften wie die Steifigkeit/Flexibilität eine andere Schüttdichte und Rieselfähigkeit aufweisen. Auf der anderen Seite hat sich herausgestellt, dass eine Trockenzerfaserungsanlage zwingend mit notwendigen Maßnahmen zum Brand- und Explosionsschutz ausgestattet sein muss. Nicht zuletzt zeigte sich eine Nachkalkulation der Schnittstellen sowie der Peripheriesysteme als erforderlich, um einen stabilen Prozess mit den gewünschten Durchsätzen zu gewährleisten.

Ziel des AP 4 „Analyse von Anforderungen und der globalen Ist-Situation“ war es Anfallstellen der potenziellen Faserquellen zu identifizieren und damit die notwendige Datenbasis für den Aufbau einer Rohstoffplattform zu schaffen. Neben der Identifikation der Faserquellen galt es ebenso mögliche Abnehmer (Senken) für die aufbereiteten Fasern, insbesondere außerhalb der Papierindustrie, zu eruieren. Dazu war es auch notwendig auf Informationen zu den Fasereigenschaften und deren Einsatzmöglichkeiten aus dem parallellaufenden Arbeitspaket AP 5 zuzugreifen.

Das AP 5 „Entwicklung eines Erfassungs-, Bewertungs- und Verwertungssystems für schwer zerfaserbare Produkte“ stellt das wichtigste Arbeitspaket der Phase II dar, da es die Entwicklung eines Bewertungssystems zur nachhaltigen Nutzung der aufbereiteten Fasern und den Aufbau der digitalen Rohstoffplattform umfasst. Ziel des Bewertungssystems ist es anhand einer Produktklassifizierung die Anforderungen an den Aufbereitungsprozess festzulegen und anhand eines Datenblatts die resultierenden Fasereigenschaften und die geeigneten Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten des aufbereiteten Faserstoffs zusammenzufassen. Auf Basis des Datenblatts sollen Nutzer der Rohstoffplattform dann für sie in Frage kommende Faserstoffe auswählen und Testmengen für Laborversuche bestellen können. Dazu war es angedacht eine physische Datenbank zur Bereitstellung von Faserstoffmustern aufzubauen. Darüber hinaus bestand ein wichtiges Ziel des Arbeitspakets im Aufbau einer zentralen Zerfaserungsanlage (temporäres Aufbereitungszentrum) zur Simulation des Plattformbetriebs. Neben dem Nachweis der Wirtschaftlichkeit und der Prozessstabilität der Aufbereitungsanlage sollten dadurch Faserstoffgroßmengen (mehrere Tonnen) für Maschinenversuche bei ausgewählten Kunden hergestellt werden.

## 3 Hauptteil

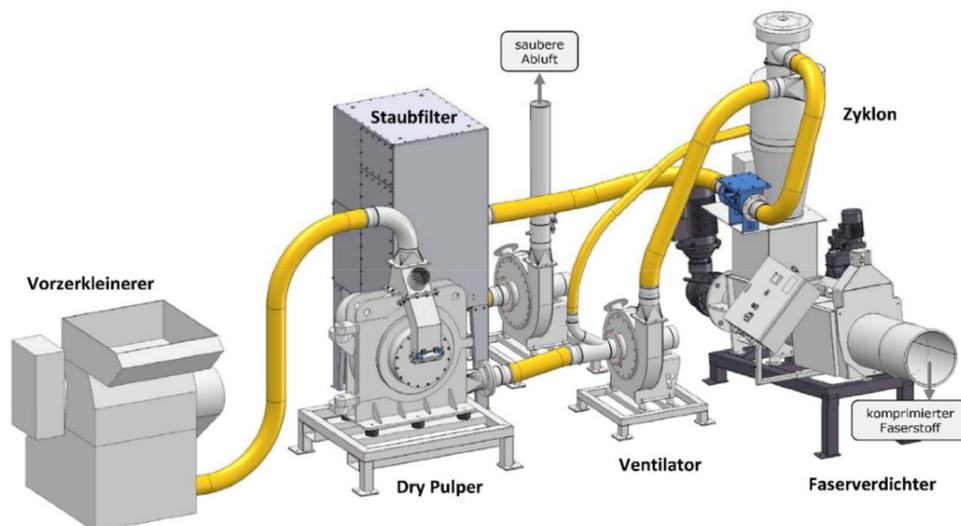
### 3.1 Zusammenfassung der Phase I

Das Gesamtprojekt „Rohstoffplattform“ wurde aufgrund des hohen Entwicklungsbedarfs in zwei zusammenhängenden und aufeinander aufbauenden Phasen durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse der Phase 1, in der die Entwicklung der Kerntechnologie im Vordergrund stand, sollen daher im Folgenden nochmal kurz zusammengefasst werden.

Das zentrale Anliegen der Phase I war die Entwicklung der notwendigen neuen Aufbereitungstechnologien, die im Gegensatz zum Stand der Technik auf eine trockene Einzelfaserzerlegung des Papiergefüges beruhen. Für die erfolgreiche Umsetzung des Trockenaufbereitungsprozesses war die technologische Weiterentwicklung der Trockenzerfaserungstechnologie auf einen industriellen Maßstab entscheidend. Hierzu waren unter anderem ein Upscaling des Trockenzerfaserungsaggregates auf einen industriell erforderlichen Durchsatz und die Entwicklung einer geeigneten Abscheidungs- und Verdichtungstechnologie für den im trockenen Zustand ansonsten sehr voluminösen Faserstoff von Nöten. Darüber hinaus stand selbstverständlich die erreichbare Qualität des trocken aufbereiteten Faserstoffs im Mittelpunkt sämtlicher Entwicklungsschritte, wobei vor allem auf drei Aspekte Wert gelegt wurde:

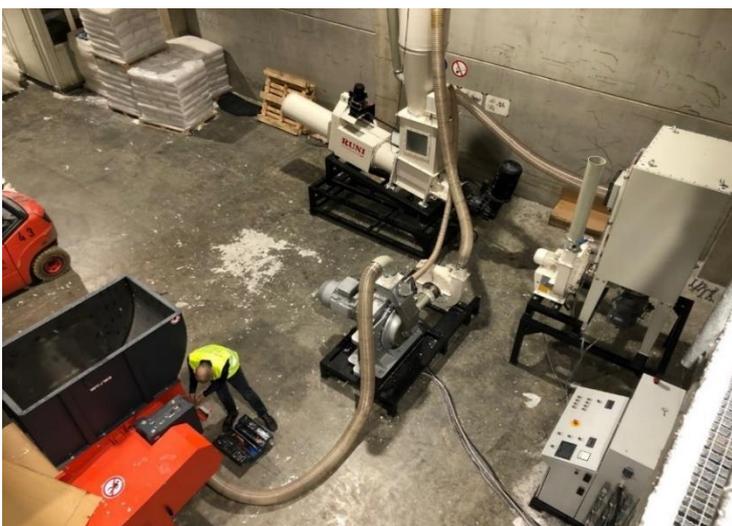
- Eine möglichst schonende Einzelfaserzerlegung unter Beibehaltung des größtmöglichen Festigkeitspotenzials der Faser.
- Eine vollständige Gefügetrennung zur optionalen Abtrennung von Störstoffen.
- Nutzung der Trockenzerfaserung als Fasermodifikationsmöglichkeit zur zielgerichteten Verbesserung des spezifischen Volumens und der Biegesteifigkeit.

Gemäß den Zielstellungen der Phase I konnte ein Trockenaufbereitungsprozess entwickelt werden, der für industrielle Anwendungen im Dauerbetrieb geeignet ist und entsprechend der erforderlichen Durchsätze auch upgescaled werden kann. Auf Basis des entwickelten Trockenaufbereitungsprozesses konnte eine mobile Testanlage (kurz DPS – Dry Pulping System) umgesetzt werden, die bereits in zahlreichen Papierfabriken im industriellen Einsatz erfolgreich getestet werden konnte. Insgesamt konnten im Rahmen der Phase I bereits mehrere hundert Tonnen Trockenfasern hergestellt und auf unterschiedlichsten Papiermaschinen eingesetzt werden. Die Phase I ist damit außerordentlich erfolgreich verlaufen und trotz teils schwieriger Corona bedingter Begleitumstände konnten alle relevanten Zielstellungen weitestgehend erreicht werden, so dass die Phase II planmäßig direkt im Anschluss beginnen kann. Infolge der Einschränkungen stehen lediglich noch prozess- und verfahrenstechnische Optimierungen des Trockenzerfaserungsprozesses aus, die in Phase I noch nicht vollständig abgeschlossen werden konnten und in Phase II noch finalisiert werden sollen. Diese bereits begonnenen Optimierungsarbeiten beziehen sich ausschließlich auf die Entwicklung eines Dosieraggregats in Kombination mit einem Pufferspeicher.



**Abbildung 3: mobile Anlage DPS 40 GT (Prinzipdarstellung)**

Die mobilen Testanlagen (siehe Abbildung 3, Anhang 1+2) stellen aus unserer Sicht einen Meilenstein für die erfolgreiche Umsetzung der Trockenzerfaserung in der Papierindustrie dar. Die Leistungsfähigkeit der Trockenzerfaserung konnte bereits in zahlreichen Technikumsversuchen mit Produkten von Papierfabriken nachgewiesen werden. Aufgrund der Produktvielfalt sowie der unterschiedlichsten Gegebenheiten und Randbedingungen in den jeweiligen Papierfabriken können Technikumsversuche allein jedoch keine hinreichend belastbaren Ergebnisse erzielen bzw. uneingeschränkt übertragen werden. Zudem stellt der Einsatz von Trockenfasern, die im Technikum erzeugt und in die Papierfabrik transportiert werden müssen, eine keinesfalls dauerhaft praktikable Lösung für umfangreichere Maschinenversuche dar. Eine mobile Anlage hingegen erlaubt es interessierten Papierfabriken eigene Rohstoffe vor Ort in größerem Umfang trocken zu zerfasern und die so hergestellten Trockenfasern direkt im laufenden Betrieb einzusetzen.



**Abbildung 4: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT II bei einem Tissuehersteller (siehe Anhang 3 - 6)**

Die mobile Trockenzerfaserungsanlage (siehe Abbildung 4) beginnt mit der Vorzerkleinerung des zu zerfasernden Produkts. Das vorzerkleinerte Produkt wird mit Hilfe eines von einem Ventilator erzeugten Luftstroms durch das Trockenzerfaserungsaggregat, dem Dry Pulper, gefördert und, unterstützt durch hochturbulente Luftwirbel, die infolge der hohen Drehzahl durch spezielle Zerfaserungselemente erzeugt werden, innerhalb kürzester Zeit zerfasert. Nach der Einzelfaserzerlegung wird der trockene, sehr voluminöse Faserstoff mithilfe eines Zyklons vom Luftstrom getrennt, anschließend durch einen Schneckenverdichter komprimiert und sukzessive ausgetragen. Die sich noch im Luftstrom befindlichen Fein- und Kurzfaserbestandteile werden am Ende der Prozesskette von einem Staubfilter zurückgehalten. Bedienung und Regelung der mobilen Anlage, die selbstverständlich explosionsgeschützt ist, erfolgen über einen Schaltschrank.

Entgegen den ursprünglichen Annahmen war es einem Filterpapierhersteller möglich, nach einer erfolgreichen Testphase mit zunächst 5 % und 10 % Trockenfaseranteil, die Trockenfasermenge schrittweise auf 20 %, 50 % und sogar 100 % zu erhöhen. Dabei konnte in allen Versuchen verkaufsfähige Ware produziert werden. Die Trockenfasern wurden aus einem nassfesten Filterpapier eines anderen Herstellers gewonnen und können als nahezu gleichwertiger Zellstoffersatz für die meisten Produkte eingesetzt werden. Durch die mobilen Anlagen konnten zahlreiche weitere Papiermaschinenversuche mit diversen nassfesten und schwer zerfaserbaren Produkten erfolgreich durchgeführt werden.

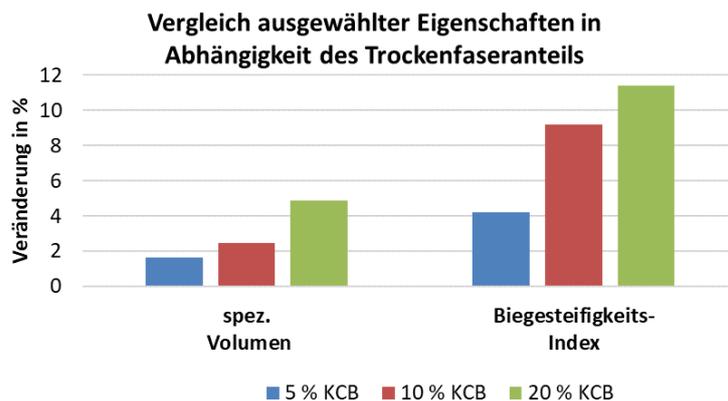
Großes Potenzial bietet die Trockenzerfaserung bei der Herstellung von faserbasierten Produkten im Trockenverfahren sowie der Entwicklung neuer faserbasierter Produkte, insbesondere im Verpackungsbereich als Ersatz für Kunststoffverpackungen. Eine vollständige Substitution für die konventionelle Nasszerfaserung von Standardprodukten kommt jedoch nicht in Frage. Eine Teilsubstitution zur zielgerichteten Fasermodifizierung zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften ist denkbar und bietet viel Potenzial.

Die Nutzung der Trockenzerfaserung als Fasermodifikationsmöglichkeit zur zielgerichteten Verbesserung des spezifischen Volumens und der Biegesteifigkeit wurde aufgrund der damit einhergehenden Vorteile intensiv untersucht, weil sich dadurch die Einsatzmöglichkeiten der Trockenzerfaserung deutlich erweitern. Insbesondere durch die Möglichkeit zur Rohstoffkosteneinsparung durch Verwendung bisher nur eingeschränkt nutzbarer Rohstoffquellen in Kombination mit einer Verbesserung des spezifischen Volumens ergeben sich vor allem für Verpackungspapier- und Kartonhersteller erhebliche Synergieeffekte. Ein Trockenfaseranteil von 5 - 20 % ist in vielen Fällen bereits ausreichend, um sehr gute Ergebnisse zu erzielen. Grundsätzlich kann das „Volumenpotenzial“ von allen relevanten Rohstoffen (Papier- und Kartonprodukte, Altpapiere, Zellstoffe) durch eine Trockenzerfaserung deutlich erhöht werden. Gleiches gilt für die Entwässerungsgeschwindigkeit.

Die Volumenzunahme geht jedoch wie bei anderen volumensteigernden Stoffen mit einer Lockerung der Gefügestruktur und damit einer Abnahme wichtiger Festigkeiten einher. Eine Ausnahme stellt dabei jedoch die Biegesteifigkeit dar, da die Dickenzu-

nahme den E-Modul-Rückgang überkompensiert und somit zum Teil deutliche Biegesteifigkeitssteigerungen erzielt werden können. Aufgrund der hohen Priorität, welche die Verbesserung des spezifischen Volumens und der Biegesteifigkeit für viele Spezialpapier- und Verpackungspapierhersteller einnimmt, ist ein gewisser Abfall der sonstigen Festigkeiten jedoch in vielen Fällen tolerierbar.

Die Möglichkeit zur Volumen- und Biegesteifigkeitsverbesserung bei mehrlagigen Produkten konnte mehrfach im Labormaßstab nachgewiesen und in Papiermaschinenversuchen bestätigt werden.



**Abbildung 5: Laborergebnisse zur Volumen- und Biegesteifigkeitsverbesserung durch Dosierung von Trockenfasern (KCB)**

Dabei konnte beim Papiermaschinenversuch durch die Zugabe von 15 % Trockenfasern (Kraftkarton „SixPack“, KCB) das spez. Volumen des produzierten Graukartons um 2,4 % und die Biegesteifigkeit sogar um 13 % gesteigert werden (siehe Abbildung 5). Die anderen relevanten Festigkeitseigenschaften blieben weitestgehend unverändert bzw. waren nur minimal reduziert, sodass der Versuch als voller Erfolg gewertet werden kann. Dies und die Verfügbarkeit einer geeigneten Trockenzerfaserungstechnologie mit einer Produktionsleistung von mehr als einer Tonne Trockenfasern je Stunde zeigen, dass der industriellen Anwendbarkeit des Ansatzes bereits jetzt nichts im Wege steht.

### 3.2 Überblick Phase II

Nach der Entwicklung der erforderlichen Kerntechnologie standen in der Phase II die notwendigen Schritte zum Aufbau der Rohstoffplattform sowie die Optimierung der Prozesskette im Vordergrund. Die ursprünglich vorgesehene Projektlaufzeit von 24 Monaten wurde aufgrund anfänglicher personeller Engpässe um weitere 6 Monate verlängert. Diese kostenneutrale Verlängerung war außerdem notwendig, da sich im Projektverlauf die Notwendigkeit zur Optimierung der Prozesssicherheit hinsichtlich des Brandschutzes auch für sortenreine Produkte ergeben hat. Letztlich konnten jedoch alle Arbeitspakete bearbeitet und die Projektziele erreicht werden.

Zur Kontrolle der Zielerreichung der in den Arbeitspaketen AP 3, 4 und 5 beschriebenen Aufgaben wurden zum Projektbeginn der Phase II folgende Meilensteine formuliert (siehe Tabelle 1):

**Tabelle 1: Meilensteine zur Phase II mit dem jeweiligen Inhalt.**

<b>Übersicht der Meilensteine der Phase II:</b>	
M 1	Erfolgreiche Implementierung von Vorzerkleinerung und Dosierung in die Prozesskette der Zerfaserungsanlage
M 2	Entwicklung eines Bewertungssystems zur Ableitung der Einsatzmöglichkeiten
M 3	Erfolgreicher Start der digitalen Rohstoffplattform ( <a href="http://www.fiber-rec.com">www.fiber-rec.com</a> )
M 4	Erfolgreicher Aufbau eines temporären Aufbereitungszentrums zum Test des Plattformbetriebs
M 5	Erfolgreiche Optimierung des Gesamtprozesses hinsichtlich der Prozesssicherheit und -stabilität sowie Nachweis des wirtschaftlichen Betriebs

Die nachfolgende Ergebnisdarstellung orientiert sich an den genannten Meilensteinen, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit die Meilensteine M 1 und M 5 zu jeweils einem Untergliederungspunkt zusammengefasst wurden. Die Meilensteine M2, M 3 und M 4 werden in jeweils einem separaten Untergliederungspunkt behandelt.

- Optimierung des Aufbereitungsprozesses -> M1 + M 5
- Untersuchung der erforderlichen Aufbereitungsschritte und Ableitung geeigneter Anwendungsmöglichkeiten -> M2
- Entwicklung der Rohstoffplattform -> M3
- Testbetrieb eines Aufbereitungszentrums -> M4

Nach der Ergebnisdarstellung des inhaltlichen Teils folgt im vorletzten Unterpunkt eine abschließende ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand der Technik. Im letzten Untergliederungspunkt des Hauptteils werden geplanten Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse (Phase I + II) sowie bereits erfolgte oder geplante Veröffentlichungen dargestellt.

### 3.3 Optimierung des Aufbereitungsprozesses

Die in Phase I entwickelte mobile Testanlage stellt einen Meilenstein für die erfolgreiche Aufbereitung von schwer zerfaserbaren Produkten dar. Die dafür entwickelte Kerntechnologie der Trockenzerfaserung hat sich in zahlreichen Testversuchen mit verschiedensten Produkten als robust und zuverlässig herausgestellt. Damit Bedarf die Zerfaserung keiner weiteren Entwicklung mehr, da sich die Technologie als praxistauglich herausgestellt hat und damit Fasern mit ausreichend hoher Qualität hergestellt werden können. Allerdings stellt die Herstellung von Trockenfasern einen komplexen Aufbereitungsprozess dar, der neben der Zerfaserung selbst noch aus zahlreichen weiteren Teilprozessen besteht. Zu nennen sind hier insbesondere die Vorzerkleinerung, die Dosierung, die Abscheidung des Faserstoffs vom Luftstrom, die Faserverdichtung nach der Abscheidung sowie das Filter- und Luftssystem.

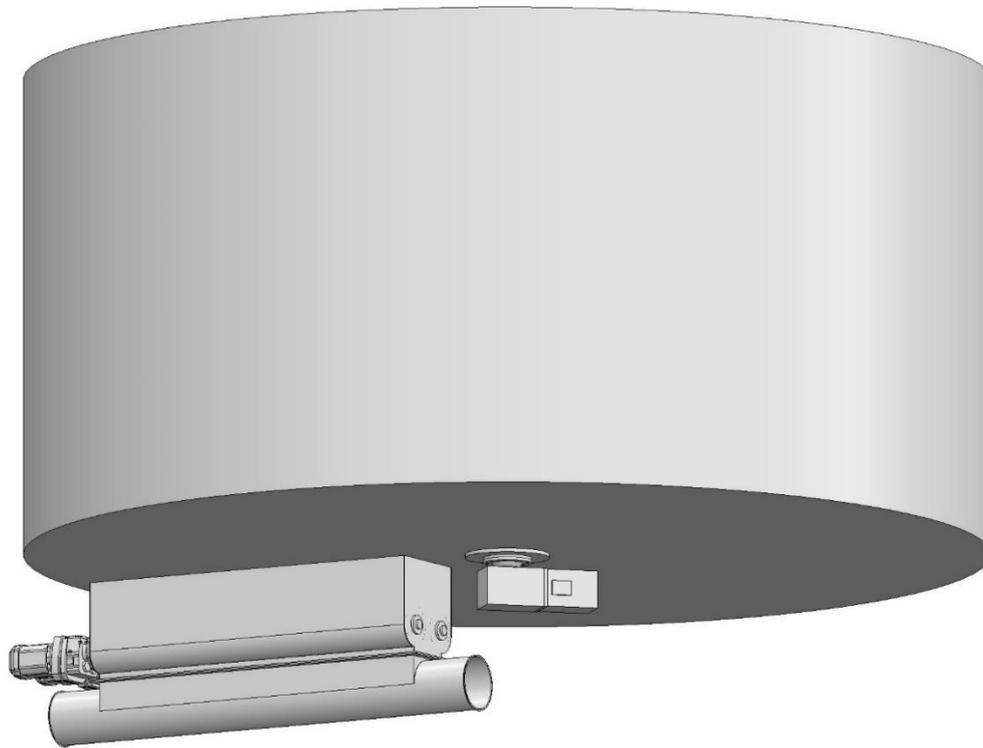
Während der Testphase mit der mobilen Anlage haben sich insbesondere bei der Verarbeitung von großen Mengen Defizite gezeigt, die nicht mehr im Rahmen der ersten Projektphase behoben werden konnten. Neben Problemen mit der Gestaltung der Schnittstellen hat sich vor allem die kontinuierliche Beschickung des Trockenzerfaserungsaggregats mit vorzerkleinertem Material als eine immense Herausforderung herausgestellt. Es hat sich gezeigt, dass der Prozess besonders kritisch auf Durchsatzschwankungen reagiert, da damit einhergehend die Stromaufnahme kurzzeitig weit über der Nennstromaufnahme des Motors liegen kann. Diese Leistungsspitzen führen zu einem starken Anstieg der Prozesstemperatur und gegebenenfalls zu einer Abschaltung des Prozesses (Motorschutzschaltung). In jedem Fall verhindern diese Schwankungen eine kontinuierliche Beschickung des Zerfaserungsaggregats am optimalen Arbeitspunkt, wodurch weder die maximal möglichen Mengen noch die bestenfalls erzielbaren spezifischen Energieverbräuche realisiert werden können.

Vor diesem Hintergrund stand in der Phase II im Arbeitspaket AP3 vor allem die Optimierung und Weiterentwicklung des Aufbereitungsprozesses im Mittelpunkt, um die noch vorherrschenden Defizite im Hinblick auf die Sicherstellung eines wirtschaftlichen Betriebs zu beheben. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung einer speziellen Dosiervorrichtung, um eine kontinuierliche Beschickung des Prozesses zu realisieren. Die Herausforderung bestand hierbei im unterschiedlichen Produktverhalten, da die verschiedenen Papier- und Kartonprodukte in Abhängigkeit ihrer Größe, flächenbezogenen Masse, Dichte und weiterer Eigenschaften wie die Steifigkeit/Flexibilität eine andere Schüttdichte und Rieselfähigkeit aufweisen. Daraus resultieren teils drastische produktspezifische Unterschiede im Förderverhalten, weshalb zunächst Vorversuche im Technikum mit verschiedenen Transportvorrichtungen durchgeführt wurden. Dabei wurden neben Austragsschnecken und -walzen auch Vibrationsrinnen auf ihre Eignung zum gleichmäßigen Materialabtransport untersucht. Bei den Versuchen hat sich herausgestellt, dass je nach produktspezifischen Förderverhalten unterschiedliche Austragssysteme erforderlich sind, um ein bestmögliches Ergebnis im Hinblick auf einen mengenmäßig konstanten Materialtransport zu erzielen. Ferner hat sich bei den Versuchen gezeigt, dass der Materialabtransport aus einem Dosierbunker heraus nicht

nur allgemein vom Produktverhalten abhängt, sondern auch ganz entscheidend von der Art der Vorzerkleinerung und der resultierenden Partikelgrößenverteilung. Für einfache Produkte, die in einem einheitlichen Größenspektrum vorliegen, reicht im Regelfall ein schneckenbasiertes Förderprinzip in Form einer Austragsschnecke. Für komplexe und weniger einheitliche Produkte hingegen ist eine Dosierschnecke weniger geeignet, da sich beispielsweise lange Papierstreifen und Papierschlängen um die Schnecke wickeln und nicht abtransportiert werden können, weshalb für solche Produkte ein Walzenaustragssystem erforderlich ist. Besser ist es jedoch – sofern möglich – dass zu zerfasernde Produkt immer auf eine einheitliche Größe vorzuzerkleinern.

Vorzerkleinerung und Dosierung müssen demnach aufeinander abgestimmt sein, wobei zunächst die passende Vorzerkleinerungsmethode anhand der Form des aufzubereitenden Produkts ausgewählt werden muss. Schneidmühlen und 1-Wellen-Schredder mit nachgeschaltetem Siebkorb zur Bestimmung der Vorzerkleinerungsgröße haben sich als universelle Lösung für häufig wechselnde Produkte herausgestellt, während 4-Wellen-Schredder vor allem für geöffnete Ballen und lose Papiermischungen geeignet sind. Erstgenannte Vorzerkleinerungssysteme bieten den Vorteil einer einheitlichen Partikelgrößenverteilung, sodass auf Dosierschnecken zurückgegriffen werden kann. Nachteilig ist hingegen das erhöhte Maß an Faserschädigungen durch die stark schneidende und quetschende Vorzerkleinerung. Demgegenüber ist die 4-Wellen-Vorzerkleinerung deutlich faserschonender, wobei der Nachteil in einer deutlich inhomogeneren Vorzerkleinerungsgröße liegt. Diese inhomogene Partikelgrößenverteilung erfordert ein deutlich komplexeres Walzenaustragssystem von zwei oder mehr Walzen am Boden des Dosierbunkers. All diese Eventualitäten wurden bei der Entwicklung eines Dosiersystems berücksichtigt und basierend auf den Vorversuchen konnte der Entwurf einer Dosiervorrichtung konzeptioniert und erste Konstruktionszeichnungen erstellt werden.

Die Dosiervorrichtung besteht aus einem Vorrats- bzw. Pufferspeicher, dem sogenannten Dosierbunker, an dessen Boden sich ein Austragssystem befindet. Je nach Rieselfähigkeit und Größenverteilung des vorzerkleinerten Produkts muss die Geometrie des Pufferspeichers sowie die Wahl des Austragssystems angepasst werden. Grundsätzlich gilt, dass mit abnehmender Rieselfähigkeit die Grundfläche des Dosierbunkers kleiner und die Höhe der Seitenwände größer gewählt werden sollte, damit eine Zwangsförderung in Richtung des am Boden angeordneten Austragssystems erzielt wird. Soll der Materialaustrag durch eine Dosierschnecke realisiert werden, dann empfiehlt sich ein zylindrischer Querschnitt, wobei ein sich am Boden befindender rotierender Räumarm das vorzerkleinerte Produkt in den Schneckenschacht schiebt. Soll hingegen ein Walzenaustragssystem zum Einsatz kommen, dann empfiehlt sich eine im Verhältnis zur Höhe kleine rechteckige Grundfläche des Dosierbunkers mit steilen Seitenwänden, wobei die Austragswalzen die gesamte Bodenfläche einnehmen können (siehe Abbildung 6).



**Abbildung 6: Darstellung des Dosierbunkers mit Austragsschnecke**

Nach der erfolgreichen Konzeptionierung des Dosieraggregats konnten die Arbeiten zur Optimierung der Verfahrenskette weiter vorangetrieben werden. Insbesondere konnte das Dosieraggregat konstruktiv fertiggestellt, gebaut und auch getestet werden. Mit Hilfe des Dosieraggregats konnte auch der spez. Energiebedarf sowie der maximale Durchsatz für ausgewählte Produkte ermittelt werden. Dadurch war es auch möglich die Leistungsgrenze der mobilen Zerfaserungsanlage experimentell zu bestimmen. Entgegen der bisherigen Annahme, dass die mobile Zerfaserungsanlage eine Kapazität von maximal 300 kg/h aufweist, konnte im Leistungsversuch mit dem Dosieraggregat ein Durchsatz von 480 kg/h ermittelt werden.

Auch wenn der erzielbare Durchsatz und damit die Produktionskosten stark vom jeweiligen Produktverhalten abhängen, hat sich auf Basis der erzielten Ergebnisse herausgestellt, dass die aus den untersuchten Faserquellen gewonnen Faserstoffe eine ökonomisch wie auch ökologisch attraktive Alternative gegenüber vergleichbaren Altpapier- und Zellstoffsarten darstellen. Unter der Voraussetzung einer entsprechend hohen Aufbereitungskapazität gilt dies auch für störstoffhaltige Faserquellen, die einer Sortierung und Abtrennung bedürfen. Dementsprechend war es auch notwendig ein Upscaling auf unterschiedliche Baugrößen durchzuführen. Grundlage hierfür war die Ermittlung von Upscaling Faktoren auf Basis der Versuche mit dem Dosieraggregat. Dadurch war es möglich eine große Zerfaserungsanlage mit einer Kapazität von bis zu 1,6 t/h zu konzipieren und zu fertigen.

Neben dem Upscaling der Zerfaserungsanlage und der Entwicklung einer Dosiervorrichtung wurde ferner damit begonnen den Aufbereitungsprozess basierend auf den zahlreichen Praxiserfahrungen mit der mobilen Testanlage punktuell weiterzuentwickeln. Im Fokus der Arbeiten stand dabei eine optimierte Produktabscheidung (Trennung Faserstoff vom Luftstrom) sowie die Implementierung einer vorgeschalteten Trocknung. Darüber hinaus wurden verschiedene Sortierprozesse zur Abtrennung von Störstoffen getestet, welche im weiteren Verlauf in die Aufbereitungskette implementiert werden sollten. Diese Maßnahmen zielten auf eine Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten des Aufbereitungsprozesses, u.a. auch auf feuchte Papierprodukte wie nasse Etiketten, die zum Beispiel bei der Aufbereitung von Glasflaschen abgewaschen werden, ab. Ohne eine zusätzliche Trocknung sowie die Abtrennung von Bruchglas könnten solche Produkte nicht aufbereitet werden, da es ab Überschreiten eines bestimmten Feuchtegehalts zu starken Ablagerungen im Bereich des Rotors und Stators im Dry Pulper kommt. Darüber hinaus soll durch den Einsatz alternativer Produktabscheidungstechnologien vor allem der Platzbedarf und die Anlagenkomplexität weiter reduziert werden. Hierzu wurden auch Versuche mit Siebkorbabscheidern sowie Faserkompaktoren durchgeführt, wobei letzteres sogar die Abscheidung mit der Verdichtung kombiniert. Dadurch können mit Hilfe eines Faserkompaktors besonders platzsparende Prozessführungen realisiert werden, insbesondere wenn diese in Kombination mit dem kleinen Dry Pulper (DPS 40 GT) zum Einsatz kommen.

Für den Funktionstest der großen Zerfaserungsanlage hat sich die Abtrennung des Faserstoffs vom Luftstrom als eine besondere Herausforderung herausgestellt. Während für die mobile Testanlage mit dem kleinen Dry Pulper (DPS 40 GT) problemlos ein Zyklon und Faserkompaktoren verwendet werden können, sollte für die große Anlage ein anderes Abscheidekonzept zum Einsatz kommen, da ein Zyklon bei der hohen Durchsatzmenge sehr groß ausfallen würde und ein Faserkompaktor nicht in der Baugröße verfügbar ist. Die getesteten handelsüblichen Materialabscheider haben sich jedoch nur als beding geeignet herausgestellt. Nachteilig gegenüber einem Zyklon ist vor allem der deutlich geringere Abscheidegrad von  $< 90 \%$ , der mit nicht tolerierbaren Faserverlusten einhergeht. Aus diesem Grund wurde ein eigener Zyklon konstruiert und gefertigt. Damit war es möglich einen Funktionstest der Komplettanlage inklusive Vorzerkleinerung, Dosierung und Abtrennung durchzuführen.

Dabei haben sich im Dauerbetrieb leider einige Defizite in den folgenden Teilbereichen der Prozesskette gezeigt: Das entwickelte Dosieraggregat trägt das vorzerkleinerte Material nicht ausreichend gleichmäßig aus dem Vorratsbehälter aus. Die periodischen Dosierschwankungen sind darauf zurückzuführen, dass der Räumarm des Vorratsbehälters das Material nicht gleichmäßig in den Fallschacht zur Schnecke führt. Dadurch wird verhindert, dass der Zerfaserungsprozess am optimalen Arbeitspunkt mit der maximalen Leistungsfähigkeit im Hinblick auf den bestmöglichen Durchsatz bei gleichzeitig minimalen Energieeinsatz stattfinden kann. Zudem können Leistungsspitzen zu einem unerwünschten Temperaturanstieg und Havarien führen, da kurzzeitig auftretende sehr hohe Durchsatzmengen zu einer Brückenbildung in kritischen Komponenten wie im Zyklon oder im Filter führen können. Neben der Dosierung hat sich auch die

Faserabscheidung vom Luftstrom als ungenügend herausgestellt. Abscheideverluste von mehr als 5 % gehen nicht nur mit einem nicht tolerierbaren Faserverlust einher, sondern bringen auch das nachgeschaltete Luftfiltersystem an seine Grenze, da dieses nur für die Abscheidung von Fein- und Füllstoffen (Staub) ausgelegt ist. Ist der Abluftstrom in den Filter jedoch zu stark mit Fasern beladen, dann akkumulieren sich diese im Filter, bis dieser so sehr zugesetzt ist, dass der Druckverlust überproportional ansteigt und das Luftsystem zusammenbricht.

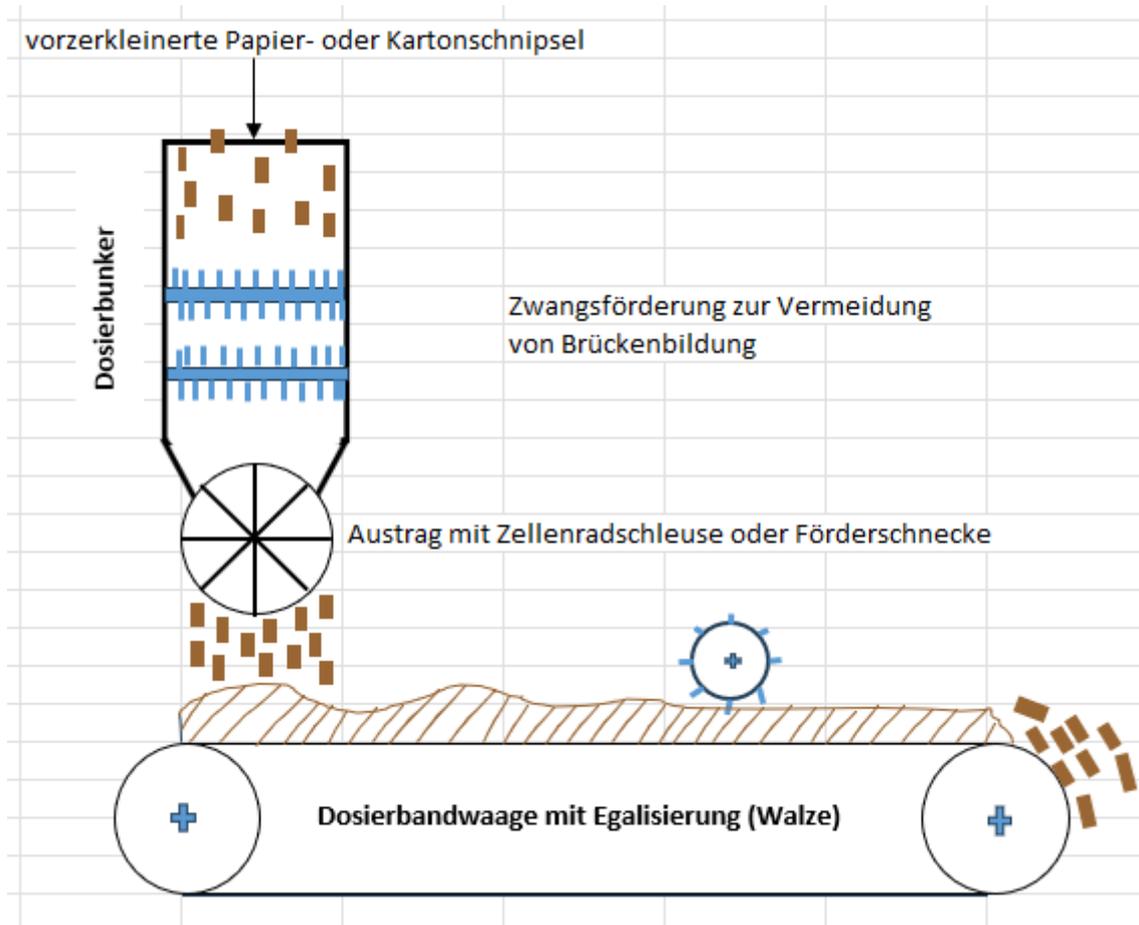
Darüber hinaus haben sich grundsätzliche Probleme bei den Schnittstellen und der Prozesssicherheit offenbart. Zwischen den Teilprozessen darf kein Material oder Staub austreten und der Materialtransport muss störungsfrei zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Insbesondere nach dem Zyklon zur Trennung des Faserstoffs vom Luftstrom sowie nach dem Filter zur Abscheidung des Feinstoffs haben sich diesbezüglich Probleme gezeigt. Nicht zuletzt haben Langzeitversuche unter praxisnahen Bedingungen Risiken hinsichtlich der Prozesssicherheit offenbart. Allen voran stellen Metallteile, die unbeabsichtigt in den Prozess gelangen, ein erhebliches Brandrisiko dar, so dass entsprechende Vorsorge- und Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden müssen.

Die aufgezählten Defizite sind alle lösbar, erfordern jedoch noch einen erheblichen Versuchsaufwand für die Nachoptimierung und Nachkalkulation der Schnittstellen und der Teilkomponenten sowie Ergänzungen der Prozesskette im Hinblick auf die erforderlichen Brandschutzmaßnahmen.

Zur Verbesserung der Abscheidung und der Entlastung des Filters wurden mehrere Lösungsansätze betrachtet. Zum einen wurde die Baugröße des Zyklons nachkalkuliert und durch Messungen an den tatsächlich vorherrschenden Luftmengen- und Strömungsverhältnissen angepasst. Und zum anderen wurden die Druckverhältnisse durch den Einbau einer Zellenradschleuse am unteren Ausgang des Zyklons dahingehend verbessert, dass der optimale Arbeitspunkt des Zyklons erreicht werden konnte. Durch den druckfreien Materialaustrag konnte zudem die Schnittstellengestaltung für die nachgeschaltete Faserstoffweiterverarbeitung (Verdichtung, Lagerung, Weitertransport, etc.) vereinfacht werden. Nicht zuletzt musste noch die Luftgeschwindigkeit durch eine Anpassung der Ventilator Drehzahl an die optimale Druckdifferenz nachgeregelt werden.

Zur Minimierung der Schwankungen des bestehenden Dosieraggregats wurde sowohl die Materialzuführung zur Schnecke als auch die Größe und Form der Schnecke neu konzipiert. Ziel war es dabei vor allem die auftretenden Pulsationen durch eine Verringerung des Schneckendurchmessers und eine Erhöhung der Schneckendrehzahl zu egalisieren. Darüber hinaus wurden gänzlich neue Konzepte zur Materialförderung und Dosierung erarbeitet und mittels Versuche auf ihre Eignung überprüft. Als Alternative zur Austragsschnecke wurden gegenläufige Walzen, Zellenradschleusen sowie Dosierbandwaagen betrachtet. Im Ergebnis wurde ein mehrstufiges Dosierkonzept bestehend aus einem Dosierbunker mit vertikaler Zwangsförderung und einer Austragschnecke am Boden sowie einer nachfolgenden Feindosierung in Form einer Dosier-

bandwaage mit Egalisierwalze entworfen (siehe Abbildung 7). Hintergrund der Entwicklung des zweistufigen Dosierkonzepts war die Erkenntnis, dass eine Schnecke allein nicht für die genaue Dosierung aus einem Vorratsbunker heraus geeignet ist.



**Abbildung 7: schematische Darstellung des mehrstufigen Dosierkonzepts**

Durch die Vertikale Zwangsförderung des Materials im Dosierbunker wird sichergestellt, dass das vorzerkleinerte Material im Gegensatz zum ersten Dosierbunker mit dem Räumarm bereits viel gleichmäßiger durch die Austragsschnecke oder einer Zellenradschleuse ausgetragen wird. Durch die nachfolgende Dosierbandwaage mit Egalisierwalze soll ferner die Mengenschwankung infolge der Schneckenpulsation ausgeglichen und somit eine kontinuierliche Beschickung des Zerfaserungsaggregats realisiert werden.

Hinsichtlich der Prozesssicherheit hat sich herausgestellt, dass nur in Ausnahmefällen eine Kontamination mit Metall ausgeschlossen werden kann, was beispielsweise bei der Verarbeitung von sauberem Ausschuss am Anfallort der Fall ist. Dementsprechend müssen für einen sicheren Betrieb einer Trockenzerfaserungsanlage in einem zentralen Aufbereitungszentrum, wo mehrere Produktströme zusammentreffen, sowohl Maßnahmen zur Metallabscheidung als auch Maßnahmen zur Erkennung und Löschung von Funken umgesetzt werden. Priorität hat dabei die Abscheidung von Metall vor der Trockenzerfaserung, wobei der Großteil der Verunreinigungen bereits vor der Vorzerkleinerung aussortiert werden sollte. Diesbezüglich hat sich die Installation eines

Metalldetektors über dem Zuführbad zum Schredder als am besten geeignete Lösung herauskristallisiert. Wird Metall detektiert, stoppt das Förderband automatisch und der Gegenstand kann entfernt werden. Insbesondere große Metallstücke werden so zuverlässig erkannt. Da ein Dosierbunker als Puffer verwendet wird, muss die restliche Produktion nicht unterbrochen werden.

Nach dem Schredder folgt eine mehrstufige Metallabscheidung, um auch kleinere Metallverunreinigungen, die vom Metalldetektor nicht erkannt wurden, weitestgehend vollständig aussortieren zu können. Als erste Stufe wurde ein Überbandmagnet über dem Förderband installiert. Darauf folgt bei der Übergabe zum nächsten Förderband eine Magnetwalze, bevor als letzte Stufe direkt am Eingang des Zerfaserungsaggregats ein Dauermagnet als Polizeifilter installiert ist. Da bei stark verunreinigten Chargen am Polizeifilter noch eine recht hohe Metallbelegung festgestellt wurde, wurde das mehrstufige Metallabscheidekonzept noch um eine weitere Magnetwalze bzw. einen Trommelmagnetabscheider nach dem Dosieraggregat erweitert. Darüber hinaus ist es möglich den Metallabscheidegrad noch weiter zu verbessern, indem die einfachen Magnetwalzen bzw. Trommelmagnetabscheider als Kaskade mit mehreren in Reihe geschalteten Trommeln bzw. Walzen ausgeführt werden.

Da eine 100%ige Metallabscheidung dennoch nicht zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden kann, wurde ferner ein Funkenlöschsystem nach der Trockenzerfaserung installiert, womit ein möglicher Funkenflug im Luftstrom zuverlässig gelöscht werden soll. Im Testbetrieb hat sich durch die Funkenlöschanlage jedoch ein Folgeproblem ergeben. Zwar werden Funken zuverlässig gelöscht, allerdings kommt es infolge der damit einhergehenden Befeuchtung zu Ablagerungen innerhalb des Rohrsystems und des Zyklons. Mit jedem Auslösen der Funkenlöschanlage verstärken sich die Ablagerungen, wodurch das empfindliche Luftsystem dahingehend gestört wird, dass der Produktabscheidegrad sinkt und mehr Faserstoff als Verlust in den Filter gelangt und diesen überlastet. In der Folge kann der Prozess nicht im Dauerbetrieb arbeiten, sondern muss in regelmäßigen Abständen gereinigt werden. Da dies den erzielbaren Durchsatz und damit die Wirtschaftlichkeit stark einschränken würde, arbeiten wir derzeit an einer Optimierung der Funkenlöschanlage. Durch Verwendung eines neuen Systems soll zum einen die Wassermenge reduziert werden. Und zum anderen soll die Funkenlöschanlage an einen wartungs- und reinigungsfreundlicheren Ort installiert werden, so dass die Ablagerungen nur an einem leicht zugänglichen Ort der Rohrleitung auftreten, wo zusätzlich eine Wartungsklappe vorhanden ist und der Zyklon ferner von Ablagerungen verschont bleibt.

Neben dem skizzierten Sicherheitskonzept zur Brandvermeidung stellte die Konzeptionierung einer Automatisierung der Prozesskette einen Schwerpunkt des zurückliegenden Berichtszeitraums dar. Zahlreiche Probleme, die beim Test der Komplettanlage aufgetreten sind, wären durch eine ausreichende Prozessüberwachung mittels geeigneter Prozessgrößen vermeidbar gewesen. Für das Erstellen des Automatisierungskonzepts mussten zunächst die relevanten Prozessgrößen, die zur Überwachung und

Steuerung des Prozesses erforderlich sind, festgelegt werden. Zudem mussten die Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den Prozessgrößen beschrieben werden. Anschließend galt es geeignete Messstellen zur Ermittlung der relevanten Prozessdaten für die Erstellung der Automatisierungsvorgänge zu identifizieren und mit der entsprechenden Mess- und Sensortechnik auszustatten. Zu den wichtigsten Größen, die die Prozessstabilität beschreiben und für die Prozesssicherheit relevant sind, zählen die Luftgeschwindigkeit vor und nach dem Zyklon, die Druckdifferenz im Zyklon, der Druckverlust im Filter, der Luftvolumenstrom am Eingang und Ausgang des Zyklons und die Temperatur am Ausgang des Zerfaserungsaggregats. Hinzu kommen Füllstandsanzeigen im Vorzerkleinerungsaggregat und dem Dosierbunker. Nicht zuletzt müssen die Leistungsaufnahmen der Teilprozesse, insbesondere des Zerfaserungsaggregats, sowie des Gesamtprozesses überwacht und aufgezeichnet werden. Gleiches gilt für die stündliche Durchsatzleistung, u.a. auch zur Bestimmung des spezifischen Gesamtenergiebedarfs. Die Prozessdaten stehen im Zusammenhang zueinander und müssen durch geeignete Steuerungs- und Regelungsalgorithmen so miteinander verknüpft werden, damit ein stabiler und sicherer Dauerbetrieb gewährleistet werden kann. Im Störungs- oder Havariefall gilt es auch die Daten nachträglich auslesen zu können, damit die Fehlerursachen ermittelt werden können.

In einem ersten Schritt des Automatisierungskonzepts wurden mehrstufige Voralarme festgelegt, bei denen Teilprozesse gestoppt oder abgeschaltet werden, beispielsweise bei Erreichen einer kritischen Prozesstemperatur. In weiteren Schritten sollen PID-Regler zur automatischen Anpassung ausgewählter Kenngrößen in das Automatisierungskonzept implementiert werden. Hierzu zählt vor allem eine Anpassung der Luftgeschwindigkeit zur Aufrechterhaltung eines festgelegten Differenzdrucks im Zyklon, in dem die Ventilator Drehzahl zum Ausgleich des auftretenden Druckverlusts im Filter angepasst wird. Da zum Ausgleich des Druckverlusts am Filter die Ventilatorleistung nicht beliebig nach oben angepasst werden kann, müssen ferner die automatischen Filterabreinigungsintervalle mittels Druckluftimpulse ebenfalls angepasst werden, wobei bei Überschreiten eines Grenzwertes ein Abschalten der Anlage und eine manuelle Abreinigung des Filters erforderlich ist. Diesbezüglich sind zunächst noch Messreihen zur Bestimmung stabiler Prozessgrenzen erforderlich. Auch die Dosierung muss durch eine Regelung der Schneckendrehzahl in das Automatisierungskonzept implementiert werden, wobei ein direkter proportionaler Zusammenhang zwischen der Schneckendrehzahl und der Stromaufnahme des Zerfaserungsaggregats besteht.

### **3.4 Untersuchung der erforderlichen Aufbereitungsschritte und Ableitung geeigneter Anwendungsmöglichkeiten**

Die untersuchten Faserquellen wurden gemäß des AP 5 (TBP-Future) zerfasert und anschließend hinsichtlich ihrer stofflichen Verwertungsmöglichkeiten untersucht. Diesbezüglich wurde das Substitutionspotenzial der gewonnenen Fasern für die erneute Papierherstellung im Labormaßstab untersucht. Als Vorbereitung für den Einsatz von ausgewählten Faserstoffen in Papierfabriken wurden zudem Faserstoffrezepturen für ausgewählte Produktsorten entwickelt, bei denen ein definierter Faserstoffanteil ohne

Qualitätsverlust durch Trockenfasern substituiert werden kann. Darüber hinaus wurden aus den Faserstoffen verschiedene Prototypen für den Einsatz als Isolationsmaterial im Verpackungsbereich gefertigt. Aufgrund zum Teil zahlreicher störender papierfremder Bestandteile, deren Abtrennung für die erneute Papierherstellung erforderlich ist, wurde außerdem auch nach alternativen Verwertungswegen gesucht. Dabei konnte insbesondere die Baustoffindustrie als prädestinierter Abnehmer für die aufbereiteten Faserstoffe eruiert werden. Als besonders geeignet hat sich die Anwendung des Faserstoffs als Füllmaterial von Ziegelhohlräumen herausgestellt.

In Ergänzung zur übergeordneten Zielstellung, dem Aufbau einer digitalen Rohstoffplattform, wurde mit dem Aufbau einer physischen Datenbank begonnen. Diese physische Datenbank umfasst Rückstellmuster von ausgewählten Produkten vor und nach der Zerfaserung inklusive der dazugehörigen Laboranalysedaten. Um die Vergleichbarkeit der Daten zwischen verschiedenen Produkten zu gewährleisten, wurde mit der Entwicklung einer standardisierten Bewertungsmethode zur Charakterisierung der aufbereiteten Faserstoffe anhand von Eigenschaftskennzahlen begonnen. Auf Grundlage dieser Datenbasis können die verschiedenen Produkte klassifiziert werden, wodurch durch Referenzanwendungen von vergleichbaren Produkten innerhalb einer zugeordneten Untergruppe besonders geeignete Einsatzmöglichkeiten zugeordnet werden können.

Für die Klassifizierung und Sorteneinteilung der aufbereiteten Faserstoffe wurde das entworfene Bewertungssystem für den Trockenfasereinsatz weiterentwickelt und eine Standardprozedur zur Faseranalyse im Labormaßstab abgeleitet. Neben der Bewertung des Faserfestigkeitspotenzials stand vor allem die Bestimmung des Störstoffgehalts der Faserquellen und die Beurteilung der Abtrennbarkeit der Störstoffe im Fokus. Hier zeigte sich, dass grundsätzlich zwischen der Abtrennung im Trocken- und Nassverfahren unterschieden werden muss und außerdem, dass die Abtrennbarkeit maßgeblich von den Parametern des Trockenaufschlussverfahrens abhängt. Hervorzuheben sind hierbei die Erkenntnisse aus den verschiedenen Laborversuchen, wonach Störstoffe wie Plastik- oder Aluminiumfolien durch eine Anpassung der Aufbereitungsparameter von der Faser separiert und in ein ausreichend großes Größenspektrum überführt werden können, um sie anschließend erfolgreich von der Faserfraktion abtrennen zu können.

Die Verifizierung der im Labor ermittelten Faserstoffqualität zum Nachweis der Eignung der Trockenfasern als Rohstoffersatz erfolgte für ausgewählte Produkte in mehreren Papiermaschinenversuchen mit bis zu 20 % Trockenfasereinsatz. Dabei wurden ausgewählte Trockenfasern in verschiedenen Papierfabriken sowohl als Zellstoff- als auch als Altpapierersatz eingesetzt. Im Ergebnis zeigte sich, dass ein geringer Trockenfaseranteil von 5 % sich unabhängig vom verwendeten Rohstoff nur minimal auf die resultierenden Produkteigenschaften und den Prozess auswirkt, während bei einem Trockenfaseranteil von >10 % in der Regel der Aufbereitungsprozess und der Rohstoff auf die jeweiligen Prozessbedingungen und Produkthanforderungen abgestimmt sein müssen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer eigenschafts- und kennwertbasierten

Klassifizierung, um den jeweiligen Faserstoffen geeignete Einsatzmöglichkeiten zuzuordnen zu können. Zudem hat sich die Verwendung der meisten Trockenfasern in altpapierbasierten Systemen als deutlich unkritischer herausgestellt, während bei frischfaserbasierten Systemen eine größere Sorgfalt bei der Trockenfaserauswahl getroffen werden muss. Dies gilt insbesondere bei Vorhandensein von Nichtfaser-Bestandteilen, welche die Trockenfaserqualität und die Einsatzmöglichkeiten deutlich verschlechtern können. Um die Anwendungsmöglichkeiten störstoffhaltiger Faserquellen nicht zu sehr einzuschränken, haben wir auch die Einbindung und Optimierung geeigneter Sortierprozesse zur Abtrennung unerwünschter Störstoffe, insbesondere von Staub und Feinstoffen, weiter vorangetrieben.

Neben dem Einsatz von Trockenfasern in Papierfabriken zur erneuten Papier- und Kartonherstellung wurden Prototypen von faserbasierten Fassadenelementen gefertigt und erfolgreich getestet. Dabei haben sich die Trockenfasern sowohl hinsichtlich der Dämmeigenschaften als auch der Flammchutzanforderungen als ein geeignetes Substitutionsmaterial für Mineralwolle herausgestellt. Die Möglichkeit Naturfasern mit einem biogenen Flammschutzmittel flammfest nach Baustoffklasse B1 auszurüsten stellt eine erhebliche Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten der betreffenden Faserquellen, insbesondere für den Baubereich, dar.

Neben diesem Nachweis der Anwendungsmöglichkeiten der Trockenfasern als Dämm- und Isoliermaterial im Baubereich war es auch möglich faserbasierte Formteile für Verpackungszwecke zu fertigen. Im Zuge der Untersuchungen zeigte sich, dass der Einsatz von Trockenfasern insbesondere bei der Herstellung von Verpackungsformteilen (z.B. Inlays) im Trockenverfahren (Dry Moulding) großes Potenzial besitzt. Über den Einsatz als Dämm- und Isoliermaterial im Bau- und Verpackungsbereich hinaus konnten auch vielversprechende Prototypen von faserbasierten Schallabsorbern mit sehr guten akustischen Eigenschaften hergestellt werden, auf dessen Grundlage im Verbund mit anderen Papierprodukten funktionale Akustikelemente aus nachwachsenden Rohstoffen entwickelt werden konnten.

Um die Qualität der aufbereiteten Faserstoffe weiter zu verbessern und um insbesondere faserbasierte Verbundmaterialien sowie störstoffhaltige Produkte einer geeigneten stofflichen Nutzung zuführen zu können, wurde auch die Weiterentwicklung von Sortier- und Abtrennstufen und deren Implementierung in die Prozesskette weiterverfolgt. Auf Nachfrage potenzieller Kunden haben wir uns vor allem der Abtrennung kritischer Staub- und Feinstofffraktionen gewidmet, da diese in vielen Anwendungsbereichen als Störstoffe fungieren und zum Teil ein Ausschlusskriterium darstellen. In diesem Zusammenhang konnte ein vielversprechender Ansatz entwickelt werden, bei dem mit Hilfe eines speziellen Zyklons die Faserstoffabscheidung vom Luftstrom mit der Abtrennung von Staub und Feinstoffen kombiniert wird. Die Abtrennung wird dabei durch eine im Inneren des Zyklons angeordnete Siebmantelfläche realisiert, wobei durch Auswahl der Siebmaschenweite der Abscheidegrad an Staub- und Feinstoffpartikeln bestimmt wird. Durch Verwendung einer entsprechend großen Siebmaschen-

weite kann durch dieses Grundprinzip auch eine Faserstofffraktionierung erzielt werden, womit bei Faserstoffen gezielt die Langfaserfraktion von der Kurzfaserfraktion separiert werden kann. Auf diese Weise können besonders hochwertige langfaserhaltige und feinstofffreie Faserstoffe als Ersatz für Zellstoffe hergestellt werden

Im Zuge der Zerfaserung von Mustermengen für potenzielle Kunden kam zudem immer wieder das Thema Störstoffe und Mikroplastik auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in letzter Zeit vermehrt Papierverbunde auf den Markt kommen, die als schwer recycelbar gelten. Zumeist enthalten solche Produkte eine Polymerdispersion oder PE- bzw. Aluminiumfolien. Um aus solchen Papierverbunden wieder wertvolle Fasern für die erneute Papierproduktion gewinnen zu können, müssen die Fasern von der Folie getrennt werden, ohne dabei die Folie unnötig zu zerkleinern, da ansonsten eine Abtrennung im konventionellen Nassprozess nicht mehr möglich ist. Das dies grundsätzlich mittels Trockenzerfaserung möglich ist, konnte durch eine Anpassung der Zerfaserungsparameter bereits für zahlreiche Produkte gezeigt werden. Auf diesen Erkenntnissen basierend konnte eine Methode zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von betreffenden Produkten entwickelt werden. Dadurch können die betreffenden Produkte hinsichtlich ihres Faserpotenzials und Rohstoffwertes besser klassifiziert und den am besten geeigneten stofflichen Verwertungswegen zugeführt werden.

Neben Papierverbunden, bei denen die Abtrennbarkeit der Plastikfraktion im Vordergrund steht, wurden auch vermehrt solche Produkte untersucht, die kritische oder wertvolle Füllstoffe enthalten. Um diese Füllstoffe von der Faser zu trennen, sind im Gegensatz zur Folienabtrennung jedoch Sortierverfahren im konventionellen Nassprozess weniger geeignet. Die optimale Variante wäre die Trockensortierung direkt nach der Zerfaserung. Vor diesem Hintergrund wurden basierend auf Laborversuchen mittels einer Luftstrahlsiebung potenziell geeignete Verfahren zur Trockensortierung eruiert und in Technikumsversuchen getestet. Untersucht wurden dabei sowohl Produkte, bei denen der Füllstoff als Gutstoff zurückgewonnen werden sollte (z. B. Korund im Schleifpapier), als auch Produkte, bei denen der Füllstoff die Störfraction darstellt und entsprechend abgetrennt werden muss (z. B. Gips aus Gipskartonplatten).

Bei den Versuchen zur Separierung und Abtrennung der Fasern von den Füllstoffen konnte mit Hilfe einer Siebmaschine eine sehr gute Fraktionierung erzielt werden. Voraussetzung dafür ist eine vollständige Gefügetrennung und Faservereinzelnung direkt vor der Siebung, welche durch die Trockenzerfaserung ermöglicht wird, so dass nahezu alle Füllstoffe in Kontakt mit der Siebfläche gelangen und so von der Faser getrennt werden können. Das Verfahren ermöglicht zwar keine vollständige, aber nachweislich ausreichende Separierung der beiden Fraktionen. Basierend auf diesen positiven Vorversuchen, wurde der Lösungsansatz zur weiteren Verbesserung der Trennschärfe optimiert sowie ein Upscaling auf industriell relevante Durchsatzleistungen durchgeführt. Hervorzuheben ist hier die Abtrennung der Gipsfraktion aus Gipskartonplatten, da aufgrund der sehr hohen Mengen, die zukünftig aufgrund neuer gesetzlicher Vorgaben recycelt werden müssen, eine sehr hohe Umweltrelevanz besteht. Durch eine Optimierung des Aufbereitungsprozesses war es möglich den Großteil der Gipspartikel

so sortenrein vom Karton abzutrennen, dass neben der Faserfraktion prinzipiell auch die Gipsfraktion wieder einer stofflichen Verwertung zugeführt werden kann. In Anbetracht der konstant hohen Mengen, die jährlich beim Gipskartonrecycling anfallen, würde dies einen signifikanten Beitrag zur Sicherung der Rohstoffversorgung und zur Abfallvermeidung leisten.

Neben Gipskarton wurden in Zusammenarbeit mit potenziellen Kunden aber auch noch weitere Produkte untersucht, bei denen die Füllstofffraktion von der Faser getrennt werden soll. Als Beispiele seien die Rückgewinnung von Korund bei Schleifrohpapieren sowie die Entfernung von Streichfarbepigmenten inklusive der optischen Aufheller bei grafischen Papieren genannt. Dabei konnten für die meisten Produkte vielversprechend Ergebnisse erzielt werden, so dass der Ansatz der Trockensiebung zur Füllstoffabtrennung eine wichtige Möglichkeit zur Verbesserung der Faserstoffqualität darstellt.

Im Zuge der Versuche zur Füllstoffabtrennung hat sich jedoch bei bestimmten Produkten ein signifikanter Verschleiß an den Mahlelementen herausgestellt. Besonders kritisch zeigt sich dieser Verschleiß bei Korund, einem besonders harten Mineral mit der Mohshärte von 9. Vor diesem Hintergrund müssen die Mahlelemente bei Produkten mit einer Mohshärte  $> 4$  mit einer gehärteten Legierung zur Verbesserung der Verschleißresistenz versehen werden, um einer verstärkten Abnutzung entgegenzuwirken. Die gewonnenen Erkenntnisse sind besonders wichtig im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Aufbereitungsprozesses und haben uns gezeigt, dass es zwingend notwendig ist die Materialbeschaffenheit der Mahlelemente an die Produkteigenschaften anzupassen. Zudem müssen die Wechselintervalle der Verschleißteile entsprechend der Abrasivität der Füllstoffe angepasst werden.

### **3.5 Entwicklung der Rohstoffplattform**

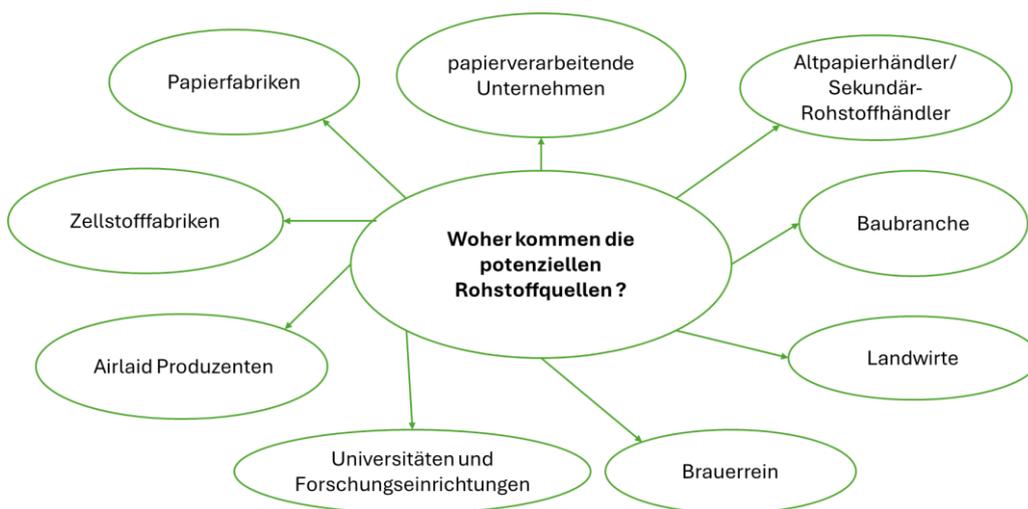
Das zentrale Projektziel ist der Aufbau einer Rohstoffplattform, auf der die Daten zu den verfügbaren, aber bisher nicht genutzten Rohstoffquellen und deren Einsatzmöglichkeiten verknüpft werden. Dafür müssen im ersten Schritt die Rohstoffquellen identifiziert werden. Zur Identifizierung potenzieller Rohstoffquellen für die Plattform wurden verschiedene Ansätze genutzt. Der Projektpartner Rohprog hat damit begonnen, papierbasierte Produkte zu identifizieren, die in seinem System erfasst sind und nicht für den Weiterverkauf als Altpapiersorte vorgesehen sind. Diese wurden in einer Liste zusammengestellt und nach verfügbaren Mengen priorisiert. Ergänzend dazu wurden Recherchen durchgeführt, um papierbasierte Produkte zu ermitteln, die im Einzugsgebiet von Rohprog (München) potenziell verfügbar sind.

Sowohl Rohprog als auch TBP-Future konnten durch Internetrecherchen potenzielle Kunden finden, die nutzbare Rohstoffquellen für die Rohstoffplattform bereitstellen könnten. Dank langjähriger Kontakte in der Papierindustrie und Messebesuchen konnte TBP-Future zusätzlich Aufmerksamkeit auf die Trockenzerfaserung und die Rohstoffplattform lenken. Zur Unterstützung dieser Bemühungen wurden Informationsflyer für

Messen erstellt, um neue Kunden zu gewinnen. Als weiterer Schritt wurde eine digitale Rohstoffplattform (Website) umgesetzt. Besonderer Schwerpunkt lag dabei auf die Eingabemaske und die Verknüpfung der relevanten Daten. Darüber hinaus wurden als Vorbereitung für den Handel mit Faserstoffen über die Rohstoffplattform Vorlagen für die Erstellung von Produkt- und Sicherheitsdatenblättern erarbeitet. Des Weiteren erfolgte eine Sorteneinteilung zur Klassifizierung und Unterscheidung der Faserstoffe auf Grundlage eines objektiven Bewertungssystems basierend auf Laboranalysen zur Bestimmung der relevanten Fasereigenschaften. Außerdem wurden Info-Flyer und Textbausteine für die Gestaltung der webbasierten Rohstoffplattform erstellt.

Durch die beschriebenen Marketingaktivitäten und die kombinierten Ansätze konnten zusätzliche Kundenkontakte generiert und zahlreiche Rohstoffquellen für die Plattform erschlossen werden. Dabei wurden nicht nur klassische Papierprodukte berücksichtigt, sondern auch alternative Faserquellen wie Einjahrespflanzen (z.B. Hanf, Hopfen, Schilf und Stroh). Hintergrund der Einbeziehung solcher Faserquellen ist eine verstärkt aufkommende Kundennachfrage nach alternativen Rohstoffquellen, um klassische Papierfasern aus Altpapier oder Zellstoff im Sinne der bioökonomische Kreislauf zu substituieren.

Die Herkunft dieser Rohstoffquellen wird in Abbildung 8 veranschaulicht.



**Abbildung 8: Herkunft der potenziellen Rohstoffquellen.**

Dazu gehören klassische Papierfabriken, papierverarbeitende Unternehmen, Zellstofffabriken und Airlaid-Produzenten. Darüber hinaus zählen auch andere Branchen dazu, wie Landwirte mit Einjahrespflanzen, Brauereien mit hochnassfesten Etiketten, die Baubranche mit Gipskarton sowie Altpapierhändler, bei denen verschiedene schwer zersäufbare Papiere anfallen. Abschließend sind auch Universitäten und Forschungseinrichtungen zu erwähnen, die mit ihren Faserquellen versuchen beispielsweise neue Produkte zu entwickeln. In all diesen Bereichen konnten wir in den letzten Jahren einen guten Kundenkontakt aufbauen.

Aufgrund der Vielzahl an Rohstoffen konnten wir bei Rohprog mit der Zerfaserung neuer Materialien beginnen und gleichzeitig den Aufbau einer physischen Datenbank vorantreiben. Im folgenden Text wird das Ablaufschema für die physische Datenbank beschrieben – von der Anlieferung des Materials bei Rohprog bis zum Anlegen von Rückstellmustern vor und nach der Zerfaserung, einschließlich der dazugehörigen Laboranalysen (siehe Abbildung 9). Dabei haben wir Dokumente entwickelt, die den Informationsaustausch zwischen den Projektpartnern erleichtern, das Potenzial eines Rohstoffes besser erkennbar machen und eine standardisierte Bewertungsmethode zur Charakterisierung der aufbereiteten Faserstoffe ermöglichen.

Der Begriff Muster wird im weiteren Text verwendet, um die zu prüfenden Materialien wie z.B. Papierprodukte, papierähnliche Produkte oder auch Einjahrespflanzen zu beschreiben. Für den Durchlauf des Ablaufschemas für die physische Datenbank genügen kleine Mengen des Musters.

Im ersten Schritt erfolgt die Musterannahme bei Rohprog, wobei die Wirtschaftlichkeit des Musters anhand eines Fragenkatalogs bewertet wird. In dem Dokument „Fragenkatalog für Musterauswahl“ werden Fragen zu verfügbaren Jahrestonnen, Einkaufspreisen, Herstellern, sowie Anmerkungen zum Produkt und weiteren Aspekten beantwortet. Anschließend wird dieses Dokument an die TBP-Future weitergeleitet, um gemeinsam mit Rohprog eine Entscheidung zu treffen, ob das Muster als wirtschaftlich interessant eingestuft wird. Bei einer positiven Bewertung des Musters wird eine Versuchsankündigung erstellt.

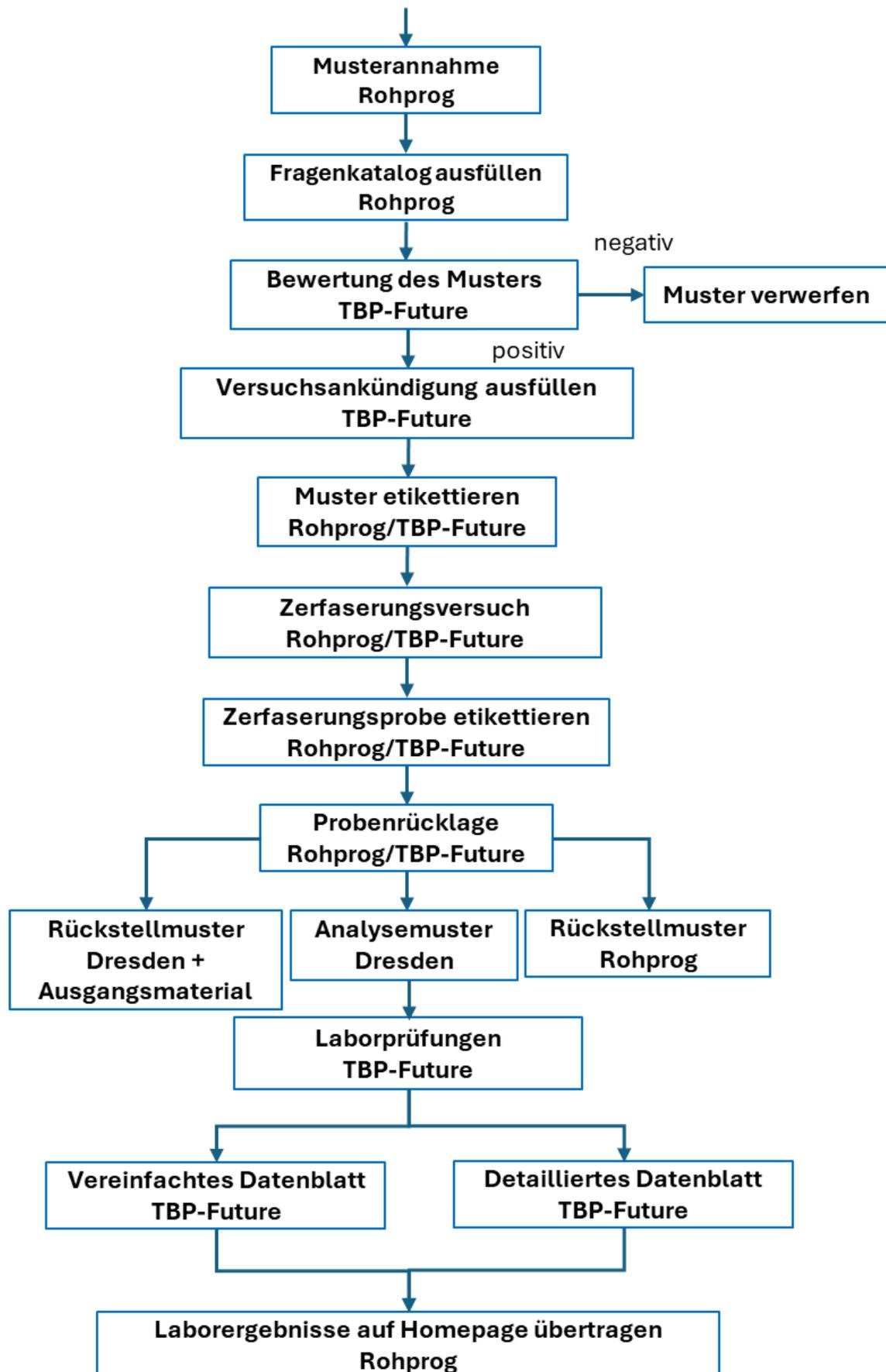


Abbildung 9: Ablaufschema für die physische Datenbank sowie der zuständige Bereich der Projektpartner

Diese erfolgt über das Dokument „Versuchsankündigung – geplanter Versuch bei Rohprog“, welches von uns ausgefüllt und an Rohprog übermittelt wird. Das Dokument enthält detaillierte Informationen zum Versuch, einschließlich des geplanten Datums, des Auftraggebers und der beteiligten Personen. Zudem werden Angaben zum Muster wie die Musternummer, die Menge, der Lieferstatus und das benötigte Equipment aufgenommen. Ergänzt wird dies durch Hinweise zur Probendokumentation sowie, falls erforderlich, durch die Angabe der Versuchsziele. Für die Vergabe der Musternummern wird eine Excel-Liste genutzt, in der alle eingehenden Muster fortlaufend nummeriert werden. In dieser Liste werden Informationen wie das Eingangsdatum, der Kunde, der Ansprechpartner, die Menge, die Bezeichnung des Kunden sowie das Zerfaserungsdatum festgehalten. Zudem enthält die Excel-Liste eine Zuordnungstabelle, in der den Musternummern die jeweiligen Zerfaserungsproben zugeordnet wird. Dadurch können die ausgewählten Versuchsparameter umfassend dokumentiert werden.

Nach der Versuchsankündigung und der Vergabe der Musternummer wird das Muster bei Rohprog mit einem Etikett versehen. Dieses enthält die Musternummer, den Kunden, das Datum und die Rohstoffbezeichnung. Zusätzlich wird eine kleine Menge des Musters in einem Beutel verpackt, etikettiert und fotografiert, um eine Rücklage des Ausgangsmaterials zu sichern. Im Anschluss beginnt der Zerfaserungsversuch bei Rohprog, der mithilfe eines „Versuchsprotokolls“ dokumentiert wird. Dieses Protokoll enthält detaillierte Informationen zum Muster und ermöglicht die Erfassung wichtiger Versuchsparameter, falls erforderlich. Für die ersten Versuche mit einem neuen Muster haben wir standardisierte Versuchsparameter festgelegt: ein Mahlsplatt von 1 mm und eine Drehzahl von 110 Hz. Nach der Zerfaserung werden die verarbeiteten Muster ebenfalls mit einem Etikett versehen. Dieses enthält neben den bereits auf dem ursprünglichen Etikett aufgeführten Informationen zusätzlich Angaben zum verwendeten Mahlsplatt und zur Drehzahl.

Von den zerfaserten Mustern werden Rücklagen für die Standorte Dresden und München (Rohprog) gebildet. Dresden erhält dabei ein Rückstellmuster (50 g) vom zerfaserten Material zusammen mit dem Ausgangsmaterial sowie ein Analysemuster (200 g). Der restliche zerfaserte Faserstoff wird bei Rohprog eingelagert. Das Rückstellmuster mit dem Ausgangsmaterial wird in Dresden in einem separaten Schrank aufbewahrt. Das Analysemuster wird an der TU Dresden für Laborprüfungen verwendet. Dabei unterscheiden wir zwischen Laborprüfungen mit geringem Aufwand, die in einem „Vereinfachten Labordatenblatt“ dokumentiert werden, und Laborprüfungen mit einem großen Aufwand, die zu einem „Detaillierten Labordatenblatt“ führen. Im ersten Schritt wird stets ein Vereinfachtes Labordatenblatt für jedes Muster erstellt, um Zeit und Material zu sparen. Falls durch Kundenanfragen oder Marktrecherche klar wird, dass das Muster zukünftig an größerer Bedeutung gewinnt, wird ein Detailliertes Labordatenblatt erstellt, um weitere relevante Informationen zum erzeugten Faserstoff zu sammeln.

Das Vereinfachte Labordatenblatt umfasst:

- Eine Faserlängenanalyse zur Bestimmung der wichtigsten Fasermorphologie-Eigenschaften,
- Verhalten der Fasern bei der Blattbildung,
- Aschegehalt,
- Kommerzielle Informationen wie verfügbare Jahrestonnen und potenzielle Einsatzmöglichkeiten.

Das Detaillierte Labordatenblatt erweitert diese Analysen durch:

- Bestimmung des Stippengehalts,
- Messung des Entwässerungswiderstands,
- Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens WRV
- Eine Mahlung des Faserstoffes und Analyse des gemahlten Faserstoffes
- Bestimmung ausgewählter Blattfestigkeiten (Tensile-Index, Bruchkraft)

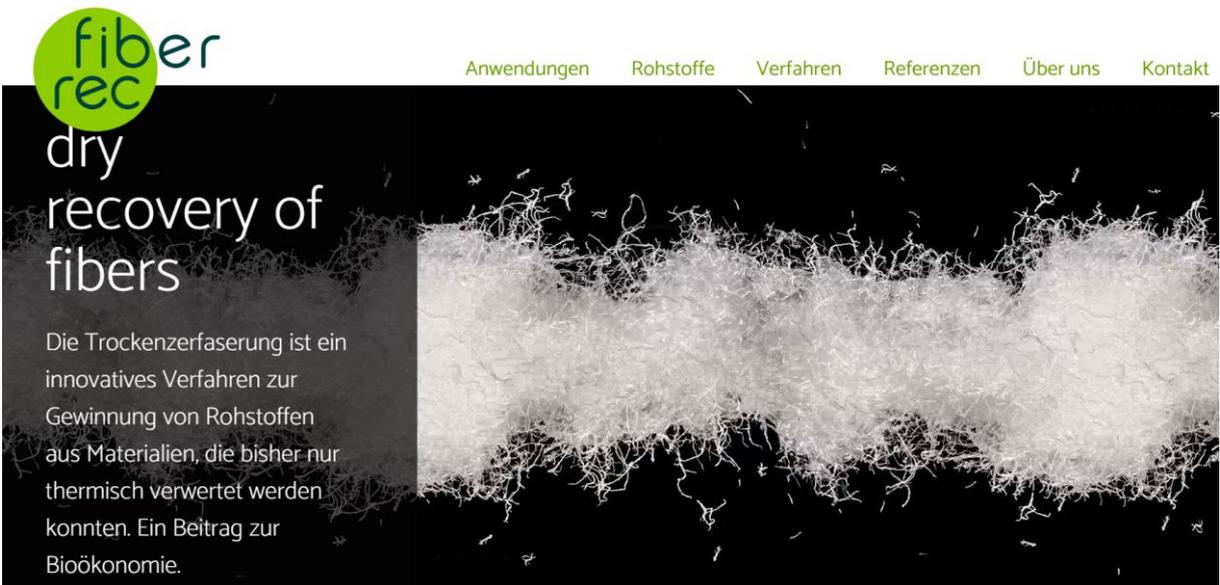
Diese Labordatenblätter werden nach ihrer Erstellung an Rohprog weitergeleitet und anschließend auf unsere digitale Rohstoffplattform (Website) hochgeladen.

Während des Durchlaufs der physischen Datenbank werden die folgenden Dokumente für jedes Muster erfasst und bereitgestellt:

- Fragenkatalog für Musterauswahl
- Versuchsankündigung – Geplanter Versuch bei Rohprog
- Excel-Liste für die Muster
- Versuchsprotokoll
- Vereinfachtes Labordatenblatt und gegebenenfalls ein Detailliertes Labordatenblatt

Die gesammelten Dokumente und Ergebnisse werden in unserem internen Ordnersystem archiviert. Auf die digitale Rohstoffplattform werden die Laborergebnisse hochgeladen, da diese die entscheidenden Informationen für potenzielle zukünftige Kunden enthalten.

Im folgenden Text wird die Website Fiber-Rec vorgestellt, die von einem Mitarbeiter von Rohprog entworfen wurde. Die Website fiber-rec.com bietet umfassende Informationen zum Trockenzerfaserungsverfahren und dessen Anwendungen. Die Hauptbereiche (siehe Abbildung 10) der Website sind:



**Abbildung 10: Startseite der Website fiber-rec.com**

**Anwendungen:** Dieser Abschnitt beschreibt die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der durch Trockenzerfaserung gewonnenen Fasern. Neben der Papierindustrie werden Anwendungen in Bereichen wie Dämmstoffe, faserbasierte Komposite, Lärmschutzwände, Akustikplatten und Transportschutz für Verpackungen hervorgehoben. Auch die ökologischen und ökonomischen Vorteile des Einsatzes dieser Trockenfasern werden hier näher erläutert.

**Rohstoffe:** Hier werden die Materialien vorgestellt, die sich für die Trockenzerfaserung eignen (siehe Abbildung 11). Dazu zählen schwer recycelbare Papierprodukte wie nassfeste oder hochfeste Papiere, Spezialpapiere (z. B. Barrierepapiere, Flüssigkeitskartons), Naturfaserzellstoffe (z. B. Hanf, Jute, Bagasse) und Verbundmaterialien. Die Informationen aus den zuvor beschriebenen Labordatenblättern werden den jeweiligen Materialien zugeordnet, sodass potenzielle Kunden die Eigenschaften des produzierten Faserstoffes einsehen können.

## Einige exemplarische Ausgangsmaterialien



### Etiketten

Etiketten gibt es in vielfältiger Form und in großen Mengen. In sehr vielen Fällen müssen sie stark nassfest sein, um die Anforderungen zu erfüllen.

Ein typisches Beispiel sind Bierflaschen-Etiketten. Derartige Produkte wieder aufzulösen war bisher sehr schwierig und nur speziellen Anlagen vorbehalten, die mit viel Energie und Chemikalieneinsatz große und meist sortenreine Mengen verarbeiten können.

Mit der Technologie der Trockenzerfaserung können Etiketten und Etikettenträgerpapiere einfach wieder am Stoffkreislauf teilnehmen und zu wertvollen Rohstoffquellen werden.



**Abbildung 11: Website Fiber-Rec Kategorie Rohstoff**

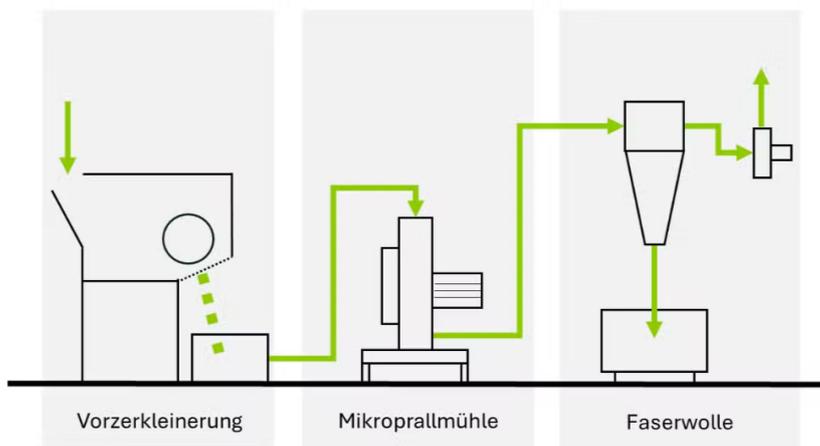
Auf der anderen Seite bietet die Website an dieser Stelle Interessenten die Möglichkeit ihre nicht verwertbaren Papierabfälle als potenzielle Sekundärfaserquellen anzumelden. Nach Zusendung einer Materialprobe und positiver Bewertung der Faserstoffeigenschaften dient die Rohstoffplattform dann als Vermittler.

**Verfahren:** In diesem Abschnitt wird das Verfahren der Trockenzerfaserung (siehe Abbildung 12) erklärt, bei dem die Fasern durch mechanische Kräfte aus dem Gefüge getrennt werden. Dabei werden die Vorteile wie die Einzelfaserzerlegung ohne Faserkürzung sowie der Ressourcenschonung besonders betont.

### Recycling von nassfesten und hochfesten Papierprodukten sowie weiteren Materialien

Das Verfahren gliedert sich in die Vorzerkleinerung und Homogenisierung und die Trockenzerfaserung in der Mikroprallmühle. Optional können die Papierprodukte vor der Zerfaserung befeuchtet werden.

Nicht-Papier-Bestandteile wie Metall oder andere Fremdstoffe werden vor dem Zerfaserungsprozess entfernt. Über den Zyklon kann der Stippgehalt gesteuert werden, um die Faserqualität zu optimieren.



**Abbildung 12: Website Fiber-Rec Kategorie Verfahren**

**Referenz & Über uns:** In diesem Bereich werden einzelne Unternehmen genannt, die über Erfahrungen mit der Trockenzerfaserung verfügen. Des Weiteren wird die Kooperation zwischen der TBP Future GmbH und der ROHPROG GmbH vorgestellt.

Die digitale Rohstoffplattform bietet Kunden die Möglichkeit, mit uns in Kontakt zu treten, um potenziell wertvolle Verarbeitungsreste bei uns zu entsorgen. Dadurch können sie neue Rohstoffquellen für sich oder andere Anwender erschließen oder deren Produkteigenschaften verbessern.

Die Idee der Rohstoffplattform ist dabei so ausgelegt, dass die Produktdatenbank stetig wächst, wobei das langfristige Ziel darin besteht mehrere Aufbereitungszentren aufzubauen und zu betreiben.

### **3.6 Testbetrieb eines Aufbereitungszentrums**

Der Erfolg der Rohstoffplattform hängt maßgeblich davon ab, ob die betreffenden Sekundärfaserquellen dermaßen aufbereitet werden können, dass die gewonnenen Faserstoffe für die erneute stoffliche Nutzung, zum Beispiel zur Papierherstellung, eingesetzt werden können. Dazu war es neben den eigenen Laboruntersuchungen zwingend erforderlich potenziellen Interessenten verschiedene Faserstoffproben für ihre eigenen Laboranalysen zur Verfügung zu stellen, damit diese die Eignung der Fasern für ihren Einsatzzweck bewerten können. Vor diesem Hintergrund wurde zunächst eine physische Datenbank mit verschiedenen Faserstoffmustern aufgebaut, sodass kleine Mustermengen an potenzielle Kunden verschickt werden konnten. Darüber hinaus musste im Falle einer positiven Rückmeldung sichergestellt werden, dass in einem weiteren Schritt auch größere Mengen bereitgestellt werden können, um die Fasern auch im Produktionsbetrieb testen zu können.

Um die notwendigen Großmengen im Bereich mehrerer Tonnen zur Durchführung von Maschinenversuchen im Bedarfsfall herstellen zu können, wurde beim Kooperationspartner Rohprog ein temporäres Aufbereitungszentrum errichtet. Ziel dieses Aufbereitungszentrums war es die erforderliche Hardware zur Simulation des Plattformbetriebs zur Verfügung zu stellen. Als Grundlage für das Aufbereitungszentrum diente unsere mobile Anlage, die im Testbetriebszeitraum um zahlreiche Komponenten und periphere Systeme erweitert wurde. Dazu zählen insbesondere:

- Die Schaffung einer Vorzerkleinerungsmöglichkeit im erforderlichen Maßstab, durch Einbindung eines großen 1-Wellen-Shredders mit der Kapazität von 5 t/h.
- Die Implementierung eines Überbandmagneten zur Metallentfernung nach der Vorzerkleinerung.
- Die Installation einer Zuführvorrichtung zur vereinfachten Dosierung des vorzerkleinerten Materials.

- Die Einbindung einer Ballenpresse zur Herstellung von Ballen aus den erzeugten Trockenfasern.
- Die parallele Einbindung eines Zyklons zur optionalen Entnahme von kleinen Mustermengen für Versuche oder Demonstrationszwecke.

Für den Testbetrieb konnten mehrere interessierte Papierfabriken akquiriert werden, die sich zu Versuchen mit diversen Faserprodukten aus verschiedenen Produkt-Kategorien bereit erklärt haben. Neben Altpapier einsetzenden Papierfabriken haben sich auch solche an den Versuchen beteiligt, die üblicherweise vorwiegend Zellstoff, d.h. Primärfasern einsetzen. Zu den getesteten Produkten zählen:

- Diverse schwer zerfaserbare Papiere, die beim Entsorger Rohprog anfallen
- Papier- und Kartonreste aus dem gelben Sack (PPK aus LVP)
- Ausschuss von Papierfabriken (nassfestes Spezialpapier)
- Diverse Produkte, die außerhalb von Papierfabriken in Weiterverarbeitungsprozessen anfallen, z.B. in Druckereien, bei Verpackungsherstellern, Brauereien (Flaschenetiketten)
- Naturfasern (Hopfen, Hanf, Stroh)
- Verbundmaterialien (Gipskartonplatte)
- Sonstige Produkte (Hanfleder)

Zur Bewertung der Eignung der Trockenfaserqualität aus den untersuchten Quellen wurden zunächst kleinere Faserstoffmuster an die teilnehmenden Papierfabriken geschickt und von diesen im Labor getestet. Anschließend wurden von ausgewählten Produkten größere Trockenfasermengen hergestellt, in Ballen gepresst und in die jeweilige Papierfabrik geliefert. Dort wurden die Trockenfasern dann im Rahmen eines Großversuchs auf der Papiermaschine eingesetzt, wobei der Trockenfaseranteil zwischen 5 - 30 % lag. Hervorzuheben ist hier die Produktion von einem Hanfpapier, bei dem 30 % Frischfaserzellstoff aus Skandinavien erfolgreich durch rein trocken-mechanisch aufbereiteten Hanf aus regionalem Anbau substituiert werden konnte.

Die Anlieferung der Trockenfasern in Ballenform wird von den meisten Papierfabriken vorausgesetzt, da auch die anderen Faserrohstoffe in Ballen angeleifert werden und daher die Stoffaufbereitung auf die Verarbeitung von Ballen ausgelegt ist. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig zu erwähnen und als Erfolg zu werten, dass bisher alle Trockenfasern zu einem ausreichend stabilen Ballen gepresst werden konnten, der nur durch einen Draht zusammengehalten wird (keine Folienummantelung erforderlich). Doch nicht nur hinsichtlich der Weiterverarbeitung in der Stoffaufbereitung ist das Verpressen in Ballen erforderlich. Auch hinsichtlich der Transportkosten stellen verdichtete Ballen die einzige praktikable und vor allem wirtschaftlich tragfähige Lösung dar. Zwar wurden in der Testphase auch viele Faserstoffe in Bag Bigs verschickt, was jedoch vorrangig an Anforderungen an die Reinheit oder nicht ausreichend großer Mengen

zurückzuführen war (für die Ballenherstellung werden mindestens 500 kg Trockenfasern benötigt).

Als eine besondere Herausforderung im Testbetrieb des Aufbereitungszentrums hat sich in vielen Fällen die Einhaltung der Sortenreinheit herausgestellt. Als besonders kritisch haben sich dabei die Prozesse der Vorzerkleinerung (Shredder) und der Verdichtung (Ballenpresse) gezeigt. Eine vollständige Reinigung dieser Prozesse vor dem Produktwechsel ist aufgrund der Aggregatgröße im Produktionsbetrieb nicht möglich, so dass eine ausreichende Produktreinheit erst nach einer gewissen Übergangszeit erreicht werden kann. Für die Übergangsphase muss jeweils mit einer Menge von ca. 200 - 400 kg kalkuliert werden, d.h. für die Produktion von 1 t sauberen und in Ballen gepressten Trockenfasern, werden 1,5 t Produkt benötigt. Für den Fall, dass das Produkt zu Beginn weder vorzerkleinert noch am Ende in Ballen verpresst werden muss, treten bei der Trockenfaserproduktion kaum Kontaminationen auf. Allerdings erhöht sich in dem Fall der Aufwand erheblich, da sich nicht vorzerkleinertes Material deutlich schwerer zuführen lässt und eine Abfüllung der Fasern in BigBags mit einem deutlich höheren Handlingaufwand einhergeht.

Eine weitere Herausforderung war die Kontamination mit Metallen, so dass nach der Vorzerkleinerung ein Überbandmagnet installiert werden musste. Im weiteren Verlauf des Testbetriebs wurden weitere Metallabscheider getestet, um die Prozesssicherheit zu erhöhen und die erforderlichen Maßnahmen zur Funkenvermeidung für eine Produktionsanlage abzuleiten (siehe auch Kapitel 3.3 „Optimierung des Aufbereitungsprozesses“).

Nicht zuletzt hat sich insbesondere bei Großmengen > 2 t gezeigt, dass die kleine Trockenzerfaserungsanlage im Testbetrieb an Kapazitätsgrenzen stößt und eine Trockenfaserherstellung nur mit großem zeitlichem Aufwand möglich ist. Nichtsdestotrotz konnten in einem Zeitraum von ca. 5 Monaten insgesamt 33 t Trockenfasern hergestellt werden (mehrere Teilmengen > 2 t, größte Teilmenge 7,6 t). Darüber hinaus war es ferner möglich eine große Zerfaserungsanlage mit einer Kapazität von bis zu 1,6 t/h zu fertigen und testweise in den Betrieb des Aufbereitungszentrums mit einzubinden. Dadurch war es möglich die notwendigen Kennzahlen zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines Aufbereitungszentrums zu bestimmen und außerdem eine Trockenfasermenge von über 20 t für einen Papiermaschinenversuch bereitzustellen. Damit ist es uns gelungen auch einen Maschinenversuch über einen längeren Produktionszeitraum von mehreren Stunden abzubilden.

Mit der erfolgreichen Optimierung des Aufbereitungsprozesses und der Herstellung von über 50 t Trockenfasern während des Testbetriebs des Aufbereitungszentrums konnte die technische Umsetzbarkeit der Projektidee, einer Rohstoffplattform mit Aufbereitungszentrum, hinreichend validiert werden. Darüber hinaus war es durch den

Testbetrieb mit der großen Zerfaserungsanlage möglich die spezifischen Herstellungskosten zu ermitteln und damit auch die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit des angestrebten Geschäftsmodells der Plattform zu validieren.

Beim Testbetrieb des Aufbereitungszentrums zur Simulation der Rohstoffplattform stand der Einsatz der Trockenfasern in Papierfabriken im Mittelpunkt. Dies betrifft insbesondere größere Trockenfasermengen > 100 kg. Darüber hinaus wurden auch kleinere Mengen an ausgewählten Trockenfasern zur Herstellung von Faservliesen im Trockenverfahren (Airlaid) bereitgestellt. Zum einen, da Trockenfasern auch bei der Herstellung von Airlaid-Produkten in der Lage sind teure Primärfasern zu ersetzen. Und zum anderen, da Trockenfasern auch ein großes Potenzial bei der Herstellung von Papier und Karton sowie anderen faserbasierten Produkten im Trockenverfahren bieten. Darüber hinaus wurden im Projektverlauf zahlreiche alternative Anwendungsmöglichkeiten von Trockenfasern außerhalb der Papierherstellung eruiert und anhand von Versuchen und der Fertigung von Mustern untersucht. Soweit möglich wurden auch Prototypen gefertigt und getestet. Zu den betrachteten alternativen Anwendungsmöglichkeiten der Trockenfasern zählen:

- Akustikelemente
- Fassadenelemente
- Baustoffplatten
- Isolierplatten
- Faserformteile
- Zuschlagstoff für Baustoffe
- Faserbasierte Kunststoffe
- Fasern für technische Anwendungen

Wenngleich der Fokus beim Testbetrieb des Aufbereitungszentrums auf die Verwendung von schwer zerfaserbaren Papierprodukten lag, wurden auch Naturfasern als lukrative Faserquelle eruiert und getestet. Darüber hinaus wurden Textilien sowie auch Papierquellen aus dem gelben Sack untersucht (PPK aus LVP).

### **3.7 Abschließende ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand der Technik**

Durch die Optimierung des Aufbereitungsprozesses und dem erfolgreichen Testbetrieb des Aufbereitungszentrums konnte neben der technologischen Umsetzbarkeit auch die wirtschaftliche Herstellung der Trockenfasern validiert werden. Zusammen mit dem erfolgreichen Einsatz von über 50 t Trockenfasern in mehreren Papierfabriken konnte damit Umsetzbarkeit des Geschäftsmodells der Rohstoffplattform nachgewiesen werden. Damit konnten die zentralen Projektziele des Gesamtprojekts erreicht werden. Die damit einhergehenden ökologischen, technologischen und ökonomischen Vorteile gegenüber

dem Stand der Technik, die sich bereits nach Abschluss der Phase I gezeigt haben, sollen im Folgenden erörtert werden.

Das Potenzial der bisher nicht genutzten Faserquellen, die durch eine Rohstoffplattform mit dazugehörigem Aufbereitungszentrum aufbereitet und als wertvoller Faserstoff einer erneuten stofflichen Nutzung zugeführt werden können, beläuft sich allein in Deutschland auf mindestens eine Millionen Tonnen im Jahr (Kalkulation siehe Anhang 7). Diese Menge würde über 5 % des jährlich benötigten Rohstoffbedarfs zur Herstellung des rechnerischen Gesamtpapierverbrauchs in Deutschland decken und stellt damit auch einen wertvollen Beitrag zur Sicherstellung der Rohstoffversorgung dar. Dies ist insbesondere dahingehend von Bedeutung, da die betreffenden Produkte überwiegend aus hochwertigen Primärfasern bestehen und besonders wertvoll für den Altpapierkreislauf sind. Neben dem ökologischen Effekt addiert sich der stoffliche Wert der bisher ungenutzten Faserquellen auf ein beachtliches Volumen von über 100 Mio. €/a (bei einem durchschnittlichen Altpapierpreis von 100 €/t).

In Gesamteuropa dürfte das Potenzial an ungenutzten Faserquellen wegen der niedrigeren Altpapiererfassungsquoten noch deutlich größer sein. Hinzu kommt, dass der klare Trend zu immer nassfesteren und anderweitig schwer zerfaserbaren Qualitäten im Zuge der notwendigen Substitution von Plastikprodukten durch Papier- und faserbasierte Produkte zu einem Anstieg der schwer zerfaserbaren Produkte führen wird. Dementsprechend sollte aus Umweltaspekten von keinem weiteren Rückgang ausgegangen werden, sondern Maßnahmen unterstützt werden, die eine effiziente stoffliche Nutzung des schwer zerfaserbaren und ungenutzten Altpapierpotenzials ermöglichen und somit den Altpapierkreislauf langfristig und nachhaltig sichern. Dies gilt auch vor dem Hintergrund des potenziellen Klimaschutz- und Treibhausgasreduzierungs potentials, insbesondere, wenn durch die aufbereiteten Faserstoffe wertvolle Primärfasern substituiert werden können. Demnach bieten Sekundärrohstoffe, zu denen auch die Trockenfasern gezählt werden, gegenüber Primärfaserstoffen nicht nur ökonomische sondern auch deutliche ökologische Vorteile.

Das theoretische Treibhausgasreduzierungs potenzial von Trockenfasern ergibt sich durch die Differenz der entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Primärfasern (Zellstoff) im Vergleich zu Sekundärfaserstoffen (Altpapier, Trockenfasern). Und zahlreiche wissenschaftliche Studien haben nachgewiesen, dass erhebliche umweltrelevante Unterschiede im Hinblick auf den fossilen Ressourcenverbrauch, dem Treibhauseffekt, dem Prozesswasserbedarf und dem Primärenergiebedarf bestehen. Die Unterschiede resultieren aus den benötigten Teilprozessen zur Roh- und Halbstoffherstellung, wobei gilt, dass die Zellstoffherstellung grundsätzlich deutlich wasser- und energieintensiver ist als die Altpapieraufbereitung.

Das genaue Einsparpotenzial durch die rohstoffliche Nutzung bisher nicht verwendeter Faserquellen kann jedoch nur abgeschätzt werden, da unklar ist, welcher Trockenfa-

seranteil insgesamt tatsächlich als Zellstoffersatz für die Papierherstellung Verwendung findet. Am konkreten Beispiel der Etikettenpapierherstellung kann jedoch die spezifische CO<sub>2</sub>-Einsparung berechnet werden.

Etikettenpapiere, zum Beispiel von Bierflaschen, können aufgrund ihrer Nassfestigkeit nur eingeschränkt wieder aufbereitet werden. Im Rahmen des Testbetriebs der Rohstoffplattform wurden daher auch Etiketten ausgewählt und aufbereitet und als Trockenfasern für die Herstellung von neuem Etikettenpapieren eingesetzt. Im Versuch wurde ein Teil des Zellstoffs 1:1 durch Trockenfasern aus den aufbereiteten Etikettenresten ersetzt. Je nach Herkunft des Zellstoffs beläuft sich die spezifische Einsparung je eingesetzter Trockenfasertonne zwischen 164 kg CO<sub>2</sub> und 204 kg CO<sub>2</sub>, was in Bezug auf die Faserstoffaufbereitung einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von durchschnittlichen 49 % entspricht<sup>2</sup> (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2: Vergleich der Treibhausgasemissionen von Etikettenpapier aus Altpapier und Zellstoff**

		Etikettenpapier aus:		Einsparung in %
		Altpapier	Zellstoff	
CO <sub>2</sub> -Emissionen in kg CO <sub>2</sub> / t Papier	Gesamt CO <sub>2</sub> -Emissionen	786	971	-19
	ohne Faserstoffaufbereitung	595	595	0
	nur Faserstoffaufbereitung	191	376	-49

Bezogen auf ein Aufbereitungszentrum mit einer stündlichen Zerfaserungskapazität von 1,6 t, welches an 200 Arbeitstagen im 2-Schicht-Betrieb betrieben wird, können bei einer durchschnittlichen Auslastung von 70 % im Jahr ca. 3.584 t Trockenfasern hergestellt werden. Diese Produktionsmenge basiert auf den Daten des Testbetriebs der großen Zerfaserungsanlage, welche im 1-Schicht-Betrieb maximal 2.000 t/a Trockenfasern herstellen kann. Unter der Annahme, dass 50 % der produzierten Trockenfasern einen Primärfaserstoff ersetzen können, würde sich dadurch eine jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung von 322.560 kg ergeben, wenn im Vergleich zu Zellstoff eine durchschnittliche Einsparung von 180 kg CO<sub>2</sub>/t zu Grunde gelegt wird. Da auch die anderen 50 % der Trockenfasern einer erneuten stofflichen Nutzung zugeführt werden, liegt das tatsächliche Einsparpotenzial nochmal deutlich darüber, auch wenn die Differenz zu normalem Altpapier nicht mehr so stark ausgeprägt ist, wie bei einem Zellstoff.

Diese kalkulierte CO<sub>2</sub>-Einsparung bezieht sich allerdings nur auf ein Aufbereitungszentrum, welches lediglich einen Bruchteil der in Deutschland verfügbaren Quellen aufbereiten kann. Wenn von den insgesamt nicht nutzbaren Faserquellen, deren stoffliches

<sup>2</sup> Quelle: Studie der Kübler & Niethammer Papierfabrik Kriebstein AG, Einfluss des Zellstoffs auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Berechnung gemäß dem Handbuch „CEPIPRINT AND CEPIFINE'S USER GUIDE TO THE CARBON FOOTPRINT OF GRAHIC PAPER“

Nutzungspotenzial auf mindestens 1 Million t/a geschätzt werden kann, nur 10 % wieder als Zellstoffersatz eingesetzt werden können, dann beläuft sich die jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung auf mindestens 18 Mio. kg. Diese Zahl bekräftigt noch einmal die hohe Umweltrelevanz der Thematik, wobei bereits ein Aufbereitungszentrum einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung leistet.

Neben den Vorteilen, die sich durch eine Rohstoffplattform mit Aufbereitungszentrum ergeben, bietet sich die Aufbereitungstechnologie auch für einzelne Anwender an, die Trockenfasern ausschließlich für den Eigenbedarf herstellen. Voraussetzung hierfür ist, dass die aufzubereitenden Mengen einen wirtschaftlichen Betrieb erlauben, was oftmals bei Papierfabriken der Fall ist. Insbesondere für Papierfabriken, bei denen relevante Mengen an nassfesten Ausschuss anfallen, ergeben sich durch die Aufbereitungstechnologie eine Reihe von ökologischen, technologischen und ökonomischen Vorteilen. Gerade bei Spezialpapier- und Hygienepapierherstellern sind die Ausschussmengen mit ca. 10 % bezogen auf die Gesamtproduktion erheblich. Müsste man diese Menge entsorgen, dann würden mitunter nicht nur erhebliche Entsorgungskosten anfallen. Die fehlenden Rohstoffmengen müssten auch durch Frischfaserzellstoff ersetzt werden, wodurch für die betreffenden Papierfabriken wieder erhebliche Mehrkosten anfallen. Hinzu kommt, dass der entsorgte Ausschuss nicht in den Altpapierkreislauf zurückgeht, weil er keiner klassifizierten Altpapiersorte zugewiesen werden kann. Die damit einhergehende nicht erfolgte stoffliche Verwertung steht entgegen dem anvisierten Kreislaufgedanken der Bioökonomie. Idealerweise wird daher der Ausschuss unmittelbar wieder vor Ort aufgelöst und zur erneuten Papierherstellung verwendet.

Tatsächlich wird der Ausschuss auch in vielen Papierfabriken durch sogenannte Ausschusspulper in separaten Aufbereitungssträngen aufbereitet. Nachteilig hierbei sind jedoch die langen Pulpzeiten von 60 - 120 Minuten, die erforderlichen hohen Temperaturen und zum Teil auch die Notwendigkeit der Chemikalienzugabe, damit die nassfesten Produkte überhaupt wieder aufgelöst werden können. Hinzu kommen nicht selten noch nachgeschaltete Entstipper oder ähnliche Aggregate, weil trotz der langen Pulpzeiten häufig noch Agglomerate, d. h. nicht in Einzelfasern zerlegte Segmente (sogenannte Stippen), vorhanden sind. Dies führt zu einem sehr hohen Energiebedarf für die Ausschussbehandlung im Nassprozess von ca. 200 - 400 kWh/t. Demgegenüber weist die Trockenzerfaserung mit einem spez. Energiebedarf von 90 - 160 kWh/t eine deutlich bessere Energieeffizienz auf. In konkreten Fallbeispielen konnte durch Papiermaschinenversuche eine Einsparung von 50 - 60 % gegenüber dem Stand der Technik nachgewiesen werden.

Neben den genannten negativen Aspekten liegt der große Nachteil bei der Nassaufbereitung von schwer zerfaserbaren Produkten in der fehlenden Effizienz und Flexibilität. So existieren zwar einige funktionierende Aufbereitungskonzepte, die in Konkurrenz zu unserem Trockenverfahren stehen, jedoch funktionieren diese nur mit ausgewählten sortenreinen Fraktionen bzw. Monochargen. Als Beispiele können die Aufbereitung von

TetraPacks<sup>3</sup>, das Recycling von Trinkbechern (Cupcycling<sup>4</sup>), das Recycling von Papierhandtüchern (Tork PaperCircle)<sup>5</sup> oder das Recycling von Trennpapieren (Cycle4green)<sup>6</sup> genannt werden. Diese Aufbereitungskonzepte basieren darauf, dass die stoffliche und chemische Zusammensetzung bekannt ist und somit die Aufbereitungsverfahren und die erforderliche Lösechemie speziell auf die Gegebenheiten des aufzubereitenden Produkts angepasst werden können. Damit einher geht jedoch ein erheblicher logistischer Aufwand sowie eine limitierte Rohstoffverfügbarkeit für den jeweiligen Aufbereitungsprozess, da dieser nur mit den darauf abgestimmten Produkten funktioniert. Der Tork PaperCycle z.B. funktioniert nur mit den selbst hergestellten Papierhandtüchern, welche nach Benutzung bei den Anwendern in speziellen Behältern separat gesammelt und in ein Essity-Werk gebracht werden. Neben den hohen Kosten, die durch das Einsammeln und den Transport von zum Teil nur Kleinstmengen anfallen, wirkt sich dies auch negativ auf die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Aufbereitungsprozesses aus, da eine optimale Auslastung der Prozesse nicht immer gegeben ist / [4], [5], [6], [7], [8], [9]/.

Die Trockenaufbereitungstechnologie bietet sich daher hervorragend als Substitution oder Ergänzung für nicht ausreichend funktionierende Ausschusspulper an. Zudem kann sie vor allem dort eingesetzt werden, wo konventionelle Ausschusspulper keinen Sinn machen bzw. nicht eingesetzt werden können, zum Beispiel:

- In Papierfabriken, die keine Lösechemikalien einsetzen können. In diesem Fall funktioniert nur eine Chemie freie Aufbereitung wie die Trockenzerfaserung.
- In Papierfabriken, wo die geplante weitere Erhöhung der Nassfestigkeit der eigenen Produkte die Effizienz des Ausschusspulpers weiter verschlechtert, was im Extremfall dazu führt, dass der Ausschuss nicht mehr aufbereitet werden kann und/oder die Nassfestigkeit der Produkte nicht auf das gewünschte Niveau erhöht werden kann.
- In Papierfabriken, die ihren eigenen Ausschuss nur einsetzen könnten, wenn dieser unmittelbar bei der gleichen Produktionscharge wieder eingesetzt werden würde. Durch lange Pulpzeiten kommt ein Ausschusspulper nicht in Frage, wohl aber die Trockenzerfaserung, die eine Online-Aufbereitung in wenigen Sekunden ermöglicht.

Und dort, wo eine Ausschussaufbereitung bisher aufgrund von zu geringen Mengen nicht möglich war, bietet sich die Trockenzerfaserung ebenso an. Entweder indem der

---

<sup>3</sup> Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel, Alf Strunz, Wochenblatt für Papierfabrikation, Ausgabe 5/2013, S. 312

<sup>4</sup> Quelle: Recycling von Trinkbechern aus Karton; Matthew Miller (James Cropper) und Alain Lascar (Kadant); Wochenblatt für Papierfabrikation, Ausgabe 10/2015

<sup>5</sup> Minister-Besuch im Werk Kostheim; Paper + Technik, Ausgabe 5/2019

<sup>6</sup> <https://www.c4g.fi/>; <https://www.neue-verpackung.de/markt/prima-fuers-klima-traegerpapier-wiederverwertung-bei-herma-157.html>; <https://www.lenzingpapier.com/de/c4g/login>

Ausschuss über die Rohstoffplattform aufbereitet und anderen Interessenten zur Verfügung gestellt wird oder indem der Ausschuss in Form einer Lohnzerfaserung aufbereitet wird.

Die Lohnzerfaserung hat sich beim Testbetrieb des Aufbereitungszentrum als eine attraktive Ergänzung des Geschäftsmodells herausgestellt. In dem Fall liefern interessierte Papierfabriken oder Hersteller von faserbasierten Produkten ihre betreffenden Produkte in unser Aufbereitungszentrum. Nach der Zerfaserung werden die Trockenfasern zurückgeschickt und stofflich verwertet. Im Gegensatz zum ursprünglichen Grundgedanken des Plattformbetriebs sind Quelle und Senke in dem Fall identisch. Diese Vorgehensweise ist v.a. für jene Interessenten von Bedeutung, die aufgrund der zu geringen Mengen keinen wirtschaftlichen Betrieb einer eigenen Aufbereitungsanlage darstellen können. In einem Aufbereitungszentrum hingegen stellt die Lohnzerfaserung sowohl für den Betreiber als auch für den Faserstoffabnehmer ein ökonomisch tragfähiges Modell dar, da die Trockenfaserkosten inkl. der Aufbereitungs- und Transportkosten deutlich unterhalb von Zellstoff liegen. Die genaue Kosteneinsparung hängt von verschiedensten Randbedingungen sowie der Produktqualität vor und nach der Trockenzerfaserung ab und kann bis zu 60 % betragen.

Insbesondere für die Papierindustrie konnte durch die Projektergebnisse ein Lösungsansatz zur Behebung des Aufbereitungs- und Erfassungsdefizits aufgezeigt werden, der folgende konkrete Vorteile bietet:

- Erhöhung der Ressourceneffizienz von Papierfabriken, da nun auch schwer zerfaserbare Produkte aufbereitet und wiedereingesetzt werden können.
- Einsparung von Entsorgungs- und Rohstoffkosten, da betreffende Papierfabriken ihren schwer zerfaserbaren Ausschuss nicht mehr gegen Gebühr entsorgen lassen müssen, sondern diesen selbst stofflich nutzen können.
- Einsparung von Energie, Chemie, Zeit und Wasser, da betreffende Papierfabriken mittels der Trockenzerfaserung ihren nassfesten Ausschuss weitaus energie- und ressourceneffizienter aufbereiten können als mit den vorhandenen Nassprozessen zur Ausschussaufbereitung.
- Verbesserung der Papier- und Kartoneigenschaften, insbesondere des spez. Volumens und der Biegesteifigkeit, da Trockenfasern aufgrund ihrer erhöhten Steifigkeit das Potenzial zur zielgerichteten Eigenschaftsverbesserung bieten.
- Verbesserung des Papierherstellungsprozesses, da Trockenfasern schneller entwässern, wodurch die Produktionsgeschwindigkeit erhöht und Trocknungsenergie eingespart werden können.
- Erweiterung der Altpapierrücklauf- und Einsatzquote, da durch die Beseitigung des Aufbereitungsdefizits nun auch schwer zerfaserbare Produkte an der stofflichen Verwertung teilnehmen können.

- Erweiterung der Rezyklierbarkeit von Papier- bzw. Faserbasierten Produkten, insbesondere solchen, die im Zuge der voranschreitenden Substitution von Plastikprodukten mit den konventionellen Nassaufbereitungstechnologien nicht oder nur ungenügend stofflich verwertet werden können.
  - Damit bietet die Trockenzerfaserung eine wichtige Voraussetzung, um neue Papierprodukte oder anderweitige faserbasierte Produkte zu entwickeln, die als nachhaltig eingestuft werden und somit umweltschädigende Plastikprodukte ersetzen können. Einerseits, weil durch die Trockenzerfaserung ein Teil der dafür benötigten Faserstoffe bereitgestellt werden kann. Andererseits – und dies ist der wichtigere Aspekt, weil durch die Trockenzerfaserung die benötigten Plastiksubstitute erst im Sinne der Kreislaufwirtschaft wiederaufbereitet und erneut stofflich nutzbar gemacht werden können.
- Beitrag zur Sicherung der Rohstoffversorgung der Papierindustrie sowie nachhaltige und langfristige Sicherung des Altpapierkreislaufs.

Die Vorteile der Rohstoffplattform und der dazugehörigen Aufbereitungstechnologie lassen sich auch auf andere Industriezweige übertragen, auch wenn die Papierindustrie die aktuell mengenmäßig bedeutendste Senke darstellt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in vielen Industriebereichen Bestrebungen intensiviert werden, um Sekundär- und Naturfasern als Substitut für nicht nachwachsende oder recyclingfähige Fasern oder Kunststoffe einzusetzen. Die damit einhergehende rohstoffliche Konkurrenznutzung von Zellstoff und Altpapier in anderen Bereichen, muss daher durch Erschließung neuer Faserquellen ausgeglichen werden. Idealerweise handelt es sich dabei aus ökonomischen und ökologischen Aspekten um Fasern aus Sekundärquellen. Vor diesem Hintergrund ist es für die Rohstoffplattform von besonderer Relevanz, dass sich im Projektverlauf herausgestellt hat, dass das angenommene Faserpotenzial noch weitaus höher ausfällt, als im Antrag skizziert. Hervorzuheben ist hier der Bereich der Naturfasern aus ungenutzten Pflanzenresten. Zudem konnte mit Hilfe von Sortierverfahren ein verarbeitungsfähiger Faserstoff aus dem gelben Sack (PPK aus LVP) sowie vom Gipskartonrecycling hergestellt werden.

Die Faserstofffraktion aus dem gelben Sack bietet trotz vorhandener Restkontaminationen insbesondere für Kartonverpackungen großes Potenzial, die in einem innovativen Trockenprozess hergestellt werden und nicht für das erneute Recycling vorgesehen sind. Ein noch größeres Faserpotenzial hat sich durch das Recycling von Gipskartonplatten herausgestellt. Dabei war es durch eine Optimierung des Aufbereitungsprozesses möglich den Großteil der Gipspartikel so sortenrein vom Karton abzutrennen, dass neben der Faserfraktion prinzipiell auch die Gipsfraktion wieder einer stofflichen Verwertung zugeführt werden kann. Damit kann den Interessenten ein verbessertes Verfahren für das Gipskartonrecycling zur Verfügung gestellt werden. Vor dem Hintergrund der jährlich konstant hohen Anfallmengen wäre die dadurch zurückgewonnene Faserfraktion ein signifikanter Beitrag zur Sicherung der Rohstoffversorgung für die Papierindustrie.

Durch die Möglichkeit auch die zurückgewonnene Gipsfraktion für die erneute Herstellung von Gipskartonplatten zu nutzen, ergibt sich zudem auch eine große Umweltentlastung durch die die Einsparung von REA-Gips.

Auch bei der Aufbereitung von Pflanzenresten, die ansonsten in nicht unerheblichen Mengen als Abfall anfallen würden, hat sich die Aufbereitungstechnologie als prinzipiell geeignet herausgestellt. Im Testbetrieb des Aufbereitungszentrums konnten bereits mehrere Tonnen Hanf aufbereitet und in einer Papierfabrik zur Herstellung von besonders reißfestem Verpackungspapier eingesetzt werden. Dadurch ist es grundsätzlich möglich hochwertige Langfaserzellstoffe aus Skandinavien durch regional angebaute Hanfpflanzenreste zu ersetzen. Auch andere Naturfasern konnten im Projektverlauf untersucht werden und weisen großes Potenzial – nicht nur für die Papierherstellung – auf. Für ein optimales Ergebnis und eine ganzheitliche Ausnutzung des Rohstoffpotenzials muss die Aufbereitungstechnologie jedoch noch weiterentwickelt werden, da bei der Zerkleinerung von Pflanzenresten mehrere Fraktionen entstehen und die Fasern zum Teil noch aufgeschlossen werden müssen. Außerdem bedarf die Aufbereitung von Pflanzenresten im Vergleich zur Papierverarbeitung einer komplett anderen Sortierung, Vorzerkleinerung und Dosiertechnik.

### **3.8 Darstellung der geplanten Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse sowie geplante Veröffentlichungen**

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit wurde ein Info-Flyer über die TBP-Future und ihre Trockenzerfaserungstechnologie erstellt, um auf Messen und anderen öffentlichen Veranstaltungen sowie durch direktes Ansprechen und persönliche Kontakte potenzielle Kunden zu gewinnen. Zur Öffentlichkeitsarbeit sind außerdem die zahlreichen Technikumsversuche und Referenzbesuche an unseren Mobilen Zerfaserungsanlagen zu nennen. Damit hat jeder Interessent die Möglichkeit sich von den Vorteilen und den Möglichkeiten unserer Technologien sowie der geplanten Rohstoffplattform zu überzeugen.

Die Resonanz auf die Idee der Rohstoffplattform und dem Testbetrieb des Aufbereitungszentrums fiel nicht nur innerhalb der Papierbranche äußerst positiv aus. So haben wir im Projektverlauf bereits Einladungen zu verschiedenen Fachkonferenzen sowie internationalen Recyclinginitiativen erhalten, auf denen wir unsere Projektidee vorstellen konnten und so zahlreiche weitere potenzielle Quellen und Senken für unsere Rohstoffplattform eruieren konnten. Hervorzuheben ist auch die Teilnahme an der 4evergreen Initiative, eine Allianz bestehend aus über 100 Teilnehmern, mit dem Ziel die stoffliche Verwertung von faserbasierten Verpackungen zu verbessern. Dadurch war es uns möglich unsere Aufbereitungstechnologie innerhalb der Papierindustrie und darüber hinaus als Ergänzung zu den bestehenden Nassaufbereitungsprozessen weiter zu etablieren und damit einen Beitrag zur Erhöhung der Recyclingrate von faserbasierten Verpackungen auf die anvisierten 90 % zu leisten.

Neben erfolgten Veröffentlichungen in der Form von Vorträgen beim Baden-Württemberg-Kongress 2024, im Rahmen des DBU-Forums zum Thema „Circular Economy, sowie beim PMAK-Fachausschuss der Zellchemie, sind nach Projektabschluss weitere Präsentationen und Veröffentlichungen geplant. Hervorzuheben ist hier ein geplanter Vortrag auf dem IMPS in München. Dazu kommt die Öffentlichkeitsarbeit bei ausstehenden Fachkongressen und Tagungen wie der APV-Tagung in Leipzig, der IFAT in München oder der Zellchemie-Messe in Wiesbaden. Darüber hinaus sind auch von den Projektpartnern Veröffentlichungen in der Entsorgungsbranche geplant.

Neben der Veröffentlichung der Projektergebnisse soll die digitale Rohstoffplattform weiter ausgebaut werden. Im weiteren Verlauf soll ferner das temporäre Aufbereitungszentrum in ein großes und dauerhaftes Aufbereitungszentrum überführt werden, welches auch eine Lohnzertifizierung anbietet. Hierzu ist geplant die Kooperation mit Rohprog weiter zu vertiefen, wobei auch die Unternehmensgründung der FiberRec GmbH zur Forcierung der Trockenfaseraufbereitung auf der Agenda steht. Diese Maßnahmen zielen darauf ab das Geschäftsmodell der Rohstoffplattform auszubauen und zu einem tragfähigen Konzept zu überführen. Ein wichtiger Aspekt auf dem Weg dahin wird es sein, die Zusammenarbeit mit ausgewählten Papierfabriken als Rohstoffsenke weiter auszubauen und auch neue Abnehmer außerhalb der Papierindustrie zu akquirieren.

Weiterhin gilt es die Erschließung des Potenzials von Naturfasern aus Pflanzenresten weiter zu erschließen. Wie angedeutet, ist hierzu jedoch eine Anpassung und Erweiterung der Aufbereitungstechnologie erforderlich. Auch das Recycling von Gipskartonplatten sowie die Rückgewinnung von Fasern aus dem gelben Sack sollen aufgrund der positiven Projektergebnisse weiter verfolgt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt stellt den Ausbau der physischen Datenbank und die Erstellung der dazugehörigen Datenblätter zur Einordnung der Faserqualität dar. Durch die Verfügungstellung von Faserstoffmustern und Infomaterial sollen potenzielle Kunden akquiriert werden. Dabei sind sowohl Kunden interessant, die an einer Lohnzertifizierung Interesse haben könnten als auch an der Abnahme von Trockenfasern.

Zur besseren Erfassung von Rohstoffquellen und der weiteren Etablierung unserer Aufbereitungstechnik wird ferner daran gearbeitet, nach Möglichkeiten zu suchen, die eine zuverlässige Erkennung von nassfesten Papieren erlauben, so dass diese gezielt aussortiert und einer geeigneten Aufbereitung zugeführt werden können.

.

## 4 Fazit

Mit dem erfolgreichen Aufbau einer Versuchsanlage zur Trockenzerfaserung konnte in der Phase I des Gesamtprojekts ein Aufbereitungsprozess entwickelt werden, mit dem bisher nicht nutzbare Sekundärfaserquellen schonend in Einzelfasern zerlegt und uneingeschränkt für die erneute Papierherstellung oder andere faserbasierte Anwendungen verwendet werden können. Auf Basis des entwickelten Trockenaufbereitungsprozesses konnten ferner mobile Testanlagen im Industriemaßstab umgesetzt werden, mit denen mehrere hundert Tonnen Trockenfasern hergestellt und in Papiermaschinenversuchen eingesetzt werden konnten. Damit konnte die technologische Basis als Grundvoraussetzung für den Aufbau einer Rohstoffplattform geschaffen werden.

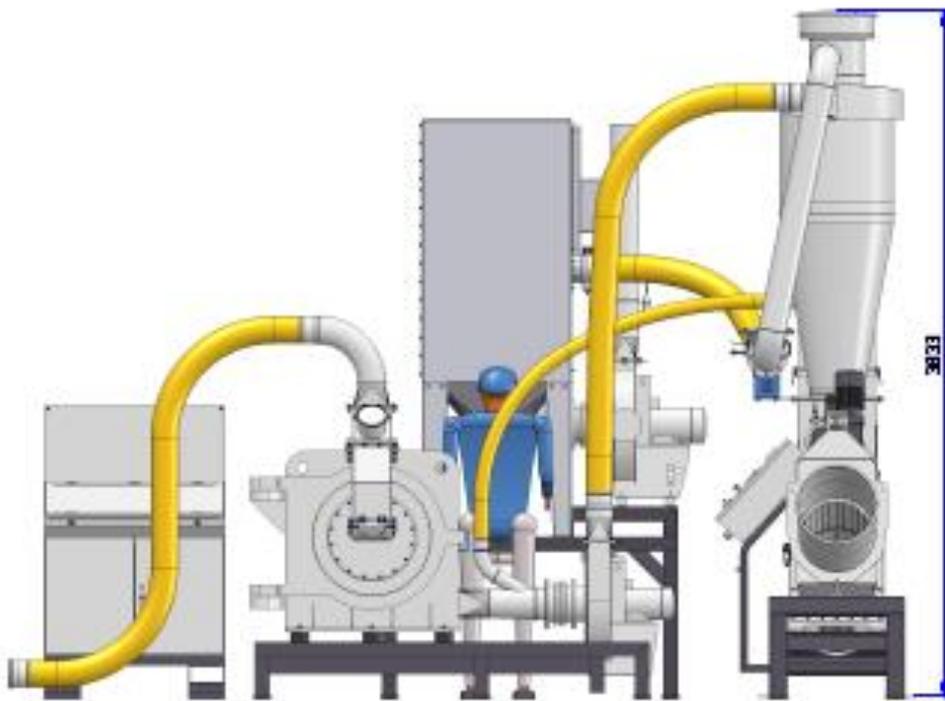
Durch eine erfolgreiche Optimierung der Gesamtprozesskette und dem temporären Testbetrieb eines Aufbereitungszentrums konnten in der Phase II die technologische Umsetzbarkeit sowie die wirtschaftliche Tragfähigkeit des angestrebten Geschäftsmodells der Rohstoffplattform validiert werden. Die Wirtschaftlichkeit des Aufbereitungsprozesses konnte insbesondere durch das erfolgreiche Upscaling auf eine Zerfaserungskapazität von bis zu 1,6 t/h realisiert werden. Darüber hinaus konnte der Nachweis erbracht werden, dass Trockenfasern aus hochwertigen Sekundärfaserquellen auch als Zellstoffersatz eingesetzt werden können. Nicht zuletzt konnten sowohl ausreichende Faserquellen als auch verschiedenste Einsatzmöglichkeiten für Trockenfasern (Senken), auch außerhalb der Papierherstellung, eruiert werden.

Neben dem erfolgreichen Testbetrieb eines Aufbereitungszentrums konnte auch eine digitale Rohstoffplattform in Form einer Website ([fiber-rec.com](http://fiber-rec.com)) umgesetzt werden. Damit konnten alle wesentlichen Projektziele sowie die wichtigsten Meilensteine erreicht werden. Durch das Zusammenspiel der Rohstoffplattform mit einem dazugehörigem Aufbereitungszentrum wird das vorherrschende Erfassungs- und Aufbereitungsdefizit behoben und eine umfangreiche stoffliche Nutzung der bisher nicht nutzbaren Sekundärfaserquellen ermöglicht. Dabei wird mit jeder aufbereiteten Tonne Trockenfasern ein signifikanter Beitrag zur Umweltschonung und Ressourceneinsparung geleistet. Um jedoch den Großteil des aufgezeigten Potenzials der bisher ungenutzten Faserquellen auszuschöpfen, sind mehrere Aufbereitungszentren sowie die weitere Etablierung unserer Aufbereitungstechnologie am Anfallort erforderlich. Damit können die Projektergebnisse einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Recyclingrate von Papier und faserbasierten Produkten leisten, wodurch Primärressourcen geschont und signifikante CO<sub>2</sub>-Einsparungen und nachhaltigere Stoffkreisläufe erreicht werden können.

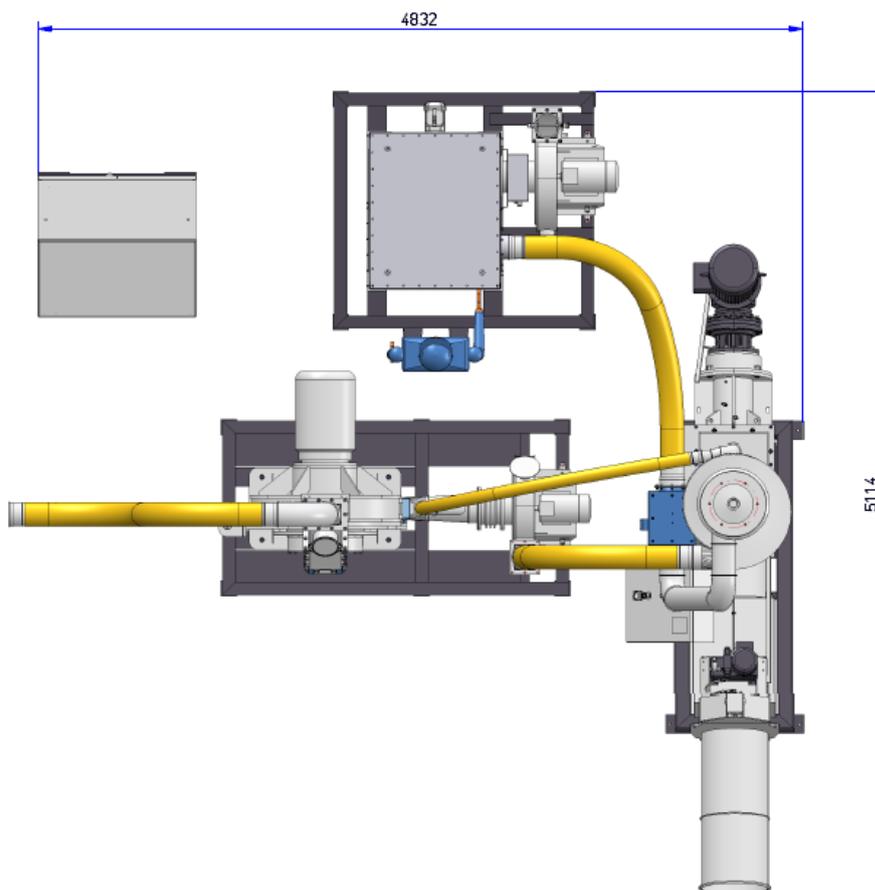
## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Was darf alles in die Altpapiertonne und was gehört in den Restmüll? Von Jennifer Buchholz, „T-Online,“ [Online]. Available: [https://www.t-online.de/heimgarten/haushaltstipps/id\\_80804150/was-darf-alles-in-die-altpapiertonne-und-was-gehoert-in-den-restmuell-.html](https://www.t-online.de/heimgarten/haushaltstipps/id_80804150/was-darf-alles-in-die-altpapiertonne-und-was-gehoert-in-den-restmuell-.html).
- [2] A. Strunz, „Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel,“ *Wochenblatt für Papierfabrikation*, p. 312, 5 2013.
- [3] P. Bittermann, „Neue Verpackung,“ 12 Februar 2019. [Online]. Available: <https://www.neue-verpackung.de/markt/prima-fuers-klima-traegerpapier-wiederverwertung-bei-herma-157.html>.
- [4] Lenzing Papier, „The Natural Choice C4G Release Liner Recycling,“ [Online]. Available: <https://www.lenzingpapier.com/de/c4g/login>.
- [5] cycle4green, „cycle4green,“ [Online]. Available: <https://www.c4g.fi/>.
- [6] M. Miller und A. Lascar, „Recyclig von Trinkbechern aus Karton,“ *Wochenblatt für Papierfabrikation*, 10 2015.
- [7] „Minister-Besuch im Werk Kostheim,“ *Papier+Technik*, 5 2019.
- [8] Verband Deutscher Papierfabriken e. V., „Papier 2020 - Ein Leistungsbericht,“ VDP, Bonn, 2021.
- [9] T. Schrinner, T. Gailat, H. Großmann, M. Ungerer und M. Gotic, „Rohstoffkosten senken, Produkteigenschaften verbessern,“ *Wochenblatt für Papierfabrikation*, pp. 508-511, 10 2020.

## 6 Anhang



Anhang 1: DPS 40 GT Aufstellplan und Platzbedarf [1]



Anhang 2: DPS 40 GT Aufstellplan und Platzbedarf [2]



Anhang 3: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT I bei einem Filterpapierhersteller [2]



Anhang 4: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT II bei einem Verpackungspapierhersteller



Anhang 5: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT II bei einem Tissuehersteller [2]



Anhang 6: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT II bei einem Hersteller von Biocompositen

## Anhang 7:

### Betrachtung der Mengen an bisher nicht nutzbaren Faserquellen:

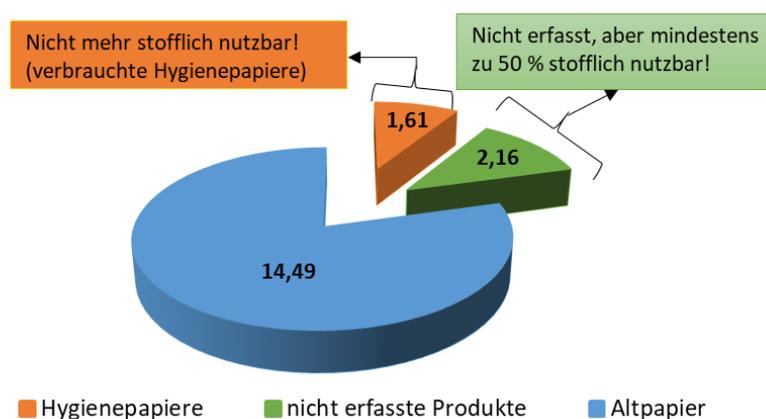
In der Bundesrepublik Deutschland werden gegenwärtig (2020) ca. 21,35 Mt/a Papier produziert. Die für die Produktion dieser Neupapiermenge eingesetzte Menge an Altpapier liegt bei 16,91 Mt/a, die Altpapier-Einsatzquote also bei ca. 79 %. Die Import-/Exportbilanz für Altpapier weist einen Netto-Importüberschuss von 2,42 Mt/a auf. Das Altpapieraufkommen in

Deutschland beträgt somit 14,49 Mt/a, was bei einem rechnerischen Verbrauch an Papier, Karton und Pappe von gegenwärtig ca. 18,26 Mt/a einer Rücklaufquote von 79 % entspricht. Ca. 21 % der in Deutschland in Umlauf gebrachten Papiere werden also nicht erfasst und zurückgeführt. Selbst wenn hiervon die Gesamtmenge der in Deutschland verbrauchten, überwiegend aber

nicht rezyklierbaren Hygienepapiere (Anteil am Inlandverbrauch 1,61 Mt/a bzw. 8,8 %) abgezogen würde, verblieben noch immer ca. 12 % des Gesamtverbrauchs, also ca. 2,16 Mt/a, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu  $\frac{2}{3}$ , mindestens jedoch zur Hälfte, stofflich durchaus verwertbar wären.

Das aktuell theoretisch ungenutzte Altpapierpotenzial beläuft sich damit auf 2,16 Mio t/a. Diese Menge an bisher ungenutzten Altpapierpotenzial stellt eine erhebliche Umweltrelevanz dar. Selbst wenn von den 2,16 Mio. t/a nur ca. 50 % stofflich genutzt werden könnten, sprechen wir immer noch von einer Menge von > 1 Mio. t/a. Diese Menge würde über 5 % des jährlich benötigten Rohstoffbedarfs zur Herstellung des rechnerischen Gesamtpapierverbrauchs in Deutschland decken. Hinzu kommt ein weiterer überaus wichtiger Aspekt. Da es sich bei den nicht genutzten Produkten überwiegend um hochwertige Papierprodukte handelt, die vorwiegend mit Primärfaserstoffen hergestellt wurden, sind die darin enthaltenen Fasern für den Altpapierkreislauf besonders wertvoll.

**Aufteilung der verbrauchten Papiermenge in Mio. t**



**Abbildung 13: Aufteilung des rechnerischen Papierverbrauchs in Deutschland nach erfasstem Altpapier und nicht erfassten Papierprodukten**

## **Geplante und bereits erfolgte Veröffentlichungen Phase I + II**

Artikel im Wochenblatt für Papierfabrikation

- Rohstoffkosten senken, Produkteigenschaften verbessern
  - Ausgabe 10/2020, S. 508-511

Artikel im Professional Papermaking

- How to reduce raw material costs and improve product properties
  - Ausgabe 2/2020, S. 48-51

Artikel in der Sächsischen Zeitung

- Wie Wolle ein Müllproblem löst
  - Ausgabe vom 25.01.2021, S. 12

Online-Artikel im Oiger

- Dresdner Maschine soll Durst der Papierfabriken stillen
  - Veröffentlicht am 25.01.2021

Online-Vortrag auf der eREC Konferenz

- Dry Pulping: Stoffliche Nutzung bisher nicht nutzbarer Faserquellen
  - Mai 2021

Online-Vortrag auf der Cegi 4evergreen Veranstaltung

- Dry Pulping
  - Juni 2021

Online-Vortrag auf einer Veranstaltung des Innovationsnetzwerk „Gebäude O.K.“

- Impulsvortrag im Juni 2021

Vortrag auf der Biorefinery Conference in Graz

- Raw Material Costs Reduction and Energy-Saving by Dry Pulping - A Field Report from Paper Mills
  - Graz, 19.05.2022

Vortrag auf dem IMPS (Internationales Münchner Papiersymposium)

- Industrielle Erfahrungen mit der Trockenzerfaserung bei der Papierherstellung
  - München, 23.-25. Mai 2022

Vortrag auf dem Technischen Ausschuss des VNOP (Verband Nord- und Ostdeutscher Papierfabriken)

- Erfahrungen mit der Trockenzerfaserung im Industrieinsatz
  - Osnabrück, 24./25. Mai 2022

Vortrag auf dem Symposium der Papieringenieure 2022

- 20. bis 22. Oktober 2022 im AlpenCongress Berchtesgaden

Vortrag auf dem Baden-Württemberg-Kongress 2024 im Rahmen des DBU-Forums zum Thema „Circular Economy – mehr als Recycling | Innovationen auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft“

- 16. bis 17. Oktober 2024 im Congress Center Heidelberg

Vortrag beim Fachausschuß Papiererzeugung (PMAK) der Zellcheming bei Jass Fulda

Vortrag auf dem IMPS (Internationales Münchner Papiersymposium)

- Erfahrungen beim Einsatz von trocken zerfaserten Faserstoffen bei der Papierfabrik Reflex
  - München, 25.-27. März 2025

Abschließend möchten wir auf die Website Fiber-Rec <https://fiber-rec.com/> sowie unsere Homepage [www.tbp-future.com](http://www.tbp-future.com) aufmerksam machen.