

Kartonfabrik Porstendorf GmbH,  
Technische Universität Dresden

**Verarbeitung von faserhaltigen Reststoffen des Papierproduktionsprozesses in  
naturfaserverstärkten Kunststoffen**

Abschlussbericht zum Vorhaben  
Az: 32045 gefördert von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



von

Frank Tilch, Paul-Gerhard Weber, Anja Groß, Marie Kühne

Bewilligungsempfänger: Kartonfabrik Porstendorf GmbH  
Kooperationspartner: Papierfabrik Hainsberg GmbH  
Biofibre GmbH  
Technische Universität Dresden, Professur für Papiertechnik

29. Februar 2016

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



Az	<b>32045</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>124.822 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

**Antragstitel**                      **Verarbeitung von faserhaltigen Reststoffen des Papierproduktionsprozesses in naturfaserverstärkten Kunststoffen**

**Stichworte**                      Reststoff, Fangstoff, Deinkingschlamm, Altpapier, Recycling, Compound, WPC

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>18 Monate</b>	<b>28.08.2014</b>	<b>29.02.2016</b>	

Zwischenberichte:

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Kartonfabrik Porstendorf GmbH Fabrikstraße 1 07778 Porstendorf	Tel	0 36427 874-200
		Fax	0 36427 874-102
		Projektleitung	Frank Tilch
		Bearbeiter	Paul-Gerhard Weber

**Kooperationspartner**

- Papierfabrik Hainsberg GmbH  
Dresdner Straße 321, 01705 Freital
- Biofibre GmbH  
Sonnenring 35, 84032 Altdorf
- TU Dresden, Professur für Papiertechnik  
Marschnerstraße 39, 01307 Dresden

***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Produkte aus naturfaserverstärkten Kunststoffen werden schon seit einiger Zeit weltweit verstärkt nachgefragt. Eine Untergruppe stellen hier die sogenannten Wood-Plastic-Composites (WPC) dar. Für WPC wird vorrangig Holzmehl als Ressource für die benötigten Naturfasern eingesetzt. Die steigende Nachfrage nach Holzbrennstoffpellets verteuert diesen Rohstoff zunehmend. Faserhaltige Reststoffe aus der Altpapieraufbereitung (Fangstoffe und Deinkingschlämme) können alternativ zu Holzmehl in Verbundwerkstoffen eingesetzt werden. Bisher werden diese Reststoffe zumeist thermisch verwertet und verursachen vor allem in mittelgroßen und kleinen Papierfabriken erhebliche Entsorgungskosten. Im Sinne einer Kaskadennutzung von Rohstoffen sind neue Konzepte für eine stoffliche Verwertung der Reststoffe deutlich vorzuziehen.

Ziel des Projektes war es, dass bereits im Labormaßstab erprobte Verfahren zu Herstellung von Verbundwerkstoffen aus Fangstoffen und Deinkingschlämmen auf eine industrielle Produktionskette zu adaptieren. Die Trocknung und Pelletierung zu Zwischenprodukten, geplant als integrierter Prozessschritt in den Papierfabriken, standen dabei im Vordergrund.

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

Die Aufbereitung der Reststoffe umfasste in erster Linie deren Trocknung und Überführung in einen dosierfähigen Zustand. Dosierprobleme bei der Weiterverarbeitung (Compoundierung) können durch eine vorangehende Pelletierung der faserhaltigen Reststoffe gelöst werden. Weil in den Papierfabriken noch keine Anlagen zum Trocknen und Pelletieren der Faserreststoffe vorhanden waren, mussten entsprechende Aufträge an Dritte vergeben werden.

Bei der Trocknung wurden unterschiedliche Konzepte miteinander verglichen. Eine Kombination aus Vor- und Nach Trocknung ist sinnvoll, um geeignete Prozesslösungen für die Nutzung der in den Fabriken anfallenden Restwärme zu identifizieren.

Die Faserpellets wurden einerseits mit einem PP-Homopolymer compounding und anschließend im Spritzguss zu Demonstratoren verarbeitet. Andererseits wurden die Faserpellets in einem einstufigen Extrusionsverfahren mit einem HDPE zu Terrassendielen verarbeitet.

Reststoffe und Faserpellets wurden durch unabhängige Labore untersucht. Diese Untersuchungen dienten dazu, potentiell kritische Substanzen und Verbindungen (Schwermetalle etc.) zu identifizieren und zu quantifizieren. Anhand dieser Untersuchungen können Produktfelder identifiziert werden, für die eine eindeutige Unbedenklichkeit bezüglich der in den Endprodukten enthaltenen Verbindungen besteht.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Bei einem ersten Versuch wurden 1 t feuchter Fangstoff (Wassergehalt: 60 %) zuerst pelletiert und danach in einer Trockenkammer bei einem Luftdurchsatz von 3.000 m<sup>3</sup>/h getrocknet (Wassergehalt nach Trocknung: 5-10 %). Die Luft wurde über einen Gasbrenner auf 140 °C erwärmt und mittels eines Radialventilators zugeführt. Der Trocknungsprozess dauerte ca. 4 Tage. Nach der Trocknung kam es zum Aufreißen der Fangstoffpellets (F-Pellets). Die innere Festigkeit der F-Pellets konnte durch einen Zusatz von 10 % Stärke verbessert werden. Dagegen ließ sich der Deinkingschlamm (0,5 t; Wassergehalt: 40 %) bei einem weiteren Versuch besser als der Fangstoff pelletieren. Der hohe Mineralanteil von ca. 70 % in den Deinkinkpellets (D-Pellets) verbessert das rheologische Verhalten bei der Verarbeitung.

Es war möglich, Compoundgranulate mit max. 50 %-Füllanteil (F-Pellets) in guter Qualität herzustellen. Die Faserpellets ließen sich dabei problemlos dosieren. Nach einer Trocknung der Granulate auf etwa 3 % Feuchte konnte eine zufriedenstellende Verarbeitung an der Spritzgussmaschine erreicht werden. Alle Rezepturen ließen sich gut spritzgießen, ein Wandstärken-Fließwegverhältnis von 1:100 wurde auch bei der Verarbeitung des Granulates mit 50 % F-Pellets/ 50 % PP erreicht.

Bei einem weiteren Versuch wurden 1,5 t Fangstoffe und 0,5 t Deinkingschlämme zuerst getrocknet und danach pelletiert. Bei den Fangstoffen wurde nach 3 Durchgängen im Trommeltrockner bei 150 °C der erforderliche Trockengehalt erreicht. Die Trocknung des Deinkingschlammes erfolgte im Trockenschrank. In einer Feinprallmühle wurden die getrockneten, krümeligen Papierreststoffe zerkleinert und homogenisiert. Vor und nach dem Pelletieren von Fangstoff und Deinkingreststoff wurde das Material aushebend (Überbandmagnet) und fallend (Magnettrommel mit Beschickung über Schwingrinne) auf magnetische Bestandteile untersucht und diese abgeschieden.

Alle Pellet-Versuchschargen ließen sich bei der anschließenden Extrusion zur Herstellung von Terrassendielen mit HDPE sehr gut dosieren. Geruchsemissionen sind im Vergleich zu WPC störend. Das Geruchsproblem ist aber lösbar. Im Vergleich zu vorangegangenen Versuchen konnte bei den Terrassendielen mit Fangstoff das Quellungsverhalten deutlich verbessert werden. Alle Quellungswerte nach 5 Stunden Kochwasserlagerung liegen im Normbereich. Hierfür ist die Einhaltung des Wassergehalts < 5 % bei den Pellets notwendig. Dadurch war auch eine Verbesserung der Biegeeigenschaft der Terrassendielen aus F-Pellets möglich. Die gemessenen Bruchlasten erfüllen die Norm. Die Festigkeitswerte bei WPC-Terrassendielen sind jedoch im Vergleich doppelt so hoch. Um gleiche Festigkeiten zu erreichen, müsste mit einem höheren Materialeinsatz gerechnet werden. Die bei vorangegangenen Versuchen hergestellten Terrassendielen erscheinen auch nach einem Jahr Außenlagerung (Witterungseinflüsse) wenig verändert. Der höhere Mineraliengehalt verbessert die Feuerfestigkeit gegenüber herkömmlichen WPC-Werkstoffen.

Die bei chemischen Analysen der Pellets ermittelten Spurenelemente wurden zum Vergleich den Migrationsgrenzwerten aus der Richtlinie 2009/48/EG über die Sicherheit von Spielzeugen gegenübergestellt. Dabei konnten die Migrationsgrenzwerte weitestgehend eingehalten werden. Eine Bewertung der Faserpellets kann aber nur nach den Produkthanforderungen des Endprodukts und dessen Einsatzzweck erfolgen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Ergebnisse des Projekts wurden auf der ZELLCHEMING-Expo 2015 in Frankfurt, in der "ipw - Das Papier" Heft 10/2015, S.30-35 und auf der LIGNA 2015 in Hannover als Referate vorgestellt.

## **Fazit**

Die Projektergebnisse zeigen, dass die Verarbeitung von faserhaltigen Reststoffen des Papierproduktionsprozesses zu naturfaserverstärkten Kunststoffen industriell umsetzbar ist.

Für eine industrielle Umsetzung der Technologie bestehen jedoch noch folgende Risiken:

- kontinuierliche Abnahme von Faserpellets in ausreichender Menge durch die kunststoffverarbeitende Industrie;
- Bedenken von Kunststoffverarbeitern und Kunden bezüglich der aus industriellen Prozessen stammenden Faserpellets (Qualität, Inhaltstoffe usw.);
- Marktplatzierung der Endprodukte.

## Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	
Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
Formelzeichen und Indizes.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Zusammenfassung.....	1
1. Einleitung.....	2
2. Hauptteil.....	5
2.1 Faserhaltige Reststoffe des Papierproduktionsprozesses.....	5
2.2 Vorversuche zur Trocknung von Papierreststoffen im Klassischen Kinetischen Experiment .....	6
2.2.1 Feuchteermittlung an den Papierreststoffen und Rückbefeuchtung .....	6
2.2.2 Klassisches Kinetisches Experiment .....	7
2.2.3 Trocknungsverhalten der Reststoffe bei Variation der Trocknungstemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit.....	9
2.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des KKE .....	12
2.3 Feuchtpelletierung und Trocknung im FGW Fasergusswerk Polenz GmbH.....	14
2.4 Compoundieren und Herstellung von PPC-Formteilen bei der Biofibre GmbH.....	15
2.5 Extrusion (1-stufig) und Verarbeitung bei der NATURinFORM GmbH.....	18
2.6 Trocknung der Reststoffe, Vorzerkleinerung und Pelletierung bei der DIEFFENBACHER GmbH.....	20
2.7 Erneute Extrusion und Verarbeitung bei der NATURinFORM GmbH.....	24
2.8 Physikalische Eigenschaften und chemische Analysen an den Faserpellets.....	27
2.9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.....	29
Fazit .....	31
Literaturverzeichnis.....	33

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozesskette PPC-Herstellung und Verarbeitung innerhalb des DBU-Projektes .....	4
Abbildung 2: Wassergehalt und Rückbefeuchtung der Papierreststoffe .....	7
Abbildung 3: Versuchsstand für das KKE .....	8
Abbildung 4: Trocknungsverläufe bei Variation der Temperatur bei Probe 1 Fangstoff lose .....	10
Abbildung 5: Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeiten der 3 Papierreststoffproben .....	12
Abbildung 6: Pelletpresse PP400C der Fa. Qteck, Bergen .....	14
Abbildung 7: Magnettrommelsortierung: oben Faserstaub und Plasteteile; unten F-Pellets und Metallteile .....	17
Abbildung 8: Magnettrommelsortierer .....	18
Abbildung 9: PPC-Terrassendielen: links mit D-Pellts; rechts mit F-Pellets .....	19
Abbildung 10: Pellets aus V1 (links) und V2 (rechts) .....	21
Abbildung 11: Pellets aus V3 (links) und V4 (rechts) .....	21
Abbildung 12: Prozesskette bei der DIEFFENBACHER GmbH .....	22
Abbildung 13: Trommeltrockner (links) und Feinprallmühle (rechts) .....	22
Abbildung 14: Eisen-Abscheidung .....	23
Abbildung 15: V1 – 100 % FS grob (SD: 612 kg/m <sup>3</sup> , links), V2 – 100 % FS fein (SD: 632 kg/m <sup>3</sup> , rechts)	24
Abbildung 16: V5 – 100 % Deinking (SD: 983 kg/m <sup>3</sup> , links), V6 – FS/Deinking (SD: 798 kg/m <sup>3</sup> , rechts)	24
Abbildung 17: Pelletierer PM22E von EcoWorxx .....	27
Abbildung 18: Wassergehalt und Glührückstand .....	29
Abbildung 19: Weitere Arbeiten vor Markteinführung von PPC-Werkstoffen .....	31

## Abkürzungsverzeichnis

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
AfA	Absetzung für Abnutzung
CA-Matrix	Celluloseacetat-Matrix
D	Deinkingschlamm
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
D-Faser	Deinkingfaser
D-Pellets	Deinkingpellets
DIP	Deinked Pulp – deinkter Altpapierstoff
F-Faser	Fangstofffaser
FGW	Fasergusswerk
F-Pellets	Fangstoffpellets
FS	Fangstoff
G-Pellets	Gutstoffpellets
HDPE	High Density Polyethylen
IGF	Industrielle Gemeinschaftsförderung
KKE	Klassisches kinetisches Experiment
KW	Kalenderwoche
L/D	Längen- Durchmesser- Verhältnis
MAH	Maleinsäureanhydrid
NFK	Naturfaserverstärkte Kunststoffe
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PPC	Pulp-Polymer-Composites
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
SD	Schüttdichte
TA	Trocknungsabschnitt
V	Versuch
WPC	Wood-Polymer-Composite

## Formelzeichen und Indizes

$EP_T$	Temperaturabhängiger Effektivitätsparameter
$EP_v$	Strömungsabhängiger Effektivitätsparameter
$m_{\text{Einwaage}}$	Masse der Einwaage
$m_{Tr}$	Trockenmasse
$T$	Temperatur
$T_T$	Trocknungstemperatur
$t_{Tr}$	Trocknungsdauer
$u$	Feuchte
$v$	Strömungsgeschwindigkeit
$w$	Wassergehalt
$\phi$	Luftfeuchte
$X$	Gleichgewichtsfeuchte

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Trocknungsdauer und Effektivitätsparameter bei Probe 1 Fangstoff lose .....	11
Tabelle 2: Eigenschaften der Terrassendielen mit F-Pellets .....	19
Tabelle 3: Eigenschaften der Terrassendielen mit D-Pellets .....	20
Tabelle 4: Anforderungen an WPC-Terrassendielen .....	20
Tabelle 5: Eigenschaften der PPC-Terrassendielen aus dem 2. Versuch .....	26
Tabelle 6: Beispielrechnung für Zielpreis Pellets 80 €/t.....	30



## Zusammenfassung

Innerhalb des DBU-Projektes „Verarbeitung von faserhaltigen Reststoffen des Papierproduktionsprozesses in naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK)“ wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, um das in einem Vorgängerprojekt im Labormaßstab erprobte Verfahren zur Herstellung eben dieser Komposite auf eine industrielle Produktionskette zu adaptieren. Dabei stand insbesondere die Aufbereitung der Reststoffe durch Pelletierung im Fokus der Betrachtungen.

Die Trocknung und Pelletierung der Reststoffe erwies sich bei den beauftragten Firmen als gut handhabbar. Es gelang, größere Mengen Pellets im Technikumsmaßstab herzustellen, die die Anforderungen der Kunststoffverarbeiter bezüglich der Eigenschaften für eine Weiterverarbeitung zu Verbundwerkstoffen erfüllten. Probleme, die durch Metallteilchen in den Reststoffen verursacht wurden und die die anschließenden formgebenden Prozesse beeinträchtigten, konnten durch die Einbindung geeigneter Verfahrenstechnik im Projektverlauf eliminiert werden. Lediglich die Beseitigung der Geruchsbelästigung durch die Reststoffe bzw. Pellets stellt verfahrenstechnisch noch einen offenen Punkt dar. Eine erste Einordnung der Pelleteigenschaften im Vergleich mit existierenden Normen wurde vorgenommen und ist ein Ansatz, zukünftige Einsatzgebiete zu finden.

Bei den Kunststoffverarbeitern wurden mit Hilfe des Spritzguss- sowie des Extrusionsverfahrens Formteile und Profile hergestellt. Allerdings stehen auf Grund von Bedenken des Projektpartners, durch die Härte der Pellets Schäden an der Compoundieranlage zu verursachen, noch Versuche zu Spritzgussteilen mit dem Reststoff Deinkingschlamm aus.

Ein weiterer Gegenstand der Untersuchungen war es, Möglichkeiten für die effiziente Trocknung der feuchten Reststoffe aufzuzeigen. Im Bericht fließen Betrachtungen zum Trocknungsverhalten und erste Empfehlungen zur Nutzung von Wärmerückgewinnung für die Trocknung ein. Detaillierte Kostenberechnungen für die Trocknung können jedoch erst gemeinsam mit einem Partner für Trocknungsanlagen vorgenommen werden und sind von einer der am Projekt beteiligten Papierfabriken und einem Maschinenbauer geplant.

Zusammengefasst kann zu Projektende davon ausgegangen werden, dass die Verarbeitung von Reststoffen aus der Papierherstellung zu Kompositen industriell umsetzbar ist. Bis zu einer Markteinführung sind aber noch offene Fragen insbesondere aus den Bereichen Anwendungsfindung, Produktverantwortung und Wirtschaftlichkeit bei geringen Anfallmengen an Reststoffen zu beantworten.

Das Projekt „Verarbeitung von faserhaltigen Reststoffen des Papierproduktionsprozesses in NFK“ wurde in Kooperation der Projektpartner Kartonfabrik Porstendorf GmbH, Papierfabrik Hainsberg GmbH, Biofibre GmbH und des Instituts für Holz- und Papiertechnik (Professur für Papiertechnik) der Technischen Universität Dresden sowie unter Mitwirkung Dritter (Fasergusswerk Polenz GmbH, DIEFFENBACHER GmbH und NATURinFORM GmbH) bearbeitet und aus Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Az: 32045) gefördert.

## 1. Einleitung

Bei der Altpapieraufbereitung zur Papiererzeugung fallen große Mengen von faser- und mineralhaltigen feuchten Reststoffen vor allem als so genannte Fangstoffe aus der Feinsortierung und als Deinkingschlämme bei der Druckfarbenentfernung an. Bisher werden diese Stoffe zumeist kostenpflichtig entsorgt und energetisch verwertet oder in der Ziegel- und Zementherstellung eingesetzt, wobei der Faseranteil beim Brennen verglüht. Große Papierfabriken unterhalten häufig eigene Anlagen zur energetischen Reststoffverwertung. Für kleinere und mittelgroße Fabriken ist eine eigene energetische Verwertung jedoch nicht wirtschaftlich. Deshalb entstehen dort hohe Entsorgungskosten.

Gleichzeitig wächst der Markt für NFK kontinuierlich. Wood-Polymer-Composites (Abkürzung: WPC, deutsch: Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe) bilden dabei eine große Untergruppe. Für WPC wird vorrangig Holzmehl als Ressource für die benötigten Naturfasern eingesetzt. Insbesondere die steigende energetische Nutzung von Holz in Form von Pellets aus Holzmehl erhöht die Nachfrage und damit den Preis für diesen Rohstoff zusehends.

Auch im Sinne einer Kaskadennutzung von Rohstoffen sind neue Konzepte für eine stoffliche Verwertung der Reststoffe deutlich vorzuziehen, da Kohlendioxid in den Fasern für mindestens eine weitere Nutzungsphase gebunden bleibt. Ein Upcycling trägt zum einen zur Ressourcenschonung bei und lässt zum anderen eine Steigerung der Wertschöpfung in den Fabriken erwarten.

Diese Aspekte bewegten die TU Dresden, Professur für Papiertechnik, dazu, dem Forschungsansatz nachzugehen, inwieweit faserhaltige Reststoffe aus der Altpapieraufbereitung als Ersatz für Holzmehl bei der Herstellung von NFK/WPC eingesetzt werden können. Die in dieser Weise entstehenden Komposite sollen als Pulp-Polymer-Composites (PPC) bezeichnet werden.

Um die Reststoffe zu Kompositen weiterzuverarbeiten, ist eine wesentliche Voraussetzung, dass sie trocken und dosierbar sind. Die Trocknung und Überführung in einen dosierfähigen Zustand erwies sich im vorangegangenen Gemeinschaftsforschungsprojekt „Entwicklung eines Recyclingverfahrens für Reststoffe aus der Papiererzeugung zur Herstellung von Bioverbundstoffen“ (AIF-IGF-Vorhaben 17434 BR) als keineswegs trivial. Vielmehr bildete der Reststoff aufgrund seines hohen Faseranteils im Trocknungsprozess ein flockiges Gefüge (Fluff), das bei der anschließenden Verarbeitung immer wieder zu Brückenbildungen und Verstopfungen der Aggregate führte. Die Dosierprobleme bei der Compoundierung konnten auf Laborebene durch eine vorangehende Pelletierung der faserhaltigen Reststoffe gelöst werden. Neben der Dosierbarkeit dient das Pelletieren auch der Vorabhomogenisierung der faserhaltigen Reststoffe.

Vor diesem Hintergrund sollten mit dem DBU-Projekt Nr. 32045 „Verarbeitung von faserhaltigen Reststoffen des Papierproduktionsprozesses in NFK“ die Voraussetzungen für eine Übertragung dieses Konzepts in den industriellen Maßstab geschaffen werden. Ziel des Projektes war es, dass im Labormaßstab erprobte Verfahren zu Herstellung von NFK auf eine industrielle Produktionskette zu adaptieren. Die Trocknung und Pelletierung zu Zwischenprodukten, geplant als integrierter Prozess-

schritt in den Papierfabriken, standen dabei im Vordergrund. Da in den Papierfabriken noch keine Anlagen zum Trocknen und Pelletieren der Faserreststoffe vorhanden sind, mussten entsprechende Aufträge an Dritte vergeben werden (Fasergusswerk Polenz GmbH; DIEFFENBACHER GmbH).

Die Pellets mussten Vorgaben bezüglich Festigkeit, Schüttdichten und akzeptablem Restfeuchtegehalt für die Weiterverarbeitung zu Kompositen erfüllen. Die diesbezüglichen Anforderungen waren gemeinsam mit den Kunststoffverarbeitern auszuarbeiten. Letzteren oblag auch die Bewertung, ob diese Vorgaben mit den verfahrenstechnischen Maßnahmen erreicht wurden. Daneben war die weitere theoretische und praktische Durchdringung einzelner Teilaspekte des Verfahrens erforderlich.

Hierzu zählte auch die Suche nach geeigneten Lösungen, die in Papierfabriken in größeren Mengen anfallende Restwärme für eine effiziente Trocknung der Reststoffe zu nutzen. Bei der Trocknung können unterschiedliche Konzepte verfolgt, miteinander verglichen und bewertet werden. Die Prozessreihenfolge beeinflusst die Qualität der Pellets (vor allem die Pellethärte) maßgeblich. Unbestritten ist eine rasche Trocknung sofort nach dem Reststoffanfall notwendig, um Schimmelbildung und damit verbundenen Geruchsproblemen an der feuchten Faserfraktion vorzubeugen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass ein Verarbeitungsfenster bezüglich der Materialfeuchte besteht, innerhalb dessen sich der Reststoff am besten pelletieren lässt. Als Ergebnis dieser Überlegungen kann abgeschätzt werden, welche Art einer späteren Prozessführung (Trocknungsanlage und Pelletierer) sinnvoll ist. Eine Kombination zum Beispiel aus Vor- und Nachtrocknung ist sinnvoll, um geeignete Prozesslösungen für die Nutzung der in den Fabriken anfallenden Restwärme zu identifizieren. Folgende Prozessreihenfolgen kamen in Frage und wurden innerhalb des Projektes als mögliche Varianten betrachtet:

- Pelletieren – Trocknen
- Trocknen – Pelletieren (stellte sich als verfahrenstechnisch favorisierte Variante heraus)
- Vortrocknung – Pelletierung – Endtrocknung

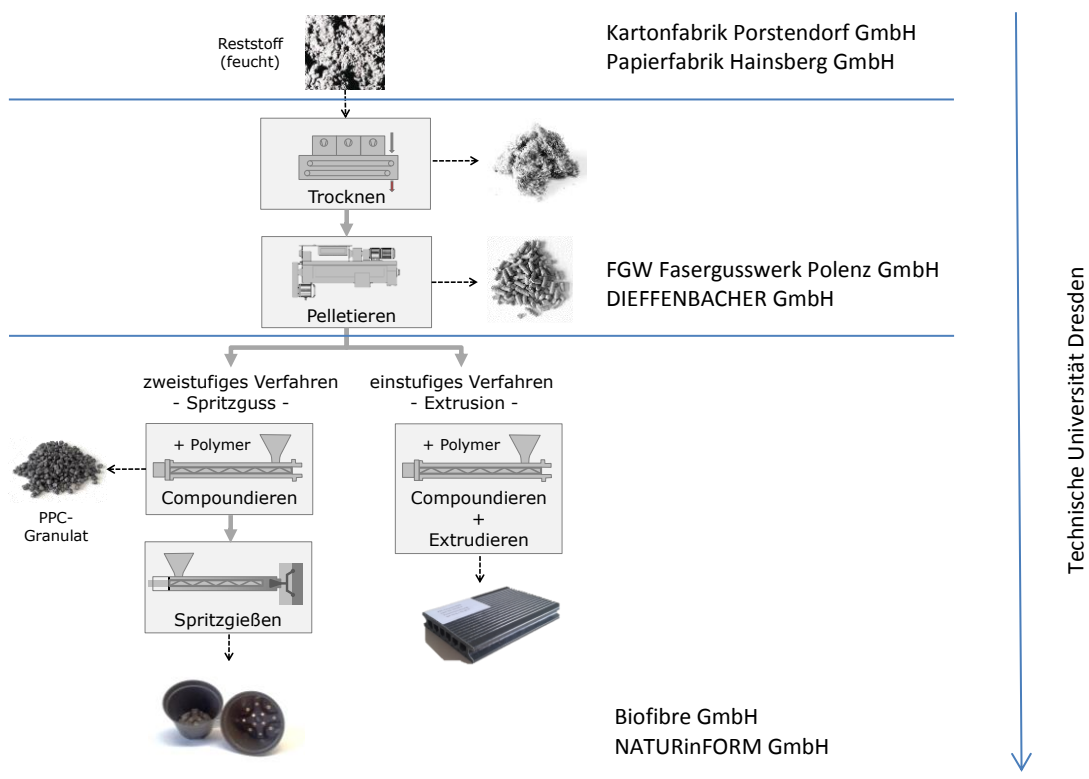
Neben der verfahrenstechnischen Auslegung zum Erreichen der gewünschten physikalischen Eigenschaften der Pellets, war auch deren chemische Zusammensetzung für das Finden geeigneter Anwendungsgebiete von hohem Interesse. Nur so können die Voraussetzungen für die Festlegung maximaler Eintragsmengen der Reststoffe im Einzelfall geschaffen und Produktfelder, für die eine eindeutige Unbedenklichkeit bezüglich der in den Endprodukten enthaltenen Verbindungen besteht, identifiziert werden. Zwar konnten aus den vorhandenen Analysen im Rahmen der bisher praktizierten Abfallentsorgung der Reststoffe erste Rückschlüsse abgeleitet werden, jedoch standen genaue Untersuchungen noch aus. Innerhalb der Papierfabriken (Porstendorf und Hainsberg) wurden deshalb die logistischen und gegebenenfalls technischen Voraussetzungen für eine repräsentative Probenahme (Art, Menge und Zusammensetzung) der Reststoffe geschaffen. Dem Institut für Holz- und Papiertechnik der TU Dresden oblag neben der wissenschaftlichen Betreuung des Projektes auch die Analyse, Prüfung und Charakterisierung der Reststoffe. Die Untersuchungen der Reststoffe erfolgten durch unabhängige Labore. Sie dienten dazu, potenziell kritische Substanzen und Verbindungen (Schwermetalle etc.) zu identifizieren und zu quantifizieren.

## Einleitung

Die Faserpellets wurden beim Projektpartner, der Biofibre GmbH, mit einem Polypropylen-Homopolymer compounding und anschließend im Spritzguss zu Demonstratoren (Formkörper-Endprodukte) verarbeitet.

Parallel dazu wurden Faserpellets auch der NATURinFORM GmbH zur Verfügung gestellt. Im Extrusionsverfahren wurden die Faserpellets in Verbindung mit Hochdichtem-Polyethylen (HDPE) einstufig zu Terrassendielen verarbeitet. Von der NATURinFORM GmbH konnte eine qualifizierte Rückkopplung bezüglich Qualität und Verarbeitbarkeit der Pellets an die Projektbeteiligten weitergegeben werden.

Eine schematische Darstellung der Prozesskette befindet sich in Abbildung 1.



**Abbildung 1: Prozesskette PPC-Herstellung und Verarbeitung innerhalb des DBU-Projektes**

## 2. Hauptteil

### 2.1 Faserhaltige Reststoffe des Papierproduktionsprozesses

Durch die Wiederverwertung von Altpapier werden zur Papierherstellung weniger Primärfaserstoffe (Holz- und Zellstoff) benötigt. In Deutschland sind über 70 % der bei der Papierherstellung eingesetzten Rohstoffe Altpapierstoffe. [1]

Sollen weiße Altpapiere zu Druck- bzw. Schreibpapier wiederverwertet werden, ist die Abtrennung der Druckerfarben und gegebenenfalls auch der Füllstoffe aus dem Stoffkreislauf notwendig. Das Verfahren zur Entfernung der Druckfarbe wird „Deinking“ (Enttinten = Entfärben) genannt. Beim hier weltweit dominierenden Flotationsverfahren (daneben gibt es auch noch das Waschdeinkingverfahren, das auf Grund des hohen Wassergebrauchs unökonomisch ist und nur in speziellen Anwendungsfällen eingesetzt wird) werden zuerst im Pulper die Druckfarben durch mechanische Energie, durch Zugabe von Chemikalien (anionische Tenside, Wasserstoffperoxid, Wasserglas und Natriumhydroxid) sowie mithilfe von Wärme von den Fasern gelöst und durch Luftblasen aus der Suspension entfernen. Das Suspensions-Luft-Gemisch wird später mit hoher kinetischer Energie in so genannten Flotationszellen verteilt. Es bildet sich an der Oberfläche ein Schaum. Die hydrophoben Druckfarbenpartikel und ein großer Teil der mineralischen Bestandteile lagern sich aufgrund von Benetzbarkeitsunterschieden an den Luftblasen des Schaums an, der durch Dekantieren aus der Flotationszelle ausgetragen wird. [2]

Bei Anwendung des Flotationsverfahrens fallen Deinkingschlämme mit bis zu 20 % der eingesetzten Rohstoffmasse an. Tatsächlich handelt es sich bei dem Deinkingflotat oder Deinkingschlamm nach der mechanischen Entwässerung in einer Doppelsiebpresse aus verfahrenstechnischer Sicht nicht mehr um einen Schlamm, sondern um einen rieselfähigen, feuchten Krümelstoff. Zur Vereinfachung wird auch weiterhin der Begriff „Deinkingschlamm“ benutzt. Die Deinkingschlämme besitzen einen sehr hohen Asche- bzw. Mineralienanteil von bis zu 70 %.

Bei den Untersuchungen im Rahmen des DBU-Projektes stammen die Deinkingschlämme ausschließlich aus der Papierfabrik Hainsberg GmbH. Dort werden hauptsächlich Druck- und Kopierpapiere aus 100 % Altpapier hergestellt.

Trennprozesse in der Stoffaufbereitung einer Papierfabrik sorgen dafür, dass faserfremdes Material und zur Blattbildung nicht geeignete Faserverbunde (Stippen, Splitter) aus dem Stofffluss entfernt werden und eine Qualitätsbeeinträchtigung des Papiers vermieden wird. Fangstoffe sind Reststoffe aus der Feinsortierung (Cleaneranlagen und Druckseparatoren), aber auch Faserbruch und Feinstoffe aus dem über Rundsiebfilteranlagen geleiteten Kreislaufwassers in der Papierfabrik. Das bedingt einen hohen Papierfasergehalt von über 70 %. Aber auch Kunststoffbestandteile wie Polystyrol, Folienteilchen sowie mineralische Füllstoffe und Sand bestimmen die Zusammensetzung.

Die Gesamtstruktur der Fangstoffe ist deutlich gröber als die der Deinkingschlämme mit hohem Feinpartikelanteil. Durch den hohen Faseranteil ist ein großer Teil des in den Fangstoffen gespeicherten Wassers kapillar und zellulär gebunden. Eine mechanische Entwässerung ist demzufolge weniger effektiv als bei Deinkingschlämmen. Dadurch besitzt der Fangstoff mit fast 60 % einen höheren Wassergehalt.

Die untersuchten Fangstoffe dieses DBU-Projektes stammen ausschließlich aus der Kartonfabrik Porstendorf GmbH. Dort wird Graukarton aus 100 % Altpapier hergestellt.

## **2.2 Vorversuche zur Trocknung von Papierreststoffen im Klassischen Kinetischen Experiment**

### **2.2.1 Feuchteermittlung an den Papierreststoffen und Rückbefeuchtung**

Um das genaue Trocknungsverhalten der Papierreststoffe in einem Klassischen Kinetischen Experiment (KKE) zu erfassen, mussten zuerst der Wassergehalt und die Gleichgewichtsfeuchte der Proben bestimmt werden. Dafür wurden loser Deinkingschlamm der Papierfabrik Hainsberg sowie loser-, als auch nass pelletierter Fangstoff aus der Kartonfabrik Porstendorf eingesetzt. Von jedem Stoff wurden Proben zwischen 150 g und 230 g entnommen, per Laborwaage eingewogen und in eine Metallschale gegeben. Die vergleichsweise hohen Probenmassen wurden gewählt, um bei einem möglichen Feuchtigkeitsgradienten innerhalb der Reststoffe ein möglichst repräsentatives und fehlerfreies Ergebnis zu erreichen. Die Trocknung fand nach DIN EN 13183-1 in einem Trockenschrank bei einer Trocknungstemperatur von 102 °C statt. Nach 24 h Trocknungszeit wurden die Proben entnommen und direkt im Anschluss die Probenmassen bestimmt. Die Proben wurden in folgender Reihenfolge bestimmt: [3]

- Probe 1: Fangstoffe (lose) aus der Kartonfabrik Porstendorf
- Probe 2: Deinkingschlämme (lose) aus der Papierfabrik Freital-Hainsberg
- Probe 3: Fangstoffe (pelletiert) aus der Kartonfabrik Porstendorf

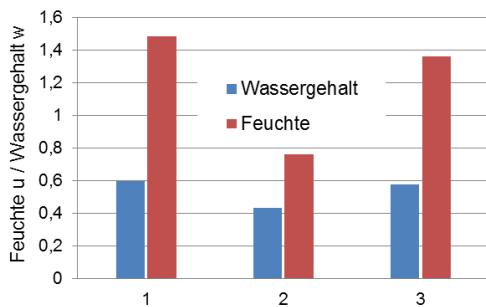
Bei den Voruntersuchungen war der Wassergehalt der Fangstoffe der Proben 1 und 3 mit 59,7 % bzw. 57,6 % Wassergehalt sehr ähnlich, da beide Proben aus dem gleichen Ausgangsmaterial bestehen. Der Deinkingschlamm der Probe 2 weist mit 43,2 % einen deutlich geringeren Wassergehalt als die Fangstoffe auf, da durch den hohen Mineralienanteil mehr freies Wasser bei der mechanischen Entwässerung abgetrennt werden kann und die Mineralien selbst kein Wasser binden. [3]

Eine Rückbefeuchtung der hygroskopischen Holzfasern nach der Trocknung erfolgt, weil das Probenmaterial mit der Umgebungsluft einen Gleichgewichtszustand anstrebt. Zur Untersuchung wurde von jeder zur Verfügung stehenden Probe eine mit darrtrockenem Reststoff befüllte Petrischale der Umgebungsluft ausgesetzt. Die Luftparameter über die Versuchsdauer lagen sehr stabil bei einer Luftfeuchte von  $\phi = 45 \% - 47 \%$  und einer Temperatur von  $T = 21 \text{ °C} - 23,5 \text{ °C}$ . In regelmäßigen Abständen wurde die Masse vier Tage lang mittels Laborwaage ermittelt. Erkennbar ist, dass eine Rückbe-

feuchtung der Reststoffe (= Gleichgewichtsfeuchte  $X$ ) innerhalb der ersten 4 h eintritt (Vergleich Abbildung 2). [3]

Der Rückbefeuchtungsgrad ist beim Deinkingschlamm weitaus geringer und liegt nur bei einem Fünftel dessen der Fangstoffe. Ursache dafür ist der geringere Faseranteil im Vergleich zu den Fangstoffen. Durch Pelletierung wird die Rückbefeuchtung beim Fangstoff vermindert. Die Deinkingschlämme erreichen unter den Versuchsbedingungen mit einer Luftfeuchte von knapp 50 % einen Endwasser-gehalt von 1 %, also weit unter dem für die Pelletierung notwendigen Wert.

### Eingangsfeuchte und Rückbefeuchtung der Stoffproben

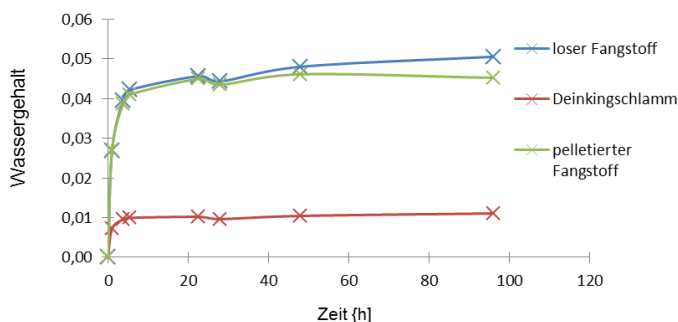


Darrtrocknung nach DIN EN 13183

$$w = 1 - \frac{m_{Tr}}{m_{einwaage}} \quad u = \frac{m_{einwaage}}{m_{Tr}} - 1$$

Probe 1: Fangstoffe (lose) aus der KF Porstendorf  
 Probe 2: Deinkingschlämme aus der PF Hainsberg  
 Probe 3: Fangstoffe (pelletiert) aus der KF Porstendorf

### Rückbefeuchtungsversuch



Gleichgewichtsfeuchte bei Rückbefeuchtung tritt innerhalb 4 Stunden ein

Abbildung 2: Wassergehalt und Rückbefeuchtung der Papierreststoffe [3]

### 2.2.2 Klassisches Kinetisches Experiment

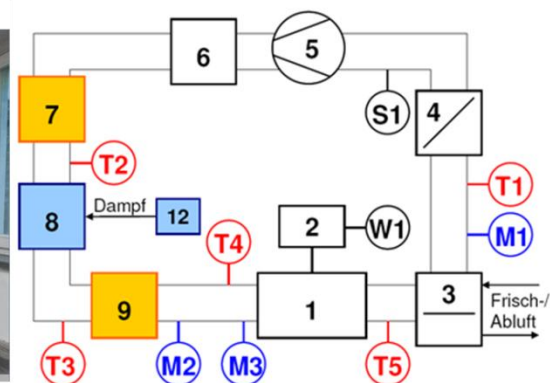
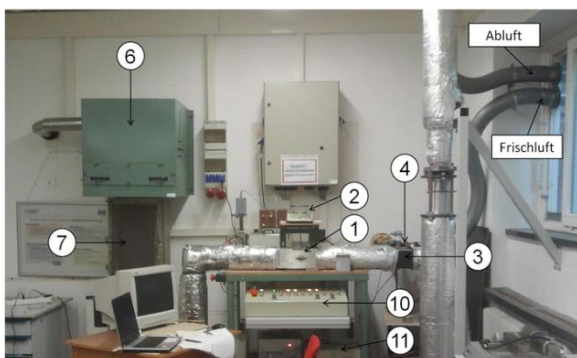
Das KKE dient der Ermittlung der stoffspezifischen Trocknungsverlaufskurven und somit der Kinetik eines Trocknungsprozesses ohne dass genaue Kenntnisse über die bei einer Trocknung im Gut ablaufenden Vorgänge, z. B. der interne Feuchtigkeitstransport, bekannt sein müssen. Um aus der ermittelten Kinetik Rückschlüsse allein auf die Trocknungseigenschaften des zu trocknenden Gutes ziehen zu können, müssen alle Einflüsse, sowohl die des Trocknungsmediums, als auch die der Versuchsanlage ausgeschlossen werden, sodass die Versuchsergebnisse unabhängig von aerodynamischen Einflüssen und einer veränderlichen Luftfeuchte sind. [3]

Der Aufbau des für die Untersuchung des Trocknungsverhaltens eingesetzten Versuchsstands ist in Abbildung 3 dargestellt. Der drehzahlgesteuerte Ventilator (5) erzeugt einen Unterdruck, welcher Frischluft über das Klappensystem (3) aus der Umgebung in die Versuchsanlage befördert.

Mithilfe der Klappen (3) kann die Anlage im Umluftbetrieb gefahren bzw. ein bestimmtes Verhältnis von Frisch- zu Umluft hergestellt werden. Eine direkt per Schaltpult (10) justierbare Drosselklappe (4) ermöglicht eine genauere Feineinstellung der Strömungsgeschwindigkeit. In einem Windkessel (6) werden durch den Ventilator bedingte Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit gedämpft. Im Heizregister (7) wird die Trockenluft mittels fünf Heizeinheiten, welche unabhängig zugeschaltet werden können, auf die gewünschte Trockentemperatur vorgewärmt. Die Feineinstellung der Versuchstemperatur erfolgt über einen sechsten regelbaren Heizer H6 (9), der stufenlos zwischen 0 und 1.350 W betrieben werden kann. Eine Befeuchtung des Luftstroms durch Aufsättigung mit Wasserdampf ist in der Befeuchtungszone (8) durch einen Dampferzeuger (12) möglich. Die Steuerung aller Vorgänge erfolgt zentral per Hand über ein Schaltpult (10). Die zu untersuchenden Proben werden in einem Probebehältnis in die Messkammer (1) gehängt, in der sie dem vorgeheizten Luftstrom ausgesetzt werden. Durch eine Laborwaage (2) wird die Masse der Probe dabei online gemessen. [3]

An mehreren Stellen der Versuchsanlage ermitteln Sensoren die Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchte. Die Temperaturmessung im Strömungskanal erfolgt durch fünf Thermoelemente (T1-T5). Zwei kapazitive Feuchtesensoren (M1, M3) sowie ein Taupunktsensor (M2) bestimmen die relative Luftfeuchte. Das zwischen (4) und (5) befindliche Flügelradanemometer übermittelt die Strömungsgeschwindigkeiten. Die Werte aller Sensoren sowie die Werte der elektronischen Laborwaage über eine serielle Schnittstelle (W1), werden an einen Prozessrechner (11) übermittelt und über das Programm DASyLab Version 5.6 erfasst. [3]

### Klassisches Kinetisches Experiment (KKE) zur Ermittlung der stoffspezifischen Trocknungverlaufskurven



Frontalansicht des Versuchsstands

Schema der Trockerversuchsanlage

1	Messkammer
2	Laborwaage
3	Frisch-/Umluft-Klappen
4	Drosselklappe
5	Ventilator
6	Windkessel
7	Heizregister
8	Befeuchtungszone

9	Regulierbare Heizeinheit
10	Schaltpult
11	Prozessrechner
12	Dampferzeuger
T	Thermoelement
M	Feuchtesensor
S	Anemometer
W	Massebestimmung

Abbildung 3: Versuchsstand für das KKE [3,4]



Sämtliche heißluftführenden Leitungen sind komplett wärmeisoliert, sodass während des Experimentiervorgangs innerhalb des Umluftprozesses kein Wärmeverlust auftritt. Darüber hinaus werden durch den Ventilator, in Bezug auf das Volumen der Probenmassen, vergleichsweise große Volumenströme umgewälzt, um die Luftfeuchteänderung durch Aufnahme der freigesetzten Probenfeuchte gering zu halten.

### 2.2.3 Trocknungsverhalten der Reststoffe bei Variation der Trocknungstemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit

„Zur sicheren Bestimmung der Kinetik der zu trocknenden Stoffe ist es erforderlich, mehrere Trocknungsverläufe unter Variation von Volumenstrom und Trocknungstemperatur durchzuführen. Bei der Trocknung des Fangstoffes werden aufgrund des unterschiedlichen Verarbeitungszustandes der Proben sowohl eine Versuchsreihe zum unbehandelten feuchten Fangstoff sowie zum bereits pelletierten Fangstoff durchgeführt und anschließend verglichen.“[3, Seite 32]

- 1 – Fangstoff (Porstendorf), lose
- 2 – Deinkingschlamm (Hainsberg), lose
- 3 – Fangstoff (Porstendorf), pelletiert

Variation der Trocknungstemperatur:	40 °C / 60 °C / 80 °C / 100 °C / 120 °C
Variation der Strömungsgeschwindigkeit:	2,5 m s <sup>-1</sup> / 3,5 m s <sup>-1</sup> / 4,5 m s <sup>-1</sup>
Probenmasse (feuchte Einwaage):	45 g Probe 1 + 3 (Fangstoff Porstendorf) 58,2 g Probe 2 (Deinkingschlamm Hainsberg)

Je höher die Lufttemperatur, je größer die Strömungsgeschwindigkeit und je geringer die relative Luftfeuchte, desto schneller erfolgt die Trocknung. Grundlage für die Wasseraufnahme durch die Luft ist der geringere Partialdruck des Wasserdampfes in der Luft gegenüber dem Dampfdruck an der Phasengrenze der Faser- bzw. Partikeloberfläche des Probematerials.

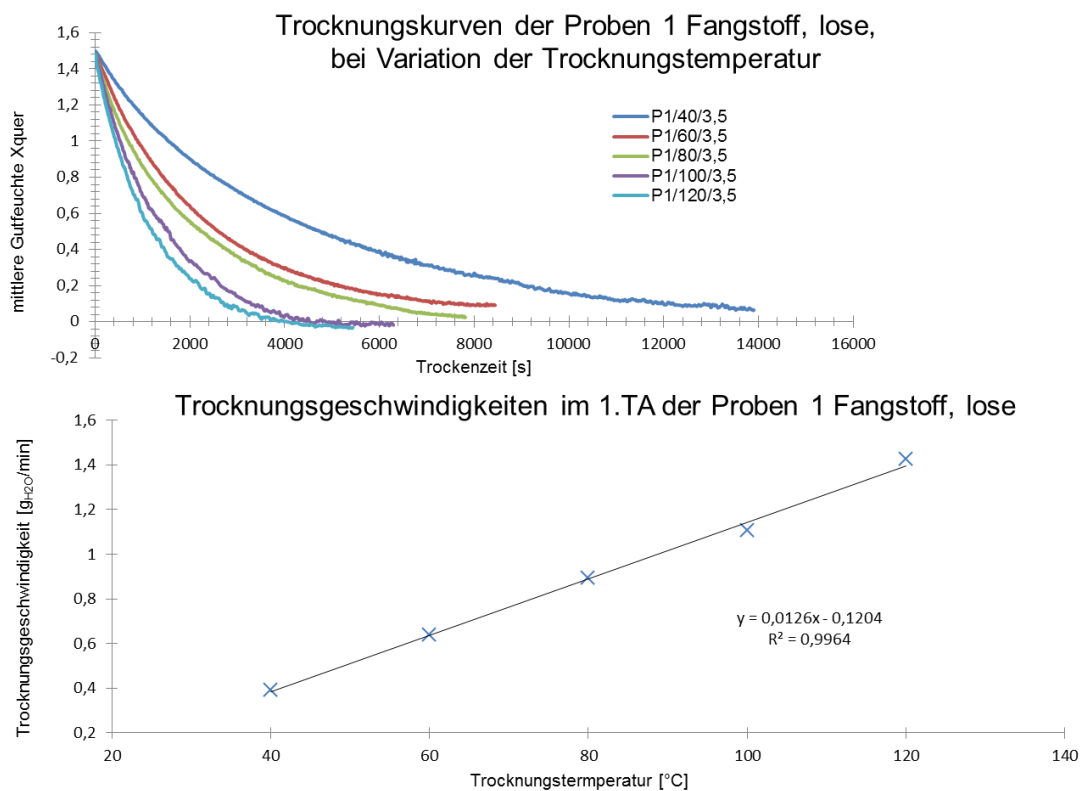
Allerdings sind dieser Vorgehensweise Grenzen gesetzt. So muss zum Beispiel die Trocknungstemperatur aus Sicherheitsgründen und zur Wahrung der Produkteigenschaften nach oben begrenzt sein. Ebenso ist bei steigender Strömungsgeschwindigkeit durch den progressiven Anstieg des Energiebedarfs ein ökonomischer Grenzwert festgelegt, denn eine Verdopplung der Strömungsgeschwindigkeit bedeutet nahezu eine Verdreifachung des Energieaufwands. [3]

Das Trocknungsverhalten der Reststoffe ist – da es von deren Holzfaserteil bestimmt wird – dem des Holzes sehr ähnlich. Grundsätzlich ist das Verhalten des Trockenguts somit kapillarporös und hygroskopisch. Aufgrund des allgemein verringerten Faseranteils ist dieser allerdings weniger ausgeprägt als bei Holz. [3]

Die Trocknung eines kapillarporösen, hygroskopischen Gutes lässt sich in drei Trockenabschnitte (TA) unterteilen. Entsprechend der Trocknungstemperatur steigt die Trocknungsgeschwindigkeit im 1. TA linear an. Ursache dafür ist die vollständig benetzte Oberfläche der Fangstoffpartikel im 1. TA, wodurch die Änderung der Trocknungsgeschwindigkeit nur aufgrund der Differenz  $\Delta Y$  zwischen absoluter Luftfeuchte an der Phasengrenze und in der Luft resultiert. Während sich beim 2. TA die Zone feuchten Stoffes in das Partikelinnere zurückzieht und der Dampftransport, gehemmt durch Wärme-

und Stofftransport, zur Oberfläche im Inneren des Gutes die Trocknungsgeschwindigkeit bestimmt, beginnt im 3. TA die Trocknung der Fasern selbst. Das hygroskopische Verhalten führt zu einer Gegentriebkraft durch die angestrebte Rückbefeuchtung aus der Trockenluft. [3]

Der mittlere Wassergehalt der Probe 1 Fangstoff lose liegt bei 59,7 %. Das entspricht einer mittleren Gutfeuchte von 148,3 %. Die losen, unbehandelten Fangstoffe sind damit aufgrund ihres hohen Faseranteils und im Gegensatz zu den vorpelletierten Fangstoffen die Proben mit dem höchsten Wasseranteil. Die Kurvenschar bei Variation der Trocknungstemperatur der Probe 1 Fangstoff lose (ähnlich so auch bei den Proben 2 und 3) weist trotz gleicher Abstände der Trocknungstemperaturen untereinander, zwei charakteristische Lücken auf (siehe Abbildung 4). Die Versuche P1/100/3,5 und P1/120/3,5 trocknen deutlich schneller als die restlichen untersuchten Proben. Zu erklären ist dies durch die Überschreitung der Verdampfungstemperatur bei der Trocknung. Die Trocknung geht bei 100 °C vom Verdunsten zum Verdampfen über. Deutlich langsamer trocknen die Proben bei P1/60/3,5 und P1/80/3,5. Erwartungsgemäß liegt die längste Trocknungsdauer bei dem Versuch P1/40/3,5. Parallel zur Zunahme der Gesamttrocknungszeit nimmt auch die Trocknungszeit bis zum Knickpunkt zu. [3]



**Abbildung 4: Trocknungsverläufe bei Variation der Temperatur bei Probe 1 Fangstoff lose [3]**

Zur Ermittlung der effektivsten Trocknungstemperatur (siehe Tabelle 1) wird ein temperaturabhängiger Effektivitätsparameter  $EP_T = T_T \cdot t_{Tr}$  eingeführt. [3]

Der Parameter ist nur zum Vergleich einer Probenreihe untereinander geeignet. Je niedriger dieser Parameter ausfällt, desto effizienter ist die Trocknung unter diesen Bedingungen, da die Trocknungstemperatur direkt proportional zum eingesetzten Energieaufwand bei gegebenen Bedingungen ist. Die eingesetzte Strömungsgeschwindigkeit des Trocknungsmediums bleibt unberücksichtigt, da sie

über die gesamte Versuchsreihe konstant bleibt. Der  $EP_T$  hat sein Minimum für die losen Fangstoffe der Probe P1/X/3,5 bei einer Trocknungstemperatur von ca. 60 °C. [3]

Die Pelletierung der Fangstoffe sollte bei einem Wassergehalt von 20 % ablaufen, da durch den Pelletiervorgang ein mechanisch bedingter Wasserverlust auftritt und eine Pelletbildung bei zu niedrigem Wassergehalt erschwert ist. Aufgrund dieser Voraussetzungen wurde der Effektivitätsparameter  $EP_{T,20\%}$  eingeführt, der statt des Gleichgewichtszustands die Trocknungsdauer bis zum Wassergehalt von 20 % berücksichtigt. In Tabelle 1 sind die ermittelten Werte dargestellt. Die niedrigsten  $EP_{T,20\%}$  liegen bei Trocknungstemperaturen über 100 °C. Die hohen Trocknungstemperaturen dieser Versuche sind allerdings mithilfe einer Nutzung von Restwärme der Papierfabriken nicht zu erreichen. Bei dem Versuch P1/60/3,5 liegt ein lokales Minimum. Der energetisch effektivste erreichbare Punkt der Trocknung bis 20 % Wassergehalt liegt somit bei einer Abwärmenutzung ebenfalls im Bereich um 60 °C. Wird eine zusätzliche Beheizung des Abwärmestroms erwägt, sollte diese den Konvektionsstrom auf 100 °C erhöhen, da nur dann eine Steigerung der Effektivität eintritt. [3]

**Tabelle 1: Trocknungsdauer und Effektivitätsparameter bei Probe 1 Fangstoff lose [5]**

**Übersicht der Trocknungsdauer  $t_{Tr}$  und dem zum Versuch der Probe 1 Fangstoffe lose gehörenden Effektivitätsparameter  $EP_T$  (für  $w= 5\%$  und  $w= 20\%$ )**  $EP_T = T_T * t_{Tr}$

Probe	Trocknungsdauer $t_{Tr}$	Effektivitätsparameter $EP_T$ [K·min]
P1/40/3,5	229,5 min	9180
P1/60/3,5	135,5 min	8130
P1/80/3,5	129 min	10320
P1/100/3,5	87,25 min	8725
P1/120/3,5	87,5 min	10500

Probe	Trocknungsdauer $t_{Tr,20\%}$	Effektivitätsparameter $EP_{T,20\%}$ [K·min]
P1/40/3,5	135 min	5400
P1/60/3,5	74,6 min	4476
P1/80/3,5	62,9 min	5032
P1/100/3,5	40,4 min	4040
P1/120/3,5	32,9 min	3948

**Übersicht der Trocknungsdauer  $t_{Tr,20\%}$  und dem zum Versuch der Probe 1 Fangstoffe lose gehörenden Effektivitätsparameter  $EP_{v,20\%}$  ( $w= 20\%$ )**  $EP_{v,20\%} = v^2_{Tr,20\%} * t_{Tr,20}$

Probe	Trocknungsdauer $t_{Tr,20\%}$	Effektivitätsparameter $EP_{T,20\%}$ [(m/s) <sup>2</sup> ·min]
P1/60/2,5	104,25 min	652
P1/60/3,5	74,6 min	914
P1/60/4,5	66,25 min	1342

Zusätzlich zur Variation der Trocknungstemperatur wurden für alle Reststoffarten auch die Strömungsgeschwindigkeiten variiert. Eine hohe Strömungsgeschwindigkeit verstärkt die Durchdringung der Schüttung und führt zu erhöhtem Abtransport feuchter, beladener und zur gesteigerten Zufuhr trockener, unbeladener Luft. Das führt zu einer erhöhten Trocknungsgeschwindigkeit und somit ver-

kürzten Trocknungszeiten. Auch bei den Versuchen unter Variation der Strömungsgeschwindigkeit wird ein Effektivitätsparameter  $EP_{v,20\%}$  eingeführt:  $EP_{v,20\%} = v_{Tr,20\%}^2 * t_{Tr,20\%}$  [3]

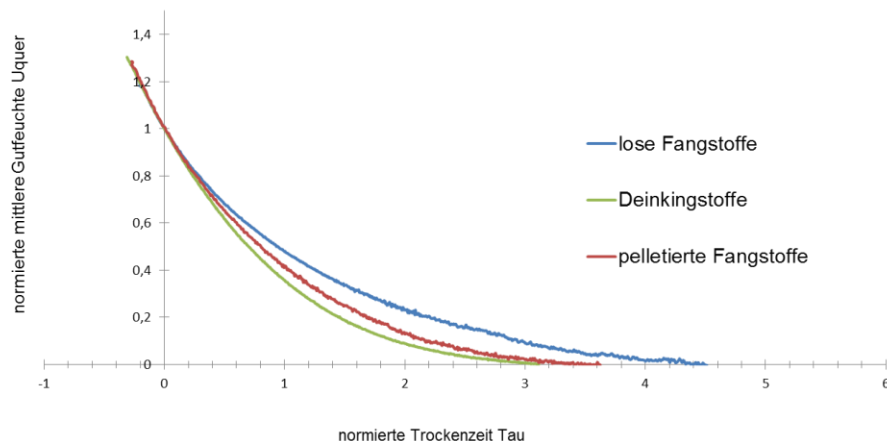
Die Strömungsgeschwindigkeit fließt quadratisch in die Parameterberechnung ein, da die benötigte Energie zur Erzeugung von Luftströmungen nicht linear proportional zum erzeugten Luftstrom steigt. Die Trocknungszeit sinkt zwischen P1/60/2,5 und P1/60/3,5 um beträchtliche 28 %. Dagegen sinkt sie zwischen der Änderung der Strömungsgeschwindigkeit von  $3,5 \text{ m s}^{-1}$  zu  $4,5 \text{ m s}^{-1}$  weit weniger. Wegen der energieintensiven Erzeugung des Luftstromes sowie der unverhältnismäßigen Verringerung der Trocknungszeit liegen die Werte des Effektivitätsparameters umso niedriger, je kleiner die Strömungsgeschwindigkeit gewählt wurde. Die Trocknung bei möglichst geringer Strömungsgeschwindigkeit ist somit am effektivsten. [3]

#### 2.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des KKE

In folgender Abbildung 5 sind die normierten Trocknungskurven aller drei untersuchten Reststoffe dargestellt. Auffällig ist, dass sowohl beim Fangstoff als auch beim Deinkingsschlamm der 1. TA wenig zur Gesamtentwässerung beiträgt. Nur knapp über 20 % der Gesamtfeuchte wird im 1. TA entfernt. Im Vergleich dazu liegt der Wert bei Holzhackschnitzeln bei nahezu 50 % [6]. Alle untersuchten Proben trocknen im 1. TA bei nahezu gleicher Geschwindigkeit und erst wenn der Feuchtetransport im Gut die Trocknungsgeschwindigkeit beeinflusst, zeigen sich gutspezifische Unterschiede.

#### Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeiten (lose – pelletiert)

normierte Trocknungskurven



- Schnellere Trocknung der pelletierten Fangstoffe
- Schnellste Trocknung bei Deinkingstoff (wenig Fasern mit hygroskopischem Verhalten)

Abbildung 5: Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeiten der 3 Papierreststoffproben [3]

Der lose Fangstoff zeigt, wie zu erwarten, die längste und flachste Trockenkurve. Unabhängig von ihrer höheren Ausgangsfeuchte wird dieser Reststoff die längere und energieintensivere Trocknung benötigen. Der Unterschied zu dem pelletierten Fangstoff dagegen ist überraschend groß. Kurz nach Beginn des 2. TA ist dessen Trocknungsgeschwindigkeit deutlich höher, als die

der losen Fangstoffe. Der Gleichgewichtszustand der Trocknung ist wesentlich eher erreicht. Der Deinkingschlamm besitzt einen minimal längeren 1. TA als die Fangstoffproben, da hier der hohe mineralische Anteil vor allem von Oberflächenwasser benetzt ist, das unabhängig von internen Transportlimitationen verdunsten kann. Der Verlauf im 2. TA ist durch den geringen Faseranteil der steilste und kürzeste und ermöglicht damit eine energiesparende Trocknung. Allgemein ist der Faseranteil ausschlaggebend für das qualitative Trocknungsverhalten der Reststoffe. Die enthaltenen Füllstoffe bewirken nur eine Stauchung bzw. Streckung der Trocknungskurven. [3]

Die in diesem Experiment ermittelten Trocknungskurven der unterschiedlichen Reststoffe ermöglichen die Übertragung der Kenntnisse aus den Laborexperimenten auf die technische Trocknung, ohne die genauen inneren Transport- und Trocknungsmechanismen zu kennen. Stoffe mit ähnlichen Trocknungsverlaufskurven erlauben Rückschlüsse auf den Feuchtetransport im Gut. [3]

Der ökonomisch effektivste Trocknungspunkt liegt für die losen Fangstoffe im Temperaturbereich um 60 °C und bei einer geringen Strömungsgeschwindigkeit von unter  $2,5 \text{ m s}^{-1}$ . In der Kartonfabrik Porstendorf, bei der diese Reststoffe anfallen, liegt eine gesättigte Abluft vor, die für den Zweck der Trocknung dieser Reststoffe genutzt werden soll. Nach einer Übertragung des Wärmepotentials per Wärmeüberträger würde eine ungesättigte Trocknungsluft mit einer Temperatur von noch knapp 40 °C vorliegen. Auf diesem Temperaturniveau ist die Trocknung der Reststoffe bis auf die gewünschte Feuchte grundsätzlich möglich. Zumindest ein Teil der anfallenden Reststoffmenge könnte damit getrocknet werden. Allerdings ist ein Einsatz von Fremdenergie, beispielsweise mit einem kostengünstigen Gasbrenner, ratsam. Dies bietet die Möglichkeit des Einsatzes eines kleineren Trockners bzw. Trocknung einer größeren Menge Reststoffe, da sich die Trocknungsdauer bei der Trocknung bis zu einem Wassergehalt von 20 % um fast die Hälfte verringert. Bei der Trocknung der pelletierten Fangstoffe von  $w = 20 \%$  auf 5 % liegt das Trocknungsoptimum mit 100 °C höher. [3]

Die Empfehlung geht daher zu einem 2-stufigen Trocknungssystem. Im ersten Trocknungsschritt erfolgt die Trocknung der Probe unter Nutzung der Abwärme bis zu einem Wassergehalt von 20 %. Hier kann unter geringen Investitions- und Betriebskosten mit einer kleinen Teilmenge des Reststoffanfalls im Probelauf gearbeitet werden, bis sich das PPC als Produkt am Markt etabliert hat. Bei Bedarf einer größeren Abnahmemenge lässt sich das Trockenpotential durch Ausrüstung des Trockners mit einer zusätzlichen Heizanlage zur Temperaturniveauerhöhung der als Trockenmedium eingesetzten Abluft um ein Vielfaches steigern.

Nach dem ersten Trocknungsschritt erfolgt die Pelletierung. Die Fangstoffpellets (F-Pellets) besitzen einen Wassergehalt  $w < 20 \%$ . Für diese wurde die ideale Trocknungstemperatur von 100 °C ermittelt. Die Fertigtrocknung erfolgt in einem zweiten kleineren Trockner, kann aber auch zur Verringerung der Investitionskosten bei diskontinuierlichem Betrieb mittels des gleichen Trockners aus dem ersten Trocknungsschritt bewältigt werden. Eine zusätzliche Beheizung ist hier quasi obligatorisch, um die letzte notwendige Feuchtedifferenz zu überwinden. Der benötigte zusätzliche externe Energieeinsatz ist verhältnismäßig gering, da nur noch wenig Feuchte zu verdunsten ist und damit die so zu erwärmende Luftmenge ebenfalls entsprechend gering ist. [3]

Für den Deinkingschlamm aus der Papierfabrik Hainsberg gelten die gleichen Empfehlungen wie für die Fangstoffe. Aufgrund des geringeren Wassergehaltes und des höheren Potenzials der Abwärme (55 °C gesättigter Luftstrom) sowie einer geringeren Bindung der Feuchtigkeit im Gut durch den geringeren Faseranteil ist kein Einsatz externer Heizenergie in der ersten Trocknungsstufe notwendig. [3]

Der Wärmeenergiebedarf für die Reststofftrocknung im Labormaßstab lag für die Fangstoffe bei 1,05 kWh/kg verdunstetes Wasser und für den Deinkingreststoff bei 0,89 kWh/kg verdunstetes Wasser.

Für die Schüttguttrocknung bis zu einem Wassergehalt von 20 % wäre ein Trommeltrockner die beste Lösung, da dieser bei relativ geringen Investitions- und Betriebskosten die Durchmischung des Trommelgutes bei gleichmäßiger Trocknung sichert. Der Trockner wird dabei im Gegenstrom betrieben, um auch bei geringen Trocknungstemperaturen eine maximale Triebkraft über die gesamte Trocknungsstrecke sicherzustellen.

Die Reststoffe weisen im Bereich der durch die Abluft vorgegebenen Trocknungstemperaturen weder eine Toxizität noch Feuergefahr auf. Die Endtrocknung der Faser-Pellets kann auch in einem Trockenlagerraum erfolgen. Dabei sollte eine Staubbildung bei den Faser-Pellets mit niedrigem Wassergehalt von ca. 5 % möglichst vermieden werden. [3]

### 2.3 Feuchtpelletierung und Trocknung im FGW Fasergusswerk Polenz GmbH

Im Fasergusswerk Polenz wurden 1.000 kg feuchter Fangstoff aus Porstendorf mit einem Wassergehalt von 60 % zuerst pelletiert (F-Pellets) und danach getrocknet (Wassergehalt 5 % – 10 %). Außerdem wurden zum Vergleich auch für die Produktion geeigneter Stoff (Gutstoff) für die Kartonherstellung aus Porstendorf (G-Pellets) und Deinkingschlamm aus Hainsberg (D-Pellets) pelletiert.



Abbildung 6: Pelletpresse PP400C der Fa. Qteck, Bergen [7]

Bei der Pelletpresse (Abbildung 6) handelt es sich um einen Pelletierer vom Typ PP400C der Fa. Qteck, Bergen. Das Füllmaterial wird mit Druck durch eine Matritze gepresst und zu festen, zylinder-

förmigen Pellets verarbeitet. Die technischen Daten der Pelletpresse PP400C nach Angaben des Herstellers sind: [7]

- Motor: 380 V
- Leistung: 30 kW
- Herstellungsmenge: bis ca. 700-900 kg/h
- Matrize: Ø 400 mm, Loch 6 mm
- Gewicht: 670 kg
- Aufbaumaß: 1490 x 590 x 1510 mm

Die Trocknung der Pellets erfolgte in einer Trockenkammer bei einem Luftdurchsatz von 3.000 m<sup>3</sup>/h. Die Luft wurde über einen Gasbrenner auf 140 °C erwärmt und mittels eines Radialventilators zugeführt. Der Trocknungsprozess dauerte ca. 4 Tage. Durch eine geänderte Luftzuführung sollte bei weiteren Versuchen die Trocknungsdauer verkürzt werden. [8]

Die Pelletierung von 1.000 kg feuchtem Fangstoff verlief problemlos. Bei den F-Pellets kam es nach der Trocknung zum Aufreißen der Pellets. Die Pellets hatten nach der Trocknung noch einen Wassergehalt von 6 % – 7 %. Die innere Festigkeit der F-Pellets konnte durch den Zusatz von 10 % Stärke verbessert werden. Auch die optische Gestalt und Form (Länge/Durchmesser-Verhältnis) der F-Pellets wurde dadurch gleichmäßiger. Die Kohäsion der F-Pellets erwies sich jedoch als nicht so gut wie die der zu einem späteren Zeitpunkt produzierten G-Pellets. Wahrscheinlich lag das an dem Wassergehalt vor der Pelletierung. Der Fangstoff hatte vor der Pelletierung noch einen Wassergehalt von 60 %. Der Gutstoff war schon einmal vorgetrocknet. Bei einem weiteren Versuch sollte dann der Fangstoff bis auf 20 % Wassergehalt vorgetrocknet und erst danach pelletiert und dann fertig getrocknet werden.

Bei einem Versuch mit Deinkingschlamm aus Hainsberg konnte bestätigt werden, dass sich ein Deinkingschlamm mit 40 % Wassergehalt besser als der Fangstoff pelletieren lässt. Der hohe Mineralanteil in den D-Pellets (bis 70 %) verbessert das rheologische Verhalten. Die Mineralanteile sind weniger hykoskopisch und die D-Pellets lassen sich besser trocknen. Eine Rückbefeuchtung wie bei den lignocellulösen Fasern kommt kaum vor. [8]

## **2.4 Compoundieren und Herstellung von PPC-Formteilen bei der Biofibre GmbH**

Bei einem industriellen Vorversuch zum Compoundieren und Spritzgießen im Mai 2014 bei der Biofibre GmbH wurden folgende Komponenten verwendet: [9]

### **Material**

- PP Homopolymer von Braskem DH 7058 01 NWAR 4A 00 71
- F-Pellets aus Porstendorf
- Vinnex 8880 (Wacker-Chemie) als Flussmittel
- Haftvermittler mit Maleinsäureanhydrid (MAH), SCONA TPPP 8112 FA
- Farb-Masterbatch, schwarz

### **Anlagen**

- Gleichlaufender Doppelschneckenextruder
- Dosiereinrichtungen der Fa. Scholz
- Unterwassergranulierung von ECON
- Trocknungsanlage der Fa. ECON
- Spritzgussmaschine der Fa. Billion, SELECT 100 Billion H 260

### **Compoundieren**

Mit dem ausgewähltem PP ergab sich ein ruhiger und kontinuierlicher Prozess. Es war problemlos möglich, mit 50 % Füllanteil (F-Pellets) zu compoundieren. Drei unterschiedliche Materialmischungen wurden gefahren: [9]

- Compound 1: F-Pellets zu 40 %, 1 % Flussmittel, 59 % PP, ohne MAH
- Compound 2: F-Pellets zu 40 %, 1 % Flussmittel, 3 % Masterbatch(schwarz), 53 % PP, 3 % MAH
- Compound 3: F-Pellets zu 50 %, 1 % Flussmittel, 3 % Masterbatch (schwarz), 43 % PP, 3 % MAH

Die Compoundieranlage wurde angefahren und die hergestellten Granulate waren binnen kürzester Zeit von guter Qualität. Die F-Pellets ließen sich problemlos dosieren (keine Unterbrechungen, keine Brückenbildung).

Alle Compounds ließen sich problemlos herstellen, wobei ein maximaler Durchsatz von etwa 80 kg/h erreicht wurde. Bei Normalproduktion von Bio-Compounds (CA-Matrix) wird mit einem Durchsatz von 35 kg/h gefahren. [9]

Eine Compoundierung mit D-Pellets wurde noch nicht durchgeführt. Von der Fa. SIMA-Mühlentechnik GmbH wurden 2 unterschiedliche Chargen D-Pellets geliefert. Die „weichen“ D-Pellets waren noch zu feucht und bei den „harten“ D-Pellets (glasiges Aussehen) bestand seitens der Biofibre GmbH die Befürchtung, die Compoundieranlage zu schädigen. Ein Versuch mit den „weichen“ D-Pellets sollte auf einer kleineren Extrusionsanlage folgen, wurde aber innerhalb der Projektlaufzeit nicht umgesetzt.

### **Spritzguss**

Alle Rezepturen ließen sich im Spritzgussverfahren gut verarbeiten. Selbst bei der Verarbeitung des Granulates mit 50 % F-Pellets/ 50 % PP wurde ein Wandstärken-Fließweg-Verhältnis von 1:100 erreicht. Möglicherweise ist die gute Fließfähigkeit des Materials auf die Faserstruktur zurückzuführen. Nach einer Trocknung der Granulate auf etwa 3 % Feuchte konnte eine zufriedenstellende Verarbeitung an der Spritzgussmaschine erreicht werden, sodass optisch einwandfreie Blumentöpfchen mit einer Wandstärke von nur 0,5 mm entstanden.

Als nachteilig wurde vermerkt, dass bei der Verarbeitung der F-Pellets gewisse Geruchsprobleme registriert wurden. [9]



Ein weiterer Versuch bei der Biofibre GmbH fand im Oktober 2014 statt. Die F-Pellets hatten einen Wassergehalt von 6 % – 7 %. Eine Compoundierung bei diesem Wassergehalt ist zwar noch möglich, aber es muss berücksichtigt werden, dass der Durchsatz bei der Compoundierung mit zunehmender Feuchte sinkt, da mehr Dampf entsteht, der abgeführt werden muss. Deshalb sollten die 5 % Wassergehalt oder Restfeuchte im Pellet angestrebt werden. [10]

Dieser 2. Versuch bei der Biofibre GmbH musste abgebrochen werden, weil Metallteilchen in den F-Pellets zu einem Maschinenstillstand führten. Die Metallteilchen hatten sich an der 3 mm-Düse des Granulators festgesetzt. Die verstopfte Düsenöffnung führte zu einem Druckaufbau im System und der Überdruck schließlich zu einem Maschinenstillstand. Die Anlage musste auseinander und wieder zusammengebaut werden. Im Nachgang wurde festgestellt, dass die Metallteilchen die Beschichtung der Schneckenwellen beschädigt hatten, die in Folge dessen ausgewechselt werden mussten. Kleine Folien- und Styroporpartikel bereiteten dagegen keine Probleme bei der Compoundierung. [10]

An der TU Dresden wurden die reklamierten F-Pellets untersucht. Dabei konnte bestätigt werden, dass kleine magnetische Metallteilchen ebenso wie Folienstückchen in den Pellets enthalten waren (Vergleich Abbildung 7). Fangstoffe sind bei der Feinsortierung in der Stoffaufbereitung zurückgehaltene Reststoffe, welche an den Sieben aussortiert werden. Ein Bestandteil dieser Fangstoffe können zum Beispiel Heftklammern sein.



**Abbildung 7: Magnettrommelsortierung: oben Faserstaub und Plasteteile; unten F-Pellets und Metallteile**

Um Metallteilchen in Pellets zukünftig als Störungsursache auszuschließen, wurde von Seiten der Kartonfabrik Porstendorf bei der Firma Vecoplan geprüft, ob über ein Förderband mit Magnetscheider das Problem gelöst werden kann.

Die reklamierten Pellets wurden dort mittels eines Magnettrommelsortierers (Abbildung 8) nachgearbeitet und Metallteilchen identifiziert und aussortiert. Die Magnettrommel befindet sich in einem Gehäuse mit 2 unten angebrachten Ausläufen. Durch diese Ausläufe fällt das abgeschiedene ferromagnetische Material in den zweiten und das Förderschüttgut in den ersten Auslauf.



**Abbildung 8: Magnettrommelsortierer [12]**

Insgesamt wurden 4 Boxpaletten mit F-Pellets (ca. 1.000 kg) nachgearbeitet, wovon die Hälfte für weitere Untersuchungen zurück an die Biofibre GmbH ging. Dort fand im Dezember 2014 ein neuer Versuch mit den nachgearbeiteten F-Pellets statt. Mittels Folienextrusion wurden Schalen hergestellt. Die Pellets bereiteten keine Probleme mehr.

Folienrezepturen:        80 % F-Pellets/20 % Polymermatrix sowie  
                                 60 % F-Pellets/ 40 % Polymermatrix

## **2.5 Extrusion (1-stufig) und Verarbeitung bei der NATURinFORM GmbH**

Ca. 500 kg der nachgearbeiteten F-Pellets wurden bei der NATURinFORM GmbH für weitere Versuche eingesetzt. Außerdem erfolgten dort auch Versuche mit D-Pellets aus der Papierfabrik Hainsberg GmbH. D- und auch F-Pellets konnten jeweils mit einem HDPE-Polymer ohne Probleme in einem Extruder mit gegenläufiger Doppelschnecke und kurzer Verarbeitungslänge zu PPC-Terrassendielen verarbeitet werden (Polymeranteil 30 %). [11]

Bei einer Eingangskontrolle der Faserpellets wurden folgende physikalischen Eigenschaften ermittelt:

Eigenschaften:	D-Pellets	F-Pellets
Feuchtigkeit:	3,6 %	13,6 % (zu hoch)
Schüttgewicht:	564 g/l	170 g/l (sehr niedrig)

**Verarbeitungsanlage:** Cincinnati Titan Fibrex 80 (Konische Doppelschnecke)

Ausstoß: ca. 200 kg/h

Matrix: HDPE

Anteil Polymer: 30 %

Anteil Haftvermittler 2,7 %

Massetemperatur: 195 °C

Massedruck: 100 bar

## Hauptteil

Zur Verarbeitung wurden die Pellets über eine Dosierschnecke mittels Differenzialdosierwaage in den Haupteinzug des Zylinders gegeben. Die Zugabe des Trägermaterials und der Haftvermittler erfolgte ebenso über den Haupteinzug, das Mischungsverhältnis war variabel und konnte während des Prozesses angepasst werden. [11]

In der Verarbeitungsanlage erfolgten das Aufschmelzen des Polymers, gleichzeitig die Vermischung und die Entfeuchtung des Werkstoffs, sowie der Austrag aus dem Extrusionswerkzeug.

Neben der guten Dosierbarkeit ließen sich die Rohstoffe gut verarbeiten. Schwankungen der Verfahrensparameter wurden nicht beobachtet.

Ein starker, unangenehmer chemischer Geruch löste bei einem Mitarbeiter Brechreiz aus. [11]

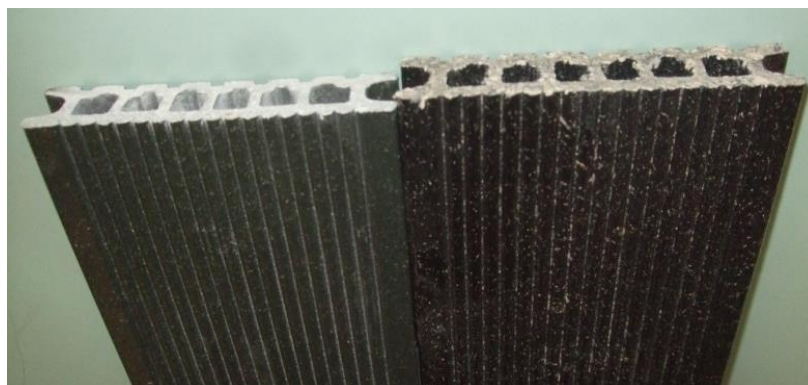


Abbildung 9: PPC-Terrassendielen: links mit D-Pellets; rechts mit F-Pellets

Beim Einsatz der F-Pellets war die Vermischung mit dem Polymer noch unbefriedigend, was auch im Querschnitt der hergestellten Terrassendielen in Abbildung 9 zu erkennen ist. Durch diese unzureichende Vermischung wurden die Biegeeigenschaften des PPC-Werkstoffes sehr nachteilig beeinflusst. Eine bessere Vermischung mit dem Polymer könnte auch bessere Produkteigenschaften erwarten lassen. Ungenügend war beim Einsatz von F-Pellets ebenfalls das Quellverhalten des PPC-Versuchsmaterials nach 5 stündiger Kochwasserlagerung. Die Werte dieses Versuchs sind in Tabelle 2 dargestellt. [11]

Tabelle 2: Eigenschaften der Terrassendielen mit F-Pellets [11]

F-Pellets		Abmessungen der Proben <b>vor</b> Kochen				Abmessungen der Proben <b>nach</b> Kochen				Quellung der Proben <b>nach</b> Kochen in %				Biegeeigenschaften	
Allgemeine Informationen		Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Biegung	Bruchlast
Nr.	Prod. Zeit														
1	27.11.2014	99,66	139,3	26,57	251,36	101,1	142,73	28,36	288,82	1,40	2,49	6,74	14,90		2584
2		99,65	139,6	26,62	252,39	100,9	143,53	28,03	287,86	1,22	2,83	5,30	14,05		1984
3		99,03	139,8	26,5	250,44	100,2	143,68	27,85	288,07	1,21	2,75	5,09	15,03		
4		99,73	139,4	26,62	251,28	100,7	142,96	28,17	292,38	0,99	2,58	5,82	16,36		
5		99,92	139,5	26,67	251,72	100,8	143,02	28,4	293,06	0,83	2,51	6,49	16,42		
						<b>Mittelwert:</b>				1,13	2,63	5,89	15,35	#DIV/0!	2284

Der Werkstoff mit D-Pellets zeigte sich in den Versuchen besonders temperaturstabil. Beim Einsatz der D-Pellets liegen die Bruchlasteigenschaften mit 3.000 N nicht weit von den geforderten Werten (3.400 N) entfernt. Zum Vergleich werden bei WPC-Werkstoffen 7.500 N erreicht. Bei Produkten aus reinem Holz können die Werte bei 14.000 N liegen. Die Ergebnisse und Anforderungen sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 zusammengefasst. [11]

**Tabelle 3: Eigenschaften der Terrassendielen mit D-Pellets [11]**

D-Pellets		Abmessungen der Proben <u>vor</u> Kochen				Abmessungen der Proben <u>nach</u> Kochen				Quellung der Proben <u>nach</u> Kochen in %				Biegeeigenschaften	
Allgemeine Informationen															
Nr.	Prod. Zeit	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Biegung	Bruchlast
1	27.11.2014	100,18	136,2	25,65	298,38	100,4	136,57	25,77	301,53	0,18	0,26	0,47	1,06		3047
2		100,03	136,6	25,84	300,98	100,2	136,86	25,97	304,15	0,14	0,23	0,50	1,05		2989
3		100,18	136,5	25,88	302,8	100,4	136,83	26,05	306,11	0,20	0,22	0,66	1,09		
4		100,23	136,3	26,02	302,32	100,4	136,54	26,17	305,49	0,15	0,20	0,58	1,05		
5		99,68	136,3	25,94	300,71	99,87	136,72	26,08	303,77	0,19	0,28	0,54	1,02		
									<b>Mittelwert:</b>	0,17	0,24	0,55	1,05	#DIV/0!	3018

**Tabelle 4: Anforderungen an WPC-Terrassendielen [11]**

Forderungen	Quellung der Proben <u>nach</u> Kochen in %				Biegeeigenschaften	
	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Biegung	Bruchlast
<b>Mittelwerte :</b>	0,50%	0,80%	4,50%	7,00%	1,9 mm	3300 N
<b>Max.Werte :</b>	0,50%	0,80%	4,50%	8,00%	2,0 mm	3200 N

## 2.6 Trocknung der Reststoffe, Vorzerkleinerung und Pelletierung bei der DIEFFENBACHER GmbH

Von dem Maschinenbauer DIEFFENBACHER GmbH in Eppingen wurden weitere Untersuchungen zur Pelletierung der Papierreststoffe und gleichzeitiger Compoundierung mit Polyethylen angeboten.

Bei Vorversuchen im Mai 2015 wurden die Papierreststoffe (entwässerte Faserschlämme als Krümelstoff) vor der Pelletierung im Trockenschrank getrocknet. Für die Untersuchung der Trockenpelletierung von Fangstoff wurde folgende Versuchsreihe durchgeführt: [12]

- V1: 50 % Fangstoff grob, 50 % PE (Vorgabe von Fa. Biofibre für Spritzgussanwendung)
- V2: 100 % Fangstoff grob
- V3: 70 % Fangstoff fein, 30 % PE (Vorgabe von Fa. NATURinFORM für Extrusion)
- V4: 100 % Fangstoff fein

Zur Vermischung von Fangstoff und Bindemittel wurden diese gemeinsam in der Feinprallmühle aufgegeben. Bei der Zerkleinerung des getrockneten Fangstoffes entsteht ein fluffiges Fasermaterial was mit zunehmender Feinheit in der Pelletpresse zu Dosierproblemen führt. So konnten bei dem Versuch mit 100 % Fangstoff grob in 1 Stunde ca. 1 m<sup>3</sup> F-Pellets hergestellt werden. Mit 100 % Fangstoff fein würde der Vorgang nach Aussage der DIEFFENBACHER GmbH ca. 1 Woche dauern. [12]

Der erzeugte Materialmix wurde im Anschluss ohne weitere Behandlung in die Pelletpresse aufgegeben.

Die Ergebnisse aus den Vorversuchen zeigen bei dem Versuch 2 mit 100 % Fangstoff grob die besten Ergebnisse. Mit zunehmender Feinheit des Fangstoffes fallen kürzere F-Pellets und verstärkt auch Staub an. Bei gleichzeitiger Zugabe von PE (Mischung von Hand vor der Pelletpresse) im Verhältnis 70 % FS fein/ 30 % PE nimmt der Staubanteil ebenfalls zu, da die Anteile an Polymer nicht ausreichen, um den Faserstoff vollständig zu benetzen. Bei den Compound-Pellets aus 50 % FS grob/ 50 % PE sind dagegen die Ergebnisse ähnlich gut wie bei den F-Pellets aus 100 % FS grob. Im Folgenden sind die

Ergebnisse der Vorversuche noch einmal zusammengestellt. Zur Veranschaulichung dienen Abbildung 10 und Abbildung 11. [12]



Abbildung 10: Pellets aus V1 (links) und V2 (rechts) [12]

**V1: 50 % Fangstoff grob, 50 % PE**

- SD: 560 kg/m<sup>3</sup>
- leicht poröse/rissige Mantelfläche
- geringe Entmischung von Fangstoff und PE zu beobachten
- Fangstoff problemlos zu pelletieren
- Dosierung und Zuführung ohne Verstopfen möglich
- nach Auflösen in Wasser deutliche Verschmelzungen des PE erkennbar

**V2: 100 % Fangstoff grob**

- SD: 695 kg/m<sup>3</sup>
- glatte glänzende Mantelfläche
- Fangstoff problemlos zu pelletieren
- Dosierung und Zuführung ohne Verstopfen möglich



Abbildung 11: Pellets aus V3 (links) und V4 (rechts) [12]

**V3: 70 % Fangstoff fein, 30 % PE**

- SD: 586 kg/m<sup>3</sup>
- Dosierung und Zuführung erschwert
- starkes Stopfen/Brückenbilden in Aufgabeschacht der Labormaschine
- leichtes Entmischen von Fangstoff und PE
- Material baut sich vor Koller der Labormaschine auf und wird schwer eingezo-gen
- offenere Struktur, neben Pellets auch Flocken
- nach Auflösen in Wasser deutliche Verschmelzungen des PE erkennbar

**V4: 100 % Fangstoff fein**

- SD: 634 kg/m<sup>3</sup>
- Dosierung und Zuführung nur schwer möglich
- starkes Stopfen/Brückenbilden in Aufgabeschacht der Labormaschine
- Material baut sich vor Koller der Labormaschine auf und wird schwer eingezo-gen
- Pellets kurz und stärker verdichtet

Bei allen durchgeführten Versuchen auf der Laborpresse war es möglich, Pellets zu erzeugen. Probleme, die beispielsweise bei der Zuführung des Materials in die Pellet-Pressen aufgetreten sind, beziehen sich ausschließlich auf die eingesetzte Labormaschine. Bei einer Umsetzung in eine industrielle Fertigung sind diese durch Anpassungen der Maschine lösbar. Eine Metallabscheidung ist nach der Trocknung und vor dem Pelletierprozess einzubauen. Die Eigenschaften der Pellets sind durch weitere Anpassungen der Produktionsparameter einzustellen und auf die Bedürfnisse der PPC-Fertigung anpassbar. [12]

Nach wie vor besteht das Problem der Geruchsbelästigung beim Trocknungsprozess des Deinking-schlammes. Die Emissionen sind bisher noch nicht weiter olfaktorisch untersucht worden.

Für eine 2. Versuchsreihe im Technikum Eppingen der Fa. DIEFFENBACHER GmbH hatte die Prozesskette folgendes Aussehen:

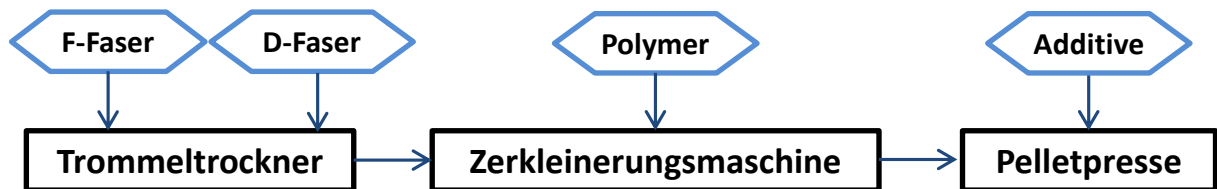


Abbildung 12: Prozesskette bei der DIEFFENBACHER GmbH

1 t Fangstoff aus der Kartonfabrik Porstendorf wurde im Trommeltrockner im Durchlauf bei 150 °C getrocknet. Nach 3 Durchgängen war der erforderliche Trockengehalt erreicht. Die Trocknung des Deinkingschlammes erfolgte im Trockenschrank. Die Geruchsprobleme waren deutlich geringer als bei den Vorversuchen im Sommer. [13]



Abbildung 13: Trommeltrockner (links) und Feinprallmühle (rechts) [13]

In einer Feinprallmühle wurden die getrockneten, krümeligen Papierreststoffe zerkleinert, homogenisiert und teilweise mit Polymer (70 % Faser/ 30 % Polymer) compoundingiert. Bei der Compoundingierung kann es zum Verschmieren des PE kommen, wenn die Temperatur in der Feinprallmühle zu hoch ist. Bei der Durchführung von Versuch 3 (70 % FS grob/ 30 % PE) konnte kein ausreichender Zusammenhalt des Gefüges erreicht werden. Beim Versuch 6 (Mischung FS/ Deinking) wurde der Anteil von Fangstoff stetig erhöht. Mit einem Anteil von 40 % FS wurde noch eine gleichmäßige Pellet-Struktur erreicht. [13]

Trommeltrockner und Feinprallmühle sind in Abbildung 13 dargestellt.

Vor und nach dem Pelletieren von Fangstoff und Deinkingreststoff wurde das Material aushebend (Überbandmagnet) und fallend (Magnettrommel mit Beschickung über Schwingrinne) auf magnetische Bestandteile untersucht und diese abgeschieden (siehe Abbildung 14).



**Abbildung 14: Eisen-Abscheidung [13]**

In der Presse könnten bei Bedarf Additive zugegeben werden. Die Pellets sollten eine zylindrische Form haben. Der Durchmesser sollte 5 mm – 6 mm betragen. Das L/D-Verhältnis sollte bei 1 – 1,5 liegen. Der Wassergehalt der Pellets sollte < 5 % betragen (bei den Versuchen wurden FS auf 5 % und Deinkingschlämme auf 7 % Restfeuchte getrocknet). [13]

**Versuchsplan:**

- V1: 100 % FS - grob
- V2: 100 % FS - fein
- V3: 70 % FS - grob / 30 % PE
- V4: 70 % FS - fein / 30 % PE
- V5: 100 % Deinking
- V6: Mischung FS / Deinking

**Rohstoffe:**

Fangstoff - grob: Kartonfabrik Porstendorf  
Trocknung kontinuierlich in Trommeltrockner  
Aufschluss in Feinprallmühle mit Sieblochung 15 mm  
SD: 52 kg/m<sup>3</sup>

Fangstoff - fein: Kartonfabrik Porstendorf  
Trocknung kontinuierlich in Trommeltrockner  
Aufschluss in Feinprallmühle mit Conidur-Sieb 2,75 mm x 2,5 mm  
SD: 34 kg/m<sup>3</sup>

Deinkingschlamm: Papierfabrik Hainsberg  
Trocknung chargenweise in Trockenschrank  
Aufschluss in Feinprallmühle mit Sieblochung 15 mm  
SD: 359 kg/m<sup>3</sup>

POLYETHYLENE  
HIGH DENSITY 25055E: Aufschluss in Feinprallmühle mit Conidur-Sieb 1,3 mm x 1,1 mm  
SD: 378 kg/m<sup>3</sup>

**Ergebnisse:**

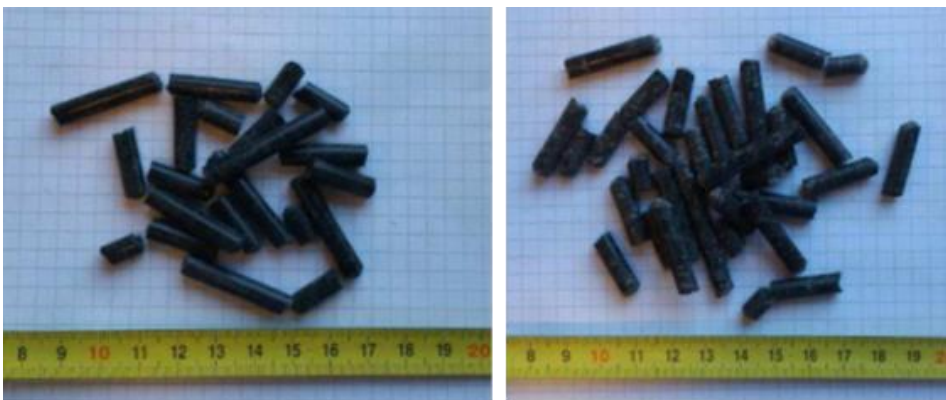
Die Versuche wurden in der 3. und 4. KW 2016 soweit wie möglich auf der Versuchsanlage in Eppingen durchgeführt. [13]

Die DIEFFENBACHER GmbH ist in der Lage, den Fertigungsprozess bis zur Pelletierung der Faserstoffe ohne Probleme durchzuführen und den Prozess industriell abzubilden. Auch das Geruchsproblem ist dabei lösbar. Die fertigen Pellets sind in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt.

Korngrößen von 800 µm – 1.000 µm bei dem Füllstoff (hier der Faserreststoff) im Verbundwerkstoff PPC sind für die Verarbeitung optimal. Dieses entspricht genau der mittleren Faserlänge der Faserreststoffe. [13]



**Abbildung 15: V1 – 100 % FS grob (SD: 612 kg/m<sup>3</sup>, links), V2 – 100 % FS fein (SD: 632 kg/m<sup>3</sup>, rechts) [13]**



**Abbildung 16: V5 – 100 % Deinking (SD: 983 kg/m<sup>3</sup>, links), V6 – FS/Deinking (SD: 798 kg/m<sup>3</sup>, rechts) [13]**

**2.7 Erneute Extrusion und Verarbeitung bei der NATURinFORM GmbH**

Alle Pellet-Versuchschargen von der DIEFFENBACHER GmbH ließen sich bei der Extrusion sehr gut dosieren. Der Prozess lief unter konstanten Produktionsbedingungen mit 1,5 m-2,0 m Terrassendielen/min ab. Geruchsemissionen bei der Herstellung der PPC-Terrassendielen sind im Vergleich zu WPC nach wie vor störend. [14]

Bei den Pelletcompounds mit PE (V3 und V4) war die Polymermatrix mit der von der NATURinFORM GmbH nicht identisch, was zu nicht komplett geschlossenen Oberflächen bei den PPC-Terrassendielen führte.



Bei den WPC-Terrassendielen werden 50 % im Produktionsprozess gebürstet, um das Holz an der Oberfläche sichtbar zu machen und die Rutschfestigkeit zu erhöhen. Bei den PPC-Terrassendielen bringt das Aufbürsten keine optischen Verbesserungen. [14]

Im Vergleich zu den Versuchen vor einem Jahr konnte bei den PPC-Terrassendielen mit Fangstoff das Quellungsverhalten deutlich verbessert werden (siehe Tabelle 5). Alle Quellungswerte nach 5 Stunden Kochwasserlagerung liegen im Normbereich. Ursache dafür ist die Einhaltung des Wassergehalts < 5 % bei den F-Pellets (zum Vergleich im Vorjahr: Wassergehalt 13 %). Bei den PPC-Terrassendielen mit Fangstoff (V1 und V2) wurde auch eine Verbesserung der Biegeeigenschaften erreicht. Die gemessenen Bruchlasten erfüllen die Norm. Dagegen konnte bei den PPC-Terrassendielen mit D-Pellets (V5 und V6) keine weitere Verbesserung erreicht werden. Der Wassergehalt bei den D-Pellets lag mit 7 % doppelt so hoch im Vergleich zu den Versuchen vor einem Jahr. Die Biegeeigenschaften der PPC-Terrassendielen mit Deinkingschlamm liegen gleich bzw. leicht unter den vor einem Jahr gemessenen Werten. Die Festigkeitswerte bei WPC-Terrassendielen sind jedoch um fast 100 % höher. Um gleiche Festigkeiten zu erreichen, müssten die Dielen dicker ausgelegt werden, was mit größerem Materialeinsatz verbunden ist. [15]

Die PPC-Terrassendielen erscheinen auch nach einem Jahr Außenlagerung (Witterungseinflüsse) noch wenig verändert. [16]

Es wird eingeschätzt, dass die Feuerfestigkeit von PPC besser ist als bei WPC-Werkstoffen. Dieses ist abhängig von der Höhe des Mineraliengehalts.

Das Schüttgewicht der Pellets wurde als sehr gut beurteilt. Nach Aussage der NATURinFORM GmbH sind die von der DIFFENBACHER GmbH hergestellten Pellets problemlos verarbeitbar. Auch wäre der Einsatz der Reststoffe in Terrassendielen durchaus denkbar. Die NATURinFORM GmbH sieht aber bessere Chancen für eine Umsetzung, wenn neue bzw. eigens auf die Eigenschaften abgestimmte Anwendungen gefunden werden würden.

Eine Bewertung der Faserpellets kann nur nach den Produkthanforderungen an das Endprodukt und dessen Einsatzzweck erfolgen. Für eine Anwendung der PPC-Werkstoffe im Außenbereich (Terrassendielen, Fassadenverkleidungen, Mülltonnen u.a.) sind weitere Prüfstandards zu berücksichtigen, wie zum Beispiel die DIN EN 13501 „Anforderungen für Verhalten bei äußerer Brandeinwirkung“ und die DIN 53160 „Prüfung der Farblässigkeit von Gebrauchsgegenständen“. Bei Kontakt mit Lebensmitteln ist die EN 1186 „Bestimmung der Gesamtmigration mittels gravimetrischer Untersuchung von Werkstoffen und Bedarfsgegenständen“ zu berücksichtigen.

Während der Herstellung und bei der Nutzung von Produkten aus PPC dürfen keine negativen Einflüsse auf Umwelt und Gesundheit entstehen. Eine Freisetzung von Emissionen in Wasser und Luft ist unbekannt.

Tabelle 5: Eigenschaften der PPC-Terrassendielen aus dem 2. Versuch [14]

Allgemeine Informationen				Abmessungen der Proben <u>vor</u> Kochen				Abmessungen der Proben <u>nach</u> Kochen				Quellung der Proben <u>nach</u> Kochen in %				Biegeeigenschaften	
Nr.	Prod. Zeit	Farbe		Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Biegung	Bruchlast
1				101,62	137,37	26,23	303,94	101,74	137,43	26,31	305,56	0,12	0,04	0,30	0,53	1,67	2702
2				101,73	137,56	26,31	303,52	101,77	137,67	26,42	306,04	0,04	0,08	0,42	0,83	1,5	2938
3				101,83	137,35	26,23	305,4	101,94	137,41	26,31	307,04	0,11	0,04	0,30	0,54	1,46	2769
				Mittelwert:													
				70% FS-grob / 30% PE (V1)													
Allgemeine Informationen				Abmessungen der Proben <u>vor</u> Kochen				Abmessungen der Proben <u>nach</u> Kochen				Quellung der Proben <u>nach</u> Kochen in %				Biegeeigenschaften	
Nr.	Prod. Zeit	Farbe		Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Biegung	Bruchlast
1				100,39	138,54	26,42	249,6	100,73	139,22	27,27	262,19	0,34	0,49	3,22	5,04	1,33	3696
2				100,58	138,69	26,44	251,11	100,97	139,36	27,29	264,65	0,39	0,48	3,21	5,39	1,33	3623
3				101,05	138,68	26,47	252,67	101,33	139,57	27,27	264,99	0,28	0,64	3,02	4,88	1,39	3744
				Mittelwert:													
				Mischung FS/Deinking + 30% unser PE-Mix (V6)													
Allgemeine Informationen				Abmessungen der Proben <u>vor</u> Kochen				Abmessungen der Proben <u>nach</u> Kochen				Quellung der Proben <u>nach</u> Kochen in %				Biegeeigenschaften	
Nr.	Prod. Zeit	Farbe		Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Biegung	Bruchlast
1				101,07	138,09	26,17	283,84	101,29	138,47	26,68	292,29	0,22	0,28	1,95	2,98	1,35	2902
2				101,41	138,02	26,04	283,73	101,6	138,46	26,59	293,64	0,19	0,32	2,11	3,49	1,49	2749
3				100,76	137,78	26,35	279,45	101,04	138,67	27,1	295,39	0,28	0,65	2,85	5,70	1,6	2580
				Mittelwert:													
				70% FS-fein/ 30% PE (V2)													
Allgemeine Informationen				Abmessungen der Proben <u>vor</u> Kochen				Abmessungen der Proben <u>nach</u> Kochen				Quellung der Proben <u>nach</u> Kochen in %				Biegeeigenschaften	
Nr.	Prod. Zeit	Farbe		Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Biegung	Bruchlast
1				100,42	138,48	26,41	248,88	100,8	139,16	27,04	261,36	0,38	0,49	2,39	5,01	1,56	3350
2				100,67	138,69	26,5	250,56	100,96	139,47	27,18	263,76	0,29	0,56	2,57	5,27	1,38	3340
3				100,52	138,87	26,43	250,8	100,92	139,79	27	265,76	0,40	0,66	2,16	5,96	1,49	3253
				Mittelwert:													

## 2.8 Physikalische Eigenschaften und chemische Analysen an den Faserpellets



Abbildung 17: Pelletierer PM22E von EcoWorxx

Die Faserpellets für die Ermittlung der physikalischen Eigenschaften und für die chemischen Analysen wurden im Technikum der Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik der TU Dresden in Freital-Hainsberg hergestellt. Dabei kam als Pelletpresse der Pelletmaker PM22E der Fa. EcoWorxx, Deggendorf, zum Einsatz (Abbildung 17).

Die Probenahmen der Reststoffe erfolgten in der Papierfabrik Hainsberg und in der Kartonfabrik Porstendorf.

**Auswahl der Reststoffe** für die Pelletherstellung:

- **Proben von Deinkingschlämmen:**
  - D 60
  - D 72
  - D 80
  - D 100
  
- **Proben von Fangstoffen:**
  - ein Jahr im Freien gelagert
  - zuvor eingefroren

Es wurden die sortenabhängigen Altpapiereinträge der Papierfabrik Hainsberg untersucht. Als Versuchspunkte wurden die dazu gehörigen Deinkingschlämme (D) ausgewählt. Die Auswahl der Sorten des Altpapierstoffs (DIP – Deinked Pulp/deinkter Altpapierstoff) bestimmt den Weißgrad im fertigen Produkt. [17]

Dabei werden für DIP 100 nur unbedruckte Altpapiersorten eingesetzt, für DIP 80 nur Sorten mit leichtem Andruck, DIP 72 mit stärkerem Andruck und DIP 60 besteht aus Haushaltssammelware. Der Unterschied besteht im Wesentlichen in der Menge an Druckfarbe, die im Deinkingschlamm enthalten ist. Die Probenahme in der Papierfabrik Hainsberg erfolgte direkt an der Schlammpresse, die zur Entwässerung des Deinkingschlammes dient. [17]

Des Weiteren wurden die Fangstoff-Proben der Kartonfabrik Porstendorf untersucht. Zum einen waren Fangstoffe im Technikum Freital-Hainsberg bereits ein Jahr im Freien gelagert worden und zum anderen waren es frische und vorher eingefrorene Proben.

Die Pellets wurden nach der Herstellung auf einem Sieb durch einen Luftstrom von 80 °C vorgetrocknet und im Anschluss im Ofen bei 105 °C nachgetrocknet.

Die physikalischen Eigenschaften der Faserpellets wurden an der Professur für Papiertechnik der TU Dresden ermittelt:

- Schüttdichte der Pellets nach DIN EN 15103
- Länge und Durchmesser der Pellets nach DIN EN 16172
- Wassergehalt nach DIN EN 14 774-2
- Glührückstand (Aschegehalt bei 550 °C) nach DIN EN 14775

Zur chemischen Analyse der Inhaltstoffe mussten die Pellets chemisch aufgeschlossen werden. Dabei wurden schwerlösliche Stoffe in einen wasserlöslichen oder säurelöslichen Zustand versetzt. Dieser Arbeitsschritt erfolgte im Institut für Pflanzen- und Holzchemie der TU Dresden in Tharandt:

- Aufschluss mittels Königswasser nach EN 13657
- Aufschluss zur Analyse von Chor und Flour nach modifizierter DIN EN ISO 16967

### **Ergebnisse**

Die im Technikum hergestellten Pellets entsprachen in Länge und Durchmesser den Vorgaben der europäischen Pelletnorm. Die geringeren Schüttdichten der hergestellten Pellets sollten kein Ausschlusskriterium für die Verwendung von D- und F-Pellets sein. Dieses lässt sich durch eine stärkere Verdichtung in der Pelletpresse korrigieren. [17]

Der Glührückstand (Abbildung 18) erlaubt eine Aussage über den Gehalt an Mineralstoffen in den Proben. Die chemischen Analysen der Proben lassen Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Mineralstoffe im Altpapier zu. Durch Calciumcarbonat und Kaolin als Streichpigment oder Füllstoff können Faserstoffe im Papier eingespart und bestimmte Eigenschaften, wie z. B. Glätte, Glanz, Rohdichte und Festigkeiten gezielt beeinflusst werden. [17]

Die F-Pellets weisen einen geringeren Mineralstoffanteil als die D-Pellets auf. Deinkingschlämme bestehen zum größten Teil aus Mineralstoffen und Druckfarbenresten. Mit steigendem Druckfarbenanteil steigen im Allgemeinen der Mineralstoffgehalt und damit auch der Glührückstand.

Dem entgegengesetzt verhält sich der Wassergehalt nach Trocknung der Pellets. Die Fangstoffe und das Holzmehl weisen den größten Wasseranteil auf. Die Faserstoffe reagieren hygroskopisch auf die Umgebungsbedingungen. [17]

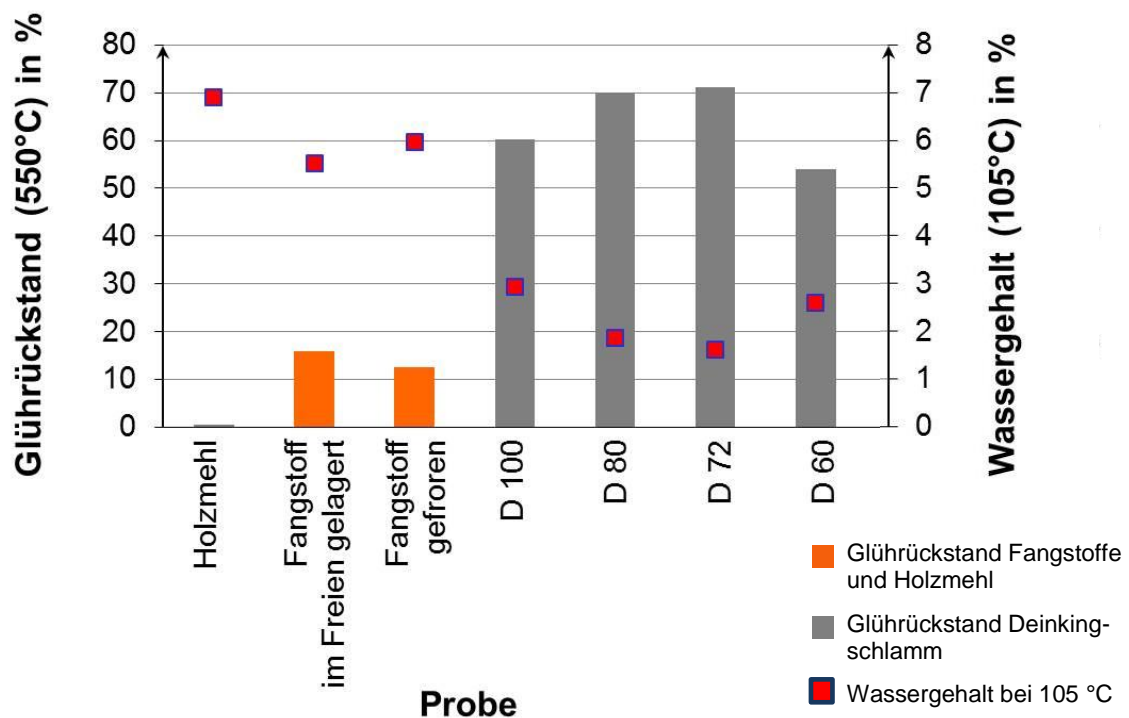


Abbildung 18: Wassergehalt und Glührückstand [17]

Die durch die chemischen Analysen ermittelten Spurenelemente wurden u. a. zum Vergleich den Migrationsgrenzwerten aus der Richtlinie 2009/48/EG über die Sicherheit von Spielzeugen gegenübergestellt. Dabei konnten die Migrationsgrenzwerte weitestgehend eingehalten werden. Der Druckfarbenanteil im Altpapier und dessen Auswirkungen sollten weiter beobachtet werden. Die chemischen Analysen sind erste Prüfungen, die statistisch noch nicht gesichert sind. Deshalb sind diese Aussagen nur mit Vorbehalt zu betrachten. Weitere zielgerichtete Untersuchungen sind notwendig und dabei mit einzubeziehen: [17]

- Herkunft des eingesetzten Altpapiers
- Druckfarbenanteil im Altpapier
- Einsatz der mineralische Füllstoffe und Streichpigmente
- Einsatz anderer Faserstoffe (Zellstoffe, Holzstoffe)
- Einsatz chemischer Hilfsmittel bei der Papierherstellung
- Kreislaufwasser bei der Papierherstellung

## 2.9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Preise für die Pellets aus Reststoffen der Papierverarbeitung sollten die bereits sehr niedrigen Rezyklatpreise für Kunststoffe unterschreiten, damit sie für Weiterverarbeiter eine preislich interessante Alternative als Füllstoff darstellen. Unter dieser Annahme wird in der Beispielrechnung ein Zielpreis von maximal 80 €/t für die Pellets angesetzt. Mit dem in Tabelle 6 gewählten Szenario kann davon ausgegangen werden, dass in etwa 8.000 t feuchte Reststoffe (Trockengehalt 40 % bis 60 %) jährlich pelletiert und abgesetzt werden müssten, damit sich für Papierfabriken der Aufbau eigener Verarbeitungskapazitäten lohnt. Bei der Altpapieraufbereitung fallen ca. 20 % Deinking-

schlamm und/oder 2 % Fangstoffe der Einsatzmenge als feuchte Reststoffe an. Hochgerechnet bedeutet dies, dass die Weiterverarbeitung erst sinnvoll ist für:

- Papierfabriken mit Deinkinganlagen ab 40.000 t Altpapiereinsatz pro Jahr
- Papierfabriken, in denen ausschließlich Fangstoffe anfallen, mit 400.000 t Altpapiereinsatz pro Jahr.

Kosteneinsparungen durch Wärmerückgewinnung wurden vorerst nicht in die Kalkulation mit einbezogen.

**Tabelle 6: Beispielrechnung für Zielpreis Pellets 80 €/t**

<b>Mengen</b>		
Input Reststoffe (mit 50 % Trockengehalt)	7.868	t/a
Output Pellets (bei 5 % Ausschuss/Materialverlust; mit 95 % Trockengehalt)	3.934	t/a
<b>Kosten für Pelletherstellung und Vertrieb inkl. Kapitalkosten</b>	<b>600.822</b>	<b>€/a</b>
+ Herstellkosten ohne AfA	357.645	€/a
davon Betriebskosten	246.496	€/a
Brennstoffkosten Trockner (bei 1 MWh/t verdampftes H <sub>2</sub> O; Gaspreis 0,041 €/kWh)	152.805	€/a
Stromkosten Pelletierer (bei 150 kW Leistung; 80 % Anschlussleist.; Durchsatz 1,6 t/h)	23.293	€/a
Wartung + Verschleiß für Anlagentechnik (bei 15 €/t Output inkl. Ausschuss)	62.116	€/a
Entsorgungskosten Ausschuss/Materialverlust	8.282	€/a
davon Personalkosten Fertigung (1/2 Technikerstelle, 3-Schichtbetrieb, Orientierung an Verdi Tariffinormation)	64.500	€/a
davon Gemeinkosten Fertigung (Zuschlagssatz 15 % auf Betriebskosten + Personalkosten Fertigung)	46.649	€/a
+ Gemeinkosten Vertrieb (Zuschlagssatz 15 % auf Herstellkosten ohne AfA)	53.647	€/a
+ Gemeinkosten Verwaltung (Zuschlagssatz 20 % auf Herstellkosten ohne AfA)	71.529	€/a
+ AfA (bei Anschaffungskosten 600.000 €; 6 Jahre Nutzungsdauer)	100.000	€/a
+ Kapitalkosten Anschaffung Anlagevermögen (Durchschnittsmethode, Zinssatz 6 %)	18.000	€/a
<b>- Kosteneinsparung Entsorgung (bei 40 €/t)</b>	<b>- 314.720</b>	<b>€/a</b>
<b>= Selbstkosten</b>	<b>286.102</b>	<b>€/a</b>
<b>= Selbstkosten pro t produzierte Pellets</b>	<b>72,73</b>	<b>€/t</b>
<b>+ Gewinnzuschlag 10 %</b>	<b>7,27</b>	<b>€/t</b>
<b>= Verkaufspreis</b>	<b>80,00</b>	<b>€/t</b>

In der Papierindustrie werden häufig nur sehr kurze Amortisationszeiten von etwa 2 Jahren für Investitionen akzeptiert. Um diese zu erfüllen sind deutlich größere Reststoffmengen zu verarbeiten. Bei dem in Tabelle 6 betrachteten Szenario bedarf es in etwa 5 Jahre bis sich die Investition amortisiert.

## Fazit

Die Projektergebnisse zeigen, dass die Verarbeitung von faserhaltigen Reststoffen (Fangstoffe und Deinkingschlämme) des Papierproduktionsprozesses zu naturfaserverstärkten Kunststoffen industriell umsetzbar ist. Der Herstellungsprozess für solche Verbundwerkstoffe ist verfahrenstechnisch abbildbar und die durch das Projekt gewonnen Erkenntnisse können direkt für die Auslegung einer Pilotanlage zur Herstellung von Faserpellets in Papierfabriken genutzt werden.

Abseits der verfahrenstechnischen Umsetzbarkeit des Vorhabens, sind bis zu einer Markteinführung von PPC-Werkstoffen aber noch verschiedenste offene Punkte aus den Bereichen Funktionalität des Komposites, Wirtschaftlichkeit für geringe Anfallmengen an Reststoffen und Umweltverträglichkeit bzw. Produktverantwortung zu klären (siehe Abbildung 19).

Die größte Hürde besteht dabei wohl im Finden konkreter Produktanwendungen unter Einhaltung eventueller Auflagen. Die Faserpellets sind hierbei vielmehr als Recyclingprodukt anstatt als „Naturprodukt“ zu betrachten, was erhebliche Auswirkungen auf die Vermarktung der Komposite, aber auch auf die Einhaltung gesetzlicher Standards haben dürfte. So erscheint es sinnvoll, die aufbereiteten Reststoffe gemeinsam mit Kunststoffrezyklaten zu Verbundwerkstoffen weiterzuverarbeiten und dadurch neue Anwendungsfelder für Sekundärrohstoffe zu finden. Eventuell kann es hier gelingen, die durch Verunreinigungen und den Recyclingprozess verursachten Eigenschaftverschlechterungen bei den Polymeren aufzuheben oder zumindest abzufedern. Recherchen und Untersuchungen hierzu stehen noch aus.



**Abbildung 19: Weitere Arbeiten vor Markteinführung von PPC-Werkstoffen**

Unabhängig vom Einsatzgebiet für PPC bedarf es weiterer Arbeiten zum Aufbau eines Qualitätsmanagements in den Papierfabriken, um sicherzustellen, dass die aufbereiteten Reststoffe in gleichblei-

## Fazit

bender Qualität an die Kunststoffverarbeiter geliefert werden. Gleichzeitig sind Untersuchungen für die Erhöhung der Flexibilität und Individualität der Komposite, je nach Produktanwendung (zum Beispiel Farbgebung, physikalische Eigenschaften) notwendig. Auch hat die Recherche und Berücksichtigung rechtlicher Gesichtspunkte wie REACH, Emissionen beim Produktionsprozess und Produktsicherheit in zukünftige Arbeiten mit einzufließen. Die Ermittlung von Ökobilanzdaten für die Pellets stellt einen weiteren Untersuchungsgegenstand dar. Vergleichende Ökobilanzen hinsichtlich der Verwertungswege der Reststoffe oder zwischen WPC und PPC können wichtige Hinweise liefern, wo sich die Faserpellets bzw. PPC in Fragen der Nachhaltigkeit positionieren. Ungeklärt blieb bisher auch, wie es gelingen kann, wirtschaftlich attraktive Konzepte für geringe Mengen an anfallenden Reststoffen zu entwickeln. Hier kann zum Beispiel die Bündelung der Verarbeitungskapazitäten, bei der ein Vertragspartner aus der Kreislaufwirtschaft bzw. der Papierindustrie die Pelletierung für mehrere Papierfabriken übernimmt, eine Lösungsmöglichkeit darstellen.

Für eine industrielle Umsetzung der Technologie bestehen vor allem folgende Risiken:

- kontinuierliche Abnahme von Faserpellets in ausreichender Menge durch die kunststoffverarbeitende Industrie;
- Bedenken von Kunststoffverarbeitern und Kunden bezüglich der aus industriellen Prozessen stammenden Faserpellets (Qualität, Inhaltstoffe usw.);
- Marktplatzierung der Endprodukte.

Für eine Projektfortführung ist deshalb neben der Einbindung von Expertise aus den Bereichen Kreislaufwirtschaft und Produktsicherheit (REACH etc.) die erfolgreiche Suche nach einem Partner aus der Kunststoffindustrie, der auch Kunststoffrezyklate verarbeitet, unumgänglich.



## Literaturverzeichnis

- [1] **vdp:** *Papier 2015 – Ein Leistungsbericht*, Verband Deutscher Papierfabriken e.V., Bonn, 2015
- [2] **Blehschmidt et al.:** *Taschenbuch der Papiertechnik*, Carl Hanser Verlag, Leipzig, 2010
- [3] **Kreische, R.:** *Trocknung von Reststoffen aus der Papierherstellung*, Professur für Thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Diplomarbeit TU Dresden, 2014
- [4] **Treppe, Konrad:** *Praktikumsanleitung Konvektionstrocknung*, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, TU Dresden, 2011
- [5] **Weber, P.-G., Wanske, M., Kreische, R.:** *Projektmeeting Trocknung von Reststoffen aus der Papierherstellung*, TU Dresden, 25.09.2014
- [6] **Kreische, R.:** *Trocknungsverhalten von Holz hackschnitzeln*, TU Dresden, 2013
- [7] **qteck GmbH:** *PP400C:*  
<http://www.qteck.de/index.php/produksuche/159-pp400c>, aufgerufen am 11.03.2016
- [8] Protokoll zum 3. Meeting DBU-Projekt AZ 32045 am 24.02.2015
- [9] **Sacher, M.:** *Forschungs- und Produktionsbericht Papierfaser*, Biofibre GmbH, Altdorf 2014
- [10] Bericht Biofibre Versuch Oktober 2014
- [11] Bericht NATURinFORM 2015
- [12] **Kasten, J.:** *Protokoll Vorversuch zur Pelletierbarkeit von Fangstoff aus der Papierherstellung*, DIEFFENBACHER GmbH, Eppingen, 2015
- [13] **Kasten, J.:** *Protokoll Produktion von Pellets für PPC Extrusion-Versuche*, DIEFFENBACHER GmbH, Eppingen, 2016
- [14] Bericht NATURinFORM 2016
- [15] **Schwarzkopf, A.:** *Aussage beim Abschlussmeeting DBU Projekt Az 32045*, TU Dresden, 24.02.2016
- [16] Probenbemusterung zum Abschlussmeeting DBU Projekt Az. 32045, TU Dresden, 24.02.2016
- [17] **Kühne, M.:** *Bewertung von und Anforderungen an Faserpellets*, Diplomarbeit TU Dresden, 2016