

Schlussbericht der:

- **TBP Future GmbH**

In Kooperation mit der:

- Gotic GmbH
- TU Dresden, Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik

**Digitale Rohstoffplattform Phase I –  
Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts zur Erfassung, Auf-  
bereitung und nachhaltigen stofflichen Verwendung bisher  
nicht nutzbarer Sekundärfaserquellen**

Abschlussbericht zum Projekt mit dem Aktenzeichen 35223/01. Das Forschungsprojekt wurde gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Tilo Gailat & Dipl.-Ing. Thomas Schrinner

April 2022

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Az **35223/01**Referat **07**

Fördersumme

**EUR 337.385,00**

**Antragstitel** **Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts zur Erfassung, Aufbereitung und nachhaltigen stofflichen Verwendung bisher nicht nutzbarer Sekundärfaserquellen (1. Phase)**

**Stichworte** **Digitale Rohstoffplattform Phase I, Aufbereitungstechnik, Abfallvermeidung, Mikroplastik, Kunststoffabfall, Stoffliche Verwertung**

Laufzeit

**26 Monate**

Projektbeginn

**01.02.2020**

Projektende

**31.03.2022**

Projektphase(n)

**1(2)**

Zwischenberichte

**Bewilligungsempfänger** TBP Future GmbH  
Fischerstr. 6 A  
85368 Moosburg a.d.Isar

Tel 08761 7181332  
Fax

Projektleitung  
Tilo Gailat

Bearbeiter  
Thomas Schrunner

**Kooperationspartner** Gotic GmbH, Gerstetten  
Technische Universität Dresden

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Der Substitution von Plastikprodukten durch nachhaltige und rezyklierbare Faser- bzw. Papier basierte Produkte wird insbesondere im Verpackungsbereich eine hohe Priorität eingeräumt. Vor diesem Hintergrund würde die stoffliche Nutzung bisher nicht erschlossener Altpapierquellen für die Produktion von umweltkompatiblen und problemlos zu entsorgenden Verpackungslösungen zweifelsfrei einen erheblichen Beitrag zur Reduktion gravierender Umweltbelastungen durch Plastikmüll leisten können.

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 zu Recht als Vorbild einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft bezeichnen, denn schließlich wird kaum ein anderes Produkt häufiger stofflich wiederverwertet als Papier. In Deutschland z. B. ist Altpapier mit einer Einsatzquote von ca. 79 % der mit Abstand wichtigste Rohstoff für die Papierherstellung. Mit dieser hohen Recyclingquote und der Verwertung nachwachsender Rohstoffe ist die Papierindustrie bereits heute Vorreiter auf dem Weg zur Bioökonomie.

Doch obwohl eine weitere Schließung der Stoffkreisläufe durchaus möglich und ökonomisch sowie ökologisch wünschenswert wäre, hat sich die Menge an rezyklierbarem Altpapier einem Grenzwert angenähert und Experten gehen davon aus, dass die Altpapiereinsatzquote nicht mehr deutlich über 80 % gesteigert werden kann. Diese Limitierung beruht zwar zu einem Teil auf Papierprodukten, die entweder archiviert oder gezielt vernichtet bzw. durch ihren bestimmungsgemäßen Gebrauch so verändert werden, dass sie für die stoffliche Verwertung grundsätzlich nicht mehr in Frage kommen (Hygieneprodukte). Neben diesen nicht mehr nutzbaren Produkten existiert jedoch noch ein ernstzunehmender Anteil, der stofflich durchaus verwertbar wäre, aber nach dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht aufbereitet werden kann, da es sich um sogenannte schwer rezyklierbare Produkte handelt, wie zum Beispiel nassfeste Spezialpapiere (Etiketten, Banknoten- und Sicherheitspapiere usw.). 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.

Daraus resultiert der Anlass des Projektes neue Aufbereitungsmöglichkeiten zu entwickeln, die in der Lage sind genau die genannten Sekundärrohstoffquellen aufzubereiten und damit nutzbar zu machen.

## **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Die Projektidee besteht deshalb 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 Altpapiersammel-system erfasst werden können noch geeignete Aufbereitungstechnologien existieren, weshalb sie in der Regel keiner stofflichen Verwertung zugeführt werden. Da-für ist es notwendig die verschiedenen Faserquellen, die wahrscheinlich sehr unterschiedliche Charakteristika aufweisen, zunächst zu identifizieren und in eine über-schaubare Zahl klar definierter Kategorien einzuteilen. Dies setzt natürlich einerseits voraus, dass die Produkte schonend einzeln 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 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 und dementsprechend auch zu beantragen. 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).

Die Technologieentwicklung des AP1 umfasst dabei schwerpunktmäßig die trockene Einzelfaserzerlegung der im Nassprozess nicht zerfaserbaren Papierprodukte und der dafür erforderlichen Konzeptionierung der Prozesskette inkl. der notwendigen Peripherie und Schnittstellen. Neben der Einzelfaserzerlegung stand auch die Grundlagenentwicklung von möglichen Trockensortierprozessen zur Abtrennung unerwünschter Teilfraktionen auf der Agenda des Forschungsvorhabens. Besonderer Fokus lag jedoch auf die Entwicklung einer technologischen Prozesskette zur Einzelfaserzerlegung und dem erfolgreichen Aufbau einer Technikumsversuchsanlage im industriellen Maßstab. Demgegenüber waren für die Sortierung nur Versuche im Technikumsmaßstab vorgesehen. Im Hinblick auf die erzielbare Faserqualität standen v.a. Untersuchungen zur Bewertung der allgemeinen Einflüsse der Prozess- und Produktparameter auf das Zerfaserungsergebnis im Mittelpunkt sowie Methoden zur Charakterisierung der Trockenfasern.

Gemäß den genannten Schwerpunkten wurden die folgenden Meilensteine im Vorfeld der Vorhabensdurchführung zur Kontrolle der Zielerreichung formuliert:

Übersicht der Meilensteine und wann diese erreicht sind:

M 1-1 Erfolgreicher Aufbau und Test einer Technikumsversuchsanlage für die Trockenzerfaserung

M 1-2 Erfolgreicher Aufbau und Test einer Technikumsversuchsanlage für die Sortierung

M 2 Erfolgreiche Kopplung der Teilprozesse Zerfaserung und Sortierung zu einer kontinuierlichen Prozesskette und Tests mit realen Produkten

M 3 Erfolgreiche Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung trocken aufbereiteter Faserstoffe, einschließlich Schnelltest

M 4 Zuverlässige Bewertung des Faserreaktivierungs- und Bindungspotenzials

Die nachfolgende Ergebnisdarstellung orientiert sich an den genannten Meilensteinen, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit und entsprechend der Gewichtung der Zielstellungen des Forschungsvorhabens die Meilensteine M 1-2 + M 2 sowie M 3 + M 4 zu jeweils einem Untergliederungspunkt zusammengefasst wurden. Zur besseren Verständlichkeit und um den Leser besser mit dem Kernthema der Trockenaufbereitungstechnologie vertraut zu machen, werden darüber hinaus zunächst die allgemeinen Einflüsse der relevanten Prozess- und Produktparameter auf das Trockenzerfaserungsergebnis dargestellt, bevor anschließend die entwickelte Prozesskette und konkrete Anwendungsbeispiele vorgestellt werden. Danach erfolgt eine detaillierte Charakterisierung der Trockenfasern im Vergleich zu nass aufbereiteten Faserstoffen und eine Bewertung des Faserreaktivierungs- und Bindungspotenzials. Es folgt eine ausführliche Betrachtung der Sortierung des trocken aufbereiteten Faserstoffs zur Abtrennung unerwünschter Stofffraktionen. Zum Schluss folgt eine abschließende ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand der Technik sowie eine Darstellung der

geplanten Maßnahmen zur Fortführung des Projekts (Phase II) sowie geplanter Veröffentlichungen der Projektergebnisse.

- Einfluss der Anlagen- und Prozessparameter auf das Zerfaserungsergebnis und Methoden zur Produkt- und Faserstoffbewertung
- Aufbau einer Prozesskette zur Trockenzerfaserung im industriellen Maßstab und Technikumsversuche mit realen Produkten und Testbetrieb in Papierfabriken
- Charakterisierung von Trockenfasern und Bewertung des Faserreaktivierungs- und Bindungspotenzials sowie Vergleich mit nass aufbereiteten Faserstoffen
- Entwicklung von Sortierprozessen im Technikumsmaßstab und Kopplung mit der Zerfaserung zur Abtrennung von unerwünschten Fraktionen am Beispiel von ausgewählten, praxisrelevanten Produkten
- Abschließende ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand der Technik
- Darstellung der geplanten Maßnahmen zur Fortführung des Projekts (Phase II) sowie geplanter Veröffentlichungen der Projektergebnisse

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Im Ergebnis der Phase I des zweigeteilten F&E-Projekts konnte eine mobile Anlage zur Trockenzerfaserung im Industriemaßstab aufgebaut werden, wobei durch zahl-reiche Tests und Papiermaschinenversuche die Praxistauglichkeit der Aufbereitungstechnologie nachgewiesen werden konnte. Ferner war es durch die Kopplung mit nachgeschalteten Sortierverfahren möglich die Störstofffraktionen von belasteten Produkten zu entfernen und so auch solche Produkte wieder stofflich zu verwerten. Durch die Ableitung geeigneter Reaktivierungsmaßnahmen konnte zudem das Festigkeitspotenzial von trocken aufbereiteten Faserstoffen auf das Niveau von Zellstoff erhöht werden. Damit ermöglicht die Trockenzerfaserung die stoffliche Nutzung von mindestens 1.000.000 t/a Sekundärfaserquellen, die nach dem aktuellen Stand der Technik nicht aufzubereiten sind. Der damit einhergehende Verzicht auf Primärfasern, zum Beispiel bei der Papierherstellung, stellt einen erheblichen Beitrag zur Umweltschonung und zur nachhaltigen Nutzung wertvoller Ressourcen da. Darüber hinaus ermöglicht das Trockenaufbereitungsverfahren auch das Recycling von faserbasierten Verpackungsprodukten, die als Alternativen zu Kunststoffverpackungen verstärkt auf den Markt drängen und mit den konventionellen Nassaufbereitungstechnologien nicht oder nur stark eingeschränkt aufbereitet werden können. Dies stellt einen weiteren wichtigen umweltrelevanten Beitrag zur Stärkung und Ausweitung der zirkulären Bioökonomie dar.

Um das skizzierte Potenzial voll ausschöpfen zu können sollen in Phase II in Zusammenarbeit mit einem Recyclingunternehmen die weiteren Schritte zum Aufbau der Rohstoffplattform vorangetrieben werden. Wesentliche Kernziele der Phase II sind die Lokalisierung der Quellen, die Untersuchung der erforderlichen Aufbereitungsschritte und die Ableitung geeigneter produktspezifischer Verwertungsmöglichkeiten.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Artikel im Wochenblatt für Papierfabrikation

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

Artikel im Professional Papermaking

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

Artikel in der Sächsischen Zeitung

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

Online-Vortrag auf der eREC Konferenz

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

Online-Vortrag auf der Cegi 4evergreen Veranstaltung

- Dry Pulping
- o 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
- o Graz, 19.05.2022

Vortrag auf dem IMPS (Internationales Münchner Papiersymposium)

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

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

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

Vortrag auf dem Symposium der Papieringenieure 2022

- 20. bis 22. Oktober 2022 im AlpenCongress Berchtesgaden

Abschließend möchten wir auf unsere Homepage [www.tbp-future.com](http://www.tbp-future.com) aufmerksam machen.

## **Fazit**

Mit dem erfolgreichen Aufbau einer Versuchsanlage zur Trockenzerfaserung konnte ein Aufbereitungsprozess entwickelt werden, mit dem gemäß den Zielstellungen der Phase I bisher nicht nutzbare Sekundärfaserquellen schonend in Einzelfasern zerlegt und bei Bedarf auch Nicht-Faserbestandteile und Störstoffe abgetrennt werden können. In Labor- und Technikumsversuchen wurde der Nachweis erbracht, dass der trocken aufbereitete Faserstoff uneingeschränkt für die erneute Papierherstellung oder die Herstellung anderer faserbasierter Produkte wie Biokomposite oder Dämmmaterialien verwendet werden kann. Zudem konnten Möglichkeiten zur Faserreaktivierung und zur Steigerung des Bindungspotenzials abgeleitet werden, so dass die Trockenfasern auch als vollwertiger Zellstoffersatz eingesetzt werden können. Damit trägt der Trockenaufbereitungsprozess zur Sicherung der Rohstoffversorgung der Papierindustrie oder anderer Altpapier- bzw. Faserstoff verarbeitender Industriezweige bei. Die stoffliche Nutzung der bisher nicht nutzbaren Sekundärfaserquellen und die damit einhergehende Einsparung von Primärrohstoffen stellt damit auch einen erheblichen Beitrag zur Umweltschonung und zur nachhaltigen Nutzung wertvoller Ressourcen dar.

Auf Basis des entwickelten Trockenaufbereitungsprozesses konnten mobile Testanlagen im Industriemaßstab umgesetzt werden, die bereits in zahlreichen Papierfabriken im industriellen Einsatz erfolgreich getestet werden konnten. Dabei konnten bereits mehrere hundert Tonnen Trockenfasern hergestellt und auf unterschiedlichsten Papiermaschinen eingesetzt werden. Die Phase I ist damit außerordentlich erfolgreich verlaufen und es konnte die erforderliche technologische Basis und Grundvoraussetzung für die Schaffung der anvisierten Rohstoffplattform in Phase II gelegt werden, welche planmäßig direkt im Anschluss beginnen soll.

Kernziele der Phase II sind die Lokalisierung der Quellen, die Untersuchung der erforderlichen Aufbereitungsschritte (Trockenzerfaserung und ggf. vor- und nachgeschaltete Sortierung) und die Ableitung geeigneter produktspezifischer Verwertungsmöglichkeiten. Darüber hinaus stehen noch verfahrenstechnische Optimierungsarbeiten des Trockenzerfaserungsprozess aus. Durch eine Dosiervorrichtung mit vorgeschaltetem Puffer soll die Vorzerkleinerung von der Einzelfaserzerlegung entkoppelt und damit der Gesamtprozess am optimalen Arbeitspunkt, d.h. beim minimalen spezifischen Energieeinsatz, betrieben werden. Die Aufbereitung der bisher ungenutzten Faserquellen, die in vielen Fällen eine Abtrennung der Störstoffe beinhaltet, soll in einem spezialisierten Aufbereitungszentrum stattfinden. Ein solches Aufbereitungszentrum ist neben der Rohstoffplattform das zentrale Element für die umfangreiche stoffliche Nutzung der bisher nicht nutzbaren Sekundärfaserquellen, da nur im Zusammenspiel der vollständigen Erfassung und der jeweils erforderlichen produktspezifischen Aufbereitung die aufgezeigten Potenziale zur Umweltschonung und Ressourceneinsparung ausgeschöpft werden können.

## Inhalt

I	Abbildungsverzeichnis .....	4
II	Abkürzungsverzeichnis .....	6
1	Zusammenfassung .....	7
2	Einleitung .....	8
3	Hauptteil .....	13
3.1	Überblick .....	13
3.2	Einfluss der Anlagen- und Prozessparameter auf das Zerfaserungsergebnis und Methoden zur Produkt- und Faserstoffbewertung .....	14
3.3	Aufbau einer Prozesskette zur Trockenzerfaserung im industriellen Maßstab und Tests mit realen Produkten im Technikum und in Papierfabriken .....	21
3.4	Charakterisierung von Trockenfasern und Bewertung des Faserreaktivierungs- und Bindungspotenzials .....	28
3.5	Entwicklung von Sortierprozessen im Technikumsmaßstab und Kopplung mit der Zerfaserung zur Abtrennung von unerwünschten Fraktionen am Beispiel von ausgewählten, praxisrelevanten Produkten .....	33
3.6	Abschließende ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand der Technik .....	42
3.7	Darstellung der geplanten Maßnahmen zur Fortführung des Projekts (Phase II) sowie geplanter Veröffentlichungen der Projektergebnisse .....	49
4	Fazit .....	53
5	Literaturverzeichnis .....	54
6	Anhang .....	55

## I Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KONZEPT DER ROHSTOFFPLATTFORM .....	9
ABBILDUNG 2: ÜBERSICHT DER HAUPTARBEITSPAKETE DER DIGITALEN ROHSTOFFPLATTFORM (PHASE I + II) .....	10
ABBILDUNG 3: ABHÄNGIGKEIT DES ZERFASERUNGSERGEBNISSES VON DEN RELEVANTEN PROZESS- UND PRODUKTPARAMETERN .....	15
ABBILDUNG 4: VERGLEICH VON DEHNUNGSSTEIFEN UND -WEICHEN MATERIALVERHALTEN BEIM ZUGVERSUCH.....	16
ABBILDUNG 5: DARSTELLUNG DES TZW FÜR AUSGEWÄHLTE PRODUKTE .....	18
ABBILDUNG 6: MOBILE ANLAGE DPS 40 GT (PRINZIPDARSTELLUNG) .....	22
ABBILDUNG 7: EINSATZ DER MOBILEN TESTANLAGE DPS 40 GT I BEI EINEM FILTERPAPIERHERSTELLER (1).....	23
ABBILDUNG 8: EINSATZ DER MOBILEN TESTANLAGE DPS 40 GT II BEI EINEM TISSUEHERSTELLER .....	24
ABBILDUNG 9: FASERMODIFIKATION DURCH TROCKENZERFASERUNG .....	27
ABBILDUNG 10: LABORERGEBNISSE ZUR VOLUMEN- UND BIEGESTEIFIGKEITSVERBESSERUNG DURCH DOSIERUNG VON TROCKENFASERN (KCB) .....	28
ABBILDUNG 11 VERGLEICH VON SR, SPEZ. VOLUMEN UND TENSILE-INDEX ZWISCHEN NZ UND TZ-0 FÜR GK .....	28
ABBILDUNG 12: ABWEICHUNG VON CURL, KINK, FEINSTOFF, MEHLSTOFF, FIBRILLEN UND CRILL VON TZ-0 IM VERGLEICH ZU NZ FÜR GK.....	29
ABBILDUNG 13: ENTWICKLUNG VON SR, SPEZ. VOLUMEN UND TENSILE-INDEX IN ABHÄNGIGKEIT DER NACHBEHANDLUNGSZEIT IM DESINTEGRATOR FÜR GK .....	29
ABBILDUNG 14: ABWEICHUNG VON CURL, KINK, FEINSTOFF, MEHLSTOFF, FIBRILLEN UND CRILL VON TZ-10 IM VERGLEICH ZU TZ-0 FÜR GK.....	30
ABBILDUNG 15: WRV, LUFTDURCHLÄSSIGKEIT UND FESTIGKEITSWERT NACH SÜTTINGER (PRODUKT AUS TENSILE-INDEX UND WEITERREIßARBEIT) IN ABHÄNGIGKEIT DER SPEZ. OBERFLÄCHE UND DER EINGANGSFEUCHTE FÜR GK .....	30
ABBILDUNG 16: VERÄNDERUNG DER MITTLEREN FASERLÄNGE UND DER FASERLÄNGENVERTEILUNG DURCH TROCKENZERFASERUNG IN ABHÄNGIGKEIT DER VORZERKLEINERUNGSVARIANTE (FÜR KISA) .....	31
ABBILDUNG 17: ÜBERSICHT DES ERZIELBAREN EIGENSCHAFTSNIVEAUS DER TROCKENZERFASERTEN KISA-STOFFE NACH 40-MINÜTIGER MAHLUNG IN ABHÄNGIGKEIT DER VORZERKLEINERUNGSVARIANTE IM VERGLEICH ZUR VON HAND VORZERKLEINERTEN NICHT TROCKENZERFASERTEN REFERENZ (= 100).....	32
ABBILDUNG 18: VERSUCHSÜBERSICHT ZUR ABTRENNUNG DER FEINSTOFFFRAKTION .....	35
ABBILDUNG 19: VERFAHRENSABLAUF IM TECHNIKUM ZUR ABTRENNUNG DER FEINFRAKTION MIT VERSCHIEDENEN TROCKEN-SIEBVERFAHREN .....	36
ABBILDUNG 20: WEIßGRADGEWINN DURCH ASCHEAUSTRAG MITTELS LUFTSTRAHLSIEBUNG (LS) UND SIEBKASKADE SK) FÜR MAGAZINPAPIER.....	36
ABBILDUNG 21: VERGLEICH DES DISPERGIEREFFEKTS BEIM THERMODRUCKPAPIER ZWISCHEN TROCKEN- UND NASSZERFASERUNG .....	37
ABBILDUNG 22: AUSTRAG VON THERMODRUCKPARTIKEL MITTELS TAUMELSIEB.....	38
ABBILDUNG 23: HPLC ANALYSE ZUR ERMITTLUNG DES RÜCKSTANDS DER THERMODRUCKPARTIKEL.....	39

ABBILDUNG 24: VERSUCHSANORDNUNG ZUR FEINSTOFFABTRENNUNG NACH DER TROCKENZERFASERUNG.....	40
ABBILDUNG 25: METHODIK DER VERGLEICHSUNTERSUCHUNGEN ZWISCHEN NASS- UND TROCKENZERFASERUN .....	55
ABBILDUNG 26: DPS 40 GT AUFSTELLPLAN UND PLATZBEDARF (1) .....	56
ABBILDUNG 27: DPS 40 GT AUFSTELLPLAN UND PLATZBEDARF (2) .....	56
ABBILDUNG 28: EINSATZ DER MOBILEN TESTANLAGE DPS 40 GT I BEI EINEM FILTERPAPIERHERSTELLER (2).....	57
ABBILDUNG 29: EINSATZ DER MOBILEN TESTANLAGE DPS 40 GT II BEI EINEM VERPACKUNGSPAPIERHERSTELLER .....	57
ABBILDUNG 30: EINSATZ DER MOBILEN TESTANLAGE DPS 40 GT II BEI EINEM TISSUEHERSTELLER (2) .....	58
ABBILDUNG 31: EINSATZ DER MOBILEN TESTANLAGE DPS 40 GT II BEI EINEM HERSTELLER VON BIOCOMPOSITEN.....	58
ABBILDUNG 32: AUSTRAG VON THERMODRUCKPARTIKEL MITTELS WIRBELSTROMSIEB UND WINDSICHTUNG	59
ABBILDUNG 33: KONTINUIERLICHE VLIESBILDUNG IM TECHNIKUM DER FA. DAN-WEB MACHINERY AM IFTH IN ROUBAIX.....	59
ABBILDUNG 34: AUFTEILUNG DES RECHNERISCHEN PAPIERVERBRAUCHS IN DEUTSCHLAND NACH ERFASSTEM ALTPAPIER UND NICHT ERFASSTEN PAPIERPRODUKTEN .....	60
ABBILDUNG 34: AUFTEILUNG DES RECHNERISCHEN PAPIERVERBRAUCHS IN DEUTSCHLAND NACH ERFASSTEM ALTPAPIER UND NICHT ERFASSTEN PAPIERPRODUKTEN .....	<b>FEHLER!</b>
<b>TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>	
ABBILDUNG 34: AUFTEILUNG DES RECHNERISCHEN PAPIERVERBRAUCHS IN DEUTSCHLAND NACH ERFASSTEM ALTPAPIER UND NICHT ERFASSTEN PAPIERPRODUKTEN .....	<b>FEHLER!</b>
<b>TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>	
ABBILDUNG 34: AUFTEILUNG DES RECHNERISCHEN PAPIERVERBRAUCHS IN DEUTSCHLAND NACH ERFASSTEM ALTPAPIER UND NICHT ERFASSTEN PAPIERPRODUKTEN .....	<b>FEHLER!</b>
<b>TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>	

## II Abkürzungsverzeichnis

AP	Altpapier
EuSa	Eukalyptussulfatzellstoff
KCB	Kraft Chemical Bleached
KiSa	Kiefernulfatzellstoff
NZ	nasszerfasert(er) / Nasszerfaserung
WRV	Wasserrückhaltevermögen
TZ	trockenzerfasert(er) / Trockenzerfaserung
DPS	Dry Pulping System
SR	Entwässerungswiderstand nach Schopper Riegler
M	Meilenstein
Ref	Referenz
TZW	Trockenzerfaserungswiderstand
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
IMPS	Internationales Münchner Papiersymposium
APV	Akademischer Papierverband
CEPI	Confederation of European Paper Industries
SAP	Super Absorbent Polymer
VNOP	Verband Nord- und Ostdeutscher Papierfabriken e.V.

## 1 Zusammenfassung

Das Projekt „Rohstoffplattform“ zielt ab auf die Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts zur Erfassung, Aufbereitung und nachhaltigen stofflichen Verwendung bisher nicht nutzbarer Sekundärfaserquellen. Als Grundvoraussetzungen waren zunächst die dafür erforderlichen trockenen Aufbereitungstechnologien sowie Analyse- und Bewertungsmethoden zu entwickeln, um die wertvollen Fasern aus den betreffenden Faserquellen zurückzugewinnen, zu charakterisieren und deren Nutzungs- und Papierherstellungspotenzial zu bewerten. Zu diesem Zweck stand in der ersten Projektphase der Aufbau und Test einer Technikumsversuchsanlage zur Zerfaserung und Sortierung im Mittelpunkt. Die Untersuchungen zielten dabei auf eine vollständige und möglichst schonende Zerlegung des Papiergefüges in Einzelfasern ab. Für eine möglichst hochwertige stoffliche Nutzung des zurückgewonnenen Faserstoffs war es zudem erforderlich den Einfluss von funktionalen Additiven und Funktionschemikalien zu bewerten und gegebenenfalls störende Substanzen oder andere Nicht-Faserbestandteile und Schadstoffe abzutrennen. Darüber hinaus galt es Methoden zur Faserstoffcharakterisierung und zur Bewertung des Faserreaktivierungspotenzials zu entwickeln.

Im Ergebnis der Phase I des zweigeteilten FuE-Projekts konnte eine mobile Anlage zur Trockenzerfaserung im Industriemaßstab aufgebaut werden, wobei durch zahlreiche Tests und Papiermaschinenversuche die Praxistauglichkeit der Aufbereitungstechnologie nachgewiesen werden konnte. Ferner war es durch die Kopplung mit nachgeschalteten Sortierverfahren möglich die Störstofffraktionen von belasteten Produkten zu entfernen und so auch solche Produkte wieder stofflich zu verwerten. Durch die Ableitung geeigneter Reaktivierungsmaßnahmen konnte zudem das Festigkeitspotenzial von trocken aufbereiteten Faserstoffen auf das Niveau von Zellstoff erhöht werden. Damit ermöglicht die Trockenzerfaserung die stoffliche Nutzung von mindestens 1.000.000 t/a Sekundärfaserquellen, die nach dem aktuellen Stand der Technik nicht aufzubereiten sind. Der damit einhergehende Verzicht auf Primärfasern, zum Beispiel bei der Papierherstellung, stellt einen erheblichen Beitrag zur Umweltschonung und zur nachhaltigen Nutzung wertvoller Ressourcen da. Darüber hinaus ermöglicht das Trockenaufbereitungsverfahren auch das Recycling von faserbasierten Verpackungsprodukten, die als Alternativen zu Kunststoffverpackungen verstärkt auf den Markt drängen und mit den konventionellen Nassaufbereitungstechnologien nicht oder nur stark eingeschränkt aufbereitet werden können. Dies stellt einen weiteren wichtigen umweltrelevanten Beitrag zur Stärkung und Ausweitung der zirkulären Bioökonomie dar.

Um das skizzierte Potenzial voll ausschöpfen zu können sollen in Phase II in Zusammenarbeit mit einem Recyclingunternehmen die weiteren Schritte zum Aufbau der Rohstoffplattform vorangetrieben werden. Wesentliche Kernziele der Phase II sind die Lokalisierung der Quellen, die Untersuchung der erforderlichen Aufbereitungsschritte und die Ableitung geeigneter produktspezifischer Verwertungsmöglichkeiten.

Das Forschungsprojekt mit dem Aktenzeichen 35223/01 wurde in Kooperation mit der Gotic GmbH und der TU Dresden, Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik, durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

## 2 Einleitung

Der Substitution von Plastikprodukten durch nachhaltige und rezyklierbare Faser- bzw. Papierbasierte Produkte wird insbesondere im Verpackungsbereich eine hohe Priorität eingeräumt. Vor diesem Hintergrund würde die stoffliche Nutzung bisher nicht erschlossener Altpapierquellen für die Produktion von umweltkompatiblen und problemlos zu entsorgenden Verpackungslösungen zweifelsfrei einen erheblichen Beitrag zur Reduktion gravierender Umweltbelastungen durch Plastikmüll leisten können.

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 zu Recht als Vorbild einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft bezeichnen, denn schließlich wird kaum ein anderes Produkt häufiger stofflich wiederverwertet als Papier. In Deutschland z. B. ist Altpapier mit einer Einsatzquote von ca. 79 % der mit Abstand wichtigste Rohstoff für die Papierherstellung [1]. Mit dieser hohen Recyclingquote und der Verwendung nachwachsender Rohstoffe ist die Papierindustrie bereits heute Vorreiter auf dem Weg zur Bioökonomie.

Doch obwohl eine weitere Schließung der Stoffkreisläufe durchaus möglich und ökonomisch sowie ökologisch wünschenswert wäre, hat sich die Menge an rezyklierbarem Altpapier einem Grenzwert angenähert und Experten gehen davon aus, dass die Altpapiereinsatzquote nicht mehr deutlich über 80 % gesteigert werden kann. Diese Limitierung beruht zwar zu einem Teil auf Papierprodukten, die entweder archiviert oder gezielt vernichtet bzw. durch ihren bestimmungsgemäßen Gebrauch so verändert werden, dass sie für die stoffliche Verwertung grundsätzlich nicht mehr in Frage kommen (Hygieneprodukte). Neben diesen nicht mehr nutzbaren Produkten existiert jedoch noch ein signifikanter Anteil, der stofflich durchaus verwertbar wäre, aber nach dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht aufbereitet werden kann, da es sich um sogenannte schwer rezyklierbare Produkte handelt, wie zum Beispiel nassfeste Spezialpapiere wie Etiketten, Banknoten- und Sicherheitspapiere, usw. 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.

Die Hauptursache für diesen „Verlust“ an wertvollen Faserquellen liegt im Fehlen geeigneter Aufbereitungstechnologien zur Gefügetrennung der nassfesten oder anderweitig schwer zerfaserbaren Papierstruktur in verarbeitungsfähige Einzelfasern. Der-

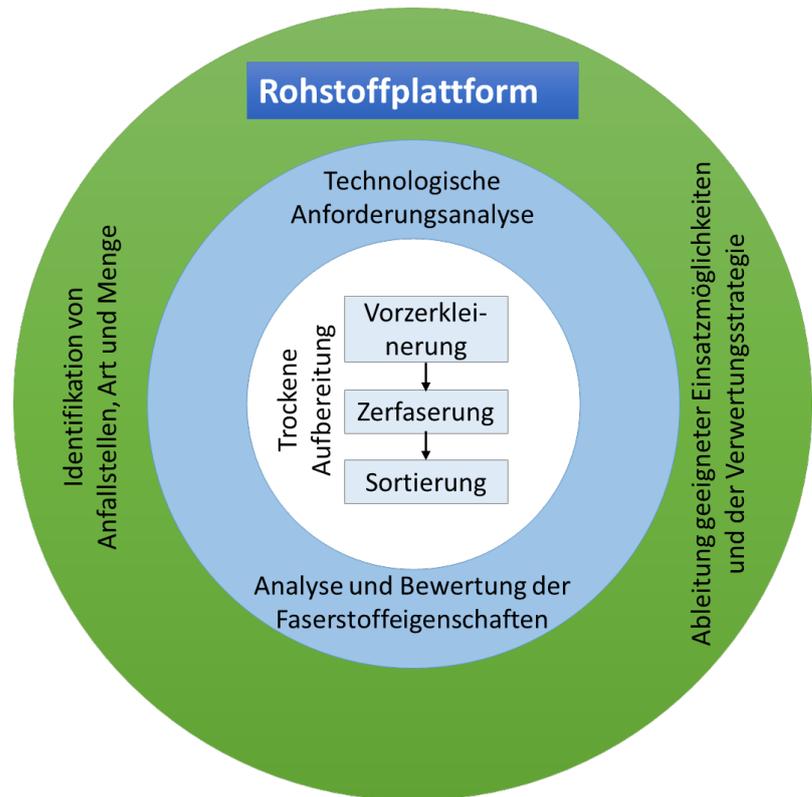
---

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

artige Möglichkeiten würden aber zwei wichtige, umweltrelevante Aufgaben lösen. Einerseits können wertvolle Ressourcen weiter stofflich genutzt werden, was insbesondere dahingehend von Bedeutung ist, da es sich bei den nicht genutzten Produkten überwiegend um hochwertige, primärfaserbasierte Papierprodukte handelt. Und andererseits wird durch die Herstellung faserbasierter Plastiksubstitute vermieden, dass Kunststoffabfälle unkontrolliert in die Umwelt gelangen.

Mit der Bereitstellung einer geeigneten Aufbereitungstechnik würde somit eine wertvolle, volkswirtschaftlich relevante Rohstoffressource für Cellulose verarbeitende Industrien, wie die Papierindustrie, aber auch die Verpackungs-, Bau- und Automobilindustrie erschlossen werden.

Die Projektidee besteht deshalb 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



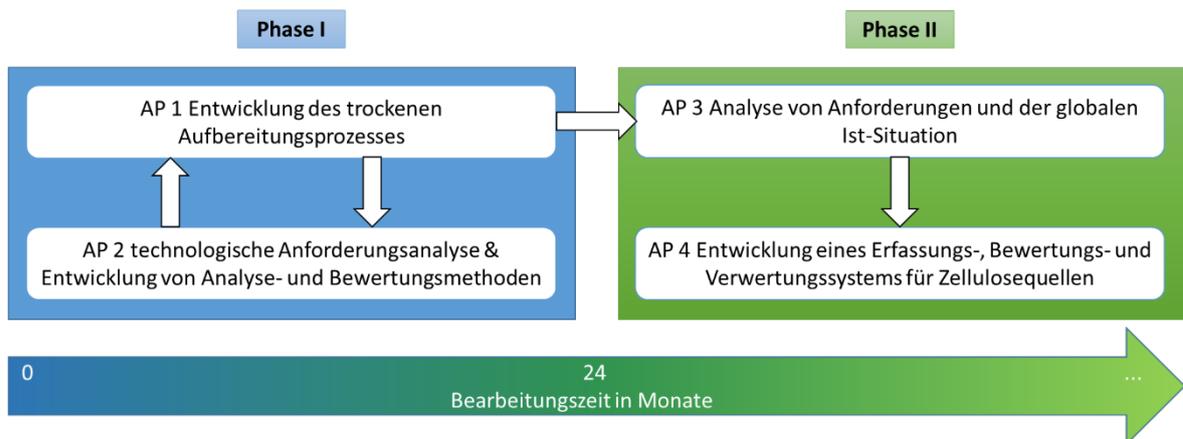
**Abbildung 1: Konzept der Rohstoffplattform**

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 natürlich 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 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.

Die notwendigen Schritte zur Erarbeitung einer solchen Strategie sind in vier Hauptarbeitspakete aufgeteilt, die wiederum in zwei Entwicklungsphasen gegliedert sind. In der Phase I sollen dabei die Arbeitspakete AP 1 und AP 2 bearbeitet werden. Diese Arbeitspakete beschäftigen sich quasi mit den notwendigen Kerntechnologien über die dann die digitale Rohstoffplattform installiert werden soll.



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

Ein wesentlicher Bestandteil des Projekts und Kernziel der Phase I stellt die Entwicklung des Aufbereitungsprozesses zur stofflichen Erschließung der bisher nicht nutzbaren Faserquellen dar (AP 1). Durch die Entwicklung, Optimierung und dem Upscaling der dafür erforderlichen Trockenverfahren entsteht erst die Möglichkeit der stofflichen Nutzung der betrachteten Faserquellen. Wichtigster Punkt der Prozesskette stellt die sogenannte Trockenzerfaserung dar. Darüber hinaus gibt es jedoch ebenso die Aufgaben der Vorzerkleinerung, der Abtrennung des Faserstoffs vom Luftstrom sowie der Sortierung des Gesamtstoffs in nutzbare und nicht nutzbare Teilfraktionen.

Die Vorzerkleinerung ist insbesondere erforderlich, um die in unterschiedlichsten Formen und Größen anfallenden Eingangsmaterialien so zu homogenisieren, dass die nachfolgenden Prozessschritte zeit- und mengenkonstant kontinuierlich beschickt werden können. Kernelement ist dabei die Zerfaserung, durch die das Papiergefüge zuverlässig in die jeweiligen Einzelfasern zerlegt werden soll ohne dabei aber die Fasereigenschaften zu beeinträchtigen oder die Fasern zu stark zu kürzen. Für diesen Zweck muss der Einsatz einer ganz speziellen Technologie erfolgen, die ferner über genügend Freiheitsgrade und Einstellungsmöglichkeiten verfügt, um sich dem breiten

Anforderungsbereich an das Produkt am Eingang sowie den Produkthanforderungen am Ausgang anzupassen.

Die gesamte Prozesskette dient – wie oben beschrieben – der Verarbeitung von Rohstoffen, die mit den gegenwärtig angewandten klassischen Methoden nicht aufbereitet werden können. Daher sind für die einzelnen Prozessschritte gegebenenfalls neue Wege zu beschreiten. Die Entwicklung des Gesamtprozesses der Aufbereitung ist hierfür die entscheidende Voraussetzung, wobei bei der Prozessentwicklung auch die Kopplung der einzelnen Prozessschritte untereinander eine entscheidende Rolle spielt. Für eine hohe Flexibilität müssen die einzelnen Prozessschritte zudem in verschiedenen Baugrößen verfügbar sein. Ferner gilt es die Schnittstellen so zu gestalten, dass der benötigte Aufbereitungsprozess modular an die jeweiligen Produkthanforderungen erweitert bzw. angepasst werden kann. Nicht zuletzt müssen Maßnahmen entwickelt und umgesetzt werden, die den gesamten Prozess hinsichtlich Brand- und Explosionsschutz zuverlässig absichern.

Im parallel stattfindenden AP 2 erfolgt dann eine Analyse der technologischen Prozessanforderungen sowie die Entwicklung geeigneter Analyse- und Bewertungsmethoden für die aufbereiteten Faserstoffe.

Ob und inwieweit ein cellulosehaltiges Material wieder der stofflichen Verwertung und damit der nachhaltigen Nutzung zugeführt werden kann und für welche konkreten Einsatzfälle es geeignet ist, hängt von der erreichbaren Zerfaserungsgüte, der Abtrennung von Störstoffen und von den Fasereigenschaften nach der Zerfaserung ab.

Durch die Trockenzerfaserung wird das Papiergefüge aufgelöst und es entstehen im Idealfall Einzelfasern. Diese verhalten sich jedoch grundsätzlich anders als klassisch, d. h. im Nassprozess erzeugte Fasern, wobei an dieser Stelle nochmals klargestellt werden muss, dass für die hier betrachteten Fasergefüge eine klassische Nassaufbereitung nicht funktioniert.

Daher sind im AP 2 Methoden und Algorithmen zu entwickeln, die der Spezifikation der Trockenzerfaserung angepasst sind und die in erster Linie die Bindungsaktivität und Reaktivierbarkeit der Fasern im Verarbeitungsprozess charakterisieren. In diesem Zusammenhang sind zahlreiche mikroskopische Untersuchungen und physikalisch-chemische Laborprüfungen notwendig, um entsprechende Bewertungsmethoden und Abhängigkeiten herauszuarbeiten und zu validieren. Wegen der erwarteten breitgefächerten Einsatzmöglichkeiten für die trockenzerfaserten Materialien müssen diese Methoden sowohl an standardisierte Trockenprüfungen angelehnt sein als auch auf die klassischen Prüfungen für Papierfaserstoff im Nassbereich zurückgreifen. Im Bedarfsfall müssen bestehende Prüfmethoden modifiziert oder kombiniert werden. Ist auf diese Weise die erforderliche Produktcharakterisierung nicht zufriedenstellend zu lösen, müssen neue Prüfmethoden entwickelt werden.

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die zuverlässige Charakterisierung der Trockenfasern im Vergleich zu konventionell aufbereiteten Fasern, wodurch auch die konkreten Anforderungen an die Aufbereitungskette so abgeleitet werden können, dass ein Großteil der identifizierten Rohstoffquellen durch die Trockenzerfaserung praktikabel und wirtschaftlich einer erneuten stofflichen Verwertung zugeführt werden kann.

### 3 Hauptteil

#### 3.1 Überblick

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 und dementsprechend auch zu beantragen. 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).

Die Technologieentwicklung des AP1 umfasst dabei schwerpunktmäßig die trockene Einzelfaserzerlegung der im Nassprozess nicht zerfaserbaren Papierprodukte und der dafür erforderlichen Konzeptionierung der Prozesskette inkl. der notwendigen Peripherie und Schnittstellen. Neben der Einzelfaserzerlegung stand auch die Grundlagenentwicklung von möglichen Trockensortierprozessen zur Abtrennung unerwünschter Teilfraktionen auf der Agenda des Forschungsvorhabens. Besonderer Fokus lag jedoch auf die Entwicklung einer technologischen Prozesskette zur Einzelfaserzerlegung und dem erfolgreichen Aufbau einer Technikumsversuchsanlage im industriellen Maßstab. Demgegenüber waren für die Sortierung nur Versuche im Technikumsmaßstab vorgesehen. Im Hinblick auf die erzielbare Faserqualität standen v.a. Untersuchungen zur Bewertung der allgemeinen Einflüsse der Prozess- und Produktparameter auf das Zerfaserungsergebnis im Mittelpunkt sowie Methoden zur Charakterisierung der Trockenfasern.

Gemäß den genannten Schwerpunkten wurden die folgenden Meilensteine im Vorfeld der Vorhabensdurchführung zur Kontrolle der Zielerreichung formuliert:

	<b>Übersicht der Meilensteine und wann diese erreicht sind:</b>
M 1-1	Erfolgreicher Aufbau und Test einer Technikumsversuchsanlage für die Trockenzerfaserung
M 1-2	Erfolgreicher Aufbau und Test einer Technikumsversuchsanlage für die Sortierung
M 2	Erfolgreiche Kopplung der Teilprozesse Zerfaserung und Sortierung zu einer kontinuierlichen Prozesskette und Tests mit realen Produkten
M 3	Erfolgreiche Entwicklung einer Schnelltestmethode zur Charakterisierung trocken aufbereiteter Faserstoffe
M 4	Zuverlässige Bewertung des Faserreaktivierungs- und Bindungspotenzials

Die nachfolgende Ergebnisdarstellung orientiert sich an den genannten Meilensteinen, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit und entsprechend der Gewichtung der Zielstellungen des Forschungsvorhabens die Meilensteine M 1-2 + M 2 sowie M 3 + M 4 zu jeweils einem Untergliederungspunkt zusammengefasst wurden. Zur besseren Verständlichkeit und um den Leser besser mit dem Kernthema der Trockenaufbereitungstechnologie vertraut zu machen, werden darüber hinaus zunächst die allgemeinen Einflüsse der relevanten Prozess- und Produktparameter auf das Trockenzerfaserungsergebnis dargestellt, bevor anschließend die entwickelte Prozesskette und konkrete Anwendungsbeispiele vorgestellt werden. Danach erfolgt eine detaillierte Charakterisierung der Trockenfasern im Vergleich zu nass aufbereiteten Faserstoffen und eine Bewertung des Faserreaktivierungs- und Bindungspotenzials. Es folgt eine ausführliche Betrachtung der Sortierung des trocken aufbereiteten Faserstoffs zur Abtrennung unerwünschter Störstofffraktionen. Zum Schluss folgt eine abschließende ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand der Technik sowie eine Darstellung der geplanten Maßnahmen zur Fortführung des Projekts (Phase II) sowie geplanter Veröffentlichungen der Projektergebnisse.

- Einfluss der Anlagen- und Prozessparameter auf das Zerfaserungsergebnis und Methoden zur Produkt- und Faserstoffbewertung
- Aufbau einer Prozesskette zur Trockenzerfaserung im industriellen Maßstab und Technikumsversuche mit realen Produkten und Testbetrieb in Papierfabriken
- Charakterisierung von Trockenfasern und Bewertung des Faserreaktivierungs- und Bindungspotenzials sowie Vergleich mit nass aufbereiteten Faserstoffen
- Entwicklung von Sortierprozessen im Technikumsmaßstab und Kopplung mit der Zerfaserung zur Abtrennung von unerwünschten Fraktionen am Beispiel von ausgewählten, praxisrelevanten Produkten
- Abschließende ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand der Technik
- Darstellung der geplanten Maßnahmen zur Fortführung des Projekts (Phase II) sowie geplanter Veröffentlichungen der Projektergebnisse

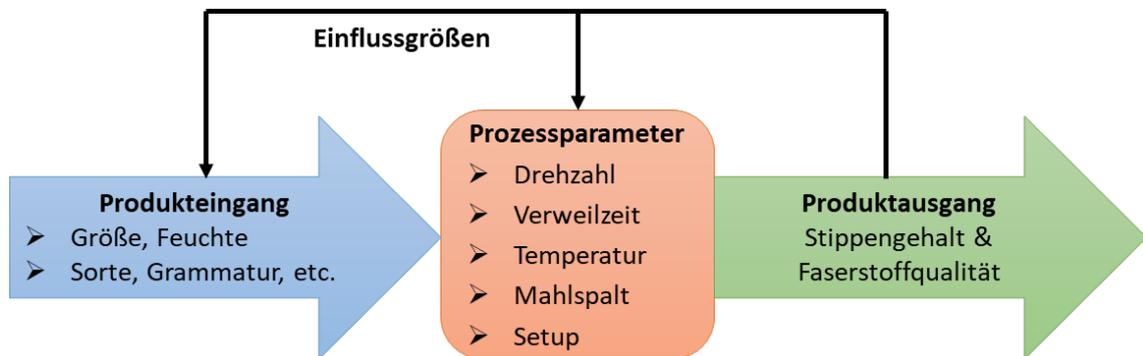
### **3.2 Einfluss der Anlagen- und Prozessparameter auf das Zerfaserungsergebnis und Methoden zur Produkt- und Faserstoffbewertung**

Die Grundlagen der Trockenzerfaserungstechnologie konnten zwar bereits in vorhergehenden Projekten entwickelt werden, aber insbesondere im Hinblick auf eine ausreichende Prozessstabilität im industriellen Dauereinsatz hat sich bereits im Vorfeld gezeigt, dass für einen qualitätserhaltenden und wirtschaftlichen Trockenfaseraufschluss auch noch eine Weiterentwicklung der Trockenzerfaserungstechnologie von Nöten ist.

Das Hauptaugenmerk bei der Prozessentwicklung wurde daraufgelegt, dass das zugeführte Papierprodukt vollständig in Einzelfasern zerlegt wird und dass die trocken aufgeschlossenen Fasern ein vergleichbares Papierherstellungspotenzial aufweisen wie nass

aufgeschlossene Fasern. Als Bewertungskriterium für das Zerfaserungsergebnis kann der sogenannte Stippengehalt, d.h. der Anteil an noch vorhandenen Faserbündeln, zusammen mit der erzeugten Faserstoffqualität herangezogen.

Ähnlich wie bei der konventionellen Nasszerfaserung im Pulper nehmen verschiedene Prozess- und Produktparameter Einfluss auf das gewünschte Zerfaserungsergebnis, wobei bei der Trockenzerfaserung gänzlich andere Parameter von Bedeutung sind.



**Abbildung 3: Abhängigkeit des Zerfaserungsergebnisses von den relevanten Prozess- und Produktparametern**

Bei der Pulperzerfaserung müssen die Rotorgeometrie, die Stoffdichte und insbesondere die Zerfaserungsdauer dermaßen an die Produkteigenschaften angepasst werden, damit die notwendige Pulperarbeit zur Erzeugung eines stippenfreien Faserstoffs verrichtet werden kann. Standardpapiere sind in der Regel innerhalb weniger Minuten ausreichend zerfasert, wohingegen solche Produktqualitäten, die nassfest ausgerüstet oder anderweitig schwer zerfaserbar sind, eine Verweilzeit von bis zu 90 Minuten und mehr benötigen und dabei sehr häufig immer noch nicht ausreichend zerfasert sind.

Demgegenüber beträgt die Verweilzeit im Trockenzerfaserungsaggregat unabhängig vom Produkt nur wenige Sekunden, wobei die erzielbare Produktfeinheit, d.h. der Grad der Einzelfaserzerlegung, vor allem über die Drehzahl reguliert wird. Neben der Drehzahl sind der Abstand zwischen Rotor und Stator (Mahlsplatt) und insbesondere auch das Aggregatsetup von Bedeutung. Zum Aggregatsetup bzw. den Anlagenparametern gehören insbesondere das Design, die Anzahl und die Anordnung der stehenden und sich bewegenden Zerfaserungselemente. Die entscheidenden Parameter, die das Zerfaserungsergebnis am deutlichsten beeinflussen, sind:

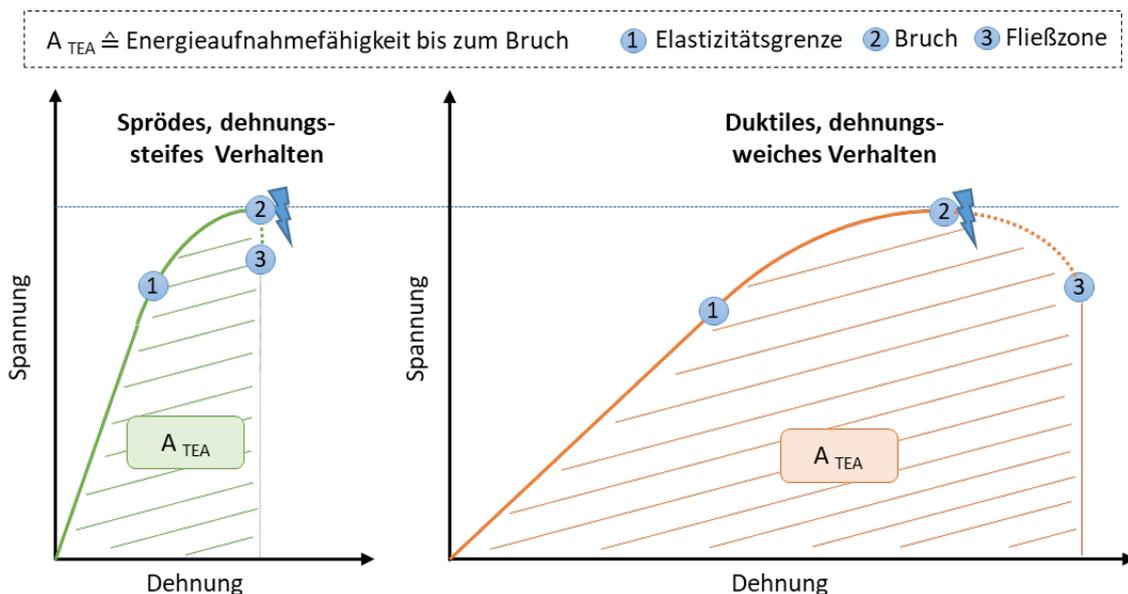
- Anzahl und Länge der Zerfaserungsstufen im Aggregat
- Anzahl der Zerfaserungselemente auf der jeweiligen Zerfaserungsstufe
- Form, Oberflächenbeschaffenheit, und Größe der Zerfaserungselemente
- Oberflächenbeschaffenheit, Profil und Material der Innenseite des Stators
- Abstand zwischen Rotor und Stator (Mahlsplatt)
- Drehzahl des Rotors
- Verweilzeit im Aggregat

Durch diese Parameter kann die Intensität der wirkenden Kräfte bei der Trockenzerfaserung gesteuert werden, wobei die Einzelfaserzerlegung auf folgende Effekte beruht:

- Druck-Scher-Beanspruchungen im Mahlpalt zwischen Rotor und Stator
- Partikel-Partikel Kollisionen
- Prallbeanspruchungen an stehenden und rotierenden Körperflächen
- Turbulente Mikrowirbel

Die Intensität der aufgezählten Effekte erhöht sich mit zunehmender Drehzahl, da die Partikel mehr beschleunigt und abgebremst werden (höhere Impulsänderung) und es zudem zu intensiveren Luftverwirbelungen an den Abrisskanten der Zerfaserungselemente kommt. Eine hohe Drehzahl ist somit eine Grundvoraussetzung für die Trockenzerfaserung. Im Hinblick auf den Abstand zwischen Rotor und Stator ist zu beachten, dass erst ab einem bestimmten Mindestmahlpalt die wirkenden Zerfaserungskräfte eine ausreichende Intensität erzielen um die gewünschte Einzelfaserzerlegung zu erzeugen. Eine bestimmte Untergrenze darf jedoch sowohl aus Toleranzgründen bei der Fertigung als auch im Hinblick auf einen überproportional steigenden Energiebedarf, einer stark zunehmenden Faserschädigung sowie einer Reduzierung des Durchsatzes nicht unterschritten werden.

Eine ausreichend hohe Drehzahl in Kombination mit einem geringen Mahlpalt ist jedoch noch keine ausreichende Grundvoraussetzung für ein zufriedenstellendes Zerfaserungsergebnis. Ebenso wichtig sind Anzahl und Design der Zerfaserungselemente und das Zusammenspiel der Anlagen- und Prozessparameter, wobei die Abstimmung so ausgelegt wurde, dass das Produkt besonders schonend im Luftstrom zerrissen und nur geringfügig gequetscht und nicht geschnitten wird. Hinzu kommt, dass die verschiedenen Prozessparameter auf das jeweilige Produkt abgestimmt werden müssen, da das Zerfaserungsergebnis auch stark von den Produkteigenschaften abhängt.



**Abbildung 4: Vergleich von dehnungssteifen und -weichen Materialverhalten beim Zugversuch**

Das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Produkte ist vor allem auf den produktspezifischen Trockenzerfaserungswiderstand zurückzuführen, der wiederum vom Kraftaufnahme- und Verformungsverhalten abhängt. In der Folge können Produkte trotz vergleichbarer Randbedingungen sehr unterschiedliche Zerfaserungsergebnisse aufweisen. Grund hierfür ist das unterschiedliche Energieaufnahmevermögen bis zum Bruch, welches bei einem dehnungsweichen Papier trotz gleicher Bruchkraft deutlich größer ist als bei einem dehnungssteifen Papier, wie die Fläche unter der Spannungs-Dehnungs-Kurve eines jeweils idealisierten dehnungssteifen (links) und eines dehnungsweichen (rechts) Papiers verdeutlicht.

Papierprodukte mit einem besonders hohen plastischen Verformungsvermögen weisen ein signifikant größeren Zerfaserungswiderstand auf, was dazu führt, dass der erforderliche spez. Energieeinsatz für die Gefügetrennung im Vergleich zu „spröden“ Papierprodukten deutlich höher ausfällt. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass das produktspezifische Kraftaufnahme- und Verformungsverhalten von Standardprodukten bei der Nasszerfaserung nur eine untergeordnete Rolle spielt, da die Papierfestigkeit nach Kontakt mit Wasser sehr schnell nachlässt. Bei der Trockenzerfaserung hingegen erfolgt die Gefügetrennung bei der maximalen Papierfestigkeit. Demnach lässt der Zerfaserungswiderstand nur Rückschlüsse auf die Zerfaserbarkeit im Trockenprozess zu.

Dehnungssteife Produkte können in der Regel problemlos mittels Trockenzerfaserung aufbereitet werden, da sie ein nur sehr begrenztes Verformungsvermögen aufweisen, wodurch die Gefügestruktur nur wenig Energie aufnehmen kann und so schnell Einzelfasern aus dem Verbund herausgelöst werden können. Es findet somit eine direkte Kraftübertragung statt, wodurch mehr Energie für die Einzelfaserzerlegung umgesetzt werden kann. Besonders dehnungsweiche Produkte hingegen, die zusätzlich bei hohen Temperaturen zu fließen beginnen, lassen sich auch mittels Trockenzerfaserung nur ungenügend mit hohem Reststippengehalt zerfasern, da ein Großteil der Energie nicht für die Einzelfaserzerlegung, sondern als Verformungs- und Dissipationsarbeit umgesetzt wird (Verlustrarbeit). Die meisten dehnungsweichen Produkte können jedoch noch problemlos zerfasert werden, wobei der erhöhte Zerfaserungswiderstand solcher Produkte mit einem erhöhten Energiebedarf einhergeht. Und da die Erhöhung des Energieeintrags durch die maximal mögliche Drehzahl, den minimal einstellbaren Mahlspalt und ebenso die Verweilzeit begrenzt ist, können selbst mittels Trockenzerfaserung nicht alle Produkte vollständig in Einzelfasern zerlegt werden. Solche Produkte, wie zum Beispiel Vliese mit hohem Kunstfaser- und Latexbinderanteil, stellen jedoch nur eine Ausnahme dar. Unabhängig davon würde eine genaue Kenntnis des Trockenzerfaserungswiderstands (TZW) eine Vorhersage der Zerfaserbarkeit und des erforderlichen Energieeintrags erlauben, weshalb eine Methode zur Bestimmung des TZW-Wertes entwickelt wurde.

Der Trockenzerfaserungswiderstand hängt grundsätzlich vom produktspezifischen Festigkeits-, Verformungs- und Bruchverhalten des jeweiligen Produkts ab. An dieser Stelle ist anzumerken, dass durch die Betrachtung des bereits erläuterten Energie- bzw.

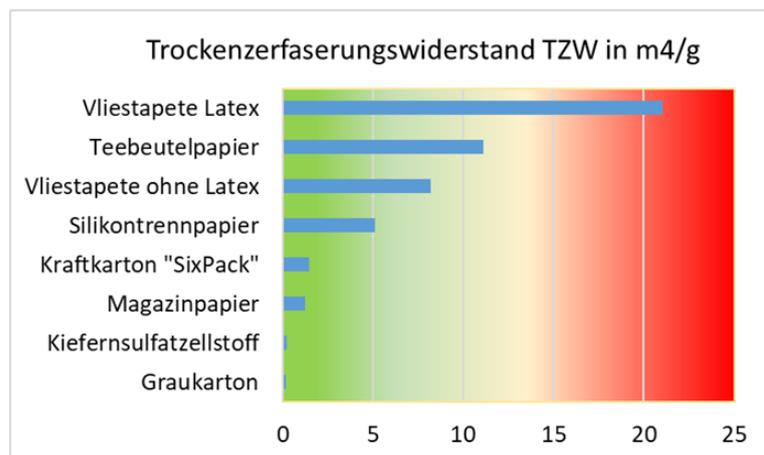
Arbeitsaufnahmevermögens alleine keine ausreichenden Rückschlüsse auf die Zerfaserbarkeit erlaubt. Für die Ermittlung des Trockenzerfaserungswiderstands müssen neben der Flexibilität auch die Trägheit und die Steifigkeit des Produkts wie folgt mit einbezogen werden um einen aussagekräftigen Index ableiten zu können:

$$TZW = \frac{\text{Flexibilität}}{\text{Trägheit} \times \text{Steifigkeit}} \quad \text{Gl. 1}$$

Die Flexibilität kann durch das Arbeitsaufnahmevermögen bzw. dem Produkt aus Bruchdehnung und Bruchkraft dargestellt werden, wobei grundsätzlich gilt, dass eine hohe Flexibilität den Zerfaserungswiderstand erhöht und damit die Zerfaserbarkeit verschlechtert. Die Steifigkeit setzt sich aus dem Produkt aus E-Modul und Dicke zusammen und die Trägheit spiegelt sich in der flächenbezogenen Masse wieder, wobei besonders dicke und steife Papiere sich besonders gut zerfasern lassen. Durch den Zugversuch (E-Modul, Bruchkraft, Bruchdehnung) und die Grundeigenschaften (Dicke, flächenbezogene Masse) können damit alle Kennwerte zur Bestimmung des Trockenzerfaserungswiderstands sehr schnell bestimmt werden:

$$TZW = \frac{\text{Kraft [N]} \times \text{Bruchdehnung [mm]}}{\text{flächenbezogene Masse} \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right] \times \text{E-Modul [MPa]} \times \text{Dicke [\mu m]}} \times 1000 \quad \text{Gl. 2}$$

Wie die nachfolgende Abbildung anhand ausgewählter Produkte zeigt unterscheidet sich der Zerfaserungswiderstand zum Teil erheblich, wobei die meisten Produkte einen TZW-Wert < 10 aufweisen und damit insgesamt gut zerfaserbar sind. Im Vergleich zu sehr gut zerfaserbaren Produkten (TZW-Wert < 5) reicht hier eine Erhöhung der Drehzahl bzw. eine Reduzierung des Mahlspalts um eine zufriedenstellende



**Abbildung 5: Darstellung des TZW für ausgewählte Produkte**

Gefügetrennung zu erzielen. Produkte mit TZW-Werten > 15, insbesondere > 20, können jedoch auch mittels Trockenzerfaserung nicht mehr vollständig zerlegt werden.

Wie bereits erwähnt besteht das übergeordnete Ziel der Trockenzerfaserung in der Einzelfaserzerlegung schwer zerfaserbarer Produkte sowie dem Wiedereinsatz des Trockenfasern für die erneute Papierherstellung und andere Anwendungsbereiche. Aus diesem Grund dürfen die Fasern in Folge der Trockenzerfaserung möglichst nicht geschädigt werden, weshalb die Anpassung der Zerfaserungsintensität nicht ausschließlich anhand des Reststippengehalts erfolgen darf, sondern immer auch anhand der Bewertung der Faserqualität. Die Anpassung der Zerfaserungsintensität zur Minimierung möglicher fasermorphologischer Veränderungen ist demnach entscheidend für ein optimales Zerfaserungsergebnis. Voraussetzung hierfür ist jedoch zunächst die genaue Kenntnis darüber, welche morphologischen Veränderungen und Begleiteffekte

im Detail infolge der Trockenzerfaserung auftreten und wie sich diese im Vergleich zum Nassprozess auswirken. Zu diesem Zweck war es erforderlich verfahrensbedingte Unterschiede zwischen der Nass- und Trockenzerfaserung im Hinblick auf die relevanten Eigenschaften und das Festigkeitspotenzial zu untersuchen. Da schwer zerfaserbare Produkte nicht oder nur eingeschränkt im Nassprozess aufzubereiten sind, wurden für die Untersuchungen diverse Zellstoffe (Kiefernulfatzellstoff, Kisa und Eukalyptussulfatzellstoff, EuSa, jeweils gebleicht) sowie altpapierbasierter Graukarton herangezogen.

Durch die Betrachtung von Standardsorten sollten etwaige auf den Trockenzerfaserungsprozess zurückzuführende Einschränkungen sowie morphologische Effekte auf die Faserqualität quantifiziert werden, um das Potenzial der Trockenzerfaserung besser bewerten zu können. Um Fehlanalysen aufgrund vorhergehender Recyclingzyklen auszuschließen erfolgte die Betrachtung nicht nur anhand von altpapierbasierten Graukarton, sondern auch anhand von Zellstoffen. Bei diesen Produkten ist im Gegensatz zu schwer zerfaserbaren Produkten ein direkter Vergleich mit der Nasszerfaserung möglich. Dies ist besonders wichtig, da für den erfolgreichen Wiedereinsatz insbesondere jene Aspekte von Bedeutung sind, die für die erneute Papierherstellung relevant sind. Hierzu zählen vor allem die Faser-, Suspensions- und Blatteigenschaften, die mit dem konventionell aufgeschlossenen Pendant verglichen werden sollen.

Um das maximal mögliche Faserpotenzial aus den schwer zerfaserbaren Produkten nutzen zu können, wurden die Kriterien an den Trockenaufbereitungsprozess in Phase I so definiert, dass die Trockenfasern bestimmte Mindestqualitätsanforderungen erfüllen müssen. Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung wurde darauf gelegt, dass eine Faserkürzung, eine abnehmende Fibrillierung sowie Faserschädigungen in Form von Quetschung, Faserwandrisen o.ä. auf ein Minimum reduziert werden (grundsätzlich geht jeder Recycling- bzw. Aufbereitungsprozess mit Faserschädigungen einher, daher kann eine Faser auch nicht unbegrenzt recycelt werden). Insbesondere wurden im Vergleich zu einer konventionell aufbereiteten Referenz folgende Zielwerte definiert:

- Faserkürzung maximal 5 %,
- Erreichbares Festigkeitspotenzial nach Mahlbehandlung mindestens 80 %.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass schwer zerfaserbare Produkte nicht oder nur stark eingeschränkt im Nassprozess aufbereitet werden können und daher oftmals keine Referenz als Bezugsgröße existiert, weshalb die Vergleichsuntersuchungen an Standardsorten erfolgten. Nicht zuletzt auch, weil ein direkter Vergleich zwischen trocken aufbereiteten Fasern (im trockenen Zustand) und nass aufbereiteten Fasern (im nassen Zustand) aufgrund fehlender bzw. nicht vergleichbarer Analysemethoden nicht möglich ist. Daher wurden die trocken aufbereiteten Fasern (TZ...Trockenzerfaserung) in eine wässrige Suspensionsform überführt, wobei sie entweder nur gequollen und homogenisiert (TZ-0), oder zusätzlich desintegriert (TZ-10) und ggf. noch gemahlen wurden (Reaktivierung). Auf diese Weise konnten die Trockenfasern mit einer konventionell aufbereiteten Referenz (NZ...Nasszerfaserung) auf Grundlage der aus der Papiertechnik bekannten Analysemethoden unter einheitlichen Randbedin-

gungen verglichen werden. Die methodische Vorgehensweise dieser Vergleichsuntersuchungen ist in Abbildung 25 im Anhang dargestellt. Im Ergebnis haben Trockenfasern nach der Reaktivierung durch zusätzliche Nasszerfaserung (Desintegration) und/oder Mahlung ein vergleichbares Papierherstellungspotenzial und erreichen unter optimalen Bedingungen nahezu das Festigkeitsniveau von konventionell aufbereiteten Fasern. Die definierten Zielkriterien konnten somit erreicht werden. (siehe Abschnitt 3.4).

### **Funktionschemikalien**

Die Bewertung der Belastung der Trockenfasern mit Funktionschemikalien stellte eine Bewilligungsaufgabe dar und führte daher zu den folgenden Betrachtungen, wobei die Untersuchung von Inhalts- und Störstoffen an zahlreichen Stellen des Berichts ebenfalls im Kontext betrachtet worden sind.

Grundsätzlich ist noch einmal festzustellen, dass alle Inhaltsstoffe der Eingangsfasergefüges zunächst auch Bestandteil des Trockenfaserstoffes sind. Sie unterscheiden sich jedoch in verschiedene Gruppen. Zum einen gibt es die aktiven und die nicht aktiven Additive. Unter den aktiven Stoffen sind solche zu verstehen die nach der Trockenzerfaserung noch wirkungsvoll sind und unter nicht aktive solche, die ihre Wirkung verloren haben. Für beide Gruppen gibt es zahlreiche Beispiele. Nassfestmittel sind dabei nach der Trockenzerfaserung inaktiv, da der geschlossene Schutz bzw. die Imprägnierung der Fasern aufgehoben wird. Diese Tatsache ist auch einer der Hauptvorteile der Trockenzerfaserung nassfester Produkte und Qualitäten. Ein Beispiel für weiter aktive Additive sind z.B. Latexbinder, die ihre Wirkung durch die Trockenzerfaserung i.d.R. nicht verlieren und auch nachträglich Bindungen und damit teilweise Agglomerate ausbilden und damit den Wiedereinsatz teilweise einschränken.

Außerdem können Funktionschemikalien dadurch unterschieden werden, ob sie nach der Zerfaserung separat als Einzelfraktion im Faserstoff vorliegen oder ob sie an den Fasern anhaften. Bei Einzelfraktion bestehen sehr effektive Möglichkeiten die Chemikalien abzusortieren oder auch zurückzugewinnen. Der trockene Zustand aller Komponenten eröffnet dort sehr einfache und umweltverträgliche Möglichkeiten. Im Gegensatz zum Nassverfahren, wo derartige Stoffe im Lösung gehen oder sich auf viele Kubikmeter Wasser bzw. Suspension verteilen und damit den Sortieraufwand extrem erhöhen. Aus diesem Grund funktioniert eine Entaschung durch die Trockenzerfaserung sehr gut. Teilweise kann ein Teil der Füllstoff und Pigmente bereits im Luftsystem gefiltert und damit die Belastung des Faserstoffes erheblich reduziert werden. Im Gegensatz dazu funktioniert das Trockendeinking nur eingeschränkt, da die Druckfarben bei entsprechendem Druckverfahren zu einem großen Teil auf der Faser verbleiben. Auch hierzu wurden zahlreiche Untersuchungen und Versuche durchgeführt.

Das Fazit welches man in Bezug auf die Funktionschemikalien im Zusammenhang mit der Trockenzerfaserung ziehen kann, ist, dass eine Belastung des Eingangsproduktes durch Funktionschemikalien durch die Zerfaserung selbst nicht verschwindet, aber ak-

tive und inaktive Stoffe die als Einzelfraktion von den Fasern trocken getrennt vorliegen, sehr einfach in beliebigem Abtrenngrad sortiert werden können. Damit werden auch hier die Vorteile der Trockenprozess ausgespielt. Fest mit den Fasern verbundene Stoffe, verbleiben i.d.R. auf der Faseroberfläche. Nach der Trockenzerfaserung und vor dem Einsatz stehen außerdem weiterhin alle Verfahren zur Verfügung, Funktionschemikalien zurückzugewinnen oder abzutrennen. In dieser Beziehung stellt die Trockenzerfaserung keinerlei Einschränkung dar, bietet jedoch die Chancen einer trockenen und damit teilweise effizienteren Abtrennung der Fraktionen.

Die Vor- und Nachteile sind immer im Einzelfall in Verbindung mit dem vorgesehenen Wiedereinsatz, zum Großteil auch im Langzeitversuch, zu prüfen.

### **3.3 Aufbau einer Prozesskette zur Trockenzerfaserung im industriellen Maßstab und Tests mit realen Produkten im Technikum und in Papierfabriken**

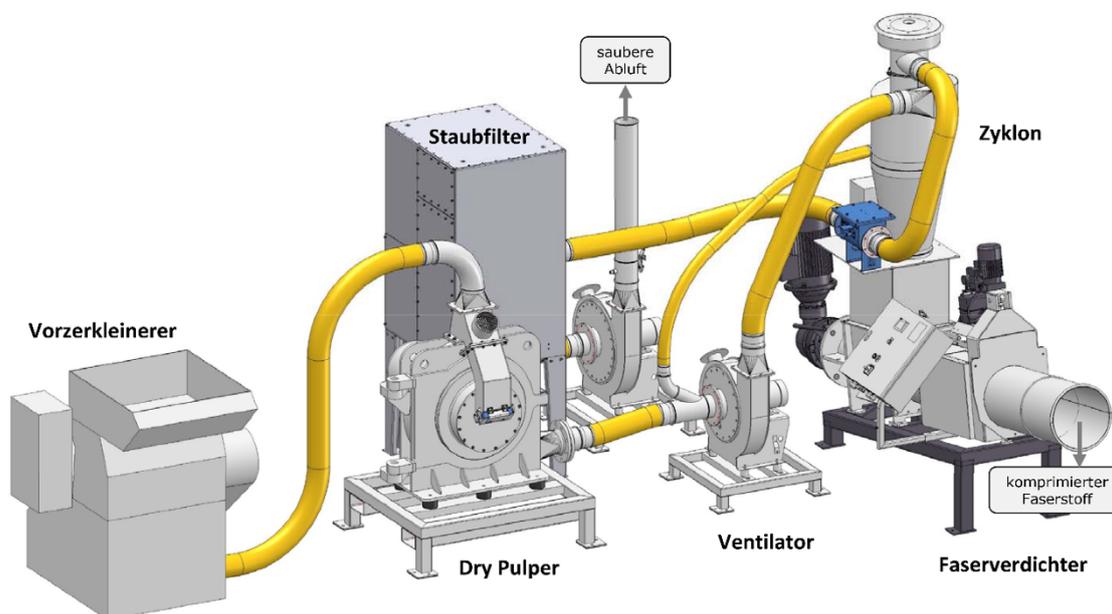
Zentrales Anliegen der Phase I war die Entwicklung der notwendigen neuen Aufbereitungstechnologien, die im Gegensatz zum Stand der Technik auf eine trockene Einzelfaserzerlegung des Papiergefüges beruhen. Für die erfolgreiche Umsetzung des Trockenaufbereitungsprozesses war die technologische Weiterentwicklung der Trockenzerfaserungstechnologie auf einen industriellen Maßstab entscheidend. Dieser Weiterentwicklungsprozess erfolgte unter Einbeziehung sämtlicher praxisrelevanter Aspekte und der Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit des Aufbereitungsprozesses. 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. Das Interesse an der Versuchsanlage ist dabei so immens, dass eine zweite mobile Anlage gefertigt wurde. 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 Trockenzerfaserungsprozess 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.

Um den Trockenzerfaserungsprozess optimal betreiben zu können, insbesondere auch im Hinblick auf einen möglichst geringen spez. Energieeinsatz, wird grundsätzlich noch eine Dosierung benötigt. Die Dosierung bei den mobilen Anlagen findet aktuell provisorisch über einen Universal-Schredder statt. Dieser wurde so dimensioniert, dass der Durchsatz unterhalb des Maximaldurchsatzes des DryPulpers liegt. Um die Trockenzerfaserung jedoch am optimalen Arbeitspunkt des DryPulpers betreiben zu können, muss der Durchsatz über eine Dosiereinrichtung exakt auf die zulässige Dauerstromaufnahme des DryPulpers eingestellt werden können. Die Dosierung erfüllt darüber hinaus noch eine weitere wichtige Funktion. Sie ermöglicht es die Vorzerkleinerung von der Trockenzerfaserung zu entkoppeln, indem die Dosierung am Ausgang eines Zwischenpuffers installiert wird. Dadurch ist der Prozess weniger anfällig gegenüber Störungen und kann zudem diskontinuierlich immer am optimalen Arbeitspunkt, d.h. beim minimalen spez. Energieeinsatz betrieben werden, was ebenfalls einen wichtigen umweltrelevanten Aspekt der neuen Aufbereitungstechnologie darstellt.



**Abbildung 6: mobile Anlage DPS 40 GT (Prinzipdarstellung)**

Die mobilen Testanlagen stellen aus unserer Sicht einen Meilenstein für die erfolgreiche Umsetzung der Trockenzerfaserung in der Papierindustrie dar. Zwar konnte die Leistungsfähigkeit der Trockenzerfaserung bereits in zahlreichen Technikumsversuchen mit Produkten von Papierfabriken nachgewiesen werden. Aufgrund der Produkt-

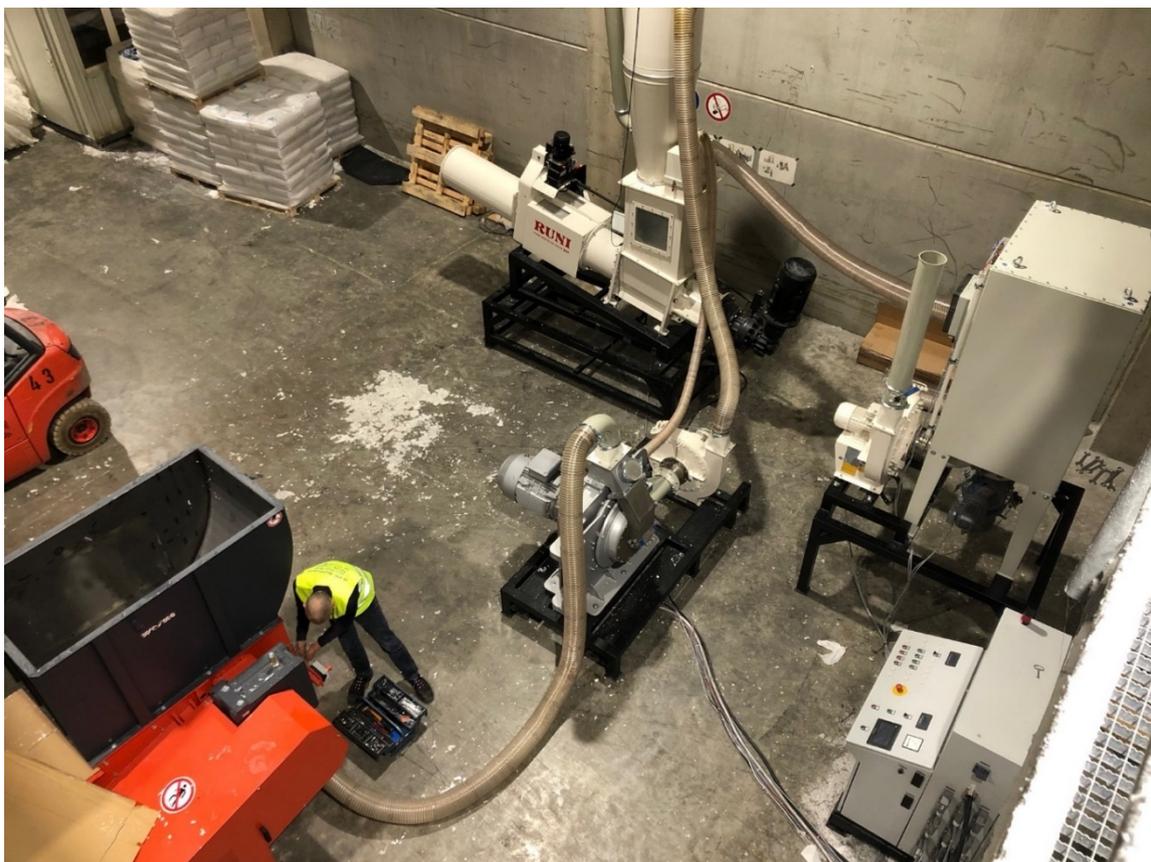
vielfalt sowie der unterschiedlichsten Gegebenheiten und Randbedingungen in den jeweiligen Papierfabriken können Technikumsversuche allein jedoch keine hinreichend belastbaren Ergebnisse erzielen bzw. uneingeschränkt übertragen werden. Zudem stellt der Einsatz von Trockenfasern, die im Technikum erzeugt 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. Die mobile Trockenzerfaserungsanlage kann teilautomatisiert durch nur einen Bediener vollständig losgelöst vom normalen Produktionsprozess betrieben werden. Die installierte Leistung der Anlage beträgt ca. 100 kW und neben der Stromversorgung muss lediglich noch ein Druckluftanschluss vorhanden sein. Dies, der geringe Platzbedarf (Bauhöhe: < 4 m; Stellfläche: ca. 5 x 5 m<sup>2</sup>, siehe Anhang Abb. 26+27) und die flexible Aufstellung der Einzelkomponenten sollten die Aufstellung der kompletten Anlage in den allermeisten Papierfabriken weitgehend problemlos ermöglichen, zumal durch den Schneckenverdichter der komprimierte Faserstoff einfach in ein Zwischenlager oder direkt zum Einsatzort transportiert werden kann. Die Kapazität von 100-300 kg/h ist insbesondere für kleine und mittelgroße Papierfabriken ausreichend, um vielfältige Versuche mit bis zu 100 % Trockenfasereinsatz durchzuführen. Aber auch größere Papierfabriken sollten mit der mobilen Anlage so viel Trockenfasern herstellen können, um zumindest versuchsweise eine Einsatzquote von 5-20 % zu realisieren / [2]/.



**Abbildung 7: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT I bei einem Filterpapierhersteller (1)**

Die mobile Trockenzerfaserungsanlage beginnt mit der Vorzerkleinerung des zu zerfasernden Produkts auf eine Größe von ca. 2x2 cm, besser noch 4x4 cm. Die Vorzerkleinerung ist aufgrund des Rotor-Stator-Zerfaserungsprinzips unabhängig von der Baugröße sowohl für die anvisierte Einzelfaserzerlegung als auch für eine konstante Beschickung notwendig. Als Universallösung für den Testbetrieb wurde hierfür ein 1-Wellen-Shredder

ausgewählt, für die Konzeptionierung einer Industrieanlage hingegen würde das Vorzerkleinerungsaggregat speziell auf die Kundenanforderungen angepasst werden. 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. Die dabei wirkenden Kräfte sind im Wesentlichen Druck-Scher-Beanspruchungen im Mahlpalt, Partikel-Partikel-Kollisionen sowie Prallbeanspruchungen an sich drehenden und stehenden Körperflächen. Im Anschluss an die Einzelfaserzerlegung wird der trockene und sehr voluminöse Faserstoff mit Hilfe eines Zyklons vom Luftstrom getrennt und durch einen Schneckenverdichter auf eine gewünschte Dichte von 100-500 kg/m<sup>3</sup> komprimiert und sukzessive ausgetragen. Die sich noch im Luftstrom befindlichen Fein- und Kurzfaserbestandteile werden am Ende der Prozesskette von einem Staubfilter zurückgehalten. Der Abscheidegrad vom Zyklon beträgt mehr als 99 %, wobei der Feinstoff, der am Filter ausgetragen und aufgefangen wird, auch wieder eingesetzt werden kann, sodass de facto keine Stoffverluste entstehen. Bedienung und Regelung der mobilen Anlage, die selbstverständlich explosionsgeschützt ist, erfolgen über einen Schaltschrank.



**Abbildung 8: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT II bei einem Tissuehersteller**

Kernstück der mobilen Zerfaserungsanlagen, die als DryPulpingSystem (kurz DPS) bezeichnet werden, ist der sogenannte DryPulper. Der Durchmesser des Rotors bestimmt dabei im Wesentlichen den erzielbaren Durchsatz, wobei für die mobilen Testanlagen die kleinsten verfügbaren DryPulper mit einem Durchmesser von 40 cm zum Einsatz kommen. Der aktuell größte verfügbare DryPulper weist einen Rotordurchmesser von

120 cm auf und erreicht bei einem spez. Energieeinsatz von 80-120 kWh/t einen Durchsatz von ca. 1,5 t/h. Diese Baugröße ist zwar für viele Papierfabriken ausreichend, aber aufgrund der Nachfrage nach noch leistungsfähigeren Aggregaten zielen aktuelle Entwicklungen, die allerdings unabhängig vom DBU-Projekt zu betrachten sind, auf eine weitere Erhöhung des Durchsatzes auf bis zu 5 t/h ab. Aufgrund fehlender Skaleneffekte beträgt der spez. Energieeinsatz beim kleinsten verfügbaren DryPulper 120-180 kWh/t. Diese Spanne resultiert aus dem produktspezifischen Zerfaserungswiderstand.

**Tabelle 1: aktuell verfügbare Baugrößen des DryPul-**

<b>Baugrößen</b>	
Bezeichnung:	Kapazität*:
DPS 40 GT	100-300 kg/h
DPS 80 GT	500-750 kg/h
DPS 120 GT	1.000 – 1.500 kg/h
*Produktabhängig	

Das aufgebaute Know-How zur schonenden und vollständigen Erzeugung von Trockenfasern, ihrer Charakterisierung und der Ableitung von Maßnahmen zur Reaktivierung des initialen Faserpotenzials konnte im weiteren Verlauf der Phase I dazu genutzt werden, um auch zahlreiche schwer zerfaserbare und nassfeste Produkte so trocken zu zerfasern, dass der resultierende Faserstoff zur erneuten Papierherstellung verwendet und zum Teil als fast vollwertiger Zellstoffersatz eingesetzt werden kann. Entgegen der ursprünglichen Annahmen, die von Mischungsverhältnissen mit einem maximalen Trockenfaseranteil von 20 % ausging, hat sich in Papiermaschinenversuchen sogar herausgestellt, dass die prozentuale Einsatzmenge von Trockenfasern nicht limitiert ist. So 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 und es zeigten sich auch sonst keinerlei negative Begleiterscheinungen im Produktionsprozess. Die Trockenfasern wurden aus einem nassfesten Filterpapier eines anderen Herstellers gewonnen und können als nahezu gleichwertiger Zellstoffersatz für die meisten Produkte eingesetzt werden.

Neben dem sowohl ökonomisch wie auch ökologisch überaus wichtigen Aspekt der Faserrückgewinnung bietet die Trockenzerfaserung auch noch die Möglichkeit zur gezielten Fasermodifizierung. Das damit einhergehende Verbesserungspotenzial beruht im Wesentlichen auf Veränderungen der Fasermorphologie, die sich darin äußert, dass trocken aufbereitete Fasern weniger gestreckt und mehr geknickt und gekrümmt sind. Durch die damit einhergehende Erhöhung der Fasersteifigkeit entwässert die Faserstoffsuspension deutlich schneller und es kommt zu einer signifikanten Zunahme der Blattdicke, wodurch beispielsweise das spezifische Volumen und die Biegesteifigkeit von Spezial- und insbesondere von Verpackungspapieren verbessert werden können.

Neben dem bereits erwähnten Filterpapierhersteller (Abb. 7 Abb. 28 im Anhang) konnten durch die mobilen Anlagen zahlreiche weitere Papiermaschinenversuche mit diversen nassfesten und schwer zerfaserbaren Produkten durchgeführt werden, wobei aus Gründen der Vertraulichkeit keine Detailangaben zu den eingesetzten Produkten und Dosiermengen sowie den erreichten Festigkeiten gemacht werden können:

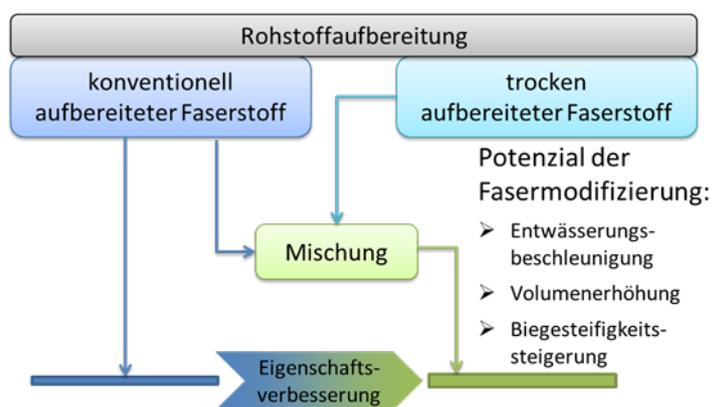
- Bei einem Tissuehersteller (Abb. 8 und Ab. 30 im Anhang) wurde der eigene nass-feste Ausschuss zerfasert und ohne Probleme wieder eingesetzt. Hier soll perspektivisch die Ausschussaufbereitung auf ein alternatives Verfahren, wie zum Beispiel die Trockenzerfaserung, umgestellt werden, weil bei erwarteter steigender Nassfestigkeit ein Nassaufschluss der eigenen Verarbeitungsreste als nicht mehr möglich angesehen wird.
- Ein Kartonhersteller (Abb. 29 Anhang) hat verschiedenste schwer zerfaserbare Produkte, die er preiswert über seinen Einkauf beziehen könnte, trockenzerfasert und in Papiermaschinenversuchen getestet und als potenzielle Rohstoffalternativen gewertet. Hier steht im Wesentlichen die Einsparung von Rohstoffkosten und die Sicherung der Rohstoffversorgung im Mittelpunkt des Interesses.
- Ein anderer Kartonhersteller hat Hülsen, Etiketten und Banknotenroh papier trockenzerfasert und in Papiermaschinenversuchen getestet und als potenzielle Rohstoffalternativen gewertet. Hier steht ebenfalls die Einsparung von Rohstoffkosten und die Sicherung der Rohstoffversorgung im Mittelpunkt des Interesses.
- Wiederum ein anderer Kartonhersteller hat erfolgreich trockenzerfaserte Getränkekartons als preiswerte Alternative zu Holzmehl zum Zwecke der Volumenerhöhung getestet. Neben der Erschließung neuer Faserquellen und der Rohstoffkosteneinsparung steht hier vor allem auch die Steigerung des spez. Volumens und die Verbesserung der Biegesteifigkeit im Fokus.
- Auch aus anderen Branchen zeigt sich reges Interesse an der Trockenzerfaserung. Ein Hersteller von Gipskartonplatten will die Technologie nutzen um schwer zerfaserbare Produkte als preiswerte Alternative zum bisher eingesetzten Zeitungspapier einzusetzen. Die hier verwendeten Hammermühlen stoßen bei anderen Papierprodukten, insbesondere bei schwer zerfaserbaren, an ihre Grenzen und stellen eine eindeutige Limitierung hinsichtlich der Zerfaserungsqualität und des einsetzbaren Rohstoffs dar.
- Ähnliches gilt für einen Airlaid-Hersteller, der mit seiner jetzigen Zerfaserungstechnologie nur Fluffpulp einsetzen kann und durch die Trockenzerfaserung mehr Freiheitsgrade hinsichtlich der Rohstoffauswahl erreichen möchte, um beispielsweise Hanffasern oder Recyclingfaserstoffe einzusetzen.
- Zahlreiche Hersteller cellulosehaltiger Komposite, wie z.B. Filtersysteme oder Glasfaservliese testen die Technologie, um Randbeschnitt oder Ausschussware streng sortenrein sofort online trockenzerfasert wieder in den Produktionsprozess zurückführen zu können (Abb. 31 Anhang).

Der Einsatz von Trockenfasern im konventionellen Nassprozess für die Herstellung von Papier und Karton ist demnach ohne Einschränkung möglich. Dies wurde nicht nur in unzähligen Laborversuchen gezeigt, sondern konnte auch in mehreren Großversuchen bei verschiedenen Papier- und Kartonfabriken mit bis zu 100 % Trockenfasereinsatz nachgewiesen werden. Der spezifische Energieeinsatz für die Trockenzerfaserung liegt

jedoch mit mindestens 75 kWh/t deutlich über den Vergleichswerten der Nasszerfaserung, wobei dies ausschließlich für gewöhnliche Papier- und Kartonprodukte gilt. Bei nassfesten und schwer zerfaserbaren Sorten hingegen ist die Trockenzerfaserung als energieeffizienter einzustufen. Daher ist die Trockenzerfaserung aus ökonomischer sowie ökologischer Sicht stand jetzt insbesondere für nassfeste oder anderweitig schwer zerfaserbare Sondersorten oder zum Zwecke der gezielten Fasermodifizierung zur Eigenschaftsbeeinflussung uneingeschränkt zu empfehlen. Großes Potenzial bietet die Trockenzerfaserung zudem 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 jedoch denkbar und bietet viel Potenzial.

Die bereits angedeutete 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. Das Verbesserungspotenzial hängt ab vom Rohstoff, den Trockenaufbereitungsbedingungen sowie dem Mischungsverhältnis mit konventionell aufbereiteten Faserstoff und insbesondere auch der Dosierstelle und den Randbedingungen (Verweilzeit, Energieeintrag durch Rührwerke, etc.). Ein Trockenfaseranteil von 5-20 % ist in vielen Fällen jedoch bereits ausreichend, um sehr gute Ergebnisse zu erzielen. Grundsätzlich kann jedoch das „Volumenpotenzial“ von allen relevanten Rohstoffen (Papier- und Kartonprodukte, Altpapiere, Zellstoffe) durch eine Trockenzerfaserung nochmal deutlich erhöht werden. Gleiches gilt für die Entwässerungsgeschwindigkeit.

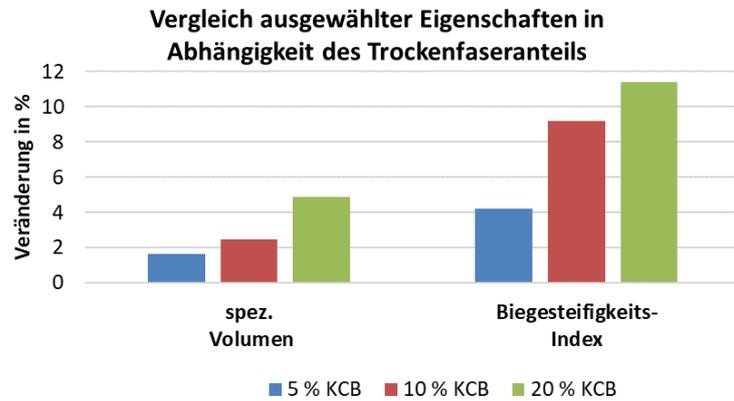
Die Volumenzunahme geht jedoch wie bei anderen volumensteigernden Stoffen mit einer Lockerung der Gefügestruktur und damit einer Abnahme wichtiger Festigkeiten einher. Eine Ausnahme stellt dabei jedoch die Biegesteifigkeit dar, da die Dickenzunahme den E-Modul-Rückgang überkompensiert und somit zum Teil deutliche Biegesteifigkeitssteigerungen erzielt werden können. Aufgrund der hohen Priorität, welche die Verbesserung des spezifischen Volumens und der



**Abbildung 9: Fasermodifikation durch Trockenzerfaserung**

Biegesteifigkeit für viele Spezialpapier- und Verpackungspapierhersteller einnimmt, ist ein gewisser Abfall der sonstigen Festigkeiten jedoch in vielen Fällen tolerierbar.

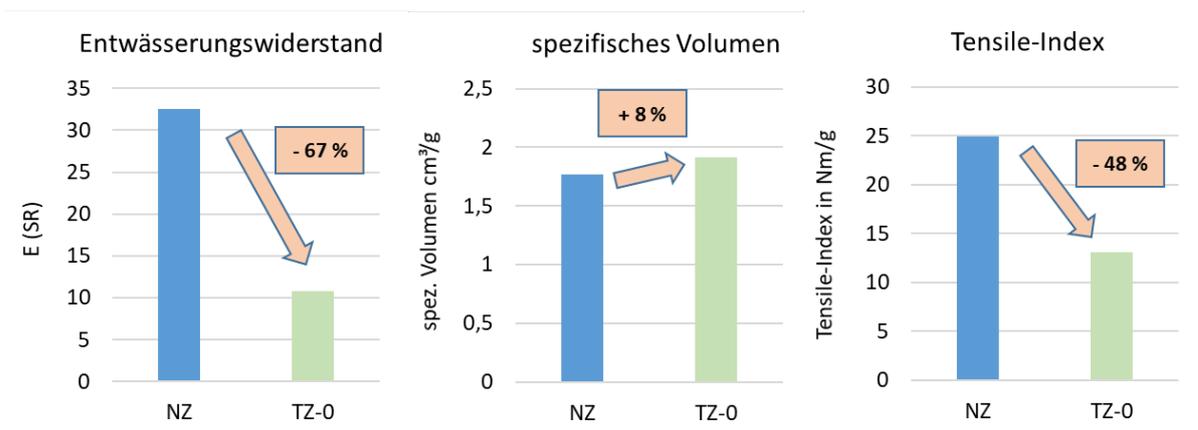
Zahlreiche grundlegende Effekte und Zusammenhänge zwischen der Trockenfaserdosierung und der damit einhergehenden Eigenschaftsveränderung könnten bereits untersucht werden. Insbesondere die Möglichkeit zur Volumen- und Biegesteifigkeitsverbesserung bei mehrlagigen Produkten konnte dabei mehrfach im Labormaßstab nachgewiesen und in Papiermaschinenversuchen bestätigt werden. Dabei konnte beim Papiermaschinenversuch durch die Zugabe von 15 % Trockenfasern (Kraftkarton „SixPack“, KCB) das spez. Volumen des produzierten Graukartons (8-lagig, 400 g/m<sup>2</sup>) um 2,4 % und die Biegesteifigkeit sogar um 13 % gesteigert werden. Die anderen relevanten Festigkeitseigenschaften (Berstfaktor: +1,24 %; spez. Bruchkraft, längs: +1,3 %; spez. Bruchkraft, quer: -0,31 %) 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.



**Abbildung 10: Laborergebnisse zur Volumen- und Biegesteifigkeitsverbesserung durch Dosierung von Trockenfasern (KCB)**

„SixPack“, KCB) das spez. Volumen des produzierten Graukartons (8-lagig, 400 g/m<sup>2</sup>) um 2,4 % und die Biegesteifigkeit sogar um 13 % gesteigert werden. Die anderen relevanten Festigkeitseigenschaften (Berstfaktor: +1,24 %; spez. Bruchkraft, längs: +1,3 %; spez. Bruchkraft, quer: -0,31 %) 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.

### 3.4 Charakterisierung von Trockenfasern und Bewertung des Faserreaktivierungs- und Bindungspotenzials

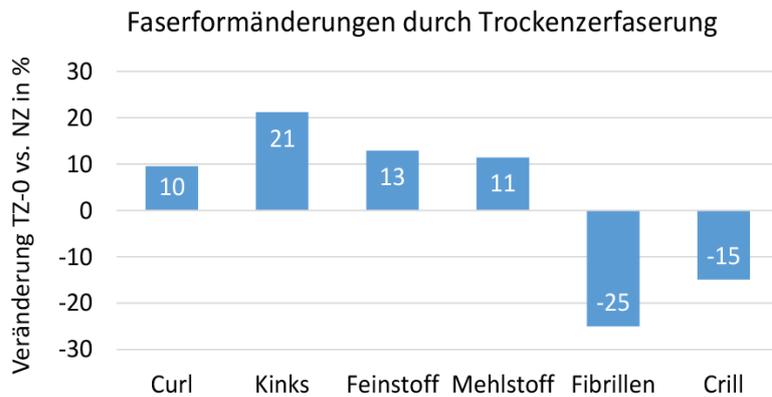


**Abbildung 11 Vergleich von SR, spez. Volumen und Tensile-Index zwischen NZ und TZ-0 für GK**

Alle trocken aufbereiteten Faserstoffe weisen grundsätzlich eine eigenständige Charakteristik auf die sich darin äußert, dass die Faserstoffsuspension ohne zusätzliche Reaktivierungsmaßnahmen deutlich schneller entwässert und die gebildeten Blätter eine sig-

nifikant höhere Blattdicke aufweisen. Im Vergleich zu einem konventionell aufbereiteten Faserstoff liegt der sogenannte Entwässerungswiderstand (SR-Wert) nur auf dem Niveau von ungemahlene Zellstoff und durch das hohe spezifische Volumen der Blätter liegen die Festigkeiten zum Teil um mehr als 50 % unter denen der Referenz.

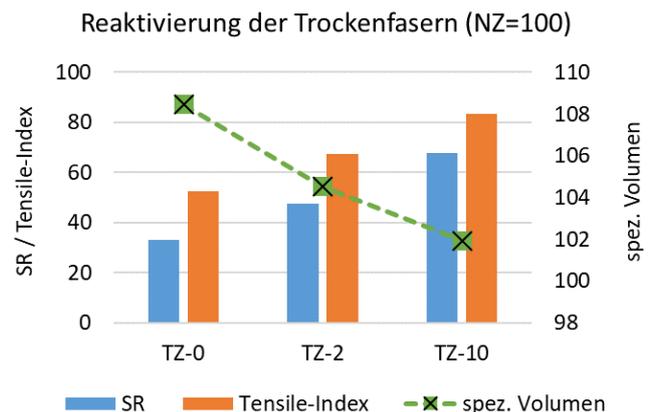
Im Vergleich zur Referenz besitzen Trockenfasern ohne eine Reaktivierung ein nur geringes Papierherstellungspotenzial, was durch zahlreiche morphologische Effekte auch messtechnisch quantifiziert werden kann. Insbesondere sind es Faserformveränderungen wie Curl (Krümmung) und Kink (Knicke), sowie eine deutlich abnehmende Fibrillierung und Faserhaarigkeit (Crill), die in Kombination mit einem stark ansteigenden Feinstoffanteil die Veränderungen bewirken.



**Abbildung 12: Abweichung von Curl, Kink, Feinstoff, Mehlstoff, Fibrillen und Crill von TZ-0 im Vergleich zu NZ für GK**

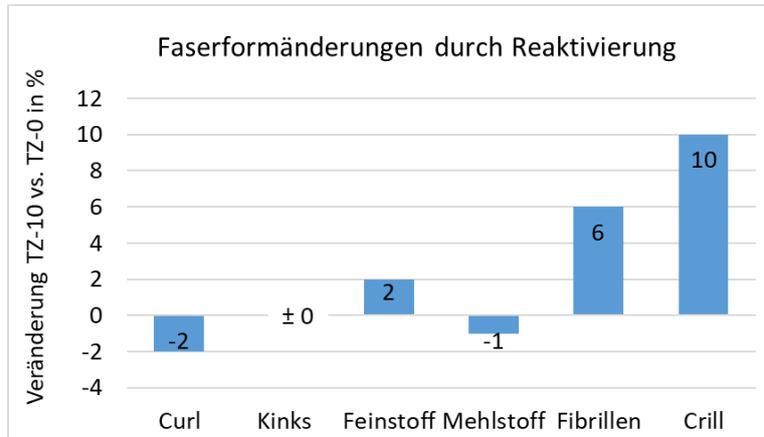
Die Einzelfaserfestigkeit wird durch die Trockenzerfaserung jedoch nur geringfügig herabgesetzt, ebenso wenig treten signifikante Faserkürzungen auf. Vielmehr sind es morphologische Effekte, die die Fasersteifigkeit verstärken und das Bindungsvermögen herabsetzen. Durch die reduzierte Faserflexibilität können sich die Fasern im Blattbildungsprozess weniger annähern und im Zusammenspiel mit der abnehmenden Fibrillierung resultiert eine deutlich geringere Kontaktfläche zwischen den Fasern.

Diese Inaktivität einer Trockenfaser kann jedoch durch entsprechende Reaktivierungsmaßnahmen zum Teil rückgängig gemacht werden. Im einfachsten Fall besteht die Nachbehandlung einer Trockenfaser in einer zusätzlichen Nasszerfaserung im Desintegrator. Dadurch kommt es zu einer Flexibilisierung und Refibrillierung, ähnlich einem Mahleffekt, wodurch sich die Fasern wieder besser annähern und deutlich mehr Bindungen untereinander eingehen können. In der Folge steigen die scheinbare Blattdichte, der Entwässerungswiderstand und die Festigkeiten mit zunehmender Desintegrationszeit wieder stark an. Die durch die Trockenzerfaserung herbeigeführten Faserformveränderungen sind demnach zum Teil reversibler Natur. Curl



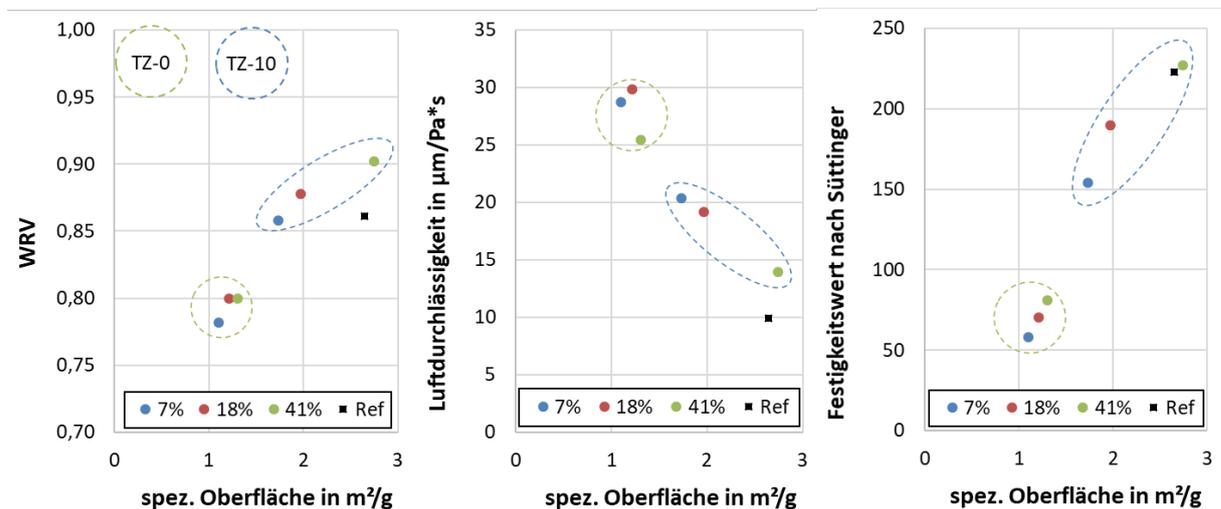
**Abbildung 13: Entwicklung von SR, spez. Volumen und Tensile-Index in Abhängigkeit der Nachbehandlungszeit im Desintegrator für GK**

und Kink bleiben jedoch auch nach der zusätzlichen Desintegration nahezu unverändert. Daher liegen der Tensile-Index (-20 %) und der SR-Wert (-37 %) auch trotz der Nachbehandlung noch deutlich unterhalb der Referenz. Um dieses Defizit auszugleichen wurden die Prozessparameter variiert. Ziel war es durch Anpassung der Verweilzeit, der Produktfeuchte, der Drehzahl und des Mahlspalts eine Anpassung der Trockenfasereigenschaften an die Referenz zu erzielen.



**Abbildung 14: Abweichung von Curl, Kink, Feinstoff, Mehlstoff, Fibrillen und Crill von TZ-10 im Vergleich zu TZ-0 für GK**

Im Ergebnis dieser Untersuchungen konnten Randbedingungen der Trockenzerfaserung so angepasst werden, dass eine Annäherung an die Referenz erzielt werden konnte. Neben Prozessanpassungen im Hinblick auf eine optimale Abstimmung der Drehzahl und des Mahlspalts auf die Produkteigenschaften des Graukartons lag der Schlüssel zur Eigenschaftsverbesserung des trocken aufbereiteten Faserstoffs auch in einer Befeuchtung des vorzerkleinerten Produkts. Für die Versuche mit Graukarton wurde im Übrigen für alle Versuche auf bereits vorzerkleinerte Stanzreste (ca. 2x4 cm) aus der Weiterverarbeitung eines Kartonherstellers zurückgegriffen, so dass ein Einfluss der Vorzerkleinerung ausgeschlossen werden kann.

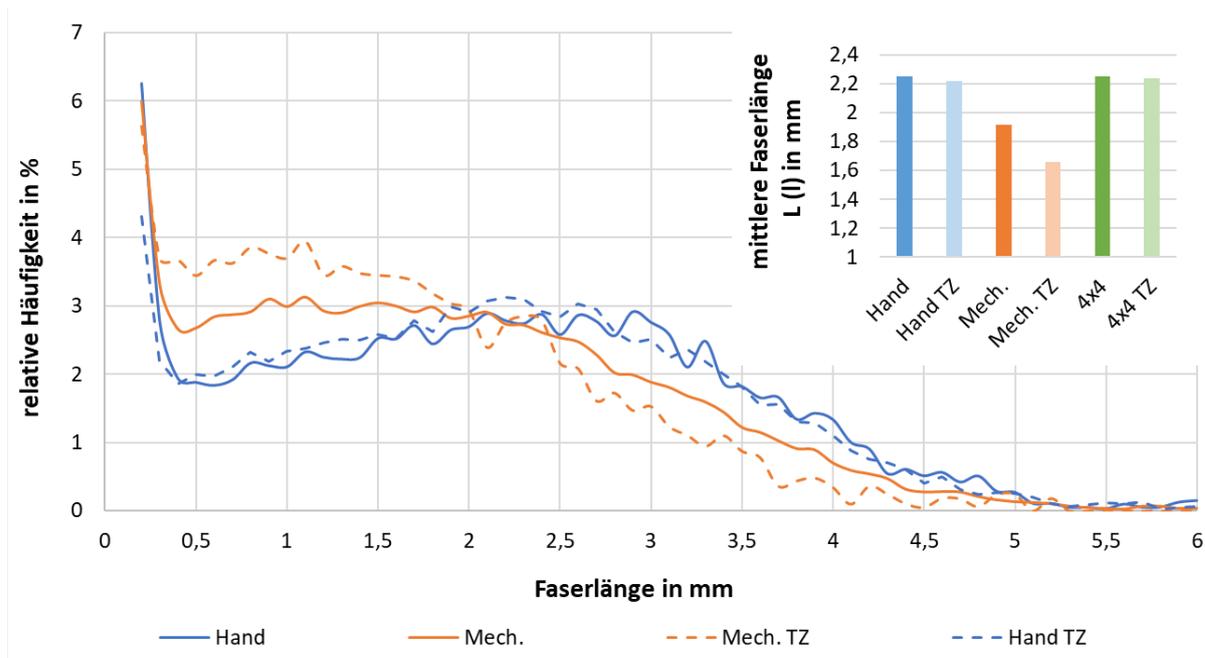


**Abbildung 15: WRV, Luftdurchlässigkeit und Festigkeitswert nach Süttinger (Produkt aus Tensile-Index und Weiterreißarbeit) in Abhängigkeit der spez. Oberfläche und der Eingangsfeuchte für GK**

Die Abbildung verdeutlicht noch einmal die sprunghafte Eigenschaftsverbesserung durch die zusätzliche Desintegration als Reaktivierungsmaßnahme. Das Wasserrückhaltevermögen (WRV) als Indikator für die Faserflexibilität, die Luftdurchlässigkeit als

Indikator für die Gefügefestigkeit, der Festigkeitswert nach Süttinger (Produkt aus dynamischer (Weiterreißarbeit) und statischer Festigkeit (Zugfestigkeit)) sowie die spezifische Oberfläche des Faserstoffs als Indikator für die verfügbare Bindungsfläche profitieren deutlich von der Nachbehandlung. Darüber hinaus zeigt sich, dass mit zunehmender Befeuchtung des vorzerkleinerten Graukartons am Eingang des Trockenzerfaserungsprozesses eine weitere Verbesserung erzielt wird, so dass letztlich das Niveau der Referenz erreicht werden kann.

Wie bereits erwähnt kommt es infolge der Trockenzerfaserung zu keiner signifikanten Faserkürzung und Faserschädigung. Dies gilt jedoch nur für den Fall einer schonenden Vorzerkleinerung. Eine zu kleine und stark schneidende sowie quetschende Vorzerkleinerung geht jedoch mit deutlichen Faserkürzungen und Schädigungen der Faserstruktur einher. Dies unterstreicht die Wichtigkeit der Vorzerkleinerung für den Trockenzerfaserungsprozess, weshalb bei der Versuchsreihe mit Zellstoff auch der Einfluss der Vorzerkleinerung im Detail untersucht wurde. Dafür wurde der Zellstoff schonend von Hand (ca. 4 cm Kantenlänge) und mechanisch mittels Schneidmühle (Lochsieb von 2 cm was in ca. ca. 0,5 bis 2 cm Kantenlänge resultiert) sowie mittels Querschneider (exakt auf 1x1, 2x2, 4x4 cm) vorzerkleinert.

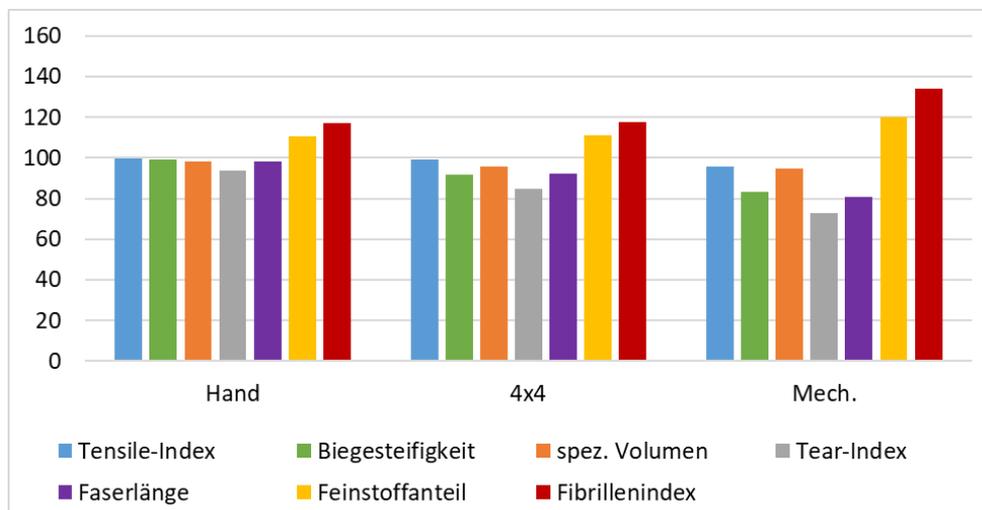


**Abbildung 16: Veränderung der mittleren Faserlänge und der Faserlängenverteilung durch Trockenzerfaserung in Abhängigkeit der Vorzerkleinerungsvariante (für KiSa)**

Im Ergebnis wird klar, dass eine zu klein gewählte Vorzerkleinerungsgröße (< 2 cm) eindeutig mit einer Faserkürzung einhergeht, während bei einer ausreichend großen Vorzerkleinerung (> 2cm, besser noch > 4 cm) keine Veränderung gegenüber einer schonenden Handvorzerkleinerung auftritt. Dies gilt sowohl vor als auch nach der Trockenzerfaserung. Demgegenüber kommt es bei einer zu kleinen mechanischen Vorzerkleinerung in Folge der Trockenzerfaserung zu einer weiteren Faserlängenabnahme. Grund hierfür sind Vorschädigungen wie Quetschungen sowie Schneideffekte im Zuge

der Vorzerkleinerung, was die Widerstandsfähigkeit der Faser bereits soweit herabsetzt, dass sie den mechanischen Beanspruchungen bei der anschließenden Trockenzerfaserung nicht unbeschadet standhalten kann, sodass es zu weiteren Faserschädigungen (Faserwandinrisse, Quetschungen, etc.) und Kürzungen kommt. Eine besonders schonende und ausreichend große Vorzerkleinerung führt demnach dazu, dass durch die Trockenzerfaserung keine Faserkürzung auftritt. Selbst im Zuge einer 40-minütigen Mahlbehandlung ist bei schonender Vorzerkleinerung kein signifikanter Faserlängenabfall zu verzeichnen.

Um das absolute Festigkeitspotenzial eines trocken aufbereiteten Faserstoffs zu bewerten, wurden die Zellstoffe einer Mahlbehandlung unterzogen (40 Minuten, Jokro-Labormühle). Dabei zeigte sich, dass die schonend vorzerkleinerten Varianten ein vergleichbares Eigenschafts- und Festigkeitsniveau erreichen, wie die Referenz. Die gilt zumindest für die untersuchten Zellstoffe. Bei vorgeschädigten Sekundärfaserstoffen hingegen kommt es bei der Trockenzerfaserung zu einer Schwächung der Faserstruktur, so dass es infolge der Mahlbehandlung zu negativen Begleiteffekten kommt. Verdeutlicht wird dies auch durch die mechanisch vorzerkleinerten Zellstoffe. Sobald die mechanische Vorzerkleinerung zu klein gewählt wird (< 4 cm), kommt es zu einem signifikanten Abfall der relevanten Festigkeiten, der umso größer ausfällt, je kleiner und schädigender die Vorzerkleinerung ausfällt. Bei einer besonders schonenden Vorzerkleinerung hingegen kann nahezu das Niveau der Referenz erreicht werden. Lediglich der Feinstoffanteil liegt etwas über dem Niveau der Referenz, was jedoch auch aufgrund der erhöhten Fibrillierung keine negativen Auswirkungen auf die dynamischen und statischen Festigkeiten hat.



**Abbildung 17: Übersicht des erzielbaren Eigenschaftsniveaus der trockenzerfaserten KiSa-Stoffe nach 40-minütiger Mahlung in Abhängigkeit der Vorzerkleinerungsvariante im Vergleich zur von Hand vorzerkleinerten nicht trockenzerfaserten Referenz (= 100)**

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass es bei der Trockenzerfaserung zu Faserformveränderungen kommt, die sich im Vergleich zum konventionellen Nassaufschluss in einem deutlich erhöhten Curl und Kink äußern. Neben rein mechanisch erzeugten Veränderungen sind die Ursachen im Wesentlichen auf Verhornungseffekte

(Trocknungskräuselung) und auf plastische Faserverformungen zurückzuführen. Diese Faserformveränderungen sind für Primärfaserstoffe deutlich stärker ausgeprägt als für Sekundärfaserstoffe, wobei die Effekte, die zu einer signifikanten Zunahme der Fasersteifigkeit führen, durch eine Befeuchtung sogar noch verstärkt werden können. Ohne geeignete Reaktivierungsmaßnahmen besitzen trocken aufbereitete Fasern einen sehr geringen Entwässerungswiderstand und bilden deutlich voluminösere Blätter mit signifikant geringeren Festigkeiten aus. Diesem Defizit steht jedoch die Tatsache gegenüber, dass durch Trockenzerfaserung nicht nur gewöhnliche Papierprodukte zerfasert werden können, sondern auch schwer zerfaserbare und hoch nassfeste Produkte, die mittels Nasszerfaserung nicht oder nur eingeschränkt aufbereitet werden können. Zudem können trocken aufbereitete Fasern durch eine zusätzliche Nassdesintegration und/oder eine nachfolgende Mahlung wieder flexibilisiert und fibrilliert werden, wodurch sich die Blatteigenschaften wieder denen der Referenz annähern.

Die bei der Trockenzerfaserung auftretenden Faserformveränderungen sind jedoch nicht für alle Papiereigenschaften von Nachteil. So führt die Erhöhung des Curl-Index zu einer Zunahme der Porosität und des spez. Volumens, wobei durch letzteres die Biegesteifigkeit verbessert werden kann. Darüber hinaus begünstigt die hohe Faserkräuselung die Entwicklung des Tear-Index (Weiterreißarbeit), so dass die Trockenzerfaserung grundsätzlich auch die Möglichkeit zur zielgerichteten Fasermodifizierung und Eigenschaftsverbesserung bietet.

Neben den Faserformveränderungen, die in Abhängigkeit vom Rohstoff und den Aufbereitungsrandbedingungen durch geeignete Reaktivierungsmaßnahmen mehr oder weniger rückgängig gemacht werden können, treten bei der Trockenzerfaserung jedoch auch noch sichtbare und nicht sichtbare Faserschädigungen auf. Ein nicht unerheblicher Teil der Faserschädigung geht dabei auf den Vorzerkleinerungsprozess zurück. Je schonender die Vorzerkleinerung stattfindet und umso geringer die Vorschädigung durch vorhergehende Recyclingzyklen ausfällt, desto weniger Faserschädigungen gehen mit dem Trockenzerfaserungsprozess einher und desto mehr können sich die relevanten Eigenschaften der Referenz wieder annähern. Sowohl für den betrachteten Graukarton als auch für die untersuchten Primärfaserstoffe konnte für die trockenzerfaserten Stoffe unter optimalen Randbedingungen das Festigkeitsniveau der jeweiligen Referenz erreicht werden. Während bei den Primärfaserstoffen hierfür eine Mahlbehandlung erforderlich war, reichte beim Graukarton eine zusätzliche Desintegration mit vorhergehender Befeuchtung.

### **3.5 Entwicklung von Sortierprozessen im Technikumsmaßstab und Kopplung mit der Zerfaserung zur Abtrennung von unerwünschten Fraktionen am Beispiel von ausgewählten, praxisrelevanten Produkten**

Da viele Papierprodukte und damit auch die schwer zerfaserbaren Produkte nicht nur Fasern enthalten, sondern auch noch papierfremde Bestandteile, haben wir uns auch intensiv mit der Thematik der Sortierung und Abtrennung beschäftigt.

An dieser Stelle muss vorweg klargestellt werden, dass es sich nicht bei allen papierfremden Bestandteilen per se um Stör- oder gar Schadstoffe handelt, die zwingend aussortiert werden müssen. Meistens handelt es sich eher um Störstoffe, wobei je nach den Anforderungen an das herzustellende Produkt der verbleibende Störstoffgehalt im aufbereiteten Faserstoff variieren kann. Als Beispiel seien hier Druckfarben genannt. Für die Herstellung grafischer Papiere ist eine Druckfarbenentfernung in der Regel erforderlich, bei Verpackungspapieren hingegen ist ein sogenanntes Deinking nicht von Nöten. Ein anderes Beispiel sind mineralische Füllstoffe und Streichpigmente. Dabei handelt es sich um Funktionsadditive, durch die Papiere bestimmte Eigenschaften erhalten. Ein hoher Füllstoffanteil wird zudem häufig aus wirtschaftlichen Gründen angestrebt, da Füllstoffe deutlich preiswerter als Fasern sind. Im Recyclingprozess müssen Füllstoffe daher nicht zwingend aussortiert werden. Je nach Produkthanforderungen ist jedoch für viele Produkte ein gewisser Füllstoffaustrag erforderlich, u.a. weil mit steigendem Füllstoffanteil im Produkt die Festigkeiten abnehmen. Aus dem Grund werden heutzutage tatsächlich viele Deinkinganlagen nicht nur zum Druckfarbenaustrag benötigt, sondern immer häufiger primär zum Füllstoffaustrag eingesetzt (die Füllstoffe werden durch die Luftbläschen im Deinkingprozess quasi ausgeschäumt). Dieser Prozess wird fachsprachlich als Entaschung bezeichnet, weil beim Verglühen von Papier mineralische Füllstoffe wie Calciumcarbonat als Asche zurückbleiben, während die organischen Fasern verglühen.

Sowohl mineralische Füllstoffe oder auch Druckfarben können als unkritische Bestandteile angesehen werden, da Papierfabriken in der Regel über eine Stoffaufbereitung verfügen, in der sie mittels Flotation oder Wäsche (Deinking) ausgetragen werden können. Auch andere papierfremde Bestandteile wie Folien, Metalle, Heftklammern, Sand, Glas, etc., die sich typischerweise im Altpapier befinden, werden in den Sortierprozessen der Stoffaufbereitung aussortiert. Demnach ist eine mit der Trockenzerfaserung kombinierte Sortierung und Abtrennung im Grunde nicht notwendig. Sofern durch die Trockenzerfaserung ein ausreichende Gefügetrennung erzielt wird, müssten die meisten im Papierprodukt enthaltenen störenden Bestandteile in der Stoffaufbereitung durch Sortierkörbe, Cleaner, Deinkinganlagen, etc. aussortiert werden. Da jedoch nicht jede Papierfabrik über eine umfangreiche Stoffaufbereitung mit entsprechenden Sortierstufen verfügt, haben wir uns in Phase I auch intensiv mit dem Thema Sortierung beschäftigt. Vor allem auch, weil es in den meisten Fällen sinnvoller ist die Störstoffe im trockenen Zustand direkt nach der Trockenzerfaserung auszusortieren, da die Rejekte so besser entsorgt werden können und das Prozesswasser weniger belastet wird.

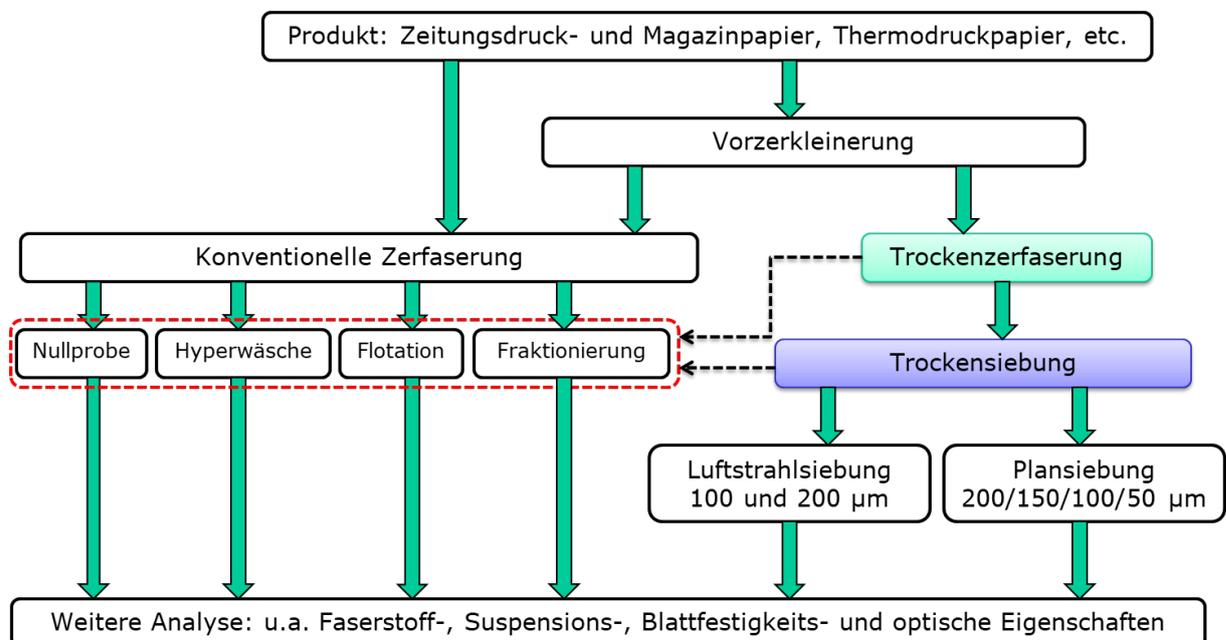
Aufgrund der großen Vielfalt an papierfremden Bestandteilen und möglichen Stör- und Schadstoffen haben wir uns bei der Entwicklung der Sortierprozesse auf einige ausgewählte Beispiele konzentriert, die eine besonders hohe Praxisrelevanz haben:

- Druckfarben (Zeitungsdruckpapier & Magazinpapier)
  - Ziel: Weißgradgewinn
- Mineralische Füllstoffe (Papiere mit verschiedenen Füllstoffanteilen (10-45 %))
  - Ziel: Entaschung
- Funktionale Striche und thermoreaktive Pigmente (Thermodruck- & Fotopapier)

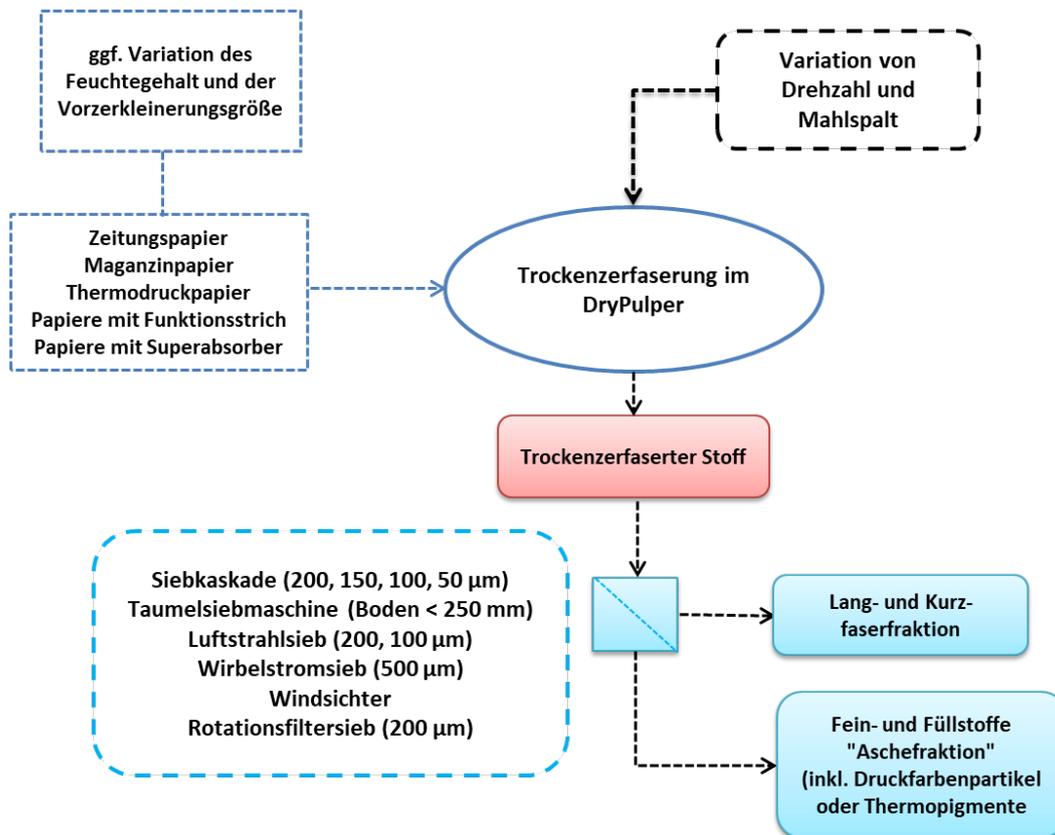
- Ziel: maximaler Störstoff- bzw. Schadstoffaustrag
- Funktionsadditive (Vliese mit Superabsorber (SAP, Super Absorbent Polymer))
  - Ziel: maximaler Störstoff- bzw. Schadstoffaustrag
- Folien (Kraftsäcke & Futtermittelsäcke mit Folienschicht zwischen den Lagen)
  - Ziel: Gefügetrennung ohne unnötige Foliengerkleinerung

Bei den genannten Beispielen handelt es sich um Störstoffe, die je nach Anwendungsfall abgetrennt werden können, aber nicht müssen und damit durchaus im Faserstoff verbleiben können (Druckfarben, Füllstoffe) und um Störstoffe, die unabhängig vom Anwendungsfall abgetrennt werden müssen, also um Schadstoffe (Thermopigmente, SAP), da ansonsten der Faserstoff nicht wieder eingesetzt werden darf. Für die Abtrennung dieser Stoffe eignen sich Verfahren, deren Abtrennprinzip auf unterschiedliche Partikelgrößen basieren. Bei Druckfarben, Füllstoffe, funktionalen Pigmenten oder sonstigen Funktionsadditiven handelt es sich in der Regel um Partikel, die im Vergleich zur Faserdimension in einer deutlich kleineren Größenverteilung vorliegen ( $\ll 0,2 \text{ mm}$ ). Dadurch eignen sich besonders Sieb-basierte Trennverfahren, mit denen die Feinstofffraktion von der Faserfraktion separiert werden kann. Als Faser wird dabei alles oberhalb von einer Länge von  $0,2 \text{ mm}$  definiert, alles darunter sind Faserbruchstücke, Fibrillen oder Feinstoffe.

Unabhängig davon, welche Partikel im Detail abgetrennt werden sollen, wurde der nachfolgende Verfahrensablauf für alle untersuchten Produkte angewendet. Ziel war es die Trennschärfe zwischen im Labor etablierten Nassverfahren und Trockensiebverfahren zu ermitteln und basierend auf den Erkenntnissen weitere Schritte für die Trockensortierung abzuleiten. Im Technikumsmaßstab wurden darüber hinaus weitere Siebverfahren wie Wirbelstromsiebe oder Taumelsiebmaschinen getestet.

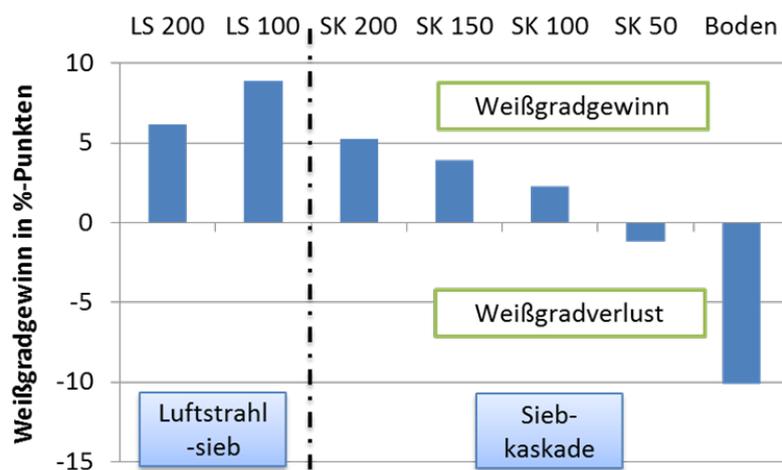


**Abbildung 18: Versuchsübersicht zur Abtrennung der Feinstofffraktion**



**Abbildung 19: Verfahrensablauf im Technikum zur Abtrennung der Feinfraktion mit verschiedenen Trocken-Siebverfahren**

Im Hinblick auf den erreichbaren Druckfarbenaustrag mittels Trockensortierung kann festgehalten werden, dass ein Weißgradgewinn nur für gestrichene Papiere (z.B. Magazinpapier) erzielt werden kann. Während bei nicht gestrichenen Papieren die Druckfarbenpartikel an der Faser anhaften und durch rein mechanische Verfahren wie die Trockenzerfaserung nicht abgelöst und damit auch nicht abgetrennt werden können, befinden sich die Druckpartikel bei gestrichenen Papieren auf der Strichschicht. Die Strichschicht wird während der Trockenzerfaserung aufgebrochen und somit von der Faser getrennt und in ein einheitliches Größenspektrum zerlegt, sodass die Strichpartikel inklusive der Druckfarben gut von der Faserfraktion abgetrennt werden können. Sowohl mittels Luftstrahlsiebung als auch mittels Siebkaskade kann so die Feinfraktion (Aschefraktion) ab-



**Abbildung 20: Weißgradgewinn durch Ascheaustrag mittels Luftstrahlsiebung (LS) und Siebkaskade (SK) für Magazinpapier**

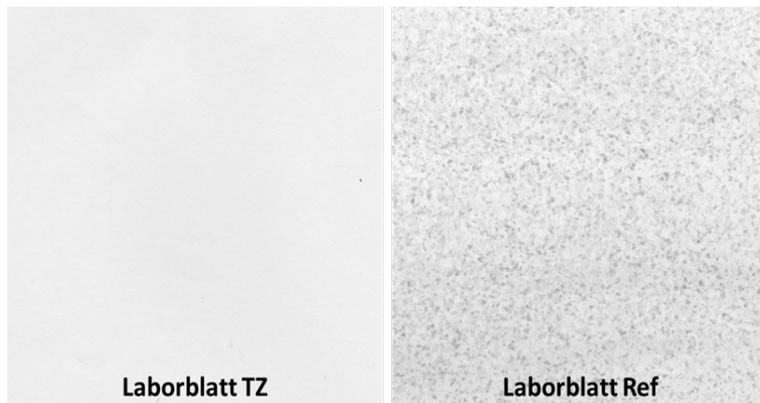
Abgetrennt werden können. Sowohl mittels Luftstrahlsiebung als auch mittels Siebkaskade kann so die Feinfraktion (Aschefraktion) ab-

getrennt und ein deutlicher Weißgradgewinn erzielt werden. Der Weißgradgewinn ist dabei umgekehrt proportional zum Aschegehalt, d.h. je mehr Asche bzw. Feinstoff ausge- tragen wird, desto höher ist der Weißgradgewinn.

Da die Ergebnisse zum Druckfarbenaustrag bei gestrichenen Papieren mit dem Ascheaustrag korrelieren wird klar, dass das Prinzip auch für die Entfernung von Füllstof- fen (Entaschung) angewendet werden kann. Untersuchungen mit verschiedenen Pro- dukten mit unterschiedlichen Ascheanteil haben dies bestätigt. Hierbei gilt es grundsätz- lich zu beachten, dass ein Zusammenhang zwischen Ascheaustrag und Faserverlust be- steht. Wird ein hoher Ascheaustrag angestrebt, dann muss mit entsprechend hohen Fa- serverlusten gerechnet werden, wobei es sich hierbei vorwiegend um Kurzfasern han- delt. Faserverluste treten jedoch im Nassprozess ebenso auf. Von daher kann die Enta- schung mittels Trockensortierung uneingeschränkt empfohlen werden, zumindest wenn der Ascheanteil nicht um mehr als 50 % reduziert werden soll.

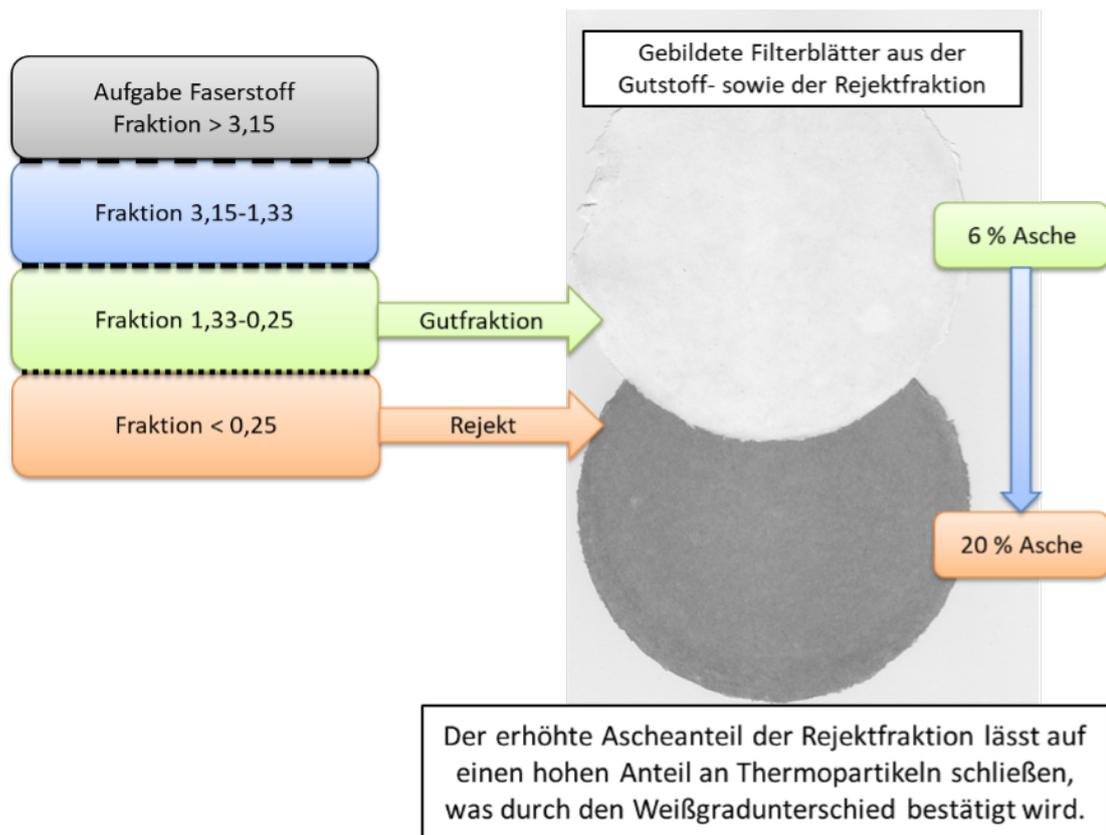
Darüber hinaus kann das Abtrennprinzip natürlich auch für andere Funktionsadditive wie Superabsorber oder thermoreaktive Strichpigmente angewandt werden. Allerdings handelt es sich hierbei um solche Stör- bzw. Schadstoffe, die eine Trennschärfe von mehr als 80 % erfordern. Dies

liegt an den besonderen Ei- genschaften. Thermoreak- tive Pigmente zum Beispiel werden vor allem für Kas- senrollen (Thermodruckpa- pier) eingesetzt. Auch wenn dafür mittlerweile keine krebserregenden Substan- zen wie Bisphenol A mehr eingesetzt werden, ist es für den Widereinsatz notwen-



**Abbildung 21: Vergleich des Dispergiereffekts beim Thermodruckpapier zwischen Trocken- und Nasszerfaserung**

dig, den Großteil der thermoreaktiven Pigmente zu entfernen. Anderenfalls würden die Thermodruckpartikel in der Trockenpartie reagieren, d.h. sich schwarz färben, und zu deutlich sichtbaren Schmutzpunkten oder einer Graufärbung im fertigen Papier führen. In Untersuchungen mittels Luftstrahlsiebung konnte nachgewiesen werden, dass durch ein Trockensortierverfahren prinzipiell ein ausreichender Austrag von Thermodruckpar- tikeln erzielt werden kann, sodass der verbleibende Faserstoff wiedereingesetzt werden kann. Dabei zeigte sich auch, dass die Trockenzerfaserung im Vergleich zur Nasszerfase- rung noch mit einem deutlichen Dispergiereffekt einhergeht. Dies bedeutet, dass die Partikel in einem kleineren und gleichmäßigeren Größenspektrum vorliegen. Dadurch wirken die gebildeten Blätter gleichmäßiger, da keine störenden Schmutzpunkte, d.h. mit bloßem Auge sichtbare Flecken, zu erkennen sind. Dieser Dispergiereffekt ist von großem Vorteil, da der zulässige Restgehalt von Thermodruckpartikeln von 10-20 % im dispergierten Zustand die optischen Eigenschaften weit weniger negativ beeinflusst.

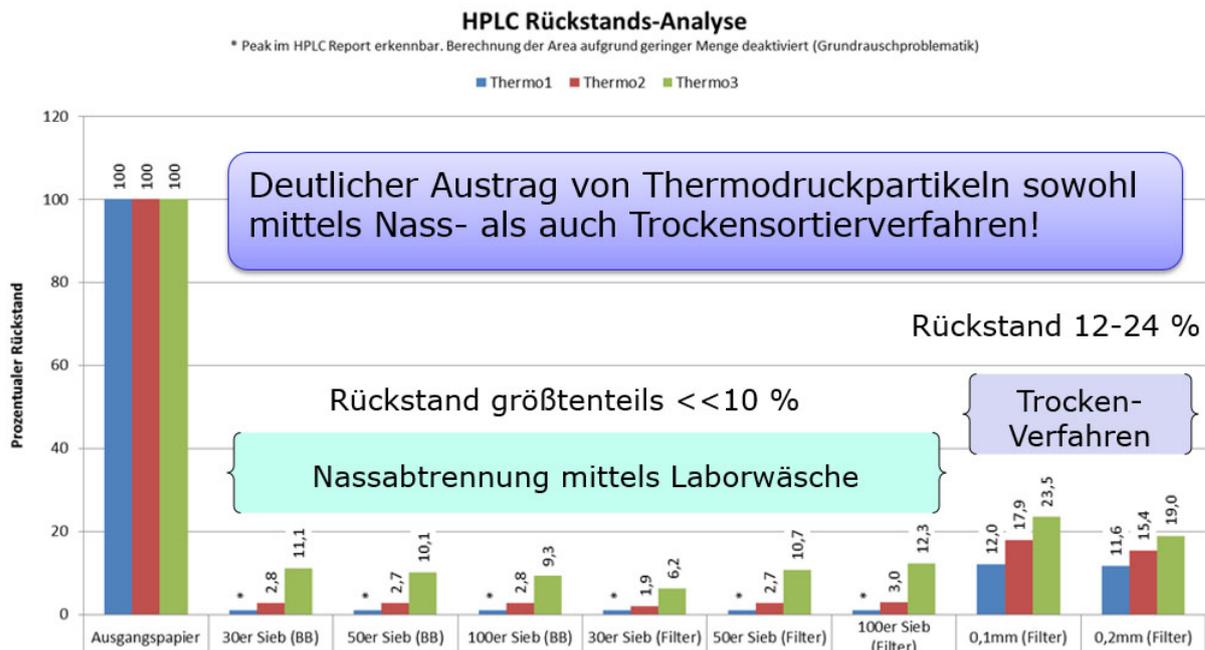


**Abbildung 22: Austrag von Thermopartikel mittels Taumelsieb**

Wenngleich Luftstrahlsiebe auch industriell verfügbar sind, wurden für die industrielle Umsetzung der vorliegenden Trennaufgabe noch weitere Sortierverfahren im Technikum getestet. Dafür wurde der Faserstoff nach der Trockenzerfaserung u.a. mit Wirbelstromsieben, Windsichtern und Taumelsiebmaschinen sortiert (s.a. Abb. 32 Anhang). Mit den Verfahren war es möglich zwischen 50-80 % der Thermopartikel abzutrennen. Die Trennschärfe der Laborluftstrahlsiebung von  $>80\%$  konnte jedoch nicht erreicht werden. Entsprechend wurde bei den weiteren Entwicklungsarbeiten der Fokus insbesondere auch auf die optimierte Einbindung der Sortierstufen in den Trockenzerfaserungsprozess gelegt. Es gilt nämlich der Grundsatz, dass die beste Trennschärfe in dem Moment erzielt werden kann, wenn das Papiergefüge vollständig in seine Einzelkomponenten zerlegt vorliegt. Dies ist unmittelbar nach der Trockenzerfaserung der Fall.

Ergebnis dieser Entwicklungsarbeiten ist ein Trennsieb, welches direkt im Luftstrom am Ausgang der Trockenzerfaserung angeordnet wird. Das Sieb hält die Faserfraktion zurück, während die Feinfraktion passieren kann und über einen Zyklon und einen nachgeschalteten Filter abgetrennt wird. Abbildung 24 zeigt die Versuchsanordnung, mit der die Trennschärfe bei verschiedenen Aufgabemengen und Siebdurchmessern untersucht werden konnte. Dabei zeigte sich, dass größere Maschenweiten ( $>250\ \mu\text{m}$ ) zwar einen fast vollständigen Austrag der Thermopartikel ermöglichen, aber auch mit einem hohen Gesamtstoffverlust von  $>60\%$  einhergehen. Zufriedenstellende Ergebnisse konnten mit einer Maschenweite von  $200\ \mu\text{m}$  erzielt werden. Bei einem Gesamtstoffverlust von  $40-50\%$  (Feinstoffe inkl. Thermopartikel sowie Kurzfasern) konnten hier mehr

als 80 % der Thermodruckpartikel abgetrennt werden. Der Nachweis des Rückstands der Thermodruckpartikel erfolgte mittels HPLC Rückstands-Analyse (siehe Abbildung 23).



**Abbildung 23: HPLC Analyse zur Ermittlung des Rückstands der Thermodruckpartikel**

Für den Übergang des skizzierten statischen Trennprinzips zu einer kontinuierlichen Prozessführung wird der sich auf dem Sieb ablegende Faserstoff einfach durch eine Vorrichtung abgesaugt. Zur vollständigen Absaugung des Faserstoffs wird das Sieb in Rotation versetzt. Saugleistung der Absaugvorrichtung, Rotationsgeschwindigkeit des Siebs und dessen Maschenweite sowie die Durchsatzmenge bestimmen dabei die Trennschärfe und die Ausbeute. Eine weitere Variante zur großtechnischen Umsetzung, die im Technikum der Fa. Dan-Web Machinery am IFTH in Roubaix erfolgreich getestet werden konnte (siehe Abbildung 33 im Anhang), besteht in einer kontinuierlichen Vlieslegung, wobei in dem Fall die Abtrennung der Feinfraktion mittels eines unter dem Sieb positionierten statischen Absaugkastens realisiert wird. Darüber hinaus eröffnen sich durch die Vlieslegung auch zahlreiche Möglichkeiten zur Entwicklung neuer faserbasierter Produkte.

Die bei der Thermodruckpartikelabtrennung angewandten Verfahren konnten auch erfolgreich für die Abtrennung von Superabsorbentpolymeren bei verschiedenen Hygienevliesen angewandt werden. Im Gegensatz zu anderen Störpartikeln, die grundsätzlich auch im Nassprozess abgeschieden werden können, ist bei Superabsorbentpolymeren aufgrund der Wasseraufnahmefähigkeit und der Gelbildung zwingend ein Trockenprozess erforderlich. Für die untersuchten Hygienevliese konnte eine Trennschärfe von > 97 % erzielt werden. Diese geringe Restmenge wäre für eine Weiterverarbeitung in einem Nassprozess zur erneuten Papierherstellung geeignet. Grundsätzlich ist es jedoch bei der Hygienevliesherstellung nicht zulässig eigenen Ausschuss für die Produktion einzusetzen. Dementsprechend sind andere Verwertungswege zu finden. An diesem Beispiel kann sehr gut die Sinnhaftigkeit der anvisierten Rohstoffplattform demonstriert werden, da die Tro-

ckenzerfaserung mit kombinierten Störstoffabtrennung grundsätzlich einen Wiedereinsatz des Hygienevliesausschusses ermöglichen würde, dafür jedoch zunächst ein Abnehmer gefunden werden muss.

Alle Nicht-Faserbestandteile, die in Partikelform vorliegen und deutlich kleinere Abmessungen als eine Faser haben, können somit grundsätzlich mittels Trockenverfahren direkt im Anschluss an die Zerfaserung abgetrennt werden. Für größere Störstoffe hingegen sollte entweder auf die Sortierprozesse der konventionellen Stoffaufbereitung zurückgegriffen werden, oder eine Sortierung vor der Trockenzerfaserung erfolgen. Sortierprozesse vor der Trockenzerfaserung zur Abscheidung von papierfremden Bestandteilen wie Metall, Glas, Folie, Sand, etc. gehören zum Stand der Technik und sind für das vorliegende Projekt von untergeordneter Bedeutung und wurden daher nicht weiter betrachtet (mit Ausnahme eines Metallabscheiders direkt vor dem DryPulper).



**Abbildung 24: Versuchsanordnung zur Feinstoffabtrennung nach der Trockenzerfaserung**

Für eine möglichst effiziente Abtrennung von Störstoffen im Nassprozess ist es jedoch erforderlich, dass neben der unbedingt notwendigen Gefügetrennung die Störstoffe im Trockenzerfaserungsprozess nicht unnötig zerkleinert werden. Versuche mit verschiedenen Folienkaschierten Papieren oder Kraftsackpapieren, die 1-2 Folienschichten enthalten, haben erfreulicherweise gezeigt, dass insbesondere flexible Folienbestandteile nicht im Trockenzerfaserungsprozess zerkleinert, sondern lediglich deformiert werden. Dadurch, dass die Einzelfasern von der Folie getrennt vorliegen, ist eine Abtrennung im Nassprozess relativ leicht möglich. Untersuchungen mit anderen folienbasierten Papierprodukten haben den beschriebenen Effekt bestätigt.

Bei den bisher untersuchten Papierprodukten konnte mittels Trockenzerfaserung in den allermeisten Fällen eine hervorragende Gefügetrennung erzielt werden. Bis auf Druckfarben oder Nassfestmittel, die direkt auf der Faseroberfläche gebunden sind, liegen somit alle Inhaltsstoffe bzw. Teilfraktionen getrennt voneinander vor. Im Hinblick auf eine Trockensortierung oder eine Abtrennung im Nassprozess ist dies auch ein großer Vorteil der Trockenaufbereitung. So können zum Beispiel störende oder gar schädliche Partikel wie thermoreaktive Pigmente durch Abtrennung der Feinfraktion aussortiert werden. Demgegenüber ist die Gefügetrennung im Nassprozess weit weniger vollständig bzw. bedarf sehr langer Pulpzeiten. Dadurch können Störstoffe im Nassprozess zum Teil schlechter abgetrennt werden. Darüber hinaus erschwert sich die Rejektbehandlung aufgrund des hohen Wassergehalts.

Bei der Aussortierung im Trockenprozess hingegen ergeben sich deutlich bessere Verwertungs- oder Entsorgungsmöglichkeiten für die entsprechenden Rejekte, da sie keinen Wasseranteil aufweisen und so eine Entsorgung deutlich preiswerter ist. Dadurch, dass die Rejekte auch nicht getrocknet werden müssen, ergeben sich grundsätzlich auch noch andere Verwertungsmöglichkeiten, welche im Detail jedoch noch untersucht werden müssen. Durch die Trockensortierung entfällt auch die ansonsten sehr aufwendige Abwasseraufbereitung, was beispielsweise bei der Ausschussaufbereitung von Thermo-Druckpapier ein wichtiger Aspekt ist. Durch die trockene Sortierung wird eine zusätzliche Belastung des Abwassers mit Thermo-Druckpartikeln verhindert und das trockene Rejekt kann wesentlich umweltschonender und kostengünstiger entsorgt und ggf. durch den Entsorger noch stofflich verwertet werden.

Je nachdem um welche Störstofffraktion es sich handelt, gibt es für Papierreststoffe bereits zahlreiche bekannte Verwertungsmöglichkeiten. Mineralische Füllstoffe und Druckfarben werden zum Beispiel bei der Ziegelbrennerei, der Zementherstellung oder im Straßenbau eingesetzt. Darüber hinaus gibt es Verwertungsmöglichkeiten bei der Herstellung von faserbasierten Kunststoffprodukten. Im Bereich der sogenannten WPCs (Wood Plastic Composites) gibt es bereits Entwicklungen hin zum Einsatz von Papierfasern anstelle von Holzpartikeln. Dieser Prozess ist relativ unempfindlich gegenüber bestimmten Störstoffen, sodass diese nicht abgetrennt werden müssen. Dazu zählen zum Beispiel Silikonbeschichtungen von Trennpapieren, Klebeetiketten oder PE-gestrichenen Papiere, da für die WPC-Herstellung bereits PE-/PP-Rezyklate eingesetzt werden.

Nassfestmittel sowie andere chemische Additive oder Druckfarben (zumindest jene, die sich direkt auf der Faser befinden) hingegen sind auch nach der Trockenzerfaserung an der Faser und können nicht abgetrennt werden. Inwieweit solche Bestandteile noch kritisch für die erneute Papierherstellung sind, soll u.a. in Phase II noch ermittelt werden. Was wir an dieser Stelle jedoch bereits sagen können, ist das zum Beispiel nassfester Ausschuss problemlos durch Trockenzerfaserung in Einzelfasern zerlegt werden kann und die Trockenfasern für die erneute Papierherstellung verwendet werden können. Das sich noch auf der Trockenfaser befindliche Nassfestmittel hat demnach keinen negativen Einfluss auf die Papiereigenschaften, sofern die Trockenfasern zu Beginn der konventio-

nellen Prozesskette zugegeben werden (also im Pulper) und solange der Trockenfaseranteil unter 20 % liegt. Diese positiven Erkenntnisse stammen aus einem Langzeitversuch zum Einsatz von Trockenfasern bei einem Filterpapierhersteller.

Wie bereits eingangs des Kapitels erwähnt wurden in Phase I nur ausgewählte Produkte betrachtet. In Phase II sollen weitere Produkte genauer analysiert und bewertet werden. Dabei gilt es die entwickelten Sortierprozesse ggf. zu erweitern, wobei stets auch die Wirtschaftlichkeit zu betrachten ist. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die erzielbare Ausbeute als auch für die erforderliche Rejektbehandlung (Fallen hierfür Entsorgungskosten an? Kann noch eine stoffliche Verwertung erfolgen?). Hierfür ist es erforderlich die betreffenden Produkte im jeweils konkreten Einzelfall zu betrachten. Dies findet idealerweise in Zusammenarbeit mit der betreffenden Papierfabrik statt, wo der Ausschuss anfällt, oder wo das betreffende Produkt bzw. die daraus hergestellten Trockenfasern wieder eingesetzt werden sollen. Da bestimmte Produkte zu viele Störstoffe enthalten können oder eine Sortierung zu aufwendig wäre, sollen auch alternative Einsatzmöglichkeiten außerhalb der Papierindustrie untersucht und betrachtet werden. Auf Basis der Ergebnisse soll dann u.a. eine Kategorisierung der schwer zerfaserbaren Produkte erfolgen:

- Produkte, die ohne Sortierung uneingeschränkt eingesetzt werden können,
- Produkte, die eingeschränkt eingesetzt werden können (nur anteilmäßige Dosiermengen, nur für Verpackungen oder untere Qualitäten),
- Produkte, die vor dem Wiedereinsatz eine Sortierung erfordern,
- Produkte, die nicht für die Papierherstellung, aber für andere Bereiche, geeignet sind,
- Produkte, die nicht mehr wirtschaftlich u. nachhaltig sinnvoll genutzt werden können.

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

Mit dem erfolgreichen Aufbau einer Technikumsversuchsanlage zur Trockenzerfaserung konnte durch entsprechende Tests der Nachweis erbracht werden, dass bisher nicht nutzbare Papier- und Kartonprodukte so aufbereitet werden können, dass sie hochwertiger Faserstoff problemlos für die erneute Papierherstellung wiedereingesetzt werden können. Der Nachweis erfolgte dabei nicht nur anhand von Technikumsversuchen mit relevanten Produkten von Papierfabriken, sondern auch durch einen mehrwöchigen Testbetrieb mit der mobilen Zerfaserungsanlage in verschiedenen Papierfabriken.

Ausgehend von diesen positiven Ergebnissen bietet die Aufbereitungstechnologie daher konkret die folgenden ökologischen, technologischen und ökonomischen Vorteile:

- 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.

- Erweiterung der Altpapierrücklauf- und Einsatzquote, da durch die Beseitigung des Aufbereitungsdefizits nun auch schwer zerfaserbare Produkte an der stofflichen Verwertung teilnehmen 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.
- Grundlage für die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, die auf die Aufbereitung und Bereitstellung von Faserstoffen aus bisher nicht nutzbaren Rohstoffquellen abzielen. Insbesondere sei hier auf die eigenen Ambitionen zum Aufbau einer Rohstoffplattform verwiesen, welche in der anschließenden Phase II entwickelt und anschließend als ein Geschäftsmodell der TBP Future dienen soll.
- 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 Rohstoffversorgungssicherheit der Papierindustrie oder anderer Altpapier bzw. Faserstoff verarbeitender Industriezweige.

Alleine in Deutschland beläuft sich das aktuell theoretisch ungenutzte Altpapierpotenzial auf ca. 2,16 Mio t/a<sup>2</sup>. Diese Menge stellt zweifelsfrei 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. Vor dem Hintergrund der aktuellen Altpapier-

---

<sup>2</sup> Siehe Anhang „Betrachtung der Mengen an bisher nicht nutzbaren Faserquellen“

knappheit stellt dies auch einen wertvollen Beitrag zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit mit Rohstoffen dar. 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. 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, der im Zuge der aktuellen Situation noch weitaus höher angesetzt werden kann). In Gesamteuropa dürfte das Potenzial an ungenutzten Faserquellen wegen der niedrigeren Altpapiererfassungsquoten noch deutlich größer sein.

Auch wenn die absolute Menge des bisher ungenutzten Altpapierpotenzials in den letzten Jahren tatsächlich etwas gesunken ist, darf nicht davon ausgegangen werden, dass sich der Trend soweit fortsetzt, dass das ungenutzte Altpapierpotenzial in naher Zukunft keine Umweltrelevanz mehr aufweist. Zum einen besteht in der Branche Einigkeit darüber, dass die Altpapiereinsatz- und Rücklaufquoten nicht mehr deutlich über 80 % gesteigert werden können. Und zum anderen ist ein klarer Trend zu immer nassfesteren und anderweitig schwer zerfaserbaren Qualitäten zu verzeichnen, was nicht zuletzt auf die Notwendigkeit der Substitution von Plastikprodukten zurückzuführen ist. Vor diesem Hintergrund ist sogar davon auszugehen, dass die Menge an schwer zerfaserbaren und nicht nutzbaren Faserquellen tendenziell eher wieder steigen wird. Es gilt auch zu bedenken, dass Produkte, die heute noch gerade so mit dem Nassprozess aufbereitet werden können, in naher Zukunft aufgrund steigender Anforderungen an die Nassfestigkeit nicht mehr qualitativ und wirtschaftlich sinnvoll aufbereitet werden können. Als ein konkretes Beispiel sei hier die Ausschussaufbereitung bei einem Tissuehersteller genannt. Dieser geht davon aus, dass die Nassfestigkeit aufgrund der Kundenanforderungen schon bald so weit ansteigen wird, dass der eigene Ausschuss im konventionellen Ausschusspulper dann nicht mehr ausreichend aufgelöst werden kann, weshalb aktuell unsere in Phase I entwickelte Trockenaufbereitungstechnologie geprüft 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.

Die ökologischen, technologischen und ökonomischen Vorteile der Trockenaufbereitungstechnologie fangen grundsätzlich dort an, wo der herkömmliche Nassprozess an seine Grenzen gelangt. Dies ist bereits in vielen Papierfabriken der Fall, wie das Beispiel des Tissueherstellers verdeutlicht. Ein wichtiger Einsatzbereich der Trockenaufbereitungstechnologie ist demnach die Ausschussaufbereitung. 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 Aggregaten, weil trotz der langen Pulpzeiten häufig noch Agglomerate, d. h. nicht in Einzelfasern zerlegte Segmente (sogenannte Stippen), vorhanden sind. Dies führt letztlich zu einem sehr hohen Energiebedarf für die Ausschussbehandlung im Nassprozess von ca. 250 kWh/t und mehr.

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

---

<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>

auf die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Aufbereitungsprozesses aus, da eine Optimale Auslastung der Prozesse nicht immer gegeben ist / [4], [5], [6], [7], [8], [9]/.

Einen grundsätzlichen weiteren Nachteil bei der Nassaufbereitung von schwer zerfaserbaren Produkten sehen wir im erforderlichen Platzbedarf (relativ großer Pulper plus nachgeschaltete Entstipper sowie notwendige Peripherie) und den hohen Betriebskosten, da neben den langen Pulpzeiten und den erforderlichen hohen Temperaturen häufig auch noch Chemikalien eingesetzt werden. Unser Trockenaufbereitungsprozess ist hingegen, wie später noch gezeigt wird, deutlich flexibler was die Aufstellung anbelangt. Durch den Verzicht auf Wasser ist das zentrale Element unseres Aufbereitungsprozesses, der Dry Pulper, deutlich kleiner als ein konventioneller Pulper und auf nachgeschaltete Entstipper kann verzichtet werden. Es wird zur Produkttrennung vom Luftstrom lediglich ein Zyklon- und Filtersystem benötigt und ggf. ein Verdichter zur Komprimierung und Zwischenlagerung des trocken aufbereiteten Faserstoffs, sofern dieser nicht unmittelbar in den Nassprozess überführt werden soll. Ferner können die Teilkomponenten unseres Trockenaufbereitungsprozesses sehr flexibel miteinander verbunden werden, sodass in Kombination mit dem Wasserverzicht ein sehr hoher Freiheitsgrad hinsichtlich der Aufstellung besteht. Im Gegensatz zu den langen Pulpzeiten bei der Ausschussaufbereitung im Nassprozess von 1-2 h beträgt die Verweilzeit im DryPulper nur wenige Sekunden, wodurch der spez. Energieeinsatz des Trockenaufbereitungsprozesses ca. 100 - 150 kWh/t unterhalb des Nassprozesses liegt. Die Werte zum Energiebedarf wurden in einer Papierfabrik ermittelt, die den nassfesten Ausschuss sowohl konventionell im Ausschusspulper aufbereitet als auch bereits mittels unserer Trockenzerfaserungstechnologie Versuche durchgeführt hat (mehrwöchiger Testbetrieb mit unserer mobilen Anlage; Nassprozess: 250 kWh/t vs. Trockenprozesse: 150 kWh/t). Hinzu kommen in vielen Fällen noch zusätzliche Kosten für die Lösechemie.

Zusammenfassend sehen wir unseren Trockenaufbereitungsprozess als die deutlich flexiblere und universellere Variante an. Während beispielsweise der Tork PaperCircle nur mit gebrauchten Papierhandtüchern von Essity funktioniert, kann mittels Trockenzerfaserung nahezu jedes nassfeste Papierprodukt auch in beliebigen Mischungen ohne Chemie in nur wenigen Sekunden schonend in Einzelfasern zerlegt werden. Insbesondere auch vor dem Hintergrund das ständig neue nassfeste und schwer zerfaserbare Produkte auf den Markt kommen, ist diese Flexibilität ein weiterer entscheidender Pluspunkt für die Trockenzerfaserung. Darüber hinaus bietet die Trockenzerfaserung noch einen weiteren großen Vorteil, der bisher unerwähnt geblieben ist: Der Trockenaufbereitungsprozess kann innerhalb weniger Sekunden hoch- und runtergefahren werden, sodass der Prozess aus einem Zwischenspeicher heraus immer am idealen und effizientesten Arbeitspunkt betrieben werden kann. Darüber hinaus kann der Trockenaufbereitungsprozess durch das sekundenschnelle hoch- und runterfahren sehr gut in Energielastmanagement-Systeme eingebunden werden.

Demnach existieren also, zum Teil bereits seit vielen Jahren, verschiedene Konzepte zur Nassaufbereitung von schwer zerfaserbaren Produkten. Wenngleich diese Konzepte für den jeweiligen Einzelfall recht gut funktionieren, sieht die Papierindustrie dennoch Bedarf an weiteren Aufbereitungskonzepten für solche Produkte. Nicht ohne Grund haben in den zurückliegenden Jahren mehr als zwei Dutzend Papierfabriken Trockenzerfaserungsversuche mit ihren Produkten bei uns durchgeführt. Und im letzten Jahr konnten wir auch dank der Unterstützung durch die DBU die Trockenzerfaserung in der Phase I soweit weiterentwickeln, dass wir mittlerweile über mobile Testanlagen verfügen, mit denen Interessenten die vielfältigen Möglichkeiten der Trockenzerfaserung im eigenen Produktionsbetrieb ausgiebig testen können. Die Resonanz ist dabei äußerst positiv und wir stellen in Gesprächen mit interessierten Papierfabriken immer wieder fest, dass gerade die nassfesten Produkte erhebliche Probleme im konventionellen Nassprozess bereiten. Und insbesondere der Trend zu immer nassfesteren Qualitäten bereitet vielen in der Branche Sorgen, weshalb alternative Aufbereitungstechnologien wie die Trockenzerfaserung derzeit eine hohe Beachtung und Anerkennung finden. Dementsprechend besteht nachweislich ein Aufbereitungsdefizit für nassfeste Papiere und anderweitig schwer zerfaserbare Produkte, was mitunter bereits heute zu einer Limitierung bei der Produktentwicklung hinsichtlich der gewünschten Nassfestigkeit oder anderer für den Nassaufbereitungsprozess kritischer Eigenschaften führt, wobei natürlich manche Papierfabriken stärker betroffen sind als andere.

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 mit nur geringen Ausschussmengen.
- 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.

Dort, wo eine Ausschussaufbereitung bisher aufgrund der geringen Mengen nicht möglich war, bietet sich die Trockenzerfaserung insbesondere daher an, weil der Platzbedarf und die Investitionskosten relativ gering ausfallen. Die Implementierung in die bestehende Prozesskette ist aufgrund der geringen Baugröße und der flexiblen Verbindung der Teilkomponenten untereinander zudem auch in bestehenden Papierfabriken mit

wenig Platz möglich. Allen voran ist eine Ausschussaufbereitung mit der Trockenzerfaserung schon ab einem Durchsatz von 100 kg/h wirtschaftlich tragfähig. Hinzu kommt neben der Ausschussaufbereitung der überaus wichtige Aspekt, dass durch die Trockenaufbereitung nun die Möglichkeit besteht auch alternative und preiswertere Rohstoffe einzusetzen. Hierzu zählt beispielsweise schwer zerfaserbarer Ausschuss von anderen Papierfabriken, der im günstigsten Fall als preiswerter Zellstoffersatz verwendet werden kann. In der ersten Projektphase des Forschungsvorhabens konnte die soeben skizzierte Einsatzmöglichkeit und deren Wirtschaftlichkeit bereits in einer längeren Testphase mit der mobilen Zerfaserungsanlage nachgewiesen werden. Als Quelle diene hierbei der sortenreine nassfeste Ausschuss einer Filterpapierfabrik A, der in einer anderen Filterpapierfabrik B durch die Trockenzerfaserung wieder aufbereitet und als Zellstoffersatz eingesetzt werden konnte. Auch der zuvor nicht wieder einsetzbare nassfeste Ausschuss der Filterpapierfabrik B konnte so wieder stofflich genutzt werden.

In einem kleinen Rahmen stellt die skizzierte Symbiose zwischen der Filterpapierfabrik A und der Filterpapierfabrik B damit den Grundgedanken der anvisierten Rohstoffplattform dar. Es konnte eine Quelle ermittelt werden (Filterpapierfabrik A), die am Anfallort nicht mehr stofflich genutzt werden kann, dafür aber nach der Trockenzerfaserung sehr wohl den gesuchten Qualitätskriterien der Filterpapierfabrik B (Senke) entspricht.

Auch wenn es sich hierbei um ein statisches und recht triviales Beispiel handelt, verdeutlicht es das grundsätzliche Potenzial der Rohstoffplattform. Der Haupteinsatzbereich der Trockenaufbereitungstechnologie im Zusammenhang mit der Rohstoffplattform ist daher bei weitem nicht nur die Aufbereitung von eigenem Produktionsausschuss, sondern von dem bisher nicht genutzten Altpapierpotenzial im Umfang von aktuell mindestens 1 Mio. t/a, um die darin enthaltenen wertvollen Faserstoffe einer erneuten Verwertung zuzuführen. Die Trockenaufbereitungstechnologie ist daher auch für Papierfabriken relevant, die keinen eigenen Ausschuss aufbereiten, wenngleich sich durch die Möglichkeit der Nutzung preiswerter Rohstoffalternativen über die Rohstoffplattform in Kombination mit einer verbesserten Ausschussaufbereitung die größten Synergieeffekte ergeben. Problem hierbei ist allerdings, dass viele der Anfallstellen (Quellen) aktuell noch unbekannt oder die entsprechenden Mengen so gering sind, dass sich eine wirtschaftliche Aufbereitung auch durch die Trockenzerfaserung nicht rechnet. Hinzu kommt, dass die Qualität des aus diesen bisher ungenutzten Quellen resultierenden trocken aufbereiteten Faserstoffs und damit die potenziellen Einsatzmöglichkeiten noch untersucht werden müssen. Bei mehr als 3.000 Papiersorten allein in Deutschland wird die Herausforderung und Komplexität dieser Aufgabe schnell deutlich und es wird klar, dass in Phase I nur ausgewählte Produkte intensiver untersucht werden konnten. Dabei wurden zwar bereits ausgewählte Funktionschemikalien wie Nassfestmittel, mineralische Bestandteile und Füllstoffe, Druckfarben sowie Funktionsstriche (funktionalisierte Striche) betrachtet. Aber durch die erhebliche Vielzahl an möglichen papierfremden Bestandteilen,

funktionalen Strichen oder diversen Beschichtungen wird auch klar, dass im Zweifel jedes Produkt im Einzelfall betrachtet und untersucht werden muss. Da dies Zeit in Anspruch nimmt und ständig neue Produkte auf den Markt kommen, ist es auch konsequenterweise angedacht, dass die Rohstoffplattform sich dynamisch entwickelt und neue Produkte nach und nach hinzukommen.

Damit begründet sich auch ein wesentlicher Teil des noch in Phase II ausstehenden hohen FuE-Bedarfs des Projekts, der ohne die Unterstützung der DBU nicht durchführbar ist, auch weil am Ende das Risiko besteht, dass für viele bisher ungenutzte Produkte auch nach Trockenzerfaserung und Trockensortierung keine adäquaten und/oder wirtschaftlich sinnvollen Einsatzmöglichkeiten gefunden werden können. Dies würde letztlich auch das vermutet hohe Mengenpotenzial der mittels Rohstoffplattform zu vermittelnden Faserquellen reduzieren.

### **3.7 Darstellung der geplanten Maßnahmen zur Fortführung des Projekts (Phase II) sowie geplanter Veröffentlichungen der Projektergebnisse**

Mit der erfolgreichen Entwicklung und dem Aufbau einer Technikumsversuchanlage im Industriemaßstab konnte in Phase I die technologische Basis und Grundvoraussetzung für die Rohstoffplattform gelegt werden. Wesentliche Kernziele der Phase II sind die Lokalisierung der Quellen, die Untersuchung der erforderlichen Aufbereitungsschritte (Trockenzerfaserung, ggf. vor- und nachgeschaltete Sortierung) und die Ableitung geeigneter produktspezifischer Verwertungsmöglichkeiten. Ob über die Plattform dann entweder der bereits trocken aufbereitete Faserstoff oder der unbehandelte Rohstoff gehandelt wird ist unerheblich und liegt im Ermessen des Anbieters bzw. des Abnehmers. Es sollte jedoch klar sein, dass für bereits aufbereitete und ggf. vorsortierte Faserstoffe höhere Preise erzielt werden als für unbehandelte Qualitäten. Spezielle Sorten, deren Störstoffe eine Sortierung erfordern, können zudem am besten wieder stofflich nutzbar gemacht werden, indem sie in einem spezialisierten Aufbereitungszentrum aufbereitet werden.

Ein solches Aufbereitungszentrum ist neben der Rohstoffplattform das zentrale Element der Verwertungsstrategie und ein Teil des späteren Geschäftsmodells der TBP Future. Für die erfolgreiche Umsetzung werden für die beiden zentralen Elemente jedoch die Quellen benötigt, was letztlich eine genaue Kenntnis über die Anfallstellen voraussetzt. Zu diesem Zweck ist eine Kooperation mit einem Recyclingunternehmen (ROHPROG) angedacht.

Durch die Zusammenarbeit mit dem Recyclingunternehmen soll zunächst eruiert werden, in welchen Bereichen außerhalb der gängigen Sammelstellen überhaupt größere Mengen anfallen. Dafür muss zunächst genau aufgeschlüsselt werden, welche Chargen überhaupt auf den Recyclinghof ankommen bzw. verfügbar wären. Aus unseren Gesprächen mit ROHPROG ist bekannt, dass dem Altpapierhändler bereits zahlreiche sortenreine Chargen (z.B. Verarbeitungsreste von Spezialpapieren) angeboten werden, für die er aber aufgrund der schweren Zerfaserbarkeit im Nassprozess bisher keinen Abnehmer in der Papierin-

dustrie findet. Gleiches gilt für Chargen, die bereits den Recyclinghof erreichen (z.B. Aluminium kaschierter Karton) und aufgrund der genannten Problematik aktuell nur außerhalb der Papierindustrie für minderwertige stoffliche Verwertungen abgegeben werden können. Erste Untersuchungen mit diesen Chargen sind bereits angelaufen, weitere Untersuchungen, insbesondere auch zur Abtrennung möglicher Störstoffe und zum Wiedereinsatz in Papierfabriken, sollen in Phase II folgen. Aber bereits jetzt zeichnet sich ab, dass durch die Zusammenarbeit mit ROHPROG eine gute Basis von bisher ungenutzten Rohstoffquellen für die initiale Startphase der Rohstoffplattform und des Aufbereitungszentrums in Form eines analogen Testbetriebs geschaffen werden kann.

Der analoge Testbetrieb, ein wichtiges Arbeitspaket in Phase II, soll dabei nicht nur mit Produktionsausschuss von interessierten Papierfabriken stattfinden. Vielmehr stehen in der Phase II solche Produkte im Mittelpunkt, welche aktuell weder von Papierfabriken, noch von Recyclingunternehmen sinnvoll wieder eingesetzt werden können. Gründe hierfür sind, neben der Nassfestigkeit bzw. schweren Zerfaserbarkeit, papierfremde Bestandteile und andere Störstoffe, die gesondert betrachtet und ggf. abgetrennt werden müssen, bevor der gewonnene Faserstoff für die erneute Papierherstellung eingesetzt werden kann. Dabei kann es sich auch um Produktionsausschuss handeln, allerdings solchen, der aktuell nicht verwendet werden kann, wie zum Beispiel Banknotenrohpaper. Selbstverständlich werden die Produkte für die analoge Testphase auch nach den verfügbaren Mengen ausgesucht, um bei erfolgreichem Testbetrieb auch eine konstante Rohstoffversorgung sicherzustellen. Dabei sind für die Testphase nur Produkte mit einer jährlichen Anfallmenge von mindestens 1.000 t vorgesehen.

In den analogen Testbetrieb werden sowohl Papierfabriken einbezogen, die hochwertige Produkte herstellen als auch solche, die weniger anspruchsvolle Verpackungspapiere produzieren. Während im ersten Fall vor allem geprüft werden soll, welche Faserquellen in welchen Mengen als Frischfaserersatz eingesetzt werden können, soll im zweiten Fall u.a. untersucht werden, welche Störstoffe und welche Störstoffbelastung bei weniger kritischen Herstellungsprozessen noch als unkritisch angesehen werden können. Beide Fälle setzen eine vorhergehende Sortenentwicklung (sinnvolle Mischungsverhältnisse, erforderliche Verbesserungen wie Mahlung, veränderten Hilfsmittel- und Chemiebedarf) sowie ggf. vor- und/oder nachgeschaltete Sortierprozesse und eine Analyse der Faserstoffbestandteile voraus. Neben dem Wiedereinsatz im Papierherstellungsprozess sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass auch andere Anwendungsbereiche untersucht werden sollen, insbesondere Möglichkeiten zur Herstellung von Dämm- und Isolationsmaterialien, wie auch funktionalisierte Faserverbundmaterialien, Composite, etc..

Im Hinblick auf die Anfallstellen gilt es weiterhin zu untersuchen, welcher Anteil an nassfein und anderweitig schwer zerfaserbaren Produkten sich letztlich in der blauen Tonne befindet. Auch hier bietet sich die Kooperation mit ROHPROG an, da das Recyclingunternehmen allein für die Altpapiersammlung in ganz München verantwortlich ist und somit eine hervorragende Datenbasis gewonnen werden kann. Unabhängig davon wie hoch der

Anteil von schwer zerfaserbaren Produkten im Altpapier tatsächlich ist, muss davon ausgegangen werden, dass diese Produkte letztlich in der konventionellen Stoffaufbereitung nicht ausreichend zerfasert werden können und daher in den Sortierprozessen als Rejekt aussortiert werden. Gelingt es daher diesen Anteil bereits im Vorfeld auszusortieren, dann könnte der Papierindustrie eine verbesserte Altpapierqualität zur Verfügung gestellt werden. Und andererseits könnten die aussortierten Produkte durch die Trockenzerfaserung für die erneute Papierherstellung wieder stofflich nutzbar gemacht werden.

Neben der Zusammenarbeit mit Recyclingunternehmen, Mittelstandsvereinigungen und Dachverbänden sollen weitere Anfallstellen außerdem durch Publikationen in Form von Artikeln, Vorträgen und Messebesuchen ausfindig gemacht werden. Durch gezielte Werbung für die Trockenaufbereitungstechnologie und die Rohstoffplattform auf Messen wie der Fachpack oder der Zellcheming sowie Vorträgen auf Fachkonferenzen gehen wir davon aus, dass wir durch den anschließenden direkten Kontakt weitere Quellen ausfindig machen können. Konkret geplant sind im Jahr 2022 Vorträge auf dem IMPS, dem Technischen Ausschuss des VNOP, der Biorefinery Conference in Graz, der APV Tagung und der CEPI European Paper Week. Hinzu kommen Gastbeiträge auf verschiedenen Online-Konferenzen (siehe Anhang „geplante und bereits erfolgte Veröffentlichungen“). Wir gehen davon aus, dass durch den immer stärker in den Mittelpunkt rückenden Kreislaufwirtschaftsgedanken viele Unternehmen, die vorher ihre Papierabfälle einfach entsorgt haben, nun nach nachhaltigeren Entsorgungs- und Verwertungsstrategien suchen.

Neben Papierfabriken und dem Aufbereitungszentrum bietet sich der Einsatz der Trockenaufbereitungstechnologie direkt beim Altpapierhändler bzw. bei Recyclingunternehmen an, da hier bereits jetzt signifikante Mengen an schwer zerfaserbaren Produkten anfallen bzw. dort eine Zugriffsmöglichkeit auf viele solcher Produkte besteht. Darüber hinaus haben sich auf der Basis unserer in Phase I entwickelten Technologien bereits erste Geschäftsmodelle entwickelt, die regionale gewerbliche Anfallstellen mit regionalen Verbrauchern bzw. Anwendern verknüpfen wollen. Als konkretes Beispiel ist hier ein regionales Projekt zu nennen, in dem die alten nassfesten Etiketten von drei Großbrauereien<sup>7</sup> mittels Trockenzerfaserung aufbereitet und als wertvoller Faserstoff bei zwei regionalen Papierherstellern<sup>8</sup> wieder eingesetzt werden sollen. Weitere ähnliche Geschäftsmodelle mit kleineren Anlagen und regionaler Ausrichtung werden sicherlich folgen. Diese Geschäftsmodelle der regionalen Aufbereitung sollen in die Rohstoffplattform eingebunden werden. Ein großer Vorteil der Trockenzerfaserung wird damit genutzt, denn die Aufbereitung kommt zur Quelle bzw. Senke. Damit werden Transportkosten minimiert und der CO<sub>2</sub>-Footprint positiv beeinflusst. Abfallexport kann entfallen. Unzählige Hersteller von Verpackungen im Medizin- und Lebensmittelbereich suchen händeringend nach Verwertungsmöglichkeiten ihrer Produktionsabfälle. Die Rohstoffplattform und regionale Aufbereitungszentren sind eine innovative Möglichkeit dieses Rohstoffpotential zu nutzen. Daher

---

<sup>7</sup> Die Namen können im Sinne des Kundenschutzes leider in Moment noch nicht genannt werden.

<sup>8</sup> Die Namen können im Sinne des Kundenschutzes leider in Moment noch nicht genannt werden.

planen wir auch selbst Aufbereitungszentren, die als Joint Venture zwischen Nutzer, Entsorger und Technologieträger aufgebaut und betrieben werden sollen.

Neben den unter Punkt 3.5 aufgezählten und in Phase I untersuchten Nicht-Faserbestandteilen gibt es selbstverständliche noch eine Vielzahl weiterer Komponenten, die noch im Papier vorkommen. Gerade in Zeiten der verstärkten Plastiksubstitution durch Papier- und faserbasierte Produkte ist es in Phase II vorgesehen weitere mögliche Stör- und Schadstoffe zu betrachten, insbesondere solche die besonders verbreitet sind und häufig vorkommen. Dabei konzentrieren wir uns gleich zu Beginn der Phase II um Polymerdispersionen von beispielsweise Getränkebechern oder Einwegverpackungen von Lebensmitteln. Aber auch andere Beschichtungen von Spezialpapieren (Barrieren, usw.) stehen im Fokus. Hier planen wir auch mit verschiedenen Spezialpapierherstellern zusammenzuarbeiten. Insbesondere solche, die aufgrund der Nicht-Faserbestandteile erhebliche Probleme haben, stoffliche Verwertungswege für ihren Ausschuss zu finden. An konkreten Produktbeispielen soll untersucht werden, wie die Teilfraktionen nach der Trockenzerfaserung vorliegen, wie diese abgetrennt werden können und welche Bestandteile ggf. noch an der Faseroberfläche anhaften und welche Auswirkungen bei der erneuten Papierherstellung bestehen. Neben Laboruntersuchungen gilt es auch die Auswirkungen bestimmter Bestandteile im industriellen Einsatz und deren Langzeitwirkung, z.B. durch eine mögliche Aufkonzentration oder unvorhersehbaren Wechselwirkungen mit anderen Bestandteilen oder chemischen Additiven, zu betrachten.

In einer ersten Stufe stehen vorrangig Laborversuche im Mittelpunkt. In einer zweiten Stufe sollen dann die trocken aufbereiteten und sortierten Faserstoffe auf der Versuchspapiermaschine eingesetzt werden. In der dritten Stufe ist dann – nach positiven Ergebnissen aus den Stufen 1 und 2 – der Wiedereinsatz auf der Papiermaschine geplant. Darüber hinaus soll der aufbereitete Faserstoff auch in anderen Papierfabriken testweise eingesetzt werden. Zu diesem Zweck stehen wir aktuell in Gesprächen mit verschiedenen Unternehmen, wobei unser Ziel darin besteht, diese als kooperierende Testpapierfabriken<sup>9</sup> für den Einsatz der verschiedenen Trockenfasern gewinnen zu können. Wir konnten bereits interessierte Papierfabriken mit unterschiedlichsten Anforderungen an den Rohstoff finden, die sich bereit erklärt haben bestimmte Trockenfasern testweise einzusetzen. Während einige nur hochwertige Trockenfasern mit annähernd Frischfaserqualität einsetzen können, also solche die störstofffrei sind, können die anderen Papierfabriken Trockenfasern mit einem gewissen Störstoffanteil einsetzen. Zum einen, weil diese Fabriken geringere Produkthanforderungen haben und zum anderen, da sie über Sortierprozesse verfügen und/oder teilweise auch besonders störstoffhaltige Trockenfaserstoffe in die weniger kritischen Mittellagen fahren können. Der dargestellte Ablauf wird im weiteren Verlauf der Phase II auch für andere Produkte angewendet.

---

<sup>9</sup> Mit Rücksicht auf interne Absprachen und zum Kundenschutz möchten wir diese Unternehmen nur in absoluten Ausnahmefall nennen.

## 4 Fazit

Mit dem erfolgreichen Aufbau einer Versuchsanlage zur Trockenzerfaserung konnte ein Aufbereitungsprozess entwickelt werden, mit dem gemäß den Zielstellungen der Phase I bisher nicht nutzbare Sekundärfaserquellen schonend in Einzelfasern zerlegt und bei Bedarf auch Nicht-Faserbestandteile und Störstoffe abgetrennt werden können. In Labor- und Technikumsversuchen wurde der Nachweis erbracht, dass der trocken aufbereitete Faserstoff uneingeschränkt für die erneute Papierherstellung oder die Herstellung anderer faserbasierter Produkte wie Biokomposite oder Dämmmaterialien verwendet werden kann. Zudem konnten Möglichkeiten zur Faserreaktivierung und zur Steigerung des Bindungspotenzials abgeleitet werden, sodass die Trockenfasern auch als vollwertiger Zellstoffersatz eingesetzt werden können. Damit trägt der Trockenaufbereitungsprozess zur Sicherung der Rohstoffversorgung der Papierindustrie oder anderer Altpapier bzw. Faserstoff verarbeitender Industriezweige bei. Die stoffliche Nutzung der bisher nicht nutzbaren Sekundärfaserquellen und die damit einhergehende Einsparung von Primärrohstoffen stellt damit auch einen erheblichen Beitrag zur Umweltschonung und zur nachhaltigen Nutzung wertvoller Ressourcen dar.

Auf Basis des entwickelten Trockenaufbereitungsprozesses konnten mobile Testanlagen im Industriemaßstab umgesetzt werden, die bereits in zahlreichen Papierfabriken im industriellen Einsatz erfolgreich getestet werden konnten. Dabei konnten bereits mehrere hundert Tonnen Trockenfasern hergestellt und auf unterschiedlichsten Papiermaschinen eingesetzt werden. Die Phase I ist damit außerordentlich erfolgreich verlaufen und es konnte die erforderliche technologische Basis und Grundvoraussetzung für die Schaffung der anvisierten Rohstoffplattform in Phase II gelegt werden, welche planmäßig direkt im Anschluss beginnen soll.

Kernziele der Phase II sind die Lokalisierung der Quellen, die Untersuchung der erforderlichen Aufbereitungsschritte (Trockenzerfaserung und ggf. vor- und nachgeschaltete Sortierung) und die Ableitung geeigneter produktspezifischer Verwertungsmöglichkeiten. Darüber hinaus stehen noch verfahrenstechnische Optimierungsarbeiten des Trockenzerfaserungsprozesses aus. Durch eine Dosiervorrichtung mit vorgeschaltetem Puffer soll die Vorzerkleinerung von der Einzelfaserzerlegung entkoppelt und damit der Gesamtprozess am optimalen Arbeitspunkt, d.h. beim minimalen spezifischen Energieeinsatz, betrieben werden. Die Aufbereitung der bisher ungenutzten Faserquellen, die in vielen Fällen eine Abtrennung der Störstoffe beinhaltet, soll in einem spezialisierten Aufbereitungszentrum stattfinden. Ein solches Aufbereitungszentrum ist neben der Rohstoffplattform das zentrale Element für die umfangreiche stoffliche Nutzung der bisher nicht nutzbaren Sekundärfaserquellen, da nur im Zusammenspiel der vollständigen Erfassung und der jeweils erforderlichen produktspezifischen Aufbereitung die aufgezeigten Potenziale zur Umweltschonung und Ressourceneinsparung ausgeschöpft werden können.

## 5 Literaturverzeichnis

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

## 6 Anhang

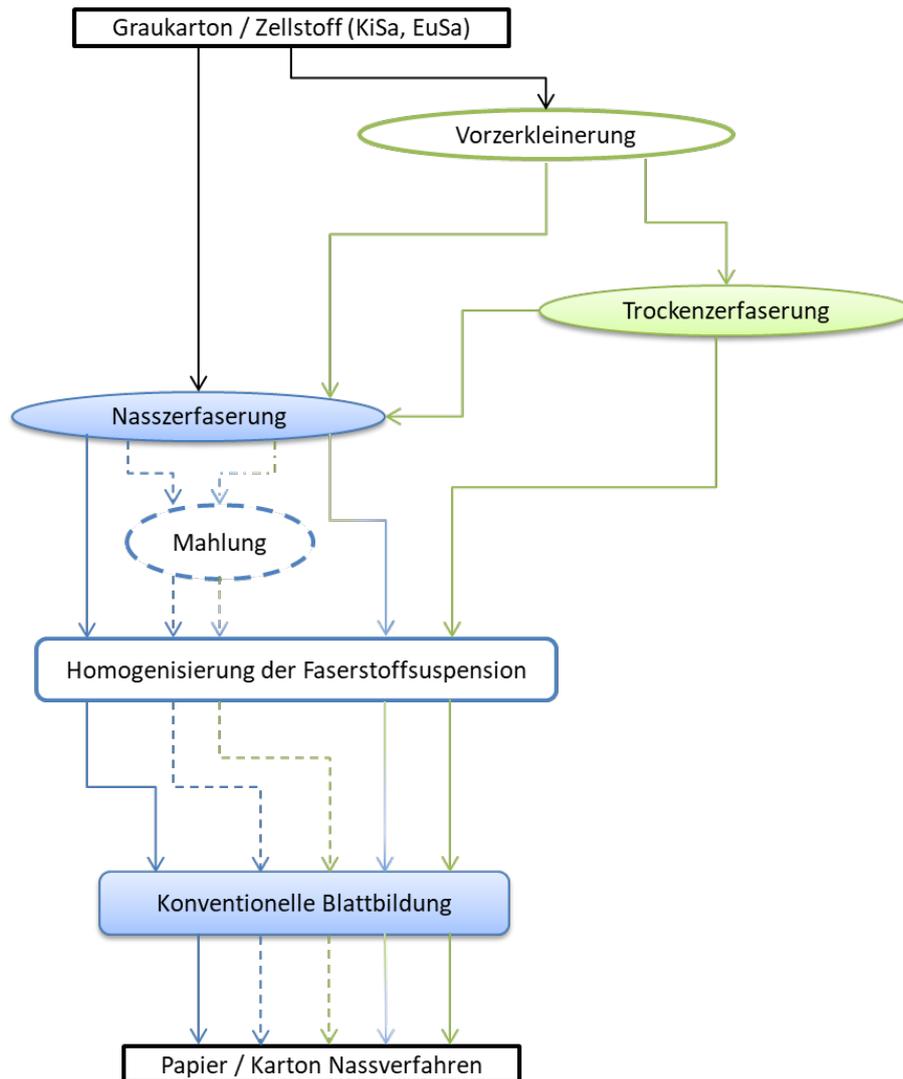


Abbildung 25: Methodik der Vergleichsuntersuchungen zwischen Nass- und Trockenzerfaserung

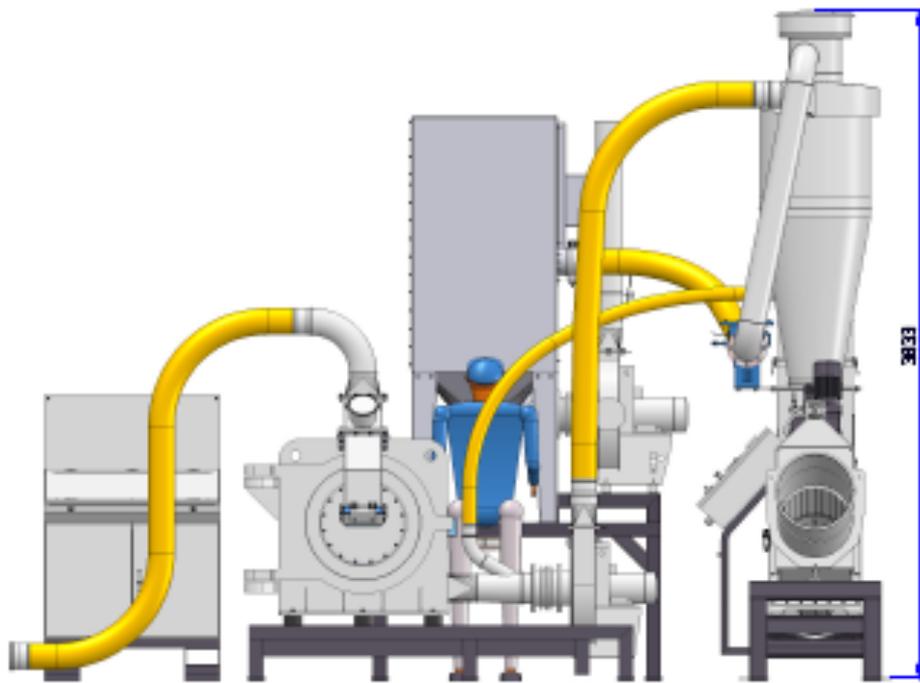


Abbildung 26: DPS 40 GT Aufstellplan und Platzbedarf (1)

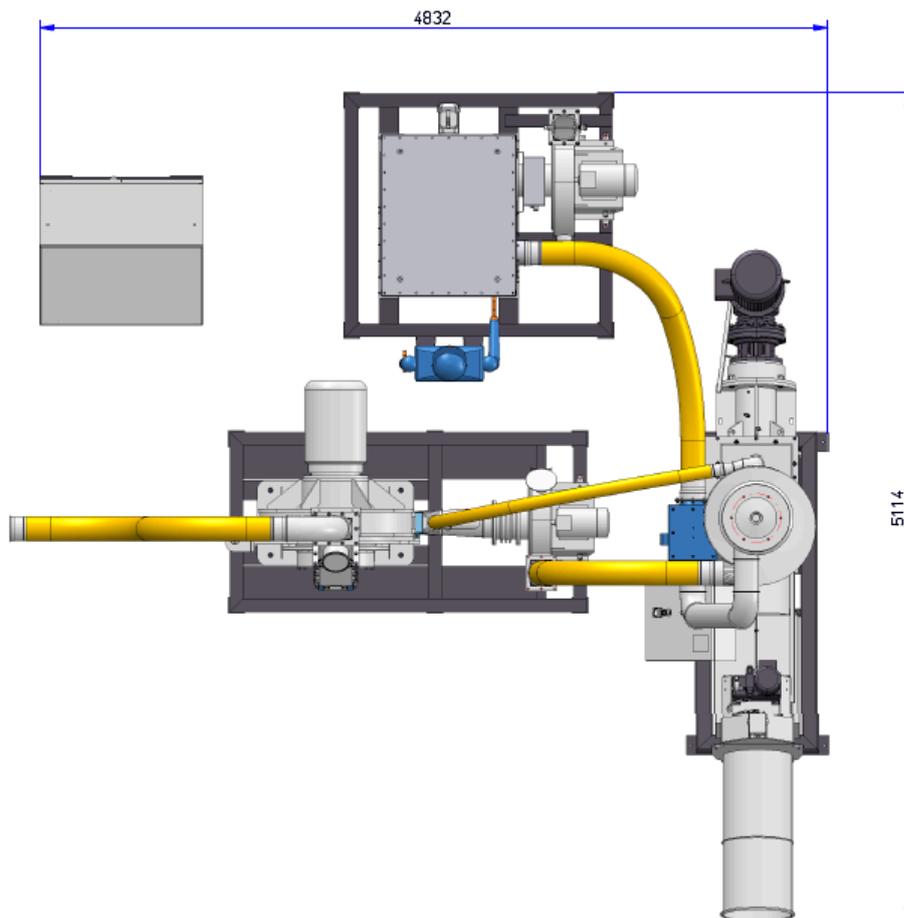


Abbildung 27: DPS 40 GT Aufstellplan und Platzbedarf (2)



Abbildung 28: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT I bei einem Filterpapierhersteller (2)



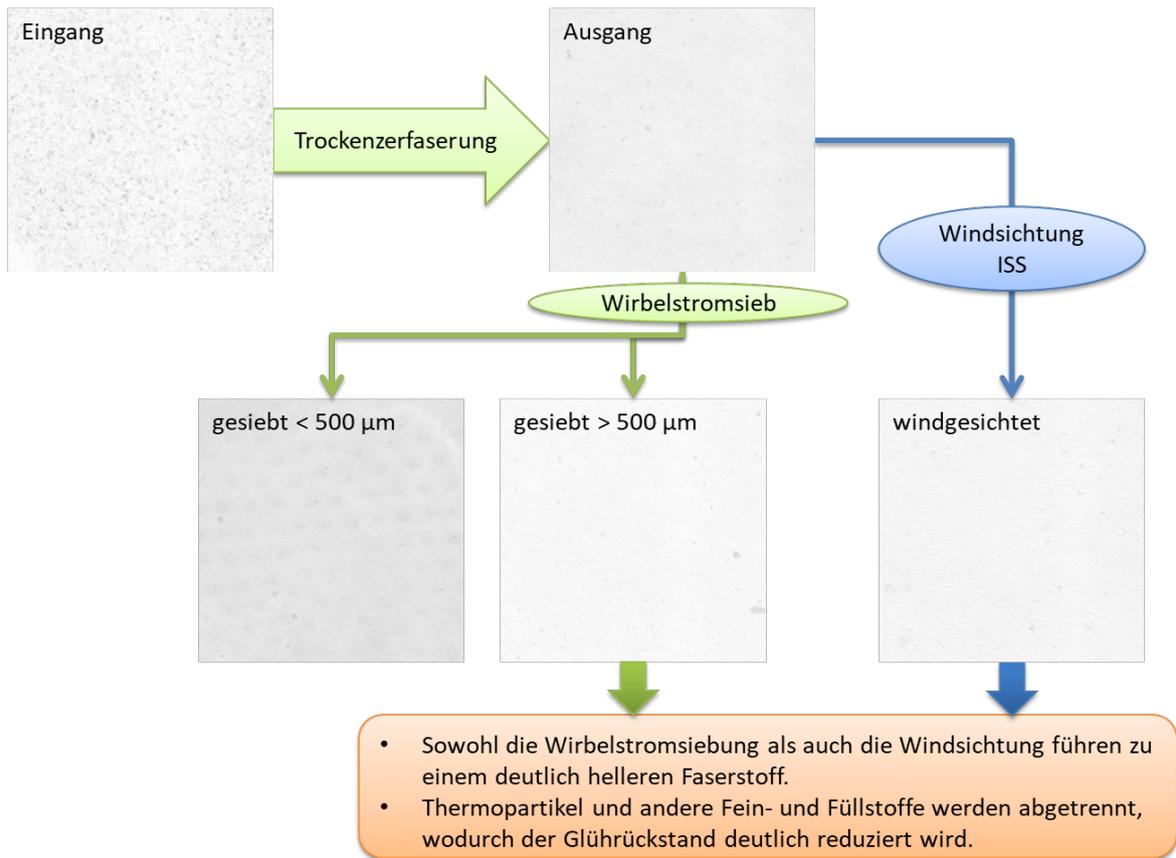
Abbildung 29: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT II bei einem Verpackungspapierhersteller



Abbildung 30: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT II bei einem Tissuehersteller (2)



Abbildung 31: Einsatz der mobilen Testanlage DPS 40 GT II bei einem Hersteller von Biocompositen



**Abbildung 32: Austrag von Thermopartikel mittels Wirbelstromsieb und Windsichtung**

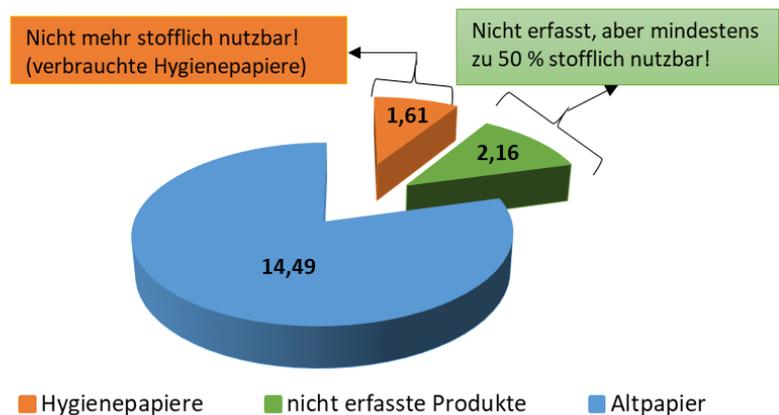


**Abbildung 33: kontinuierliche Vliesbildung im Technikum der Fa. Dan-Web Machinery am IFTH in Roubaix**

## 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.

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



**Abbildung 34: Aufteilung des rechnerischen Papierverbrauchs in Deutschland nach erfasstem Altpapier und nicht erfassten Papierprodukten**

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.

## **Geplante und bereits erfolgte Veröffentlichungen**

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 Capi 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

Abschließend möchten wir auf unsere Homepage [www.tbp-future.com](http://www.tbp-future.com) aufmerksam machen.