

## **Abschlussbericht**

# **„Ressourcenschonung bei der Herstellung thermoplastischer Compounds mittels Substitution von Primärkohlefasern durch Reißkohlefasern aus Verschnittteilen“**

gefördert unter dem Az: 32414/01 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Laufzeit: 01.01.2015 – 31.03.2017

durchgeführt von: ULT AG  
Am Göpelteich 1  
02708 Löbau



Unterauftragnehmer: Steinbeis – Transferzentrum Erzeugnisentwicklung

Löbau im Juli 2017

06/02



## Projektkennblatt

der

**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Az **32414\_01**

Referat

Fördersumme 125.000 €

**Antragstitel**                      **Ressourcenschonung bei der Herstellung thermoplastischer Compounds mittels Substitution von Primärkohlefasern durch Reißkohlefasern aus Verschnittteilen**

**Stichworte**

- Dosierer
- Kohlefaser
- Compound

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>24 Monate</b>	<b>01.01.2015</b>	<b>31.03.2017</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte	3
------------------	---

<b>Bewilligungsempfänger</b>	ULT AG	Tel 0 3585 – 41 28-0
	Am Göpelteich 1	Fax 0 3585 – 41 28-11
	02708 Löbau	<b>Projektleitung</b>
		Dr. Jakschik
		<b>Bearbeiter</b>
		M. Berger

**Kooperationspartner**

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

Aufgrund steigender Energiekosten, strengerer Emissionsvorschriften und der steigenden Nachfrage nach elektrischen Antrieben im Automobilsektor steigt der Bedarf an Leichtbaulösungen, vor allem im Verkehrswesen, stark an. Dabei weisen Bauteile und Komponenten aus Verbundwerkstoffen, insbesondere CFK, ein sehr hohes Leichtbaupotential auf. Bei deren Verarbeitung entsteht bei Konfektionierungsprozessen ein sehr hoher Verschnitt.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines neuartigen Wirkprinzips zur Dosierung von Kohlefasern aus dem Verschnitt textiler Flächengebilde. Dabei sollen die hergestellten Recyclingfasern zur Substitution von Primärfasern dienen, die zur Herstellung von thermoplastischen Compounds verwendet werden. Weitere wichtige Punkte durch die Verwendung von Recyclingfasern sind die Kostenersparnis sowie die Reduzierung der benötigten Energie. Außerdem werden durch die Substitution von Primärfasern Ressourcen geschont.

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

Im ersten Schritt des Projekts wurde das Ausgangsmaterial bestimmt und begutachtet. Hierbei ist zunächst in Primärfaser und Verschnittabfällen unterschieden worden. Verschnittabfälle sind durch ein Gewirr aus unterschiedlichen Faserlängen gekennzeichnet. Diese Agglomerate gleichmäßig zu dosieren stellt das Ziel dar. Allerdings besteht die Herausforderung diese Agglomerate zu fördern und zu vergleichmäßigen. Da Kohlefasern als nicht rieselfähig gelten und zur Agglomeration neigen, erschwert dies die Aufgabenstellung. Aus diesem Grund werden zur Prinzipienentwicklung zunächst Primärfasern unterschiedlicher Länge heran gezogen. In den ersten Versuchen wurden die unterschiedlich langen Fasern im Sinne der direkten Vergleichbarkeit nicht gemischt.

Parallel zur Materialbegutachtung wurde der Versuchsstand entwickelt und aufgebaut. Der Dosierer besteht aus einem Vorratsbehälter mit einem Trichter. Beide sind durch eine Walze getrennt. Diese Walze kann variabel bestückt werden, um verschiedene Nadeln und Bürsten zum Auskämmen der Fasersträhnen zu verwenden. Die Walze dient zum Auflösen der Agglomerate und zur Regelung des Durchsatzes. Unterhalb der Walze wird mittels pneumatischen Transports der Faserstoff zu einer Transportschnecke bewegt. Ein Filterelement trennt hierbei Luftstrom und Fasern. Der Weitertransport und die Dosierung erfolgt über die Schnecke.

Der Luftstrom wird durch ein Filtergerät mit abreinigbaren Filterpatronen erzeugt. Ziel ist es hier, die abgesaugten und abgeschiedenen Fasern aus einem Sammelbehälter dem Dosierprozess wieder zuzuführen (Feeding-Einheit). Die Abreinigung erfolgt prozessbegleitend über Druckluft.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Im Rahmen des Entwicklungsprojektes „Ressourcenschonung bei der Herstellung thermoplastischer Compounds mittels Substitution von Primärkohlefasern aus Verschnittteilen“ wurde ein neuartiges Verfahren zur Aufbereitung und Dosierung von Reißfasern aus Verschnittteilen von CFK-Prozessen entwickelt.

Die verwendeten Reißfasern lagen in Form von Kurzfasern, Langfasern sowie Quasiendlosfasern vor. Mit den Kurz- und Langfasern konnten die Ziele, einen konstanten Massestrom von Recyclingfasern zu generieren und somit Ressourcen und Energie zu sparen, eingehalten werden. Die Untersuchungen mit agglomerierten Quasiendlosfasern führten zur Knäuelbildung und somit Blockierung der Fördereinheit.

Hinsichtlich der Kosteneffizienz wurde das Ziel, die Kosten auf 41,7% zu senken, übertroffen. Durch einen doppelt so hoch erreichbaren prozesssicheren Massestrom und einer Energieeinsparung des Umluftsystems können weitere Kosten im Vergleich zu Primärfasern eingespart werden.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Die entwickelte Kohlefaser-Dosier-Anlage wurde im DBU-Jahresbericht 2015 veröffentlicht und beschrieben. Des Weiteren soll die Vermarktung in erster Linie durch Präsentationen bei bestehenden Industriekunden sowie über die Kontaktaufnahme zu potentiellen Anwender auf Messen erfolgen

Für 2017 ist die aktive Teilnahme auf Messen wie Powtech (26.-28.09.2017) und productronica (14.-17.11.2017) geplant. Für 2018 wird ULT als Aussteller auf der LASYS, SMT, Rapid.Tech (05.-07.06.2018) sowieACHEMA (11.-15.06.2018) und Chillventa (16.-18.10.2018) neue Produkte und Entwicklungen präsentieren.

## ***Fazit***

Die innovative Technologieentwicklung reduziert die Kosten zur Herstellung von spritzgegossenen Strukturbauteilen. Durch die Substitution von Primärfasern durch Recyclingfasern können die Kosten auf unter 40% gesenkt werden. Ebenfalls lässt sich die Energiebedarfsmenge für die Herstellung des notwendigen thermoplastischen Granulats deutlich senken.

Damit stellt das durchgeführte FuE-Projekt einen wichtigen Beitrag zur energie- und kosteneffizienten Großserienfertigung homogener Recyclingfasern für die Herstellung von thermoplastischem Granulat dar. Zusätzlich kann durch die Recyclingfasern eine ressourcenschonende Neuteilfertigung realisiert werden.

## Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Bildern, Abkürzungen und Definitionen .....	6
1 Zusammenfassung .....	7
2 Einleitung.....	8
3 Vorhabensdurchführungen und –ergebnisse.....	11
3.1 Beschreibung und Bearbeitung der einzelnen Arbeitsschritte und deren Ergebnisse .....	11
3.1.1 Analyse des Ausgangsmaterials und Konzipierung von Verfahrensprinzipien.....	11
3.1.2 Entwicklung von Versuchsaufbauten für Grundlagenuntersuchungen..	11
3.1.3 Grundlagenuntersuchung zur Verfahrenstechnik.....	12
3.1.4 Konzeption und Variantenentwicklung kritischer Teilprozesse .....	13
3.1.5 Entwicklung von Messprinzipien Prozesssteuerung .....	14
3.1.6 Konzeptentwicklung und konstruktive Umsetzung der Lösungsvarianten einzelner Teilprozesse.....	15
3.1.7 Entwicklung der Prozesssteuerung der Demonstratoranlage .....	16
3.1.8 Fertigungstechnische Realisierung der Demonstratoranlage.....	17
3.1.9 Einbindung der Prozesssteuerung und Sensorik .....	18
3.1.10 Einbindung der Prozesssteuerung und Sensorik.....	19
3.2 Diskussion und Ergebnisse .....	20
3.2.1 Möglichkeiten und Grenzen des Dosierverfahrens .....	20
3.2.2 Mikroskopische und Mechanische Analyse .....	21
3.2.3 Ergebnisresultierte Maschinenoptimierung .....	25
3.3 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse .....	27
3.4 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse .....	28
4 Fazit.....	30
5 Literaturverzeichnis .....	31

## Verzeichnis von Bildern, Abkürzungen und Definitionen

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technologische Zielstellung.....	9
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Kohlefaserdosieranlage .....	9
Abbildung 3: Entwickelte Versuchsaufbauten für grundlegende Untersuchungen....	12
Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Zuführung, Förderung, Dosierung und Rückführung von Kohlefasern.....	13
Abbildung 5: Auflösung der Faseragglomerate (l) und Materialaustrag an der Förderschnecke (r) .....	14
Abbildung 6: Brückenbildung infolge zu hohen Materialdurchsatzes (l) Optische Füllstanderfassung (r).....	15
Abbildung 7: Konstruktive Umsetzung des Walzen- und Dosiersystems.....	16
Abbildung 8: Prozessregelung zur Rückführung von Faserstäuben in den Prozess	16
Abbildung 9: Programmablauf der Prozesssteuerung .....	17
Abbildung 10: Demonstratoranlage .....	18
Abbildung 11: Prozesssteuerung und Sensorik an der Staukammer.....	19
Abbildung 12: Zurückzuführende Filterrückstände .....	19
Abbildung 13: Dosierung von Langfasern von links nach rechts: Ausgangsmaterial, Dosiervorgang, Zustand am Ende des Prozesses.....	20
Abbildung 14: Quasiendlosfasern: Ausgangsmaterial (l), Knäuelbildung an der Nadelwalze (m), Blockieren der Förderschnecke (r).....	20
Abbildung 15: Dosierung von Kurzfasern von links nach rechts: Ausgangsmaterial, Dosiervorgang, zustand am Ende des Prozesses .....	21
Abbildung 16: Zugstäbe mit 30% Recyclingkohlefasern.....	21
Abbildung 17: Faserorientierung im Zugstab .....	22
Abbildung 18: Faserlänge entlang der Faserorientierung.....	22
Abbildung 19: Kostenspezifischer E-Modul (Zugmodul-Kosten-Verhältnis).....	25
Abbildung 20: Versuchsaufbau alt (l); Versuchsaufbau neu (r).....	26
Abbildung 21: Neuer Aufbau des Kohlefaserdosierers .....	26

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialvergleich in Bezug auf Zugmodul und Kosten .....	24
Tabelle 2: Wirtschaftliche Zielstellung .....	27

## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Entwicklungsprojektes „Ressourcenschonung bei der Herstellung thermoplastischer Compounds mittels Substitution von Primärkohlefasern aus Verschnittteilen“ wurde ein neuartiges Verfahren zur Aufbereitung und Dosierung von Reißfasern aus Verschnittteilen von CFK-Bauteilen entwickelt.

Das Verfahren ermöglicht es Reißfasern zunächst in eine rieselfähige Masse zu verarbeiten und diese anschließend mithilfe einer Förderschnecke dosierend auszutragen. Die geförderten Recyclingfasern werden in einem konstanten Massestrom ausgetragen. Die durchgeführten Untersuchungen auf der Demonstratoranlage wurden mit Reißfasern unterschiedlicher Länge durchgeführt. Die Faserlängen unterscheiden sich in Kurzfasern mit  $l \leq 2\text{mm}$ , Langfasern mit  $l = 20 - 30\text{ mm}$  und in Quasiendlosfasern mit  $l > 80\text{ mm}$ .

Die Ergebnisse zu den durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass mit den Kurzfasern sowie den Langfasern ein konstanter Massestrom erzielt und ebenfalls für den Extrusionsprozess unkritische oder keine Agglomerate am Ende der Förderschnecke gebildet wurden. Somit ist mit den beiden Faserlängen eine Dosierung für Kunststoffprozesse möglich. Mit den Quasiendlosfasern ergaben sich Knäuel an der Nadelwalze und ein Blockieren an der Förderschnecke.

Für das weitere Vorgehen ist zur Dosierung von Langfasern eine Modifikation des Vereinzelungsprinzips „Nadelwalze“ notwendig. Angestrebt wird eine Lösung bei der Faseragglomerate mittels Scherung durch Bürsten vereinzelt werden. Des Weiteren muss die Trennung von Faser- und Luftstrom auf engstem Bauraum verbessert werden, um die Reinigungsintervalle der Filter signifikant zu verlängern.

Eine pneumatische Fördereinrichtung zur automatischen Beschickung der Anlage mit Fasermaterial und zur prozessintegrierten Rückführung der Filterrückstände ist in den Demonstrator implementiert.

## 2 Einleitung

Aufgrund steigender Energiekosten, strengerer Emissionsvorschriften und der steigenden Nachfrage nach elektrischen Antrieben im Automobilsektor steigt der Bedarf an Leichtbaulösungen, vor allem im Verkehrswesen, stark an. Dabei weisen Bauteile und Komponenten aus Verbundwerkstoffen, insbesondere CFK, ein sehr hohes Leichtbaupotential auf. Bei deren Verarbeitung entsteht ein sehr hoher Verschnitt.

Diese Kohlefaserreste bieten einen hohen ökologischen und ökonomischen Nutzen, wenn sie recycelt und weiterverarbeitet werden. Der Verschnitt von Kohlefasern liegt bei 3.000.000 kg pro Jahr. Mit der Nutzung dieser Verschnittmengen lassen sich hohe Energieeinsparungen erzielen. Im Moment wird der Verschnitt hauptsächlich zur Herstellung von Wirrfaservliesen verwendet. Solche Wirrfaservliese weisen jedoch eine sehr geringe Qualität auf und schöpfen somit nicht das Potential der Kohlefasern aus. Außerdem werden für neue Strukturbauteile, die aus thermoplastischem Granulat spritzgegossen werden, Primärfasern zugeschnitten, die für die Herstellung des Granulats dienen. Die Herstellung von Primärfasern ist jedoch kosten- und energieintensiv. Für eine bessere Nutzung der Verschnittmengen soll im Zuge dieses Forschungs- und Entwicklungsprozesses eine Kohlefaserdosiermaschine konzipiert werden, mit der Reißfasern zu homogenen, dosierfähigen Recyclingfasern verarbeitet werden, welche anschließend zu thermoplastischen Granulat weiterverarbeitet werden können. Die Recyclingfasern sollen schließlich die Langfasern, aus der Herstellung von Primärfasern, weitgehend ersetzen.

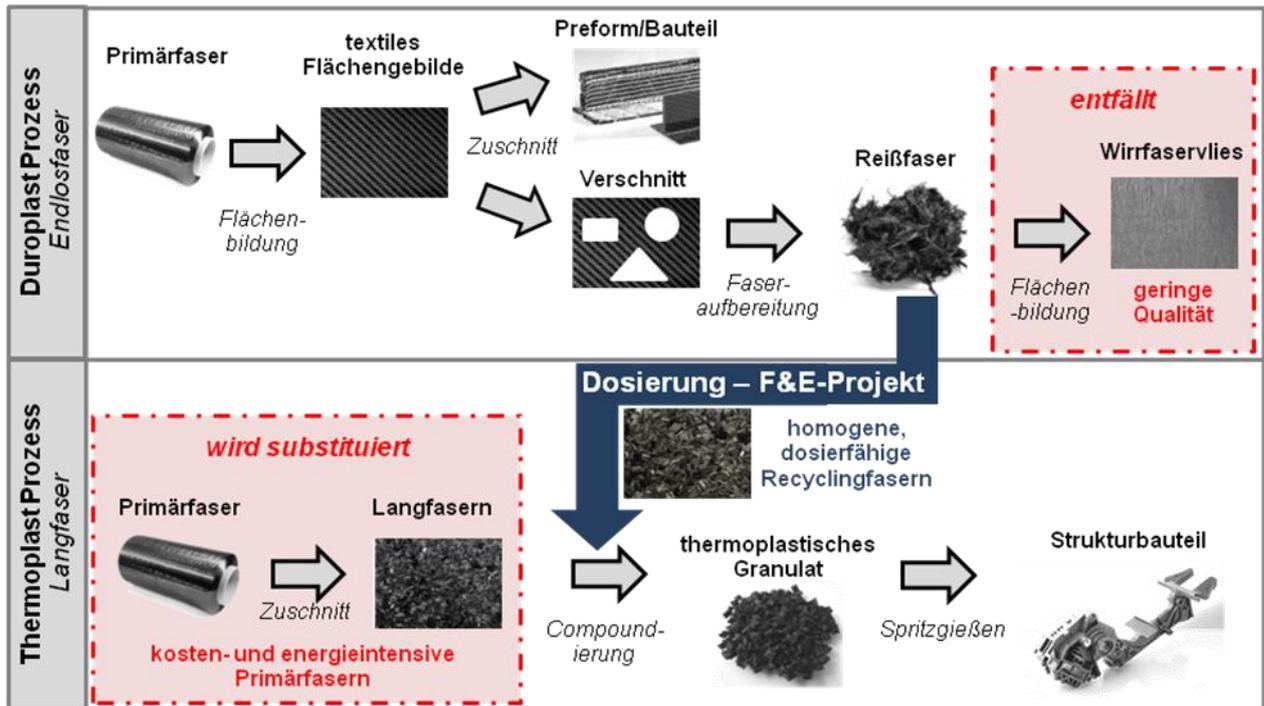


Abbildung 1: Technologische Zielstellung

Das primäre Ziel des Kohlefaserdosierers ist es folglich homogene, dosierfähige Recyclingfasern zu produzieren. Die Reißfasern als Ausgangsprodukt werden dabei in der ersten Stufe vereinzelt, zu rieselfähigen Langfasern verarbeitet und pneumatisch in eine Staukammer befördert. Die Staukammer soll eine konstante Fördermenge garantieren. In der zweiten Stufe werden die Fasern mit einer Förderschnecke transportiert und ausgetragen.

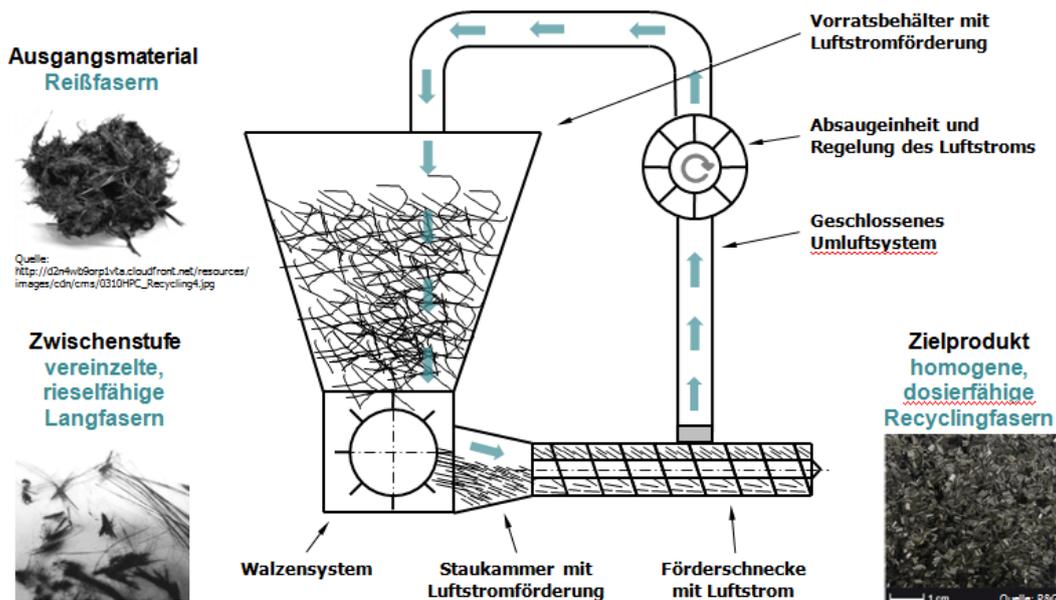


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Kohlefaserdosieranlage

Mit diesem Verfahren sollen die Kosten für die im Kohlefaserdosierer recycelten Fasern bei 41,7% im Vergleich zu Primärfasern liegen. Zudem ist das Verfahren besonders ressourcenschonend, da ausschließlich Fasern aus Verschnitten hergestellt werden.

### 3 Vorhabensdurchführungen und –ergebnisse

#### 3.1 Beschreibung und Bearbeitung der einzelnen Arbeitsschritte und deren Ergebnisse

##### 3.1.1 Analyse des Ausgangsmaterials und Konzipierung von Verfahrensprinzipien

Für eine Konzipierung von Verfahrensprinzipien wurden zunächst die Ausgangsmaterialien bezüglich ihrer Handhabungs- und Verarbeitungseigenschaften untersucht und verglichen. Als Vergleichsmaterial dienten dabei Primärfasern, die aus Kohlefasern geschnitten sind. Die Primärfasern liegen dabei mit einer Länge von 6 mm vor. Die zu untersuchenden Materialien sind Kohlefaserreste aus Absauganlagen sowie aus Verschnittteilen. Die Kohlefaserreste aus Absaugmaterialien haben eine Faserlänge von ca. 50 mm bis 150 mm und die Fasern aus Verschnittteilen von ca. 30 mm bis 100 mm.

Diese Ausgangsmaterialien sollen pneumatisch gefördert sowie gehandhabt werden. Die Arbeitsschritte der Förderung und Handhabung beinhalten dabei die Zuführung der Ausgangsmaterialien mittels Vakuumpförderer im geschlossenem System, die Übergabe der Faseragglomerate zur Weiterverarbeitung, den Transport vereinzelter Strähnen zur Weiterverarbeitung sowie den Rücktransport von Faserstäuben im geschlossenen Umluftsystem.

Zusätzlich wurden Lösungsprinzipien zum mechanischen Aufschließen und Vereinzeln der Reißfasern aufgestellt. Die Vereinzelnung der Langfasersträhnen wird mittels einer Nadel- und Bürstenwalze ermöglicht und der Austrag homogener Fasern wird mittels angepasster Förderschnecke realisiert.

##### 3.1.2 Entwicklung von Versuchsaufbauten für Grundlagenuntersuchungen

Für die Grundlagenuntersuchung wurden zwei Versuchsaufbauten entwickelt. Der erste Versuchsaufbau befasst sich mit dem Fasertransport und der Faserhandhabung. Dieser Versuchsaufbau beinhaltet die mechanische Vereinzelnung der Reißfasern zu Strähnen mittels einer Nadelwalze sowie mit dem Übergang vom freien Fall zur pneumatischen Förderung der Fasern in die Staukammer.

Desweiteren werden die Fasern in der Staukammer als Pfropfen homogenisiert und mittels einer Förderschnecke mechanisch ausgetragen. Im zweiten Versuchsaufbau werden die Faserstäube für die Rückführung separiert. Die Trennung von Luftstrom und Fasern wird dabei durch einen Filtereinsatz ermöglicht und die Fasern werden mithilfe eines Patronenfiltergeräts mit pneumatischer Abreinigung in einem Sammelbehälter gesammelt. Über einen Vakuumförderer und einer Feeding-Einheit werden die Fasern wieder in den Prozess zurückgeführt und die Anlage unter Berücksichtigung des Arbeitsschutzes befüllt und in Betrieb genommen.

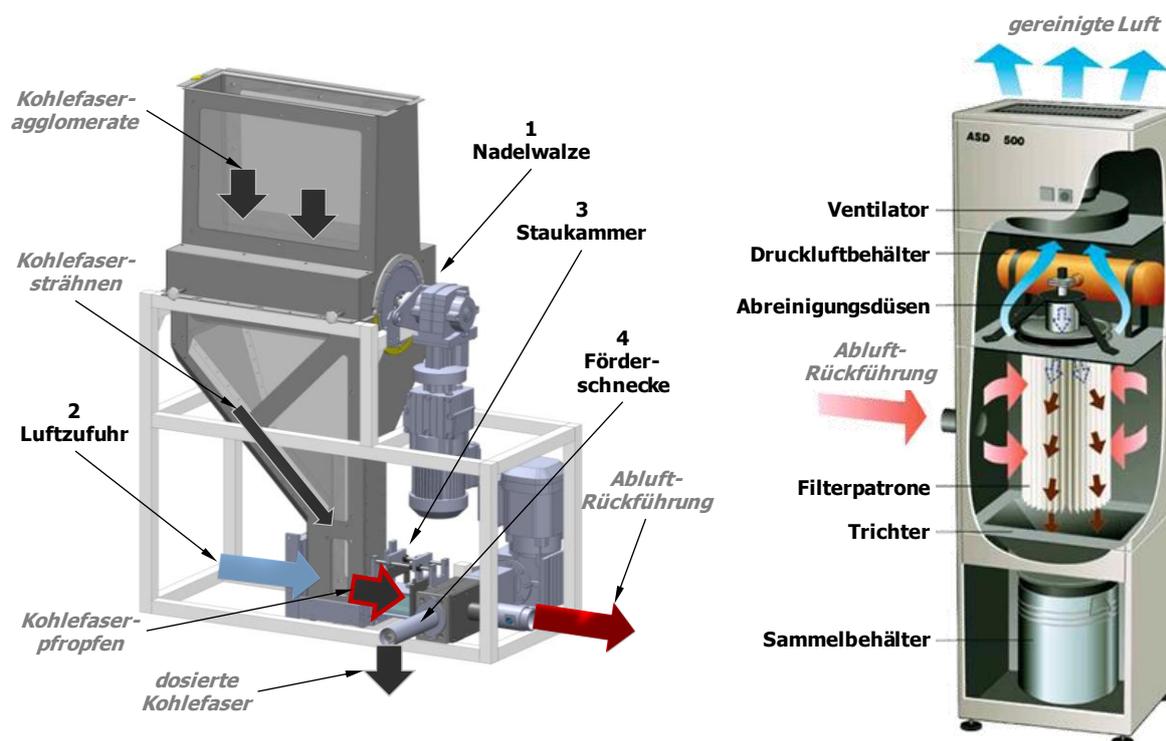


Abbildung 3: Entwickelte Versuchsaufbauten für grundlegende Untersuchungen

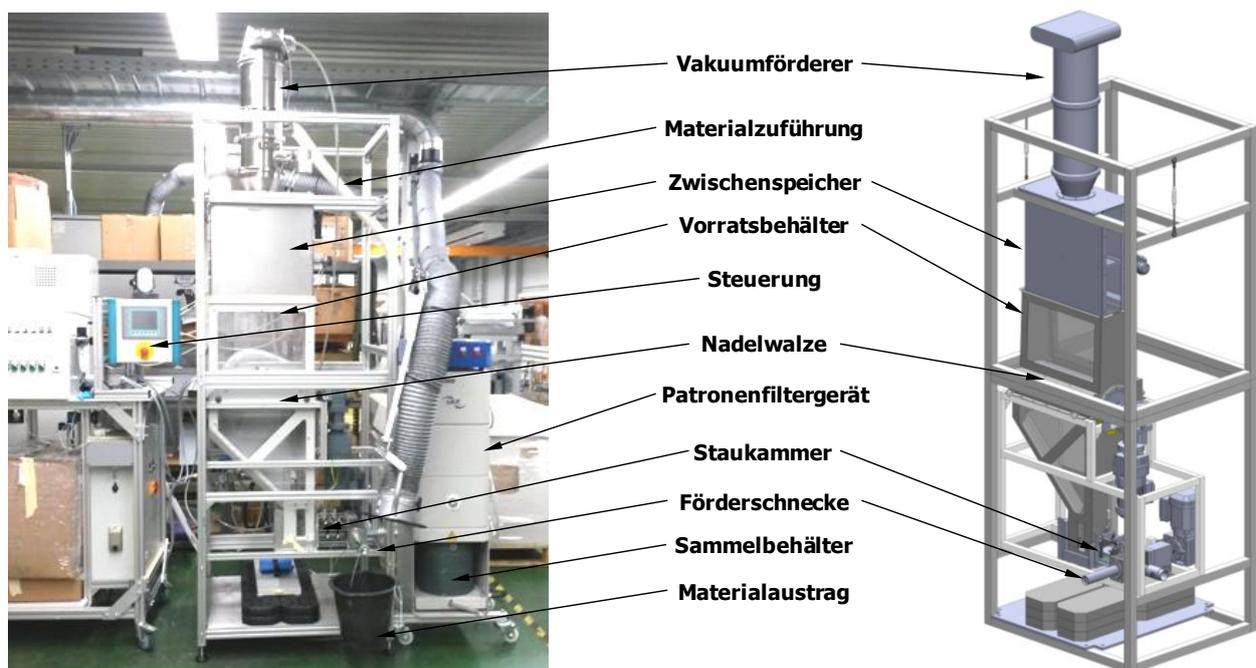
### 3.1.3 Grundlagenuntersuchung zur Verfahrenstechnik

Für einen reibungsfreien Prozessablauf wurden notwendige Grundlagenuntersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen befassten sich mit Versuchen zur Ermittlung der Materialeigenschaften in Abhängigkeit des Verarbeitungszustands. Diese Versuche ergaben, dass Kohlefaserreste aus Absauganlagen und aus Verschnittteilen zur Bildung von Agglomeraten, Kompaktierung und zur Brückenbildung neigen. Ebenfalls ergab sich, dass aufgrund

des sehr geringen Schüttgewichts der Transport im freien Fall nicht möglich ist und geschnittene Fasern vergleichsweise besser zu handhaben sind.

Desweiteren wurden Versuche zur Ermittlung der Verfahrensgrenzen der pneumatischen Förderung durchgeführt. Dabei resultierte, dass die Zuführung und Übergabe der Ausgangsmaterialien mittels Vakuumpörderer für Massedurchsätze im Labormaßstab für alle getesteten Materialien genügt. Die Massedurchsätze belaufen sich bis zu 10 kg/h. Der Transport einzelner Strähnen zur Weiterverarbeitung unterliegt hohen Prozessschwankungen. Hierbei sind Schnitffasern weniger kritisch.

Bei den Grundlagenversuchen zur Ermittlung der Verfahrensgrenzen hinsichtlich der mechanischen Vereinzelung wurde festgestellt, dass die Vermeidung des Zusetzens der Wirkelemente, Komprimierung und Brückenbildung des Fasermaterials kritisch ist.



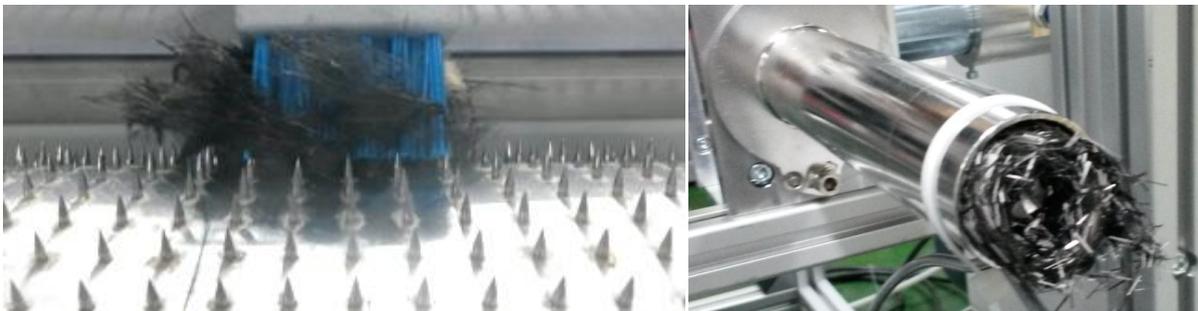
**Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Zuführung, Förderung, Dosierung und Rückführung von Kohlefasern**

### 3.1.4 Konzeption und Variantenentwicklung kritischer Teilprozesse

Die kritischen Teilprozesse des Versuchstandes sind die Auflösung der Faseragglomerate sowie der Materialtransport in der Förderschnecke. Ziel ist es die Faseragglomerate soweit mechanisch zu vereinzeln, dass vereinzelt Fasersträhne entstehen, die eine Rieselfähigkeit besitzen, welche Voraussetzung für die Dosierung

ist. Dabei wurden verschiedene Wirkpaarungen und Anordnungen untersucht. Die Variationen der Wirkpaare beliefen sich dabei auf Nadelwalzen, Abstreifer und Bürsten. Als zusätzlicher Verarbeitungsschritt ist ein definierter Zuschnitt mittels Schneidwerk zum gezielten Auskämmen und Abstreifen vereinzelter Strähnen notwendig.

Für den Materialtransport in der Förderschnecke sind die unterschiedlichen Reibungseigenschaften der Fasermaterialien zu berücksichtigen. Des Weiteren ist eine Komprimierung des Fasermaterials durch eine geeignete Geometrie zu vermeiden, da die Fasern sonst zum Agglomerieren neigen und die Förderschnecke blockieren können. Für einen homogenen Faseraustrag ist ein kompressionsfreier Transport vorausgesetzt.



**Abbildung 5: Auflösung der Faseragglomerate (l) und Materialaustrag an der Förderschnecke (r)**

### 3.1.5 Entwicklung von Messprinzipien Prozesssteuerung

Während des Prozesses sollen der Luftstrom sowie der Faserzustand und Füllstand in der Staukammer überwacht werden. Der Luftstrom wird dabei mittels Differenzdruckmessung an den Wirkstellen überwacht. Die Wirkstellen sind die Zuführung, die Aufbereitung, die Dosierung und die Rückführung. Der Faserzustand sowie der Füllstand in der Staukammer werden dagegen optisch erfasst. Zum Ausgleich der Prozessschwankungen ist ein Zwischenspeicher vorhanden. Bei unterschiedlichen Füllständen ist zur gleichmäßigen Förderung eine Detektion erforderlich. Des Weiteren ist eine Brückenbildung infolge hoher Materialdurchsätze zu vermeiden. Der Materialdurchsatz wird dabei am Walzensystem reguliert.



**Abbildung 6: Brückenbildung infolge zu hohen Materialdurchsatzes (l) Optische Füllstanderkennung (r)**

### 3.1.6 Konzeptentwicklung und konstruktive Umsetzung der Lösungsvarianten einzelner Teilprozesse

Zunächst wurden die Lösungsvarianten für die Teilprozesse miteinander verglichen und bewertet. Dabei wurden die Varianten zur Anordnung des Walzensystems sowie die Varianten zur Anordnung von Staukammer, Luftzufuhr und Prozessabluft analysiert. Für das Walzensystem existieren die Varianten Nadelwalze, Bürstenwalze, Bürstenleiste und Abstreifer. Bei der Betrachtung der Anordnung von Staukammer, Luftzufuhr sowie Prozessabluft sind der Fasertransport und die Faserhandhabung vorrangig zu berücksichtigen.

Die Materialzuführung und das Vereinzlungssystem wurden durch Bürstenwalzen realisiert und ein definierter Zuschnitt der Fasern durch eine Aufbereitung im Mahlwerk erlangt. Der Materialaustrag geschieht mittels einer Förderschnecke, die die Fasern von der Staukammer aus fördert. Mit einem Filtereinsatz werden dabei die Fasern vom Luftstrom getrennt.

Als weiteren Teilprozess wurde das abgeschlossene Umluft- und Rückführungssystem detailliert entwickelt. Die Partikel der Abluftrückführung scheiden sich dabei am Patronenfilter ab. Des Weiteren erfolgt die Abreinigung druckgesteuert mittels Abreinigungsdüsen und Druckluftimpuls. Die Partikel werden anschließend im Sammelbehälter aufgefangen und mittels Feeding-Einheit und Vakuumförderer in den Prozess zurückgeführt.

Aus diesen Konzeptentwicklungen wurde eine Lösungsauswahl getroffen und die Demonstratoranlage konstruktiv umgesetzt.

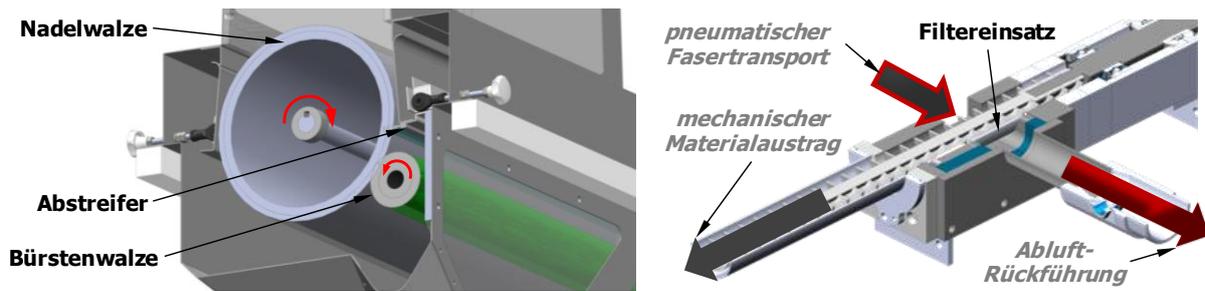


Abbildung 7: Konstruktive Umsetzung des Walzen- und Dosiersystems

### 3.1.7 Entwicklung der Prozesssteuerung der Demonstratoranlage

Für die Demonstratoranlage wurden drei Teilprozesse für die Steuerungssoftware entwickelt. Die Teilprozesse belaufen sich dabei auf die Regelung der Materialzu- bzw. Rückführung, die Regelung des Luftstroms und Vereinzlungssystems sowie auf die Regelung des Massestroms im Dosiersystem. Die Teilprozesse wurden für eine Steuerung des Gesamtprozesses abgestimmt.

- Kontinuierliche Prozessabluft (—)
- Zyklische Rückführung in den Verarbeitungsprozess unter Ex-Schutz-Anforderungen (· · ·)
- Abreinigung der Filterpatronen mittels Druckluftimpulses (\* · · ·)
- Aufnahme und Transport der abgesaugten Faserstoffe aus dem Sammelbehälter mit Hilfe eines Vakuutförderers mit Venturidüsen (· · ·)
- Befüllung und Betrieb der Anlage unter Berücksichtigung des Arbeitsschutzes (· · ·)

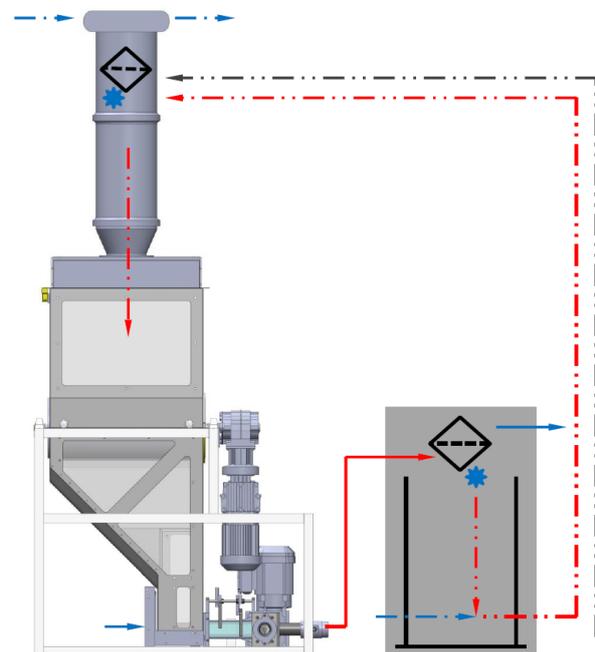
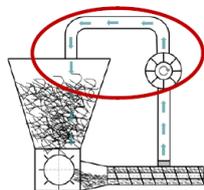


Abbildung 8: Prozessregelung zur Rückführung von Faserstäuben in den Prozess

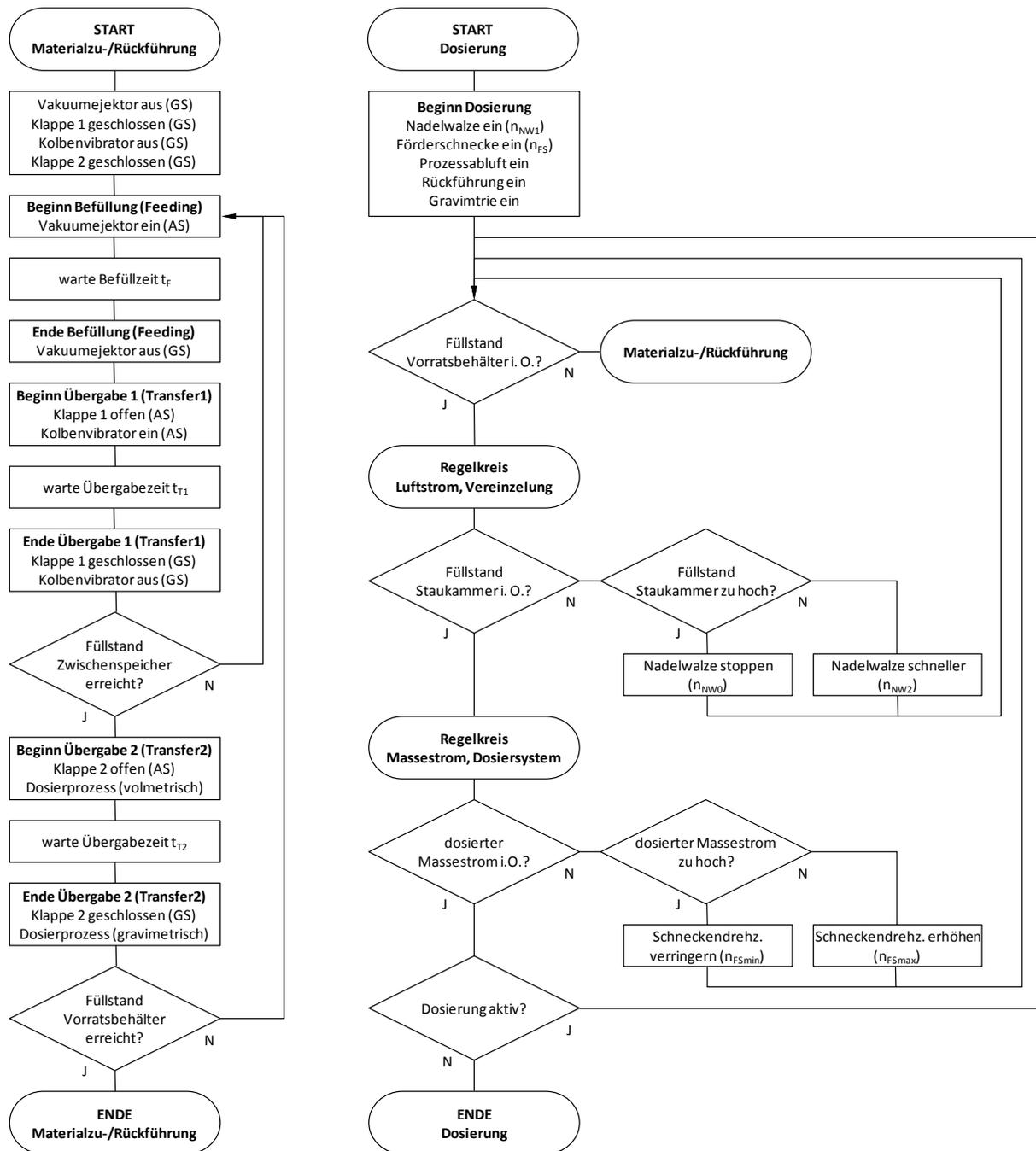
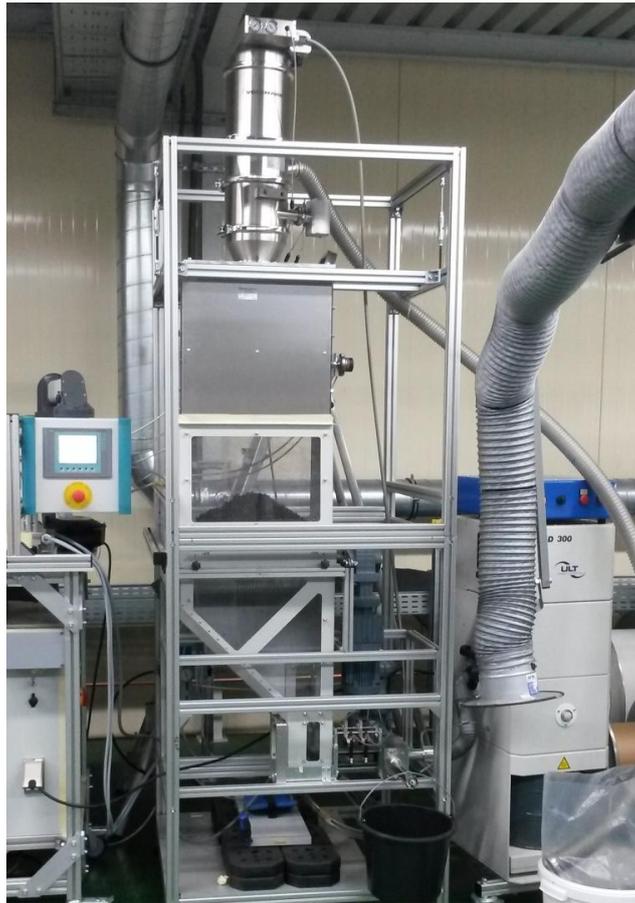


Abbildung 9: Programmablauf der Prozesssteuerung

### 3.1.8 Fertigungstechnische Realisierung der Demonstratoranlage

Die Versuchsaufbauten wurden für eine fertigungstechnische Umsetzung der Demonstratoranlage zusammengeführt, in Betrieb genommen und getestet. Zu den Versuchsaufbauten zählen die Faserhandhabung und Transport sowie die Separation und Rückführung von Faserstäuben.



**Abbildung 10: Demonstratoranlage**

### 3.1.9 Einbindung der Prozesssteuerung und Sensorik

Nach der fertigungstechnischen Realisierung der Demonstratoranlage wurde die Steuerungstechnik implementiert. Mit der Steuerungstechnik werden Messprinzipien zur Prozesssteuerung im gravimetrischen und volumetrischen Betrieb realisiert. Des Weiteren soll durch die Steuerungstechnik eine gleichmäßige Förderung bei unterschiedlichen Füllständen realisiert und Brückenbildung infolge hoher Materialdurchsätze vermieden werden.

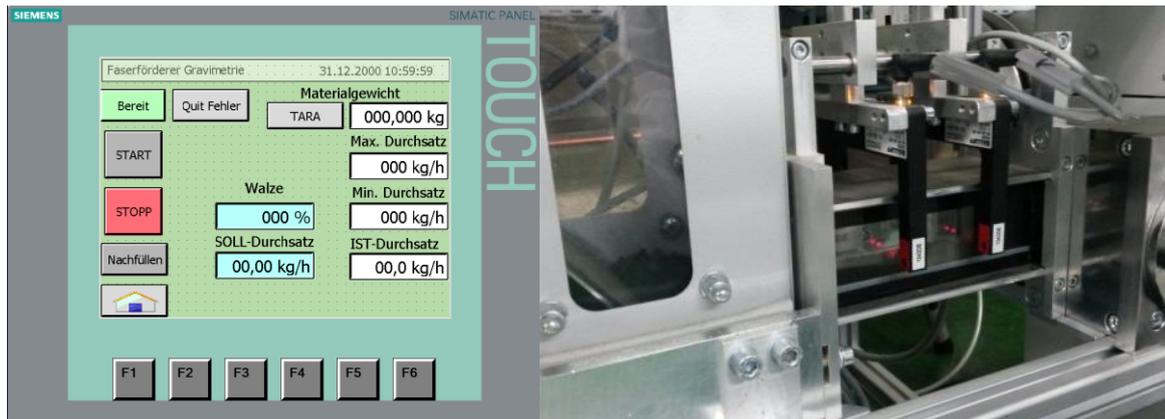


Abbildung 11: Prozesssteuerung und Sensorik an der Staukammer

### 3.1.10 Einbindung der Prozesssteuerung und Sensorik

In der Staukammer war es nötig eine Optimierung der Regelung vorzunehmen. Der Filterzustand wird dabei überwacht und eine Rückführung des Materials in den Dosierprozess realisiert. Daraus ergab sich, dass für eine prozesssichere Dosierung eine Verlängerung der Intervalle zwischen der Rückführung der Filterrückstände notwendig ist.



Abbildung 12: Zurückzuführende Filterrückstände

## 3.2 Diskussion und Ergebnisse

### 3.2.1 Möglichkeiten und Grenzen des Dosierverfahrens

Zur Prozesserverprobung des Demonstrators wurden Versuche mit Fasern unterschiedlicher Länge durchgeführt. Zum einen wurde eine Untersuchung für die Dosierung von Langfasern mit einer Länge von  $l = 20 \text{ mm} - 30 \text{ mm}$  durchgeführt.



**Abbildung 13: Dosierung von Langfasern von links nach rechts: Ausgangsmaterial, Dosiervorgang, Zustand am Ende des Prozesses**

Die Analyse der Verarbeitungseigenschaften zeigte einen konstanten Massestrom. Des Weiteren bildeten sich keine Agglomerate am Ende der Förderschnecke. Eine Dosierung für Kunststoffprozesse ist daher ohne weitere Modifikationen möglich und es entsteht ein rieselfähiges Material nach dem Dosierprozess.

Weiterhin wurde die Dosierung von „Quasiendlofasern“ mit einer Länge von  $l > 80 \text{ mm}$  untersucht.



**Abbildung 14: Quasiendlofasern: Ausgangsmaterial (l), Knäuelbildung an der Nadelwalze (m), Blockieren der Förderschnecke (r)**

Von der Untersuchung mit „Quasiendlofasern“ resultierten eine Knäuelbildung an der Nadelwalze sowie eine Blockierung der Förderschnecke. Ein konstanter Transport der Fasern im Luftstrom ist somit nicht gegeben.

Als letzte Faserlänge wurden Untersuchungen zur Dosierung von Kurzfasern mit einer Länge von  $l \leq 2 \text{ mm}$  durchgeführt.



**Abbildung 15: Dosiervorgang von Kurzfasern von links nach rechts: Ausgangsmaterial, Dosiervorgang, Zustand am Ende des Prozesses**

Aus den Untersuchungen ergaben sich ein konstanter Massestrom sowie eine Bildung von Agglomeraten am Ende der Förderschnecke, die für den Extrusionsprozess unkritisch sind. Somit ist eine Dosierung für Kunststoffprozesse möglich.

### 3.2.2 Mikroskopische und Mechanische Analyse

Zum Vergleich der Recyclingfasern mit den Primärfasern wurden Zugstäbe, mit einem Füllgrad von 30% Kohlefasern, spritzgegossen. Die für die Zugstäbe verwendeten Fasern sind die, in diesen Versuchen, beschriebenen Kurzfasern. Die Zugstäbe wurden sowohl mikroskopisch als auch mechanisch geprüft. Bei den Zugstäben mit Primärfasern wie auch mit den Recyclingfasern besteht die Matrix aus dem Thermoplast PA6.



**Abbildung 16: Zugstäbe mit 30% Recyclingkohlefasern**

Die mikroskopische Analyse bewies, dass sich mit den Recyclingfasern eine gleichmäßige Verteilung sowie Orientierung der Fasern erreichen lässt.



Abbildung 17: Faserorientierung im Zugstab

Die mit dem Zugstab erreichten Festigkeiten weisen eine sehr gute Festigkeitssteigerung im Gegensatz zum unverstärkten Material auf. Das bedeutet die verwendeten Faserlängen sind ausreichend um eine signifikante Festigkeitssteigerung im Bauteil zu erreichen. Zudem sind die Fasern mit einer Länge von unter 2 mm sehr gut mit dem Kohlefaserdosierer zu vereinzeln und zu dosieren. Diese Fasern, mit der vorhandenen Länge, sind auch ohne weiteres im Extruder zu verarbeiten.

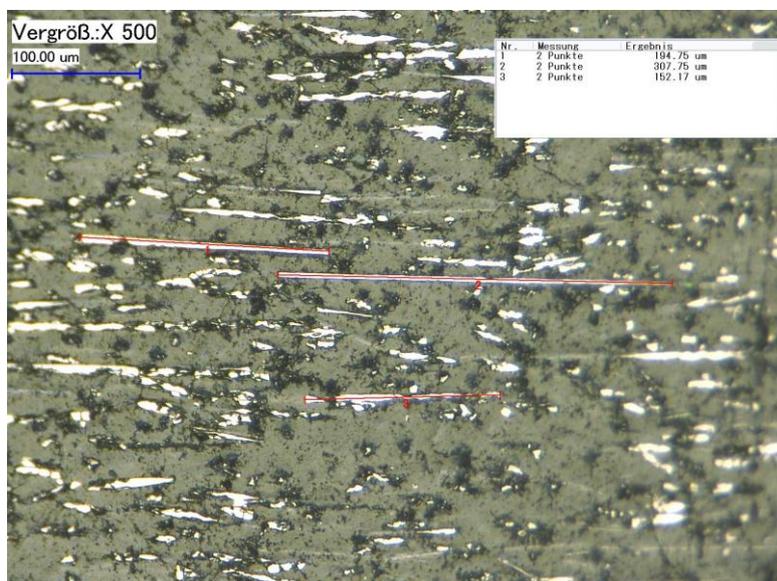
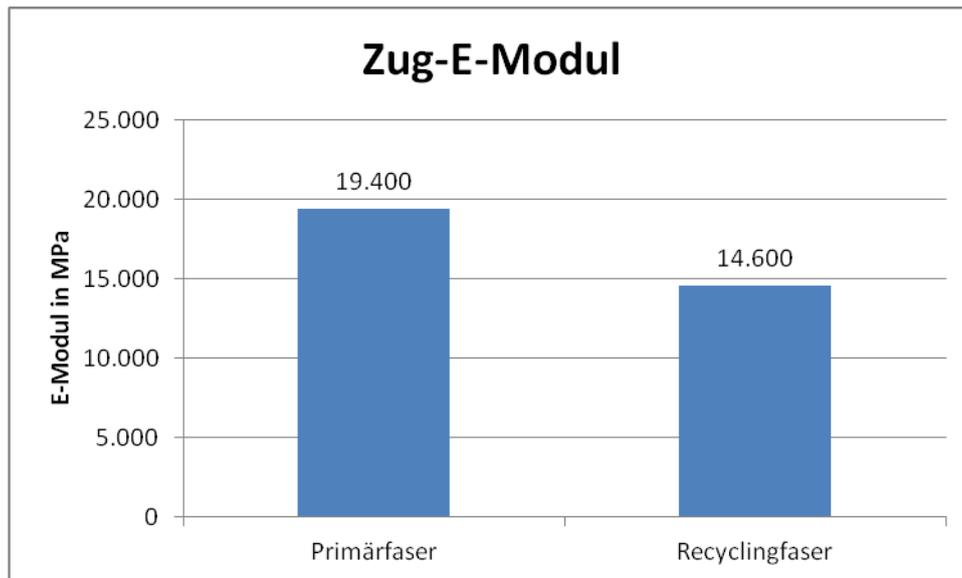
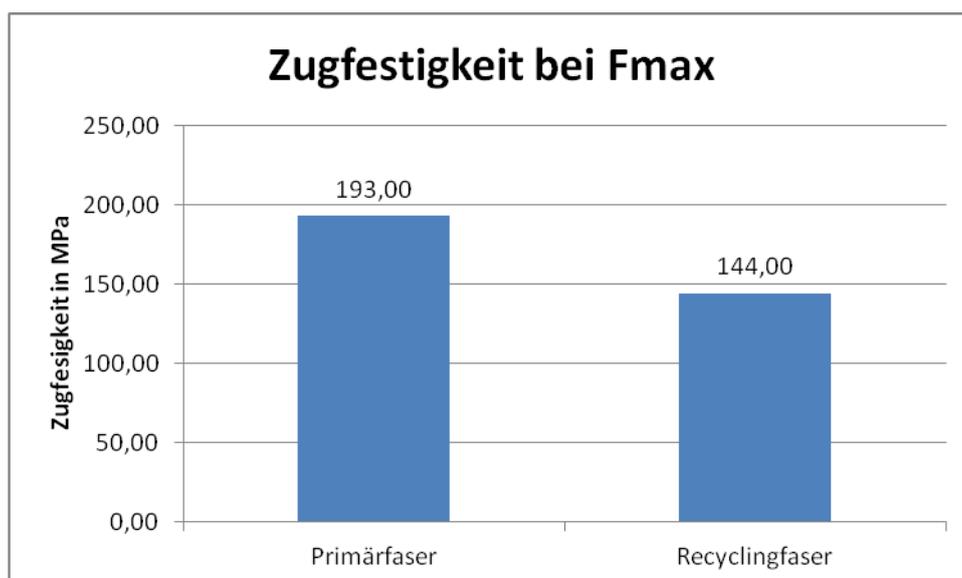


Abbildung 18: Faserlänge entlang der Faserorientierung

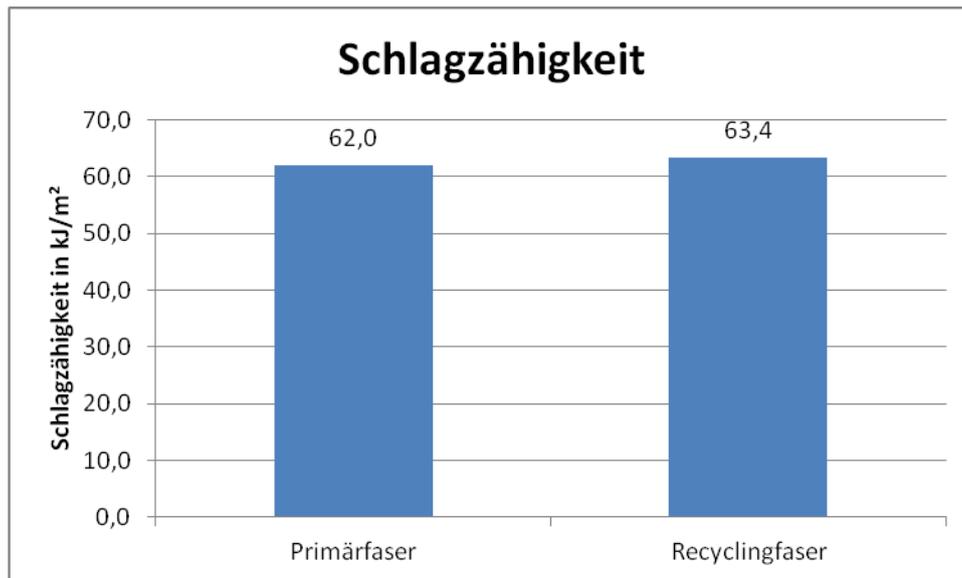
Bei der mechanischen Analyse mittels Zugversuch wurden die Proben mit den Recyclingfasern mit Proben mit Primärfasern desselben Füllgrades verglichen. In Bezug auf den E-Modul erreicht der Zugstab mit Recyclingfasern mit 14.600 MPa etwa 75% der Festigkeit, die mit Primärfasern erreicht werden.



Bei der Zugfestigkeit werden ebenfalls etwa 75% der Festigkeit von den Zugstäben mit Primärfasern erreicht. Der Wert für die Festigkeit der Zugstäbe mit Recyclingfasern liegt bei 144 MPa.



Die Auswertung der Schlagzähigkeit ergab, dass die Ergebnisse für einen mit Recyclingfasern gefüllten Zugstab im gleichen Bereich wie mit einem Primärfaser gefüllten Zugstab liegen.

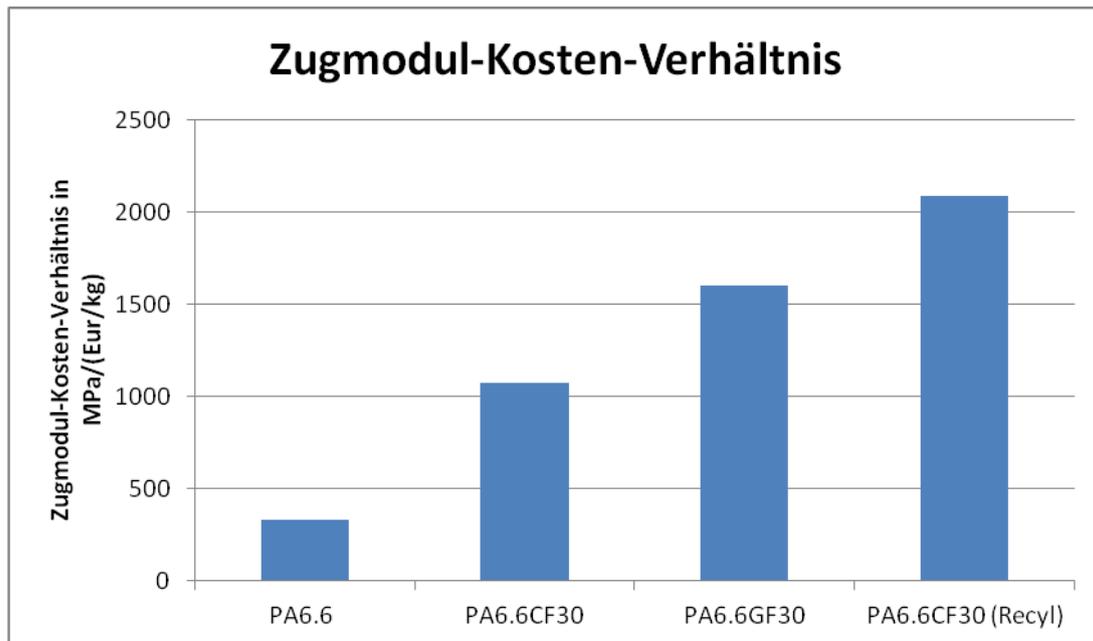


In der anschließenden Tabelle wurde zu einem anschaulicheren Vergleich der Compoundmaterialien der Kostenfaktor mit einbezogen. Zusätzlich wurde das Reinmaterial PA6.6 und PA6.6GF30 verglichen.

**Tabelle 1: Materialvergleich in Bezug auf Zugmodul und Kosten**

	Zugmodul in MPa	Kosten in €/kg
PA6.6	1.000	3
PA6.6 CF30	19.400	18
PA6.6 GF30	8.000	5
PA6.6 CF30 (Recyl)	14.600	7

Stellt man diese Faktoren miteinander ins Verhältnis, kann man auf die Leistung des Materials bezogen auf die Kosten schließen. Das Compound mit Recyclingfasern kann zwar nicht die Leistung des Compounds mit Primärfasern erreichen, weist jedoch eine doppelt so hohe Kostenausnutzung auf. Das bedeutet je Euro/kg hat das Recyclingcompound einen doppelt so hohen Zugmodul.



**Abbildung 19: Kostenspezifischer E-Modul (Zugmodul-Kosten-Verhältnis)**

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass zur Dosierung von Langfasern eine Modifikation des Vereinzelnprinzips „Nadelwalze“ notwendig ist. Angestrebt wird eine Lösung bei der Faseragglomerate mittels Scherung durch Bürsten vereinzelt werden. Zudem muss die Trennung von Faser- und Luftstrom auf engstem Bauraum verbessert werden, um die Reinigungsintervalle der Filter signifikant zu verlängern. Zur Prozessverbesserung wird eine pneumatische Fördereinrichtung zur Beschickung der Anlage mit Fasermaterial und zur Rückführung der Filterrückstände in den Demonstrator integriert.

### 3.2.3 Ergebnisresultierte Maschinenoptimierung

Zur Optimierung der Prozesssicherheit, wurden Änderungen an der Förderung der Fasern in der Staukammer vorgenommen. Damit keine Blockierungen der Fasern an bestimmten Stellen auftreten können, wurde der waagerechte Aufbau der Staukammer in einen senkrechten Aufbau umgebaut. Die Förderung der Fasern vereinfachte sich durch die Ausnutzung der Gewichtskraft und zusätzlich wurden mögliche Blockierungstellen und somit Brückenbildung der Fasern vermieden.

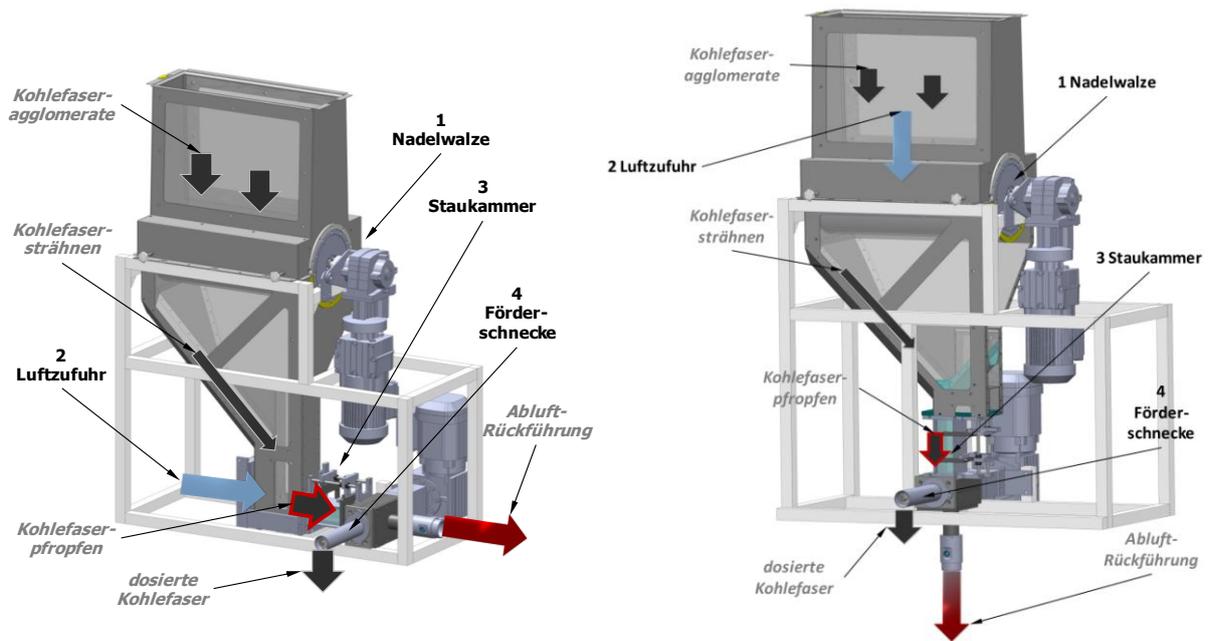
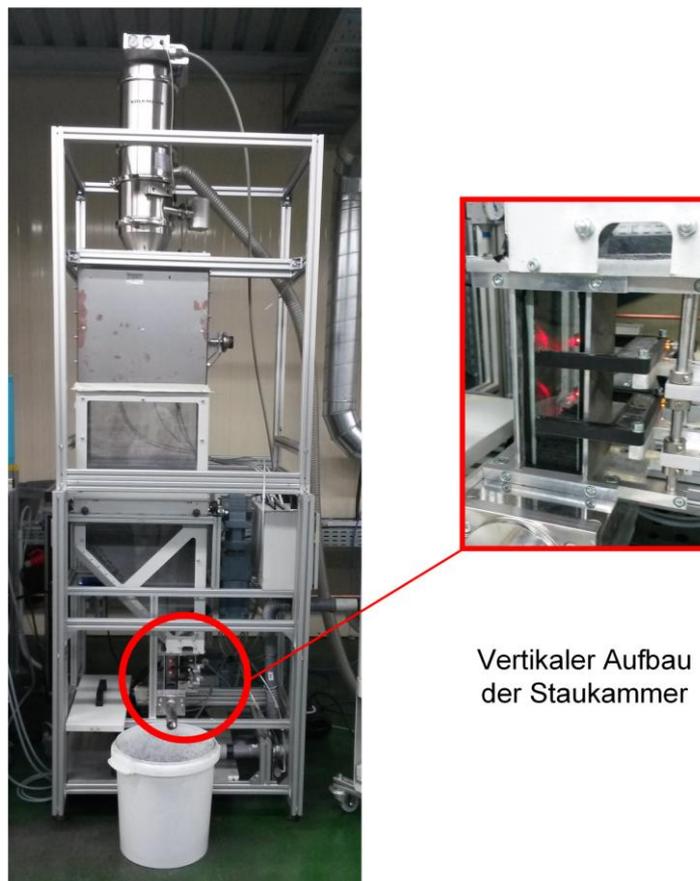


Abbildung 20: Versuchsaufbau alt (l); Versuchsaufbau neu (r)

In der Abbildung 21 ist der neue Aufbau mit der vertikalen Staukammer dargestellt.



Vertikaler Aufbau der Staukammer

Abbildung 21: Neuer Aufbau des Kohlefaserdosierers

### 3.3 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

Die Bewertung der Projektergebnisse erfolgt anhand von drei Hauptkriterien:

- Konstanter Massestrom
- Massedurchsatz
- Energiebedarf / Kosten

Der konstante Massestrom konnte, wie in den Ergebnissen unter Punkt 3.2.1 erläutert, bei Kurzfasern sowie bei Langfasern realisiert werden. Der Massedurchsatz sowie der Energiebedarf und die Kosten sind als wirtschaftliche Zielstellung in der Tabelle 2 aufgestellt worden. Das Ziel war es mit einer Produktionsmenge von 7,5 kg/h 41,7% der Kosten im Vergleich zu Primärfasern zu erreichen. Aus den Versuchen ergab sich, dass sich sogar eine Produktionsmenge von mindestens 15 kg/h erreichen lassen kann. Die Kosten im Vergleich zu den Primärfasern fallen somit auf 37,5%. Zusätzlich ist die benötigte Energie für eine jeweilige Produktionsmenge halb so hoch wie erzielt.

**Tabelle 2: Wirtschaftliche Zielstellung**

	Geplante Werte			Erzielte Werte		
<b>Elektrische Anschlussleistung</b>						
Anschlussleistung Walzensystem	0,4	0,13	kW	0,3	0,13	kW
Anschlussleistung Dosiersystem	0,4	0,25	kW	0,8	0,25	kW
Anschlussleistung Umlufteinheit	0,4	1,20	kW	0,05	1,20	kW
<b>Abschlussleistung gesamt</b>		<b>1,58</b>	<b>kW</b>		<b>1,58</b>	<b>kW</b>
<b>Energiebedarf und Produktionsmenge</b>						
Auslastung		0,4		0,3; 0,8; 0,05		
Betriebsleistung gesamt		0,63	kW	0,3		kW
Produktionsmenge je h		7,5	kg/h	15		kg/h
Produktionsdauer im Jahr		4.000	h	4.000		h
<b>Spez. Energiebedarf</b>		<b>0,08</b>	<b>kWh/kg</b>	<b>0,02</b>		<b>kWh/kg</b>

<b>Spez. Energiebedarf</b>	<b>302</b>	<b>kJ/kg</b>	<b>75,5</b>	<b>kJ/kg</b>
<b>Produktionsmenge im Jahr</b>	<b>30.000</b>	<b>kg/a</b>	<b>60.000</b>	<b>kg/a</b>
<b>Energiebedarf im Jahr</b>	<b>2.520</b>	<b>kWh/a</b>	<b>1.200</b>	<b>kWh/a</b>
<b>Maschinenstundensatz und Verarbeitungskosten</b>				
Energiekosten je h	0,10	Eur/h	0,10	Eur/h
Anlageninvest	40.000	Eur	40.000	Eur
Abschreibungsdauer	4	a	4	a
Abschreibung im Jahr	10.000	Eur/a	10.000	Eur/a
Abschreibung je h	2,50	Eur/h	2,50	Eur/h
Personalkosten je h	35	Eur/h	35	Eur/h
<b>Maschinenstundensatz</b>	<b>37,60</b>	<b>Eur/h</b>	<b>37,60</b>	<b>Eur/h</b>
<b>Verarbeitungskosten je kg</b>	<b>5,01</b>	<b>Eur/kg</b>	<b>2,51</b>	<b>Eur/kg</b>
<b>Direktverarbeitung der Primärfaser in Compoundierprozessen</b>				
<b>Kosten Primärfaser</b>	<b>60,00</b>	<b>Eur/kg</b>	<b>60,00</b>	<b>Eur/kg</b>
<b>Verarbeitung von Reißfasern zu Recyclingfasern für Compoundierprozesse</b>				
Kosten Reißfaser	20,00	Eur/kg	20,00	Eur/kg
Verarbeitung zu Recyclingfaser	5,01	Eur/kg	3,50	Eur/kg
<b>Kosten dosierfähige Recyclingfaser</b>	<b>25,01</b>	<b>Eur/kg</b>	<b>23,50</b>	<b>Eur/kg</b>

### 3.4 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Entwicklung von innovativen Anlagen zur Aufarbeitung von Kunststofffasern, ist eine Reaktion auf das zunehmende, internationale Interesse an belastungsfähigen Strukturbauteilen aus faserverstärkten Kunststoff für die Automobilindustrie. In den vergangenen Jahren wurde zunehmend die Notwendigkeit sowie das Marktpotential bei der Entwicklung von effektiven Wirkmechanismen zur Verbesserung von Verfahren der Aufarbeitung und Herstellung von faserverstärkten Verbundstoffen erkannt und umgesetzt. Durch die kontinuierliche Forschungs- und

Entwicklungsarbeit sowie enge Zusammenarbeit mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen konnte und kann die ULT AG ihr Know-How auch in diesem Segment vorangetrieben. Damit können zukünftig neue Marktanteile erschlossen werden.

Neben Komplettlösungen, stellen vor allem auch die Teilkomponenten der Förderung, Abtrennung und Abscheidung von Fasern einen interessanten Marktanteil dar. Dieses Know-How zur Entwicklung und Vertrieb von Sonderlösungen wird auf der Website der ULT AG beworben.

<https://www.ult.de/produkte-leistungen/sonderloesungen.html>

Die im Projekt getätigten Entwicklungen erweitern das firmeneigene Kompetenzspektrum. Unter Nutzung der im Projektablauf gewonnenen Erkenntnisse können künftig neue Lösungen bei der Verarbeitung und Abtrennung von Kohlefasern für die Herstellung von thermoplastischen faserverstärkten Halbzeugen angeboten werden.

Umsätze werden längerfristig positiv beeinflusst und Arbeitsplätze bewahrt bzw. geschaffen. Die Erschließung neuer Märkte bzw. die Erweiterung des Marktanteils steigert den Bekanntheitsgrad und ist somit Voraussetzung für eine längerfristige Personal- und Umsatzerhöhung.

Die Vermarktung von Komplettanlagen oder Anlagenkomponenten (Absaug- und Abscheideeinrichtungen), soll in erster Linie durch Präsentationen bei bestehenden Industriekunden sowie über die Kontaktaufnahme zu potentiellen Anwendern auf Messen erfolgen.

Für 2017 ist die aktive Teilnahme auf Messen wie Powtech (26.-28.09.2017) und productronica (14.-17.11.2017) geplant. Für 2018 wird ULT als Aussteller auf der LASYS, SMT, Rapid.Tech (05.-07.06.2018) sowieACHEMA (11.-15.06.2018) und Chillventa (16.-18.10.2018) neue Produkte und Entwicklungen präsentieren.

Aber auch auf Veranstaltungen wie dem firmeneigenen ULT-Symposium, zu dem wir Kunden und Interessenten einladen, werden die getätigten Entwicklungen vorgestellt und beworben.

## 4 Fazit

Im Rahmen des FuE-Projektes wurde eine Demonstratoranlage zur Homogenisierung und Dosierung von Reißfasern aus CFK-Teilen entwickelt, gebaut und erprobt. Die Anlage vereinzelt die Reißfasern, damit rieselfähige Fasern entstehen. Anschließend werden diese Fasern in eine Staukammer mit Luftstrom befördert und gesammelt, um einen gleichmäßigen Masseausstoß in der folgenden Fördereinheit zu garantieren. Die Fördereinheit fördert die Fasern mit Hilfe einer Förderschnecke und kann die Recyclingfasern somit homogen und dosiergenau austragen.

Ziel der innovativen Technologieentwicklung ist es Primärfasern im Herstellungsprozess für spritzgegossene Strukturbauteile zu substituieren. Die Demonstratoranlage erzielte konstante Masseströme bei Kurzfasern mit einer Länge von  $l \leq 2$  mm sowie für Langfasern mit einer Länge von  $l = 20$  mm – 30 mm. Diese Recyclingfasern können für die Herstellung von thermoplastischem Granulat ohne weiteres verwendet werden. Die Versuche mit „Quasiendlosfasern“, die eine Länge von  $l > 80$  mm haben, ergaben Knäuelbildung an der Nadelwalze sowie Blockierungen an der Förderschnecke. Es ist somit nicht möglich Fasern mit einer Länge von über 80 mm konstant zu transportieren und einen gleichmäßigen Masseausstrom zu generieren.

Des Weiteren ergab sich während der Versuchsdurchführung, dass eine senkrecht ausgerichtete Staukammer ein Blockieren der Fasern verhindert. Die Fasern müssen somit nicht rein vom Luftstrom in und durch die Staukammer befördert werden, sondern fallen und sammeln sich aufgrund der Gewichtskammer in der Staukammer. Diese Anordnung stellt eine größere Prozesssicherheit dar.

## 5 Literaturverzeichnis

(Har12)	Hartbtrich, Iestyn: Ingenieur.de; <a href="http://www.ingenieur.de/Themen/Werkstoffe/Recycling-Carbon-stuetzt-neue-Technologien">http://www.ingenieur.de/Themen/Werkstoffe/Recycling-Carbon-stuetzt-neue-Technologien</a> ; 2012-08-17
(CLO14)	<a href="http://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/resources/images/cdn/cms/0310HPC_Recycling4.jpg">http://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/resources/images/cdn/cms/0310HPC_Recycling4.jpg</a> ; Zugriff: 2014-05-08
(CTC14)	<a href="http://www.ctc-gmbh.com/typo3temp/pics/401ea5c067.jpg">http://www.ctc-gmbh.com/typo3temp/pics/401ea5c067.jpg</a>
(KER14)	<a href="http://www.kern.de/kunststoff/ueber_uns/aktuelles/hannovermesse_lft/hauptlagerbock.jpg">http://www.kern.de/kunststoff/ueber_uns/aktuelles/hannovermesse_lft/hauptlagerbock.jpg</a> ; Zugriff: 2014-02-28
(RG14)	<a href="http://www.r-g.de">http://www.r-g.de</a> ; Zugriff: 2014-04-02
(WIK14)	<a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Polyamid-Granulat_4.10.jpg">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Polyamid-Granulat_4.10.jpg</a> ; Zugriff: 2014-03-14
(DBU15)	Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Jahresbericht 2015
(AVK10)	AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: Handbuch Faserverbundwerkstoffe; 2010