

Abschlussbericht

Prozessentwicklung zum Recycling von Organoblech-Verschnitten mit direkter Implementierung in den Hybridbauteil- Fertigungsprozess mit zusätzlicher Bewertung (ReProOrgano)

Institution	TH Rosenheim Zentrum für Forschung, Entwicklung und Transfer Hochschulstraße 1 83024 Rosenheim
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Michael Schemme Prof. Dipl.-Ing. Martin Würtele martin.wuertele@th-rosenheim.de Prof. Dr.-Ing. Sandra Krommes sandra.krommes@th-rosenheim.de
Bearbeiter	Sabine Hummel, B.Eng. sabine.hummel@th-rosenheim.de Katharina Obermeier & Dr. Katja Zier
Förderkennzeichen	13FH007PX8
Auftraggeber	Bundesministeriums für Bildung und Forschung Rahmenprogramm: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)
Projektträger	VDI Technologiezentrum GmbH
Laufzeit	vom 01.09.2019 bis 31.12.2022

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Kurzbericht.....	3
1.1 Aufgabenstellung, Ablauf des Vorhabens und wesentliche Ergebnisse	3
2 Eingehende Darstellung	5
2.1 Die Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses	5
2.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	10
2.3 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	12
2.4 Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 13	
2.5 Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	14
2.6 Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses	14

1 Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung, Ablauf des Vorhabens und wesentliche Ergebnisse

Im Leichtbau findet zunehmend eine Funktionalisierung von thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen statt. Treibende Kraft dafür ist in erster Linie die Automobilindustrie, die aufgrund von steigenden Verbrauchs- und CO₂-Anforderungen zur Gewichtsreduktion immer mehr auf die Substitution von Metallen durch Verbundmaterialien setzt. Aufgrund ihres guten Preis-Leistungsverhältnisses - bedingt durch die geringe Dichte und leistungsfähigen Materialeigenschaften - sind diese Werkstoffe prädestiniert für Leichtbau-Anwendungen.

Das Hybrid-Spritzgussverfahren von faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen in Verbindung mit Endlosfaserstrukturen für die Herstellung von Funktionsbauteilen und Leichtbaustrukturen hat sich in den vergangenen Jahren auf breiter Front durchgesetzt. Bei endlosfaserverstärkten Thermoplasten spricht man von sog. Organoblechen.

Zur Herstellung der Hybridbauteile werden die Organobleche auf eine bestimmte Größe und Geometrie konfektioniert. Bei diesem Konfektionierungsprozess, dem sogenannten Nesting, fallen bis zu 35 % Verschnitt je nach Anwendung an. Dieser Verschnitt wurde bis zum Jahre 2020 in Verbrennungsanlagen beigemischt und somit energetisch verwertet (Stand der Antragsstellung). Aktuell werden die sortenreinen Organoblech-Verschnitte an Recyclingunternehmen zur Herstellung von Sekundärrohstoffen weitergegeben und zu Regranulat verarbeitet. Jedoch hat dieses Recycling eine deutliche Reduktion der mechanischen Eigenschaften zu Folge (Faserlängendegradation) und erfährt somit ein Downcycling.

Im Rahmen des Projekts wurde zusammen mit den Industriepartnern Bond-Laminates, Brose, ElringKlinger und KraussMaffei die Entwicklung einer Closed-Loop Strategie angestrebt. Dabei sollten speziell die Wechselwirkungen zwischen der komplexen Werkstoffstruktur, der Maschinentechnik zur Aufbereitung und Wiederverwertung sowie den wirtschaftlichen Faktoren der mehrstufigen Wertschöpfungskette untersucht werden. In dieser Wertschöpfungskette sollten die sortenreinen Verschnitte des endlosverstärkten Halbzeugs zu einer langglasfaserverstärkten Spritzgusskomponente für Funktionselemente bei der Organoblechverarbeitung direkt im Verarbeitungsprozess ohne Minderungen von mechanischen Eigenschaften wiederverwertet werden. Dabei stand der ökonomische und ökologische Mehrwert durch das Einbringen eines hohen Anteils des „Produktionsabfalls“ im Vordergrund.

Für die Entwicklung dieses Closed-Loop-Recyclingprozesses werden die sog. Nestingreste (Organoblech-Verschnitt) mittels eines Zerkleinerungsverfahrens zu Mahlgut verarbeitet. Dieses Mahlgut wird anschließend mit einem geeigneten Dosiersystem unter Beimischung von Neat PP und Masterbatch als Funktionalisierung direkt in den Hybrid-Spritzgussprozess implementiert. Entscheidend dabei ist, dass die Faserlänge des recycelten Materials möglichst lang ist, um bestmögliche mechanische Eigenschaften im späteren Hybridbauteil zu gewährleisten.

Zu Beginn des Vorhabens wurden die Anforderungen an die Verwendung von Rezyklaten aus dem zu entwickelnden Closed-Loop-Recyclingverfahren in einem Pflichtenheft definiert. Für eine erste Einschätzung und Machbarkeit wurden unterschiedliche Zerkleinerungsstrategien ermittelt, betrachtet und ausführlich getestet. Dabei wurde folglich die Abhängigkeit der Dosierfähigkeit zur Weiterverarbeitbarkeit im späteren Spritzgussprozess der zerkleinerten Verschnitte zur Beschaffenheit dieser Verschnitte hergestellt. Als Referenzbauteil für das Forschungsvorhaben wurde das Serienbauteil Türmodulträger des Ford Focus gewählt. Sowohl die technischen Untersuchungen als auch die ökonomischen und ökologischen Betrachtungen wurden federführend speziell für diese Anwendung exemplarisch durchgeführt.

Es wurden durch umfangreiche Voruntersuchungen Zerkleinerungsmethoden gegenübergestellt und die Beschaffenheit der Mahlgüter bewertet. Mit der Guillotinentchnik (Firma VanWees) und der 4-Wellentechnologie (Firma Weima) konnten die besten Zerkleinerungsergebnisse hinsichtlich der Weiterverarbeitung erzielt werden: Die damit zerkleinerten Mahlgüter konnten reibungslos

weiterverarbeitet werden, so dass schnell sehr gute und brauchbare Ergebnisse gewonnen wurden. Anhand der sehr guten Vorversuche war die Auswahl der Zerkleinerungsmethoden und der Dosiermethoden schnell getroffen. Somit konnten vielversprechende Versuchsreihen zur Weiterverarbeitung der Organoblech-Verschnitte durchgeführt werden. Der Fokus lag auf der Ermittlung der Kennwerte der gespritzten Prüfkörperbauteile, um abschätzen zu können, ob die Primärware durch das entwickelte Rezyklat vollständig ersetzt werden kann. Ebenso wurden die Ergebnisse mit dem Referenzmaterial Regranulat der Firma Wipag verglichen. Um eine realistische Abschätzung zur Substitution der Primärware für das Serienbauteil Türmodulträger des Ford Focus abgeben zu können, wurden die Massenströme berechnet. Diese dienen ebenso als Grundlage zur ökonomischen und ökologischen Bewertung im Projekt. Unter Annahme eines Ausschusses von 5 % bei der Zerkleinerung der Organoblech-Verschnitte zum Mahlgut kann eine Substitution von 32 % des gesamt eingesetzten Anspritzmaterials durch das Rezyklat realisiert werden. Diese Ergebnisse wurden aus technischer Sicht ebenso geprüft. Das Beimischen von Primärware zum Rezyklat als Mischmaterial hatte keinen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper zufolge.

Abschließend wurden ausführliche mechanische, optische und thermische Analysen an den hergestellten Prüfkörpern durchgeführt. Dafür wurden Multiprüfkörperbauteile für Zugprüfungen, Schlag-Biegeprüfungen, Impactprüfungen sowie thermische und optische Prüfungen wie (bspw. CT-Analyse) hergestellt. Hierbei lag der Fokus sowohl auf den Faserlängen im Prüfkörperbauteil als auch auf dem Faserlängenabbau während des gesamten Spritzgussprozesses. Die Faserlängenanalyse korreliert mit den mechanischen Kennwerten der Versuchsreihen. Die Faserlängendegradation über den Spritzgussprozess lässt sich deutlich erkennen. Im Bauteil konnte in Bezug auf die Faserlängen kein signifikanter Unterschied zwischen den Mahlgütern und Referenzmaterialien festgestellt werden.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Vorhabens war die Wirtschaftlichkeitsanalyse des Recyclingprozesses und die ganzheitliche Bewertung der Umweltentlastungseffekte mittels Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung). Der Vergleich zeigt, dass durch das Closed-Loop-Recycling trotz einer verringerten Gutschrift aus der energetischen Verwertung und dem zusätzlichen Zerkleinerungs- und Aufbereitungsschritt die Umweltwirkungen verringert werden. Die CO₂-Belastung kann um 9,0 % verglichen mit dem Ist-Stand 2019 reduziert werden.

Zusätzlich wurde eine Wirtschaftlichkeitsrechnung und eine Materialkreislaufneigung für die stoffliche Verwertung in Abhängigkeit vom Preis der Neuware durchgeführt. Hierbei lässt sich sagen, dass sich selbst bei einer geringen Auslastung der Shredder/Zerkleinerungsanlagen ein positiver, wirtschaftlicher Effekt ergibt. Aufgrund der steigenden Materialpreise wird der Recyclingprozess in Zukunft wirtschaftlich zudem immer lohnenswerter.

Eine Direktverarbeitung der zerkleinerten Organoblech-Verschnitte mit einer passenden Spritzgussanlage ist aus technischer und wirtschaftlicher Sicht sinnvoll. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Direktverarbeitung des Rezyklats als Mahlgut bessere mechanische Kennwerte aufweist, wie die des Regranulats der Firma Wipag. Hier spielt die Menge der zugegebenen Primärware keine Rolle. Ein Closed-Loop-Recycling der Organoblech-Verschnitte ist unabhängig von der Menge des Massenstroms lohnenswert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Entwicklung des Recyclingprozesses erfüllt wurde. Die Konstanz und Reproduzierbarkeit der Prozesse ist gewährleistet. Bei einem Upscaling in den Serienprozess und auf Serienanlagen müssen lediglich Anpassungen und spezifische Optimierungen je nach konkreter Maschine und Bauteil durchgeführt werden. Die bisherigen Ergebnisse sind allerdings sehr vielversprechend.

Im Forschungsprojekt ReProOrgano konnte ein optimales Verfahren entwickelt werden, um Organoblech-Verschnitte zu recyceln. Dabei wurde gezeigt, dass Organoblech-Verschnitte ohne wirtschaftlichen Verlust und mechanische Einbußen im Vergleich zu herkömmlichem Spritzgussgranulat in den Spritzguss-Serienprozess integriert werden kann. Zudem bietet das Recycling von Organoblech-Verschnitten deutliche Vorteile in der Ökobilanz im Vergleich zum Ist-Stand.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Die Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Das Forschungsprojekt wurde in drei Phasen eingeteilt:

- In Phase I wurden grundlegende Untersuchungen zur Zerkleinerung, Aufbereitung und Dosierung der Organoblech-Verschnitte durchgeführt.
- In Phase II wurden eine umfangreiche Wirtschaftlichkeitsanalyse des Recyclingprozesses und eine ganzheitliche Bewertung der Umweltentlastungseffekte mittels Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung) durchgeführt.
- In Phase III wurden die mechanischen Kennwerte der Resultate betrachtet und analysiert.

Nachfolgend werden die übergreifenden Arbeitspakete mit ihren erreichten Zielen im einzelnen erläutert.

AP 1.0: Vorbereitenden Maßnahmen (Recherche, Pflichtenheft, Vorversuche)

In diesem Arbeitspaket wurden eine umfassende Recherche zum Stand der Technik abgeschlossen. Zusätzlich wurden in diesem Arbeitspaket erste Untersuchungen zur Zerkleinerung und der Dosierbarkeit der Ergebnisse durchgeführt um folglich ein Pflichten- und ein Lastenheft erstellen zu können. Hier galt es, die Wechselwirkungen zwischen dem Erhalt möglichst langer Fasern im Bauteil und der Dosierbarkeit der zerkleinerten Organoblech-Verschnitte zu betrachten. Es wurden eine große Auswahl an Zerkleinerungsmethoden sowie Zerkleinerungsunternehmen miteinander verglichen und eine ausführliche optische und thermische Analyse der Mahlgüter durchgeführt.

Die Vorversuche zeigen deutlich, dass die Beschaffenheit des Mahlgutes entscheidend dessen Dosierfähigkeit bestimmt. Für eine gute Dosierfähigkeit ist ein gut **rieselfähiges Mahlgut** vorteilhaft. Möglichst **gerade Schnittkanten** (ohne herausstehende Fasern, Vermeidung von Brückenbildung) und **gleichförmige Flakes** führen zu einer guten Dosierfähigkeit. Die Größe der Flakes sollte dabei mit einer **maximal dosierfähigen Geometrie** gewählt werden, da durch die Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Hybridbauteile eine möglichst **hohe Faserlänge** im Mahlgut als vorteilhaft einzustufen ist. Anhand der Vorversuche zur Zerkleinerung und Dosierung kann eine maximal dosierfähige Geometrie der Flakes von **12 mm x 15 mm** für die Anlagen im Technikum der TH Rosenheim definiert werden.

Eine weitere Problematik bei der Zerkleinerung der Organoblech-Verschnitte stellt eine ausgeprägte Staubentwicklung dar. Entstehende Stäube bedingen hohe Auflagen an die Arbeitsschutzmaßnahmen im Produktionsprozess und führen zur Bildung von Clustern/Klumpen bei der Dosierung.

Darüber hinaus sollten zusätzliche Aufbereitungsschritte, wie z.B. Fraktionierungen oder Reinigungen bei der Aufarbeitung des Mahlguts vermieden werden. Diese würden zu einer Reduktion der positiven ökologischen Auswirkungen führen.

Für die Mahlgutspezifikationen zur Weiterverarbeitung an der Technikumsanlage der TH Rosenheim sollen die händisch gestanzten Flakes als Referenz dienen. Zusammenfassend können folgende Kriterien für die Verarbeitbarkeit des Mahlgutes definiert werden:

- homogene Größenverteilung im Mahlgut
- Flakegeometrie 12 mm x 15 mm
- definierte Schnittkanten ohne herausstehende Fasern
- (geringe bis) keine Staubentwicklung bei der Zerkleinerung und Weiterverarbeitung
- möglichst einstufige mechanische Zerkleinerung (ohne zusätzliche Säuberung oder Fraktionierung)

Das entscheidendste Kriterium zur Qualifizierung des aufbereiteten Rezyklats (Mahlgut in der Abmischung mit zudosiertem Polypropylen (PP) und Masterbatch (MB) zur Einstellung eines Glasfaseranteils von 30 Gew.-%) ist die Einhaltung der mechanischen Kennwerte der hergestellten Hybridbauteile. Als obere Referenz in allen Prüfverfahren ist für die Entwicklung des Recyclingprozesses das Primärmaterial LGF30 zu 100% Anspritzmaterial mitzuführen. Als weitere

Referenz wurde ein Regranulat der Firma Wipag, welches ebenfalls aus Organoblech-Verschnitt hergestellt wurde verwendet.

Das Eigenschaftsprofil der Primärware / Referenz PP LGF 30 gilt als Lastenheft für die Versuche im Technikum der TH Rosenheim.

Zusätzlich wurde in diesem Arbeitspaket eine Massenstromberechnung durchgeführt. Die Aufstellung der Massenströme am Beispiel der Fertigung eines Türmodulträgers erfolgt als Grundlage zur ökonomischen und ökologischen Bewertung des im Projekt entwickelten Closed-Loop-Verfahrens, sowie für die Bewertung des am Beispiel des Türmodulträgers technisch einsetzbaren Anteils an Rezyklat. Unter Beachtung eines angenommenen Ausschusses von 5 % bei der Zerkleinerung der Organoblech-Verschnitte zum Mahlgut, kann rechnerisch eine Substitution von 32 % des gesamt eingesetzten Anspritzmaterials durch das Rezyklat realisiert werden. Das Mahlgut (Gewichtsanteil GF 64 %) muss zur Bildung des Rezyklats (Gewichtsanteil GF 30 %) im Spritzgussprozess mit zudosiertem (neat) PP und Masterbatch (Haftvermittler) versetzt werden. Die verbleibenden 68 % des gesamt eingesetzten Anspritzmaterials müssen zunächst durch Primärware abgebildet werden. Bei der technischen Umsetzung der Spritzgussversuche an der TH Rosenheim wird eine Versuchsreihe mit einem Anteil von 33 % Rezyklat (1/3, Ausschuss Mahlgut von 2-3 %) durchgeführt.

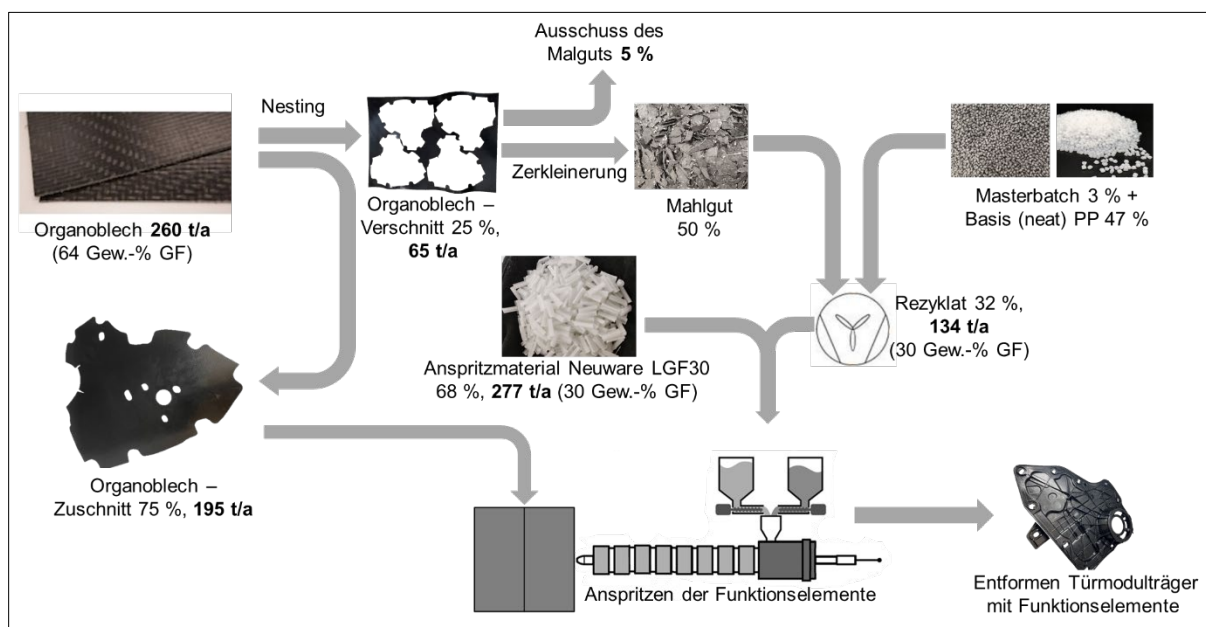


Abbildung 1 Massenströme bei der Fertigung eines Türmodulträgers unter Beachtung des Closed-Loop-Recyclings von **Organoblech**-Verschnitt.

AP 2.0: Zerkleinerung, Aufbereitung und Dosierung der Organoblech-Verschnitte - Phase 1

Resultierend aus den Ergebnissen der Vorversuche wurde der Fokus für die Weiterverarbeitung in Phase I auf drei Zerkleinerungstechniken eingeschränkt (Zwei 4-Wellenzerkleinerer und Guillotinentchnik).

Für die Weiterverarbeitung ist die Auswahl der Dosierer ebenfalls abhängig von den Ergebnissen der Vorversuche. Für die Dosierung der Materialkomponenten (Zerkleinerte Organoblech-Verschnitte, neat PP und Masterbatch) wurden zusammen mit der Firma Motan eine Auswahl an Dosierern und Förderschnecken zusammengestellt. Alle Dosierer sind an ein gravimetrisches Dosiersystem angeschlossen und somit konnte die genaue Dosiermenge mittels Gewichtsermittlung dem Spritzgussprozess zu dosiert werden.

Um einen Closed-Loop-Recyclingprozess realisieren zu können, wurde die Weiterverarbeitung des Rezyklates (Mahlgut + neat PP + MB) im Spritzgussverfahren getestet. Dabei wurden mittels eines geeigneten Mischverhältnisses, Multiprüfkörperbauteile mit einem Glasfasergewichtsanteil von 30 % im

Spritzgussverfahrens hergestellt. Als obere Referenz dient die verwendete Primärware (PP LGF 30) was dem aktuell im Serienprozess zur Funktionalisierung des Türmodulträgers verwendeten Materials ähnelt. Als weitere Referenz dient das Rezyklat der Firma WIPAG (PP KGF 30).

Für die Weiterverarbeitung wurden ein Spritzgusscompounder der Firma Krauss Maffei verwendet. Anhand diese Anlage können zwei unterschiedliche Spritzgussprozesse untersucht werden. Dafür wird neben dem Standard-Spritzgussprozess ein Sonderverfahren, das Direct Compounding Injection Molding (DCIM) verwendet. Mit beiden Verfahren wurden intendierte Versuchsreihen gefahren und gegenübergestellt. Um Brückenbildungen entgegen zu wirken, wurde das Mahlgut unterfüttert in die Plastifizierung zudosiert. Zur Berücksichtigung der Massestromberechnung wurden weitere Versuchsreihen mit Mischmaterialien (Teil Rezyklat + Teil Primärware) durchgeführt und verglichen. Im Fall des „Türmodulträgers“ ergibt sich aus der Massenstromberechnung ein maximal möglicher Rezyklat-Anteil von 35 % (angenähert 33 %). Für andere Bauteile können sich allerdings auch höhere Rezyklat-Anteile ergeben, weshalb 67 % als Zwischenwert gewählt wurde. Der Vergleich mit 100 % Rezyklat-Anteil zeigte, ob eine vollständige Substitution des Primärstoffs möglich ist.

Die Weiterverarbeitung der ausgewählten Mahlgüter verlief reibungslos und es konnten schnell sehr gute und brauchbare Ergebnisse gewonnen werden. Anhand der sehr guten Vorversuche war die Auswahl der Zerkleinerungsmethoden und der Dosiermethoden schnell getroffen. Somit konnten vielversprechende Versuchsreihen zur Weiterverarbeitung der Organoblech-Verschnitte durchgeführt werden.

Folgende Ergebnisse wurden zusammengefasst:

- Das Zumischen von Haftvermittler verbessert die Homogenität (Faser-Matrix-Haftung) der Rezyklate und führt zu einer Verbesserung der mechanischen Kennwerte
- Die Weiterverarbeitung mit dem DCIM-Verfahren weist eine homogenere Faserverteilung ohne Clusterbildung auf, allerdings werden die Fasern erheblich längendegradiert. Mit der Verarbeitung der 3-Zonen-Schnecke sind höhere Clusterbildungen, aber längere Faser im Prüfkörperbauteil erkennbar. Auch die mechanischen Eigenschaften sind bei den Prüfkörpern mit der 3-Zonen-Schnecke etwas besser als bei den Prüfkörpern mit dem DCIM-Verfahren.
- Bei den Mischmaterialien kann gesagt werden, dass die Primärware (PP LGF 30) durchaus mit 100 % Mahlgut und 33 % Mahlgut – Rezyklat substituiert werden kann.

Für weitere Versuche werden folgende Auswahl getroffen:

- Haftvermittler wird dem Rezyklat mit 3 Gew.-% weiterhin beigemischt.
- Das neat PP – MFI 75 wurde für weitere Versuche ausgewählt.
- Aufgrund der Serientauglichkeit und des Maschinenparks beim Verarbeiter (Tier I) wird der Fokus auf die 3-Zonen-Schnecke gelegt.
- Die Weiterverarbeitung erfolgt weiterhin mit den den Zerkleinerungsmethoden der Guillotinenteknik (VanWees) und der 4-Wellentechnologie (Weima)

AP 3.0: Wirtschaftlichkeitsanalyse des Recyclingprozesses und ganzheitliche Bewertung der Umweltentlastungseffekte mittels Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung) - Phase 2

In der Projektphase II wurden die Daten zur **ökonomischen Bewertung** des Closed-Loop-Recyclingverfahrens in Abstimmung mit den Projektpartnern erhoben. Es wurden das Vorgehen und die Methoden beleuchtet, die zur Wirtschaftlichkeitsanalyse im Projekt geeignet sind. Grundlage für die Berechnungen bilden dabei ebenfalls die Massenströme bei der Fertigung eines Türmodulträgers.

Neben den Produktanforderungen und verfahrenstechnischen Herausforderungen muss ein Closed-Loop-Recycling bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse überzeugen und zur Reduzierung von Umweltwirkungen beitragen. In dem Projekt wurde daher ausgehend von der Rohstoffherstellung bis zur Fertigung des Bauteils (Systemgrenze: cradle-to-gate) der **IST-Zustand** mit der konzipierten Prozesskette der werkstofflichen Verwertung im **Closed-Loop-Recycling** vergleichend analysiert.

Der IST-Zustand umfasst die Herstellung der Materialien, Betriebs- und Hilfsstoffe, die Prozessschritte der Produktion des Anspritzmaterials (PP-LGF) und die Fertigung des Organoblech-Halbzeugs mit dem anschließenden Zuschnitt auf die Einlegerform sowie die Vereinigung der beiden Ausgangsprodukte im

Spritzgussverfahren. Vergleichend erfolgt die Betrachtung der Verwertung des Verschnittmaterials, welche die Hauptunterscheidung von IST und CL darstellt. Für den IST-Zustand wurde die energetische Verwertung des Verschnittmaterials im Zementwerk angenommen (energetische Verwertung in Form der Substitution fossiler Energieträger für die Zementherstellung), da eine Mitverbrennung in der Müllverbrennungsanlage zur Störung der Prozessführung und Abgasreinigung führen kann. Für das Closed-Loop-Recycling wurde eine mechanische Zerkleinerung mit dem 4-Wellenzerkleinerer sowie die Herstellung eines Anspritzmaterials aus Mahlgut (33 Gew.-%), (neat) PP und Masterbatch modelliert.

Durch Änderung des Verwertungspfades der Organoblech-Verschnitte von energetischer zu werkstofflicher Verwertung ist eine Änderung der Prozesskosten zu erwarten. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden die Verwertungskosten für die unterschiedlichen Verwertungswege mittels eines Kosten- und Erlösmodells ermittelt und vergleichend diskutiert. Im Beispiel der Fertigung des Türmodulträgers fallen beim Hersteller der Organoblech-Einleger die Kosten zur Abgabe des Verschnittmaterials zur energetischen Verwertung (Zementwerk, IST-Status 09/2019), bzw. zur Abgabe zur werkstofflichen Verwertung (Recompound Kurzfasergarnulat, IST-Status 12/2020) an. Dem gegenüber steht das im Projekt entwickelte Closed-Loop Konzept und damit die Herstellung eines Rezyklats aus den mechanisch zerkleinerten Verschnitten (Mahlgut) zur Direktverarbeitung im Spritzgussprozess.

Aufgrund günstiger Neumaterialpreise war ein Kunststoffrecycling in der Vergangenheit für Unternehmen oft nicht wirtschaftlich. Knappe Ressourcen und steigende Materialpreise steigern indes die wirtschaftliche Attraktivität eines Closed-Loop-Recyclings. Zudem wächst der politische Druck auf Unternehmen Recyclingprozesse zu etablieren und Rezyklate einzusetzen, z.B. durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und Altfahrzeuggesetzgebung. Die ökonomische Bewertung des Closed-Loop-Recycling basiert auf der Kreislaufeignung nach VDI 2243. Ursprünglich als Kennzahl im Produktentwicklungsprozess zur Bewertung der wirtschaftlichen Kreislaufeignung eines Bauteils konzipiert, ist sie geeignet, die Wirtschaftlichkeit des Closed-Loop-Recyclings zu bewerten.

$$KE_M = \frac{(Kosten\ Neuware + Beseitigungskosten) \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right]}{Recyclingkosten\ Sekundärmaterial \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right]}$$

Die Kennzahl Kreislaufeignung KE_M setzt dafür die Kosten der Neuware und die Beseitigungs-/Verwertungskosten des Verschnitts ins Verhältnis zu den Recyclingkosten des Sekundärmaterials (Rezyklat). Die Recyclingkosten des Sekundärmaterials setzen sich dabei aus den Kosten der Demontage, der Aufbereitung und der Logistik für das Sekundärmaterial zusammen. Ist $KE_M > 1$, ist das Recycling wirtschaftlich sinnvoll, d.h. eine werkstoffliche Verwertung der Organoblech-Verschnitte wird bei entsprechenden Massenströmen aus ökonomischer Sicht empfohlen.

Für die Berechnung der Recycling- bzw. Aufbereitungskosten des Sekundärmaterials wurde ein Kostenmodell entwickelt, dass die kalkulatorischen Prozesskosten der Aufbereitung und die Logistikkosten in Abhängigkeit der Auslastung und Logistikkumfänge berechnet. Diesem liegen die Anschaffungskosten inkl. Nebenkosten mit einer Abschreibungsdauer von 6 Jahren sowie Kapital-, Betriebs- (Energie, Hilfsstoffe, Wartung und Reparatur), Miet-, Lager-, Logistik- und Lohnkosten für einen 4-Wellenzerkleinerer zugrunde. Daraus ergeben sich Prozess- einschließlich Logistikkosten in Höhe von 1,56 €/kg bei einer Auslastung von etwa 10 % (4-Wellenzerkleinerer). Demontagekosten, wie sie bei einem End-of-Life-Recycling anfallen, sind für das Closed-Loop-Recycling nicht relevant.

Die Bewertung der Kreislaufeignung zeigt, dass das Recycling-Konzept rechnerisch ab einem Neuwarepreis von 0,50 €/kg aus ökonomischer Sicht vorteilhaft ist. Basierend auf historischen Marktpreisen zwischen 1,59 €/kg und 2,41 €/kg PP-LGF30 ergibt sich für das Closed-Loop-Recycling eine robuste KE_M von 1,4. Zukünftig ist davon auszugehen, dass sich die Neuwarepreise mindestens auf dem gleichem Preisniveau befinden.

Ebenso wurden in der Projektphase 2 die Daten zur **ökologischen Bewertung** des Closed-Loop-Recyclingverfahrens in Abstimmung mit den Projektpartnern erhoben. Es wurde das Vorgehen zur vergleichenden Ökobilanzierung des IST-Status und des Closed-Loop-Recyclings nach den Normen DIN EN ISO 14040/14044 und die resultierenden Ergebnisse betrachtet. Grundlage für die Bilanzierungen bilden auch hier die berechneten Massenströme und den IST-Zustand sowie das

Closed-Loop-Recycling. In einer Ökobilanz werden für jeden Prozessschritt der Herstellung, Nutzung und Entsorgung die Input- und Outputströme eines Produkts identifiziert und quantifiziert, die damit einhergehenden Umweltwirkungen können dadurch erkannt werden. Ziel ist es zu bewerten, ob das Closed-Loop-Recycling ein Umweltentlastungspotential gegenüber der energetischen Verwertung der Organoblech-Verschnitte im Zementwerk hat (IST-Zustand). Der Bewertung liegt dabei die Systemgrenze cradle-to-grave und die funktionelle Einheit von 1.000 Stück Türmodulträger zugrunde. Die Wirkungsabschätzung erfolgt mittels der Methode nach CML2001. Dabei werden die Wirkungskategorien Treibhauspotential (GWP), Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) elementar und fossil, Humantoxizitätspotential (HTP), Ozonabbaupotential (ODP) und das Eutrophierungspotential (EP) zur Bewertung herangezogen.

Der IST Zustand mit energetischer Verwertung im Zementwerk dient als Referenz und wurde auf 100 % normiert. Der Vergleich des IST Zustands gegenüber dem Closed-Loop-Recycling zeigt, dass in allen Wirkungskategorien ein deutliches Umweltentlastungspotential durch das Closed-Loop-Recycling entsteht. Durch die Gutschrift der energetischen Verwertung fällt das Entlastungspotential bei dem abiotischen, fossilen Ressourcenverbrauch (ADP (fossil)) zwischen IST und CL jedoch geringer aus als bei den anderen Wirkungskategorien.

Bezogen auf die Prozessschritte wurde deutlich, dass die Umweltwirkungen des Recyclings des Verschnittmaterials je nach Wirkungskategorie einen Anteil von etwa 5-10 % an den gesamten Umweltwirkungen im Closed-Loop-Recycling haben. Diese werden durch die anteilige Substitution des Anspritzmaterials (Primärware) kompensiert. So kann das GWP100 im Closed-Loop-Recycling um 6,6 % und der elementare, abiotische Ressourcenverbrauch durch die Kreislaufführung der Glasfasern um 13,3 % reduziert werden. Das Closed-Loop-Recycling des Verschnittmaterials ist somit auch aus ökologischer Sicht sinnvoll.

Aus umwelttechnischer Sicht ist die erzielbare Verringerung der Umweltwirkungen hauptsächlich abhängig vom Energie- und Materialverbrauch in den Herstellungsprozessen und Transportvorgängen.

AP 4.0: Bestimmung der mechanischen Kennwerte der Rezyklate - Phase 3

In Phase III des Forschungsprojektes wurden umfangreiche Untersuchungen zur Charakterisierung des Closed-Loop-Recyclingprozesses durchgeführt. Es wurden ausführliche Materialcharakterisierungen, sowohl optische als auch mechanische Methoden angewandt.

Die Machbarkeit des Closed-Loop-Recyclingprozesses wurden bereits in Phase I geklärt, die Primärware kann durch das entwickelte Rezyklat vollständig ersetzt werden. Anhand der Auswahl der Parameter aus Phase I konnten spezifischere Untersuchungen stattfinden.

Um dem Serienprozess möglichst nah zu kommen, wurden die Versuche mittels des einstufigen Serienprozesses mit einer 3-Zonen-Schnecke durchgeführt. Dabei wurden nur noch zwei Zerkleinerungsmethoden (4-Wellenzerkleinerer und Guillotine) miteinander verglichen. Diese optimierten Versuchsreihen wurden mit allen Mischmaterialien durchgeführt. Des Weiteren wurde der Einfluss von möglichen Störfaktoren wie Staubentwicklung, Schneidesand/Verunreinigungen nach dem Wasserstrahlschneiden der Nestingreste und weitere Punkte genauer untersucht und ausgewertet.

Neben den umfangreichen mechanischen Prüfungen wie Zugprüfungen, Schlag-Biege-Prüfungen und Durchstoßprüfungen wurden optische Prüfungen wie CT-Messungen, Mikroskopie- und REM-Aufnahmen sowie eine ausführliche Faserlängenanalyse (FibreShape CROSS System) mit einem speziellen Faserlängenanalyse-System über den Recycling-Prozess durchgeführt.

Des Weiteren wurden Haftungsuntersuche mittels eines speziell entwickelten Werkzeugs zur Untersuchung des Haftungsverhaltens zwischen Organoblechen und angespritzten Rippenstrukturen durchgeführt.

Anhand dieser umfangreichen Untersuchungen konnten folgende Aussagen getroffen werden:

- Das Zumischen von Haftvermittler verbessert die Homogenität der Rezyklate und führt zu

- einer Verbesserung der mechanischen Kennwerte
- Bei den Mischmaterialien kann gesagt werden, dass die Primärware (PP LGF 30) durchaus mit vanWees und Weima 100% Mahlgut, 66% Mahlgut und 33% Mahlgut – Rezyklat substituiert werden kann.
- Der Einfluss des Schneidesandes ist deutlich zu erkennen und eine Reinigung der Nesting-Reste ist aus technischer Sicht sinnvoll.
- Die Haftungsuntersuchungen zeigen, dass anhand der Abzugskräfte die Primärware durch Rezyklat ohne Verlust substituiert werden kann.
- Durchführung von Faseranalysen mittels CT wurden durchgeführt und vielversprechende Bilder zur Faserorientierung und -verteilung ausgewertet.
- Die Faserlängenanalyse spiegelt sich mit den mechanischen Kennwerten der Versuchsreihe wieder. Der Faserlängenabbau über den Spritzgussprozess lässt sich deutlich erkennen. Im Bauteil sind die Faserlängen unter Betrachtung der Streuung sowohl aller Mahlgüter als auch Referenzmaterialien nahezu identisch.

Als „nice-to-have“ wurde eine Versuchsreihe zur Zerkleinerung von ganzen Türmodulträgern durchgeführt. Die Ausschussware aus der Produktion wurde mittels einem 4-Wellenzerkleinerer zu Mahlgut verarbeitet. Auch hier lag die Herausforderung in der Mahlgutbeschaffenheit und der Dosierbarkeit. Da die Bauteile größer und die Materialstärke wesentlich stärker über das Bauteil variiert, ist die Mahlgutbeschaffenheit recht inhomogen. Prinzipiell ist es möglich ganze Ausschussbauteile mechanisch zu recyceln, allerdings müssen hier die Prozessschritte maschinentechnisch angepasst werden.

Eine Direktverarbeitung der zerkleinerten Organoblech-Verschnitte mit einer herkömmlich Spritzgussmaschine ist aus technischer Sicht sinnvoll. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Direktverarbeitung in besseren mechanischen Kennwerten resultiert, wie die des Regranulats der Firma Wipag. Hier spielt die Menge der zugegebenen Primärware keine Rolle. Ein Closed-Loop-Recycling der Organoblech-Verschnitte ist unabhängig von der Menge des Massenstroms lohnenswert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Entwicklung des Recyclingprozesses bis dato theoretisch erfüllt ist. Konstanz und Reproduzierbarkeit sind gewährleistet. Es müssen lediglich noch Optimierungsschritte zur Übertragung des Prozesses in Serie durchgeführt werden. Diese ist abhängig von Anwendung und Maschinenbeschaffenheit. Die Ergebnisse sind sehr vielversprechend und das Projekt konnte dementsprechend erfolgreich abgeschlossen werden.

2.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Pos. 850 - Investitionen > 410 €:

1. Computertomograph (CT) – 153.120,00 €

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein Computertomograph (CT) angeschafft. Mittels CT ist es möglich, eine zerstörungsfreie Analyse von Bauteilen durchzuführen. Damit können die entscheidenden Wirkzusammenhänge bei der Zerkleinerung der Organoblech-Verschnitte, der nachfolgenden In-Line Compoundierung und dem Spritzgussprozess hinsichtlich der Faserlängendegradation, dem Aufschließen der Rovingbündel sowie der Faserorientierung untersucht werden. Diese Kennwerte waren im Rahmen des Vorhabens von großer Bedeutung für die Bewertung des Rezyklates, da die Faserlängenverteilung und Faserorientierung, sowie der lokale Faseranteil bzw. die Vermeidung von Faserclustern entscheidende Einflussgrößen auf die mechanischen Eigenschaften von diskontinuierlich verstärkten Kunststoffen darstellen. Damit lassen sich die Einflüsse der einzelnen Prozessschritte auf die Beschaffenheit des Rezyklates in Hinblick auf die Faserlängen und Faserverteilung einfacher und schneller analysieren.

Die Firma Werth Messtechnik ist daher sehr an einer Kooperation mit einer praxis- und anwendungsorientierten Hochschule interessiert, welche sich intensiv mit diesen Schlüsseltechnologien beschäftigt, und war deshalb bereit, der TH Rosenheim ein Labor-System deutlich unterhalb des marktüblichen Kostenrahmens, anzubieten. Durch dieses sehr großzügige Angebot aus der Industrie

sowie der Finanzierung über dieses Forschungsvorhaben bestand die einmalige Möglichkeit, ein CT-Gerät zu außer-wettbewerbsfähigen Sonderkonditionen anzuschaffen.

Mit der Anschaffung des CT-Geräts steht der TH Rosenheim ein System auf dem neuesten Stand der Technik zur Verfügung, mit dem zuverlässige und belastbare Ergebnisse für Lehre und Forschung erzielt werden können. Das Gerät wird zukünftig auch in Praktika und Vorlesungen eingebunden, was für zukünftige Absolventinnen und Absolventen von großem Vorteil ist und die Nachhaltigkeit der Investition garantiert.

2. VGSTUDIO Max – **39.200,00 €**:

In dem Forschungsvorhaben ReProOrgano wurde als Investition ein Computertomograph (CT) von der Firma Werth Messtechnik angeschafft. Mittels der Tomographien sollen die recycelten Materialkombinationen auf Glasfaseranteil, -orientierung und -länge untersucht werden. Zur Nutzung und Auswertung der Tomographie wurde von der Firma Werth Messtechnik die haus eigene Software (WinWerth) bereitgestellt. Allerdings befindet sich diese Software in steter Weiterentwicklung und ist speziell in der Faseranalyse noch sehr eingeschränkt. Die geplanten Faseranalysen sind mit dieser Software leider nicht vollständig umsetzbar. Für das Projekt ReProOrgano ist die zerstörungsfreie Faseranalyse und die Auswertung sehr wichtig. Faserlängen und -orientierungen im Bauteil definieren mitunter die physikalischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffes. Durch die Verarbeitung der Rezyklate können Fasercluster und Faserlängendegradationen entstehen, welche einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Materialien haben und einen hohen Stellenwert für die Bewertung der Rezyklate darstellt.

VolumeGraphics ist Marktführer in der Auswertung von Volumendaten jeglicher Art. Für einen umfänglichen Erkenntnisgewinn und damit einen erfolgreichen Abschluss des Projektes wurde eine Softwarelizenz von VGSTUDIO MAX angeschafft.

3. FiVer (FibreShape CROSS) – **7.735,00 €**:

Es wurden im Vorfeld zahlreiche Faserlängenanalysen mit dem FibreShape CROSS System durchgeführt. Erste generierte Ergebnisse wurden bereits auf der Technomer 2021 vorgetragen, die Publikation des ausführlichen Erkenntnisgewinns wurde im Materials, Volume 15, Issue 11 (1.Juni 2022) veröffentlicht. Die Messungen waren allerdings nur zeitlich beschränkt möglich, da die IST AG die Software für den Zeitraum der gemeinsamen Veröffentlichung bereit gestellt hat. Damit für den Abschluss der Projektes noch umfangreiche Faserlängenanalyse durchgeführt werden konnten, war die Anschaffung dieser Softwarelizenz wichtig. Aufgrund der bisherigen guten Zusammenarbeit und im Interesse weiterer Veröffentlichungen ermöglichte die IST AG der TH Rosenheim einen Sonderrabatt von 46%.

Faserlängen in Faserverbundwerkstoffen werden bislang nach der Norm ISO 22314 über das Mikroskop ausgewertet. Dabei sind 100 ± 10 Fasern mit $n = 3$ zu vermessen. Die Messung nach Norm führt somit zu einem subjektiven Ergebnis aufgrund der Auswahl der zu vermessenden Fasern durch den Bediener. Weiterhin erlaubt die geforderte Anzahl an Fasern keine statistisch sinnvolle Aussage (v.a. bei Spritzgussbauteilen). Bei typischen Fasergewichtsgehalten von 30 %, dem minimal notwendigen zu analysierenden Probengewicht von 2 Gramm (vgl. DIN EN ISO 1172) und typischen Faserlängen im Bauteil (z.B. 2 mm) ergeben sich rechnerisch 900.000 Glasfasern, welche die Mechanik des Werkstoffverbundes beeinflussen. Somit ist ohne ein softwarebasiertes Messsystem, welches innerhalb kurzer Zeit eine große Anzahl an Fasern vermessen kann, keine signifikante Aussage zu treffen.

Durch die FiVer-Software (FibreShape CROSS) können die Faserlängen zuverlässig und effizient ausgewertet werden. Fasern bis zu einer Anzahl von 100.000 St. können innerhalb weniger Minuten vermessen und statistisch ausgewertet werden. Durch die „Cross“ Funktion können sich kreuzende Fasern ebenfalls zuverlässig ausgewertet werden, welche in anderen am Markt verfügbaren (und deutlich teureren) Systemen zu Fehlern, Programmabstürzen und falschen Ergebnissen führen. Dies erleichtert die Probenvorbereitung, erhöht die Anzahl an zu vermessenden Fasern und lässt durch die Glaubwürdigkeit der ermittelten Faserlängen Rückschlüsse auf Zerkleinerungsverfahren, Wirkzusammenhänge mit Prozessparametern zu.

Pos. 812 und 817 - Personalausgaben:

Die geplante 50 % Stelle E13/2, kalkuliert für die wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Sustainable Engineering & Management, ging nach dem ersten Projektjahr in Mutterschutz. Die Finanzierung wurde nachfolgend nur teilweise von einer Masterstudentin abgedeckt, welche die Aufgaben umfänglich mit Hilfe von Studentenarbeiten und unterstützend durch Professor*innen ausgeführt hatte. Des Weiteren wurde für die geplante 100 % Stelle E13/2 für den/die wissenschaftliche/-n Mitarbeiter/-in im Bereich Kunststofftechnik eine Projektmitarbeiterin E10 mit vergleichbaren Wissensstand eingesetzt. Aufgrund der von COVID-19 ausgelösten Krise und dem Notbetrieb während der Pandemie war der Zugang für Studierende an der TH Rosenheim lange eingeschränkt. Folglich konnten die bewilligten Mittel geplanter studentischer Hilfskräfte nicht vollständig ausgeschöpft werden. Folglich sind die bewilligten Mittel bis zum Projektende (inkl. Laufzeitverlängerung) nicht vollständig ausgeschöpft und wurden für die Anschaffung zwei Softwarelizenzen für die Faseranalyse umgewidmet und aufgebraucht.

Pos. 835 Vergabe von Aufträge:

1. Zerkleinerungen – 4.931,50 €

Die Vergabe von Aufträgen wurden zur Zerkleinerung der Nestingreste verwendet. Die Zerkleinerung ist eine entscheidenden Komponente des Organoblech-Recyclings. Die Größe und die Beschaffenheit des Mahlgutes ist entscheidend für die Weiterverarbeitung im Spritzgussprozess. Somit wurden unterschiedliche Shredder, Wellenzerkleinerer, Mühlen und weitere Zerkleinerungsanlage auf dem bestehenden Markt getestet um geeignete Verfahren zu finden. Die Zerkleinerungen wurden daher fremd vergeben.

Pos. 843 Sonstige allg. Verwaltungskosten:

1. Veröffentlichungen – 1.931,47 €

Unter den sonstigen allg. Verwaltungskosten wurden in der Antragsstellung die Veröffentlichungen eingeplant. Während der Projektlaufzeit wurde neben kleineren unentgeltlichen Veröffentlichung eine große peer-review Veröffentlichung durchgeführt.

Hier wurde ein Artikel im MDPI Materials, Volume 15, Issue 11 (1.Juni 2022) veröffentlicht. Die Veröffentlichung hat folgenden Inhalt:

Mit der steigenden Nachfrage nach energieeffizienten Transportmitteln nimmt der Trend zu Leichtbaukomponenten stetig zu. Insbesondere der Einsatz von thermoplastischen Glasfaserverbundwerkstoffen mit Endlosverstärkung (Organoblech) gewinnt bei der Herstellung von funktionalen Automobilbauteilen wie Türmodulen an Bedeutung. Zur Herstellung von Hybridbauteilen wie Türmodulen werden Organobleche im Spritzgussverfahren geschnitten, geformt und funktionalisiert. Beim Schneiden von Organoblechen fallen erhebliche Produktionsabfälle an. Durch die Verwendung von Produktionsabfällen aus dem Wasserstrahlschneiden von Organoblechen im Spritzguss entsteht ein geschlossener, ressourcenschonender Recyclingkreislauf. Es wird eine systematische Studie vorgestellt, in der der Anteil der verwendbaren Rezyklate sowohl aus technischer als auch aus ökonomischer und ökologischer Sicht untersucht wird. Die Ergebnisse dieser Studie legen nahe, dass die werkstoffliche Verwertung und Kreislaufführung (Closed-Loop) dieser postindustriellen Abfälle eine denkbare Lösung für den nachhaltigen Umgang mit dem Organoblechverschnitt darstellt. Dabei werden zwei Zerkleinerungsmethoden näher auf optische, mechanische und wirtschaftliche Eigenschaften untersucht.

2.3 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die geleistete Arbeit entspricht dem im Projektantrag dargestellten Vorhaben.

Die durchgeführten Arbeiten des Projektes waren für die Erfüllung der Ziele notwendig und ausreichend. Das durch die TH Rosenheim durchgeführte Projekt hätte ohne die bereitgestellte Förderung nicht

durchgeführt werden können. Die erzielten Ergebnisse des Vorhabens und die bei der Projektbearbeitung gewonnenen Ergebnisse und Methoden bieten der TH Rosenheim aufgrund ihrer Praxisrelevanz am Markt einen unmittelbaren Mehrwert.

2.4 Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Es war vorgesehen, ein bereits bestehendes Serienbauteil als Referenzbauteil für die Validierung des Recyclingprozesses von einem der Zulieferer zu verwenden. KraussMaffei, Brose und ElringKlinger werden hierzu die Anwendbarkeit des Prozesses auf größeren Maschinen (Upscaling) und Serientauglichkeit künftig versuchen umzusetzen. Die Verwertung der Ergebnisse wird vorrangig den Kooperationspartnern angeboten.

Für die wirtschaftliche Umsetzung der Erkenntnisse werden die Projektpartner die Ergebnisse bis zur Erzielung der Serienreife weiterentwickeln und diese in die bestehenden Produkte als Zusatzpakete integrieren. Dabei werden die Erkenntnisse individuell auf die Prozesse und die Bauteile abgestimmt.

Die Spritzgusstechnologie entspricht dem Stand der Technik, wohingegen das Einbringen der recycelten Organobleche in den Spritzgussprozess über diesen Stand hinausgeht. Dadurch stellen die erlangten Erkenntnisse dieses Projekts einen wichtigen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der TH Rosenheim für zukünftige Forschungsvorhaben dar. Im Fachgebiet Sustainable Engineering stärkt das Projekt die Aktivitäten zum Kompetenzaufbau von Umweltbewertungen von Produkten und Prozessen. An der TH Rosenheim fließen aktuell bereits die Ergebnisse in die Akquise für weitere Industrie- und Forschungsprojekte ein, und dienen als Grundlagen für die Beratung von Firmen und Anwendern. Auch künftig sollen die Ergebnisse über den Projektleiter Prof. Würtele und Prof. Krommes direkt in die Lehre sowie auch – über Industrieseminare - in die Weiterbildung einfließen. Eine Einbindung von Studierenden in Form von Abschluss- oder Projektarbeiten, wurde an der TH Rosenheim auch in diesem Forschungsprojekten für beide Seiten gewinnbringend praktiziert und weiterhin fortgeführt. Dabei geht es hauptsächlich um eine praktische Anwendung der erlernten Theorie und das Vermitteln von wissenschaftlichen Arbeitsweisen. Die hochschulinterne Kooperation zwischen den Fakultäten Ingenieurwissenschaften und den Wirtschaftswissenschaften wird weiter vertieft. Des Weiteren soll die Qualität der Lehre durch Stärkung des Forschungsschwerpunktes sowie durch Gewinnung von weiterem fachlichen Knowhow und Erkenntnissen erweitert werden.

Folgeprojekte im Bereich Recycling von Kunststoffen und Hybridbauteile in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen sind bereits angedacht.

Aktuell läuft ein Bewilligungsverfahren für folgendes geplantes Vorhaben: „Recyclingmaterial in faserverstärkten Hybridverbunden – ReProHybrid“, Antrag im Rahmen des zentralen Innovationsprogramms für den Mittelstand „ZIM“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) mit dem Förderkennzeichen „KK5209705PA3“.

Die Forschungsergebnisse sollen weiterhin auf verschiedenen Wegen der Fachöffentlichkeit vorgestellt werden:

- Präsentation von Forschungsergebnissen auf Fachmessen („K“, „Fakuma“, usw.)
- Vorträge und Beiträge auf Konferenzen, Tagungen und Seminaren (VDI-Tagungen, Technomer, usw.)
- Publikationen in Fachzeitschriften („Kunststoffe“, „K-Zeitung“, „International Journal of Life Cycle Assessment“ usw.)

Es wird weiterhin ein fachlicher Abgleich und Diskussion mit anderen Forschungsgruppen erwartet. Durch das Forschungsvorhaben wurde bereits und soll weiterhin die Öffentlichkeit auf die FuE-Arbeiten an der TH Rosenheim aufmerksam werden.

2.5 Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Hybrid-Spritzgussverfahren von faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen, in Verbindung mit Endlosfaserstrukturen für die Herstellung von Funktionsbauteilen und Leichtbaustrukturen, hat sich in den vergangenen Jahren auf breiter Front durchgesetzt. Hinzu kommen die CO₂ Anforderungen, die speziell in der Automobilindustrie ein großes Thema darstellen. Anhand des Closed-Loop-Recyclings der Organoblech-Verschnitte ist das Einsparungspotenzial aus technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Sicht sehr hoch einzuschätzen.

Anhand einer branchenübergreifenden Recherche wurde bekannt, dass sich während der Projektlaufzeit einige Forschungseinrichtungen und Unternehmen mit ähnlichen Frage- und Themenstellungen beschäftigen. Dadurch wird deutlich, dass die Arbeit des Forschungsvorhabens ein hohes Interesse in Wirtschaft und Wissenschaft hervorrief und die Herstellung von Hybridbauteilen und deren Recycling ein hohes Potenzial dahingehend aufweist.

Die Tätigkeiten bei anderen Stellen stellte allerdings keinerlei Risiko für die Erfolgsaussichten dieses Projektes „ReProOrgano“ dar. Es konnten keine Veröffentlichungen, F&E-Vorhaben oder Patente gefunden werden, welche die Ziele des Projekts vorweg genommen hätten. Dies konnte durch eine vertiefte Literatur- und Patentrecherche bestätigt werden. Für die Erreichung der Zielsetzung des Projekts stand nichts im Weg.

2.6 Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Während der Projektlaufzeit wurden die Forschungsfortschritte, Zwischenergebnisse und Erkenntnisse auf Fachmessen wie der FAKUMA und der K-Messe vorgestellt und diskutiert. Neben fachlichem Abgleich und Diskussionen auf Fachmessen, Fachtagungen und Sitzungen wurden folgende schriftliche Veröffentlichungen durchgeführt:

1. Closed-Loop Recycling von Organoblechen im Hybridverbund - Technische, wirtschaftliche und ökologische Betrachtung
Sabine Hummel, Katharina Obermeier, Katja Zier, Michael Schemme, Sandra Krommes, Peter Karlinger, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland
Postervorstellung auf der 28. Technomer - Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren an der Technischen Universität Chemnitz 2021
2. Hummel, S.; Obermeier, K.; Zier, K.; Krommes, S.; Schemme, M.; Karlinger, P. Analysis of Mechanical Properties Related to Fiber Length of Closed-Loop-Recycled Offcuts of a Thermoplastic Fiber Composites (Organo Sheets). *Materials* 2022, 15, 3872. <https://doi.org/10.3390/ma15113872>
Received: 30 March 2022, Accepted: 25 May 2022, Published: 29 May 2022
3. Fachvortrag auf der 29. Technomer – Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren an der Technischen Universität Chemnitz 2023 (geplante Veröffentlichung, genauer Titel wird erarbeitet)