

Zuwendungsempfänger:

ERLOS GmbH

Unternehmen der Weck + Poller Holding GmbH

Reichenbacher Str. 67

08056 Zwickau

Förderkennzeichen:

033RK034 A

Vorhabenbezeichnung:

KMU-innovativ - Verbundvorhaben ReMets-plus: Entwicklung einer innovativen verfahrenstechnischen Apparatur zur biologischen Rückgewinnung von Metallen und Edelmetallen aus dünnen Beschichtungen, Teilaufgabe: Aufbereitung und Bioleaching von metallbeschichteten Kunststoffteilen

Laufzeit des Vorhabens:

01.03.2016 bis 30.06.2018

## Schlussbericht

Vertraulich

erstellt von:

ERLOS GmbH  
Unternehmen der Weck + Poller Holding GmbH

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser  
Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zwickau, Dezember 2018

## Inhalt

I.	Kurzdarstellung des Vorhabens .....	3
I.1	Aufgabenstellung .....	3
I.2	Voraussetzungen der ERLOS, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	4
I.4	Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation .....	5
I.4.1	Benutzte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte .....	5
I.4.2	Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste .....	6
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	7
II.	Eingehende Darstellung .....	7
II.1	Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse, Gegenüberstellung Ziele/ Ergebnisse .....	7
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	16
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	16
II.4	Nutzbarkeit und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	17
II.5	Fortschritte bei anderen Stellen .....	18
II.6	Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	18

## I. Kurzdarstellung des Vorhabens

### I.1 Aufgabenstellung

Die ERLOS beschäftigt sich seit mehr als zehn Jahren mit der Verwertung von Kunststoffen aus dem Altfahrzeugbereich und den damit in Zusammenhang stehenden Aufbereitungsprozessen. Sie betreibt dazu verschiedene Prozesse, in denen sowohl Produktionsabfälle von Automobilzulieferern, wie beispielsweise Verkleidungen und Ummantelungen als auch Komponenten aus Altfahrzeugen (end-of-life-vehicles, ELV), insbesondere Stoßfänger, aufbereitet und als wertvolle Sekundärrohstoffe in den Wirtschaftskreislauf zurück geführt werden. Die Komponenten aus den ELV werden dabei vordemontiert, zerkleinert, sortiert und anschließend der Wiederverwendung zugeführt.

Einen Spezialfall der im Unternehmen in den Aufbereitungsprozessen verarbeiteten Altkunststoffe stellen die galvanisch beschichteten Kunststoffteile dar. Dabei handelt es sich zumeist um verchromte Zierteile aus dem Außenbereich von Fahrzeugen, die bei der Demontage von Stoßfängern und anderen Fahrzeugteilen anfallen. Diese metallisch beschichteten Kunststoffteile konnten bisher aufgrund ihrer metallischen Beschichtung zumeist nur einer minderwertigen Verwertung oder lediglich einer thermischen Nutzung zugeführt werden.

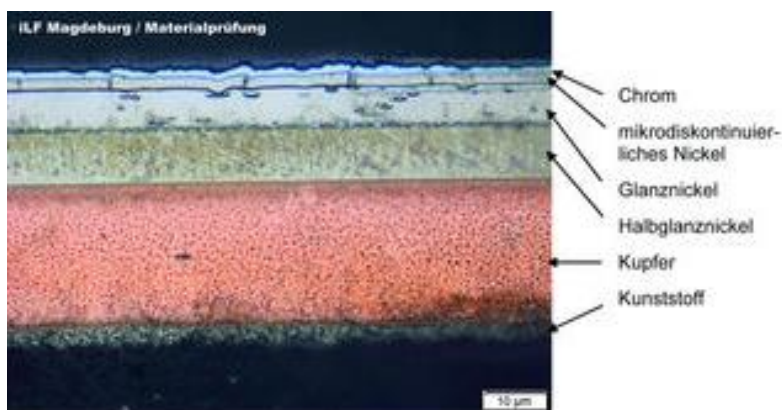


Abb. 1: Beispiel für den Aufbau einer galvanischen Beschichtung im Automobilbereich  
(Quelle: ILF Magdeburg/ Materialprüfung)

Zielstellung des Verbundvorhabens war deshalb, eine effiziente und kostengünstige Verfahrenstechnik zu entwickeln, die es erlaubt, dünne metallische Beschichtungen (insbesondere aufgalvanisierte Schichten aus Chrom, Nickel und Kupfer) von den polymeren Basismaterialien (vorwiegend ABS-Kunststoffe) zu trennen und alle Komponenten selektiv, umweltfreundlich und effizient zurück zu gewinnen.

Die wesentlichen Schwerpunkte des Vorhabens waren aus Sicht der ERLOS:

- die Entwicklung einer speziellen apparativen Lösung für die biotechnologische Laugung von metallisch beschichteten Kunststoffbauteilen aus dem Automobilrecycling
- die passgenaue Zerkleinerung der separierten Chromteile aus dem Altfahrzeugrecycling
- die selektive Abscheidung und Rückgewinnung von Metallen und Metallverbindungen sowie der abgereinigten Kunststoffteile
- der Betrieb einer Demonstrationsapparatur im Technikumsmaßstab

Das Verbundprojekt beinhaltete die Entwicklung einer verfahrenstechnischen Lösung zur gezielten Aufbereitung vorfraktionierter Materialgruppen aus der Kunststoffsortierung, zur Rückgewinnung der Wertmetalle Kupfer, Nickel und Chrom sowie den abgereinigten Polymeren zur weiteren stofflichen Verwertung. Mit der Technologiekette, die wesentlich auf biotechnologischen Prozessen basiert, wurde eine vollkommen neue innovative Recyclinglösung aufgezeigt, welche auf der Produktseite hochwertige Sekundärrohstoffe erzeugt und gleichzeitig die stoffliche Verwertung aller Materialien sichert.

### **I.2 Voraussetzungen der ERLOS, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

- Know-How im Bereich der Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffrecyclaten, insb. aus dem Altabereich und Produktionsabfällen aus dem Fahrzeugzulieferbereich, Aufbereitung von Katalysatoren, Metallrückgewinnung
- Erfahrungen aus der Errichtung, der Inbetriebnahme und dem Betrieb von industriellen Aufbereitungsanlagen zur Rückgewinnung von Kunststoffen sowie Test- und Demonstrationsanlagen im Recyclingbereich
- Kooperation mit wissenschaftlichen Einrichtungen für die Entwicklung neuer Technologien und Verfahren (z. B. BTU Cottbus-Senftenberg, IVV Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackungen, ipf Leibniz-Institut für Polymerforschung)

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Verbundvorhaben wurde gemäß Projektablaufplan durchgeführt, wobei die Gesamtprojektleitung und -koordination durch die ERLOS erfolgte. Im Verlauf der Projektdurchführung wechselte 2017 die Geschäftsführung der ERLOS GmbH von Herrn H. Pempel zu Herrn Dr. M. Schmidt. Damit änderte sich im Mai 2017 auch die Gesamtprojektleitung des Vorhabens. Die Gesamt- und Teilprojektleitung war durch den gleitenden Übergang zu jeder Zeit gegeben.

Eine weitere Änderung administrativer Art ergab sich zum 1.1.2018 mit der Eingliederung der ERLOS in die Weck + Poller Holding GmbH und den damit in Zusammenhang stehenden Veränderungen auf Gesellschafterseite.

Die Teilaufgaben konnten durch die ERLOS vollständig und termingerecht erfüllt werden.

Zur Abstimmung mit den Projektpartnern erfolgten im April und im November 2016 sowie im Oktober 2017 Projektbesprechungen mit allen Partnern. Neben der Durchführung und Demonstration einzelner Versuche dienten die Projekttreffen insbesondere zur Abstimmung der weiteren Vorgehensweise. Daneben erfolgten häufige bilaterale Treffen und Abstimmungen mit einzelnen Partnern, insbesondere mit der BTU Cottbus-Senftenberg.

## **I.4 Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation**

### **I.4.1 Benutzte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Bei der gemeinsamen Entwicklung der biotechnologischen Aufbereitung und den damit in Zusammenhang stehenden vor- und nachgeschalteten Schritten wurde auf Technologien, Geräte, Rezepturen und Aggregate zurückgegriffen, die den Stand der Technik verkörpern. Insbesondere flossen die Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem gemeinsamen BMBF-Projekt zur Elektronikschrottaufbereitung (2004-2008) und dem SAB-Projekt zur Reaktorkonstruktion (2006-2007) in die Arbeiten ein.

Als Einsatzmaterial für die Laugungsversuche kamen jeweils Chargen aus der laufenden Produktion der ERLOS zum Einsatz. Dabei wurden mehrfach Proben in einem Umfang von jeweils ca. 2 kg aus den laufenden Produktionsprozessen entnommen und insbesondere der BTU zur Verfügung gestellt. Für die Demontage und Vorbereitung der Einsatzmaterialien kamen die am Standort Zwickau vorhandenen Werkzeuge und Aggregate zum Einsatz. Die Demontage- und Sortierarbeiten erfolgten durch das Fachpersonal der ERLOS. Für die Vorzerkleinerung wurde u. a. eine Herbold-Mühle herangezogen.

Die für die Konstruktion und Ausführung von Labor- und Technikumsreaktor verwendeten Einzelaggregate (z. B. Pumpen, Behälter, Heizungen etc.) entsprechen dem Stand der Technik und werden für verschiedene Anwendungen in der Biotechnologie sowie in der chemischen Verfahrenstechnik genutzt. Sie unterliegen keinen Nutzungseinschränkungen. Dies gilt in gleicher Weise für die im Rahmen des Projektes verwendete Nährlösungsrezeptur (9-K-Lösung nach Silverman/ Lundgren, 1959). Als Laugungslösung für die Durchführung der Versuche mit den galvanisierten Kunststoffen wurden sowohl Rezepturen aus einer Mischkultur, bestehend aus *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* und *Acidithiobacillus thiooxidans* als auch Einzelkulturen (insb. *Ac. ferrooxidans*) verwendet. Die

Mischkultur wurde von der Universität für Bergbau und Geologie Sofia (Prof. Groudev) bezogen und im Juni 2017 durch eine identisch zusammengesetzte Mischkultur der Universität Lüttich (Prof. Gaydarchev) aufgefrischt. Die Einzelkulturen stammen von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover und wurden vom Projektpartner BTU zur Verfügung gestellt.

Für die Compoundierversuche zur Zumischung von rückgewonnenen ABS-Kunststoffen in den Extrusionsprozess erfolgte die Verwendung von Kunststoffgranulat NOVODUR P2MC des Herstellers INEOS Styrolution.

Alle verwendeten Aggregate, Verfahren oder Technologien, soweit sie nicht im Rahmen des Vorhabens neu entwickelt wurden, unterliegen keinen Nutzungseinschränkungen oder fremden Schutzrechten. Die gemeinsam mit den anderen Projektpartnern entwickelte verfahrenstechnische Lösung zur biotechnologischen Laugung von dünnen Metallschichten stellt in ihrer Gesamtheit und in der ausgeführten Kombination verschiedener Aggregate eine Neuentwicklung dar.

#### **I.4.2 Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste**

Folgende Informations- und Literaturquellen wurden für die Verfahrensentwicklung und Durchführung des Vorhabens durch die ERLOS verwendet:

- Sand, W., Wie Bakterien Metalle zerstören oder Kupfer gewinnen, Universität Duisburg-Essen, Aquatic Biotechnology, Biofilm centre, 19.1.2012
- Rossi, G., The design of bioreactors, Elsevier, Hydrometallurgy 59, 2001, S. 217–231
- Kohler, D., Willkommen im wunderbaren Land der Galvanik, den faszinierenden Oberflächen und dem Gefühl von Wertigkeit und Perfektionismus, den beherrschbaren Gesetzen der Elektrochemie, Fischer Surface Technologies, 02.09.2010
- Pollmann, K., Kutschke, S., Matys, S., Kostudis, S., Hopfe, S., Raff, J., Novel Biotechnological Approaches for the Recovery of Metals from Primary and Secondary Resources Minerals-Open Access Journal of Mining & Mineral Processing, 13.06.2016
- Bio-Hydro-Metallurgical Beneficiation of Non-Ferrous Polymetallic Shredder Residues, An integrated process of bio-metallurgy that converts low grade shredder residues into various highly valuable metals. Developed by Comet Traitements SA and GeMMe Laboratory of the University of Liège with the support of Eco-Innovation, Call Identifier: CIP-EIP Eco-Innovation-2011, BIOLIX Eco/11/304470, Layman Report, 30.11.2014
- INEOS-Styrolution, NOVODUR P2MC, Technical Datasheet, Rev. 2018.10.08

Durch die ERLOS wurden im Rahmen des Projektes keine Informations- und Dokumentationsdienste in Anspruch genommen.

## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

### ***Gesperrte Information***

## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1 Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse, Gegenüberstellung Ziele/ Ergebnisse**

#### Verwendung der Zuwendung

Die Verwendung der öffentlichen Zuwendung erfolgte durch die ERLOS entsprechend den jeweils geltenden Gesetzen, Richtlinien und sonstigen Bestimmungen. Der Einsatz von Personal im Projekt erfolgte gemäß den aktuellen Erfordernissen und entsprechend der fachlichen Qualifikation. Unteraufträge wurden durch die ERLOS im Rahmen des Projektes nicht vergeben.

Für die benutzten Geräte sowie Verbrauchsmaterialien erfolgte im Verlauf des Vorhabens im Bedarfsfall eine Anpassung an den technischen Projektfortschritt und den jeweiligen fachlichen Arbeitsstand. Vorhandene Geräte wurden für die speziellen Aufgaben im Rahmen des Vorhabens umgebaut/ angepasst.

#### Erzielte Ergebnisse

Im Verbundvorhaben ReMETS+ konnten durch die ERLOS bzw. durch Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern folgende wichtige Ergebnisse erreicht werden:

- Neuentwicklung einer technisch vorteilhaften biotechnologischen Verfahrenstechnik zur schonenden und selektiven Trennung von Metall-Kunststoff-Verbunden
- Aufbereitung und stoffliche Verwertung aller Komponenten und Materialien

### Aufbereitung der Inputmaterialien

Die separierten Chromteile waren im Anfallzustand für eine biologische Behandlung im Rahmen der Becherglas- und Laborversuche durchweg nicht geeignet, da sie Kantenlängen von teilweise über 800 mm aufweisen. Daraus ergab sich die zwingende Notwendigkeit einer Zerkleinerung vor dem Laugungsprozess. Zielstellung für die Zerkleinerung war, die Teile aus ihrem Ausgangszustand in eine derartige Korngröße und -form sowie in einen Zustand zu bringen, der einen direkten Einsatz im Laugungsprozess erlaubt, einen geringen Feinkornanteil aufweist und nur eine geringfügige Nachbehandlung der entmetallisierten Kunststoffpartikel vor der Verarbeitung im Extruder erfordert.

Im Zusammenhang mit der Konzipierung des Laugungsaggregates und den -abläufen wurde die erforderliche und sinnvolle Korngröße intensiv diskutiert. Stand der Technik bei Bio-leachingapparaturen ist der Einsatz von Rührreaktoren. Dafür wäre es erforderlich gewesen, das Einsatzmaterial intensiv auf eine Korngröße  $\leq 2$  mm zu zerkleinern und dabei gleichzeitig große Kantenflächen (Angriffsfläche für die Mikroorganismen) zu erreichen. Die Zerkleinerung wäre damit aber sehr aufwändig und dementsprechend teuer. Als nachteilig ist bei Rührreaktoren festzustellen, dass sowohl für die Aufbereitung als auch den eigentlichen Laugungsprozess ein hoher Energieeintrag erforderlich ist und die Rührorgane und Behälterwände starken mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass das Materialhandling des Trägermaterials (ABS-Kunststoff) in der Folge enorm erschwert wird, da das Granulat für eine Weiterverarbeitung aufwändig getrocknet werden muss und in der Folge ein stark staubendes und elektrostatisch aufgeladenes Gemisch darstellt. Das Beschicken eines Extruders ist mit derart feinkörnigem Material sehr schwierig. Die vorsortierten Teile sollten also eine für die Laugung ausreichende, aber nicht zu feine Korngröße aufweisen.

Für die Laugungsversuche erfolgte deshalb zunächst eine Zerkleinerung mittels Einwellenzerkleinerer und integriertem 10-mm-Siebboden. Die so erzeugten Partikel konnten ohne weitere Vorbehandlung direkt einer biologischen Behandlung zugeführt werden. Der bei der Zerkleinerung entstandene Feinkornanteil  $< 1$  mm war vernachlässigbar gering ( $< 0,5\%$ ).

Bewusst verzichtet wurde auf das Waschen des Einsatzmaterials, so dass ggf. anhaftende Schmutzpartikel durchaus in den Laugungsprozess gelangen konnten. Ein negativer Einfluss auf den Laugungsprozess konnte nicht festgestellt werden.





Abb. 2: Vorzerkleinerte Versuchsmaterialien 10 mm und 30 mm

Nicht bestätigt wurde durch die Versuche das in der Literatur<sup>1</sup> beschriebene großflächige Ablösen von aufgalvanisierten Schichten durch den Zerkleinerungsvorgang. Die nach dem Zerkleinerungsprozess vorliegenden Partikel wiesen durchweg weiterhin eine Beschichtung auf. Ein mechanisches Entfernen konnte auch durch manuelles Abkratzen nicht erreicht werden.

#### Aufarbeitung der polymeren Rückstände

Hinsichtlich der verwendeten Trägerpolymere wurde durch die ERLOS recherchiert, dass für verchromte Kunststoffe an Fahrzeugen fast ausschließlich ABS und PC-ABS eingesetzt werden. Dabei können beim ABS bis zu 20% Polycarbonat (PC) als Verstärkungs- und Versteifungsadditiv deklarationsfrei zugegeben werden. Das aufgenommene Infrarot-Spektrum zeigt, dass es sich bei dem erzeugten Recyclat um PC-ABS handelt.

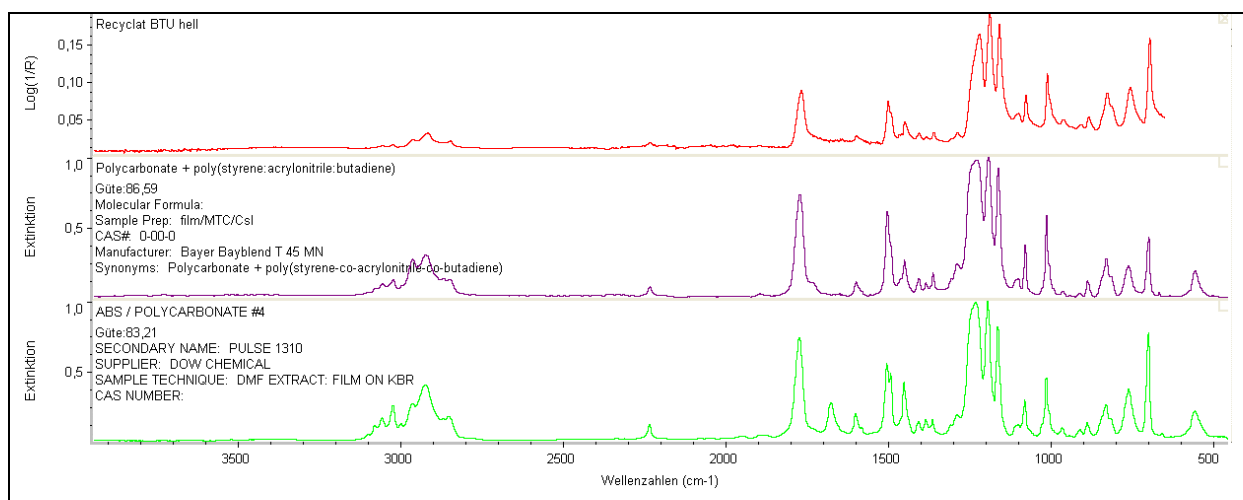


Abb. 3: IR-Spektrum des hergestellten Recyclats

<sup>1</sup> Schmiemann, A. (2000). Recycling metallbeschichteter Kunststoffteile. Ostfalia-University of Applied Sciences, Institute for Recycling. gefunden am 29.7.2016 unter:  
[http://www.ostfalia.de/cms/de/ifr/not\\_in\\_menu/forschung\\_projekte\\_kunststoffentschichtung.html](http://www.ostfalia.de/cms/de/ifr/not_in_menu/forschung_projekte_kunststoffentschichtung.html)

Für die Aufarbeitung der Kunststoffrückstände wurde ein ABS-Spezialitätenpolymer (NOVODUR P2CM des Herstellers INEOS-Styrolution, weiß<sup>2</sup>) mit den Recyclaten aus dem Bioleaching in verschiedenen Zumischraten extrudiert. Nach Recherchen der ERLOS und der BTU wird dieses Material des Herstellers INEOS häufig als Trägermaterial für verchromte Zerteile eingesetzt. Im Gemisch mit dem PC-ABS bzw. reinem ABS aus dem Recyclat sind bei entsprechenden Zumischraten PC-Anteile von < 20% gesichert.

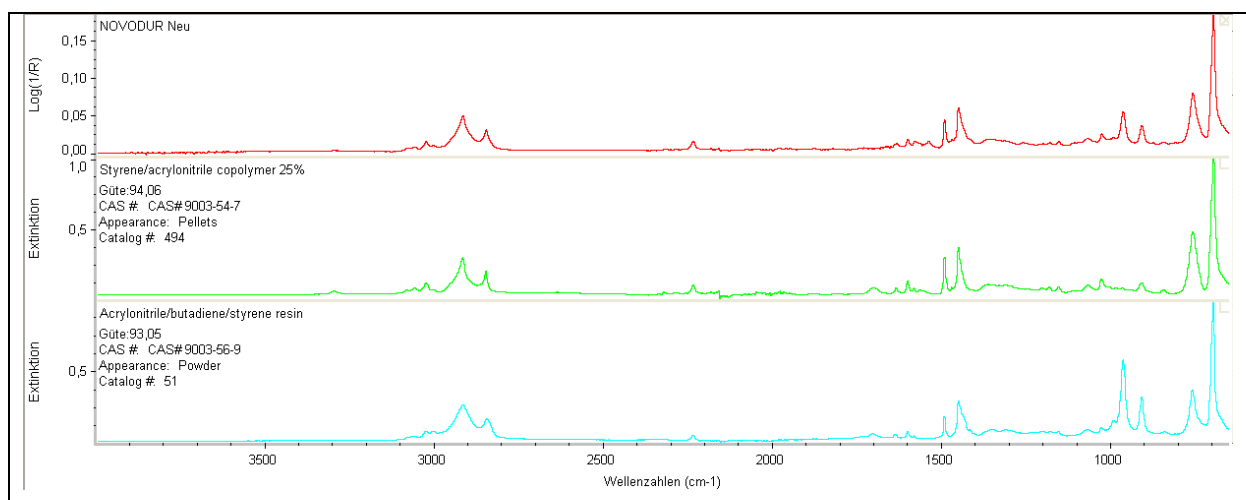


Abb. 4: IR-Spektrum von NOVODUR P2CM

Die Oberflächen der thermoplastischen Recyclate aus dem Bioleaching zeigten im mikroskopischen Bild deutliche Beanspruchungen/ Degradierungen, die vornehmlich auf die Behandlung bei der metallischen Beschichtung (Sputtern und Säurebehandlung im Zusammenhang mit der Galvanisierung) zurückzuführen sind. Nicht beschichtete Bereiche weisen eine derartige Oberflächenbeanspruchung nicht auf. Es kann deshalb ausgeschlossen werden, dass die Kunststoffoberflächen bei Bioleaching durch die Mikroorganismen angegriffen werden.

Das Recyclat wurde mittels Schneidmühle auf die gleiche Größe wie das Novodur nachzerkleinert (4 mm Kantenlänge) und unmittelbar vor der Verarbeitung getrocknet (1 h bei 70°C). Anschließend erfolgte die Herstellung der Versuchschargen mit 10 bzw. 20% Recyclatzumischung. Die Verarbeitung erfolgte mittels Doppelschnecken-Laborextruder Brabender KETSE 20/40 bei 50 min<sup>-1</sup> mit folgenden Zonentemperaturen:

<sup>2</sup> INEOS-Styrolution, NOVODUR P2MC, Technical Datasheet, aufgerufen am 07.11.2017 unter [www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/Novodur+P2MC/Styrolution+Group+GmbH/654/f6fa0](http://www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/Novodur+P2MC/Styrolution+Group+GmbH/654/f6fa0)

Zone	1	2	3	4	5	6 (Düse)
Temperatur [°C]	220	225	225	230	230	230

Der an der Düse möglichst gleichmäßig abgezogene Strang wurde im Wasserbad gekühlt und für die Versuche mit dem 3-D-Drucker aufgewickelt.

Die hergestellten Filamente wiesen eine relativ schlechte Maßhaltigkeit auf. Die Durchmesser schwanken zwischen 1,0 und 2,0 mm. Diese geringe Maßhaltigkeit ist der manuellen Abnahme des Filaments geschuldet. Durch eine geeignete Apparatur (z. B. automatisierte Spule) ließe sich die geringe Maßhaltigkeit korrigieren.

Die Recyclat-Filamente wiesen im Vergleich mit dem weißen Novodur-Extrudat eine leichte dunkle Verfärbung auf, die bei dem Filament mit 20% Recyclatanteil deutlicher ausgeprägt ist und auf die Graufärbung einiger Recyclatteile zurück zu führen ist. Die Oberflächen beider Filamente zeigen bei der visuellen Bemusterung auch unter dem Mikroskop keine auffälligen Merkmale. Alle Oberflächen sind selbst bei 200-facher Vergrößerung sehr eben und ohne Einfurchungen oder Kerben.

Festzustellen waren in beiden Recyclatfilamenten mikroskopisch kleine punktförmige metallische Einschlüsse, die offensichtlich den Schmelzefilter ungehindert passieren konnten. Aufgrund der deutlich höheren Schmelztemperaturen der metallischen Bestandteile (Kupfer, Nickel, Chrom) bleiben diese Einschlüsse durch den Extrusionsvorgang unberührt und es sind keine Schlieren o. ä. festzustellen. Die Einschlüsse resultieren aus metallischen Partikeln, die bei Galvanisierungsvorgang in die bei der Vorbehandlung gezielt gebildeten Kavernen hinein diffundieren und beim Bioleaching zwar möglicherweise vom Kunststoff abgelöst aber aus der Kaverne nicht entfernt werden.

Eine Zählung der Einschlüsse ergab, dass mit Verdopplung des Recyclatanteils auch eine annähernde Verdopplung der Anzahl der Einschlüsse erfolgt.

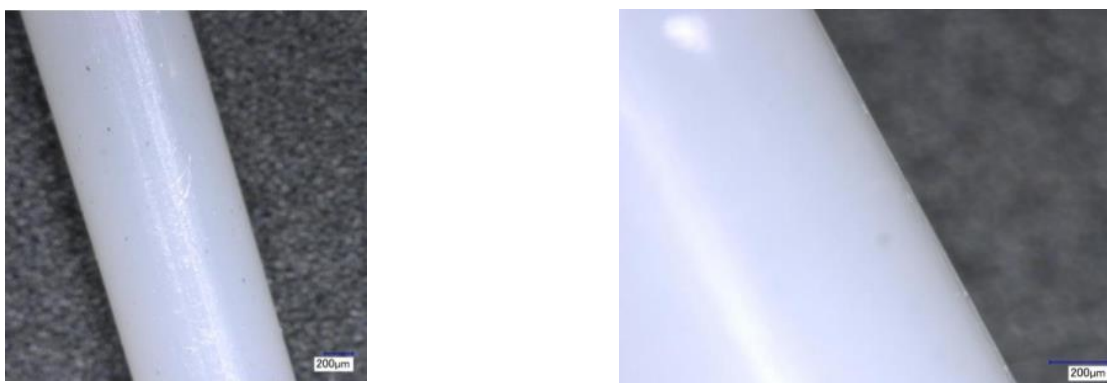


Abb. 5: Mikroskopaufnahmen des Filaments mit 10% Rezyklatanteil (links: 100-fache Vergrößerung, rechts: 200-fache Vergrößerung)

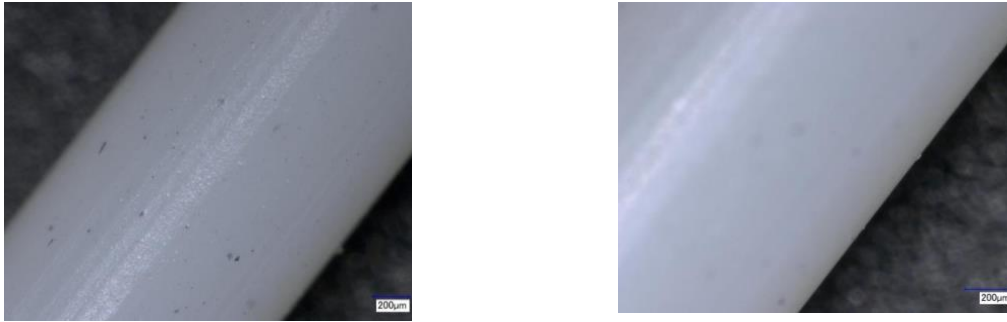


Abb. 6: Mikroskopaufnahmen des Filament mit 20 % Rezyklatanteil (links: 150-fache Vergrößerung, rechts: 200-fache Vergrößerung)

In beiden Filamenten wurden vereinzelt eingeschlossene, axial ausgerichtete, annähernd kreisförmige Hohlräume gefunden. Diese haben einen Durchmesser von 400 bis 1000  $\mu\text{m}$  und sind wahrscheinlich auf eine ungenügende Trocknung des Kunststoffgranulates vor der Extrusion oder eine unzureichende Durchmischung/ Verweilzeit im Extruder zurückzuführen. Durch apparative Maßnahmen (z. B. Einbau von rückfördernden Schneckenelementen oder weiteren Knetelementen sowie längere Trocknung und bessere Durchmischung vor der Extrusion) kann dieses Problem beseitigt werden.

Als Ausgangsmaterial für die Schmelzschtichtung im 3-D-Druck dienen thermoplastische Filamente (Strang aus der Extrusion). Der 3D-Drucker besteht im Wesentlichen aus dem beheizten Druckkopf, welcher sich in X-Y Richtung bewegt, das Filament durch eine Düse extrudiert und in einzelnen Schichten aufträgt sowie aus dem beheizbaren Druckbett, welches nach Vollendung einer Schicht seine Höhe (Z-Achse) verändern kann. Das durch die Düse extrudierte Material wird auf das Druckbett aufgetragen, verfestigt sich und anschließend wird die nächste Schicht aufgetragen. Da thermoplastische Kunststoffe in der Regel beim Abkühlprozess schrumpfen und es bei der ersten auf dem Druckbett aufgetragenen Schicht zur Verschlechterung der Haftung mit dem Druckbett kommen kann (Warping-Effekt), wird das Druckbett beheizt.

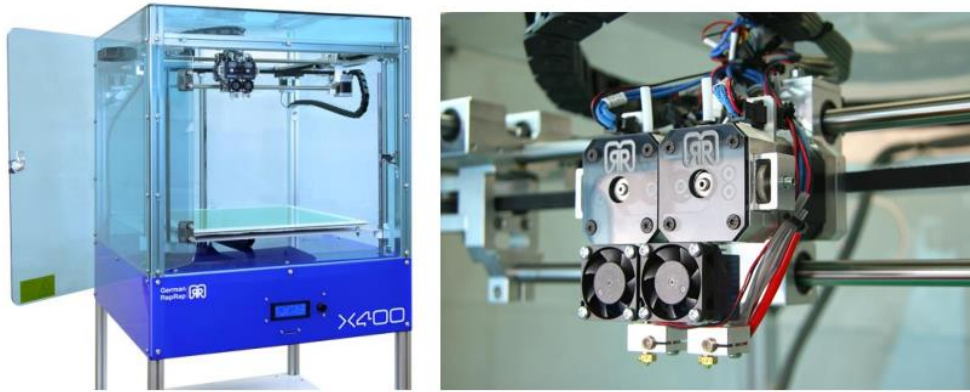


Abb. 7: 3D-Drucker X400 v3, German RepRap

Der 3-D-Druck erfolgte mit einem X400 v3 3D-Drucker (Hersteller: German Reprap) im IAP Fraunhofer Anwendungstechnikum in Schwarzheide. Als Druckobjekt wurden Normprüfstäbe vom Typ 1BA in Anlehnung an die DIN EN ISO 527-2:2012-06 („Kunststoffe – Bestimmung von Zugeigenschaften, Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen“) hergestellt.

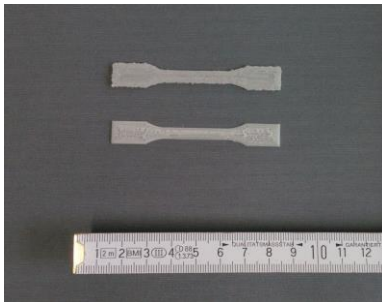


Abb. 8: Prüfstäbe Typ 1BA entspr. ISO 527-2:2012-06

Unter Berücksichtigung der geringen Vorkenntnisse bei der Verarbeitung der Recyclate und Gemische (für 3-D-Druck mit Recyclaten gibt es bisher fast keine Erfahrungen oder Nachweise) weisen die hergestellten Prüfkörper eine relativ gute Qualität auf. Die Abweichungen lagen bereits bei diesen ersten hergestellten Prüfkörpern innerhalb der zulässigen Toleranzbereiche.

#### Upscaling Anlagentechnik, Darstellung des Gesamtverfahrens

Für die ersten Versuche zur biologischen Laugung von verchromten Kunststoffteilen wurden die Einsatzmaterialien mittels Einwellenzerkleinerer auf eine Kantenlänge  $\leq 10$  mm zerkleinert. Für die Versuche in den Reaktoren wurde die Kantenlänge auf bis zu 30 mm vergrößert, ohne dass sich daraus wesentliche Einschränkungen in der biologischen Prozessdurchführung ergaben.

Mit den durchgeführten Versuchen zu Extrusion und 3D-Druck konnte die grundsätzliche Eignung von Recyclingfilamenten mit bis zu 20% Zumischung zur Verarbeitung mittels Schmelzschießungsverfahren nachgewiesen werden. Es wurden dabei in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 527-2:2012-06 maßhaltige Drucke hergestellt.

Für die weitere Verbesserung des Druckprozesses ist neben der besseren Trocknung des Materials vor der Extrusion insbesondere die Maßhaltigkeit der Filamente im Extrusionsprozess zu verbessern. Zum Aushalten der feinen metallischen Verunreinigungen sollte eine Abscheidung mittels Metall-Separator mit Quick-Flap-System erfolgen, wie sie bereits in ähnlichem Fall zur Nachsortierung zerkleinerter Granulate bei der ERLOS erfolgte (siehe Abbildung).



Abb. 9: Metalldetektor vor der Absackeinrichtung

### Bilanzierung

Jährlich fallen bei der ERLOS etwa XXXXXX kg der zur biologischen Behandlung infrage kommenden verchromten Kunststoffteile bei den Demontagearbeiten an. Derzeit werden diese Teile ohne weitere Behandlung an einen Kunststoffverwerter abgegeben (jährliche Erlöse XXXXX €).

Bei einer Anlagengröße von 300 Liter (3 Laugungsreaktoren á 100 Liter) könnten bis zu 5 kg in einer Charge verarbeitet werden. Aufgrund der Spezifik der Anlagentechnik und der relativen Neuheit wird von einer jährlichen Betriebszeit von max. 6.000 h/a ausgegangen. Eine weitergehende Veredlung der erzeugten Produkte würde nicht erfolgen, lediglich eine Separation und Trocknung der Metallpulver (metallisches Kupfer und Ni-Cr-Flitter).

Folgende Anlagenkosten wurden für die Reaktorkonfiguration entsprechend Projektentwicklung recherchiert.

Tab. 2: Voraussichtliche Investitions- und Anlagenkosten für eine Anlage zur biologischen Laugung von verchromten Kunststoffteilen und Granulatherstellung

Position	Vorauss. Umfang
Investition Bau, Infrastruktur und Nebenanlagen (ohne Hallen-Neubau)	Vertraulich
Investition MTA und EMSR für biolog. Laugung	Vertraulich
Montage Bioreaktor und Nebenaggregate	Vertraulich
Gesamtumfang Invest	Vertraulich
Jährliche Kosten für Instandhaltung, Wartung und Reinigung	Vertraulich
Jährliche Betriebskosten (geschätzt)	Vertraulich
Spezifische Anlagenkosten bei 15 Jahre Betrieb	115 T€/a

Diesen jährlichen Kosten von etwa 115 T€ stehen voraussichtlich folgende Erlöse gegenüber:

Tab. 3: Voraussichtliche Erlöse der bei der biologischen Behandlung erzeugten Produkte

Aufkommen/ Verarbeitungsmenge	Vertraulich
Erlöse Kupfer fest, zementiert (7,5 Ma.-%)	Vertraulich
Erlöse Ni-Cr-Flitter (2,5 Ma.-%)	Vertraulich
Erlöse Kunststoff abgereinigt (90 Ma.-%)	Vertraulich
Vorauss. Erlöse gesamt	12.750 €/a

Der Vergleich mit der IST-Situation zeigt, dass von einer Vervielfachung der Erlöse durch die Trennung und Verbesserung der Produktqualitäten ausgegangen werden kann. Dem gegenüber steht jedoch ein signifikant hoher Aufwand für Errichtung und Betrieb der Anlage zur biologischen Laugung, der die erzielbaren Erlöse derzeit noch deutlich übersteigt.

Ein wirtschaftlicher Betrieb einer biologisch basierten Aufbereitungsanlage ist demzufolge für verchromte Kunststoffteile unter den derzeitigen Umständen noch nicht möglich. Zudem sind die Risiken seit Beginn des Jahres 2018 aufgrund der chinesischen Importbeschränkungen für Kunststoffabfälle und dem damit einher gehenden Preisverfall für Kunststoffrecyclate erheblich.

## II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tab. 4: Zahlenmäßiger Nachweis ERLOS

Position	Gesamtvorkalkulation (€)	Gesamtnachkalkulation (€) <sup>*)</sup>
0813 <b>Material</b>	0,00	<b>0,00</b>
0823 FE-Fremdleistungen	0,00	0,00
0837 <b>Personalkosten</b>	166.654,00	<b>125.300,63</b>
0838 <b>Reisekosten</b>	9.700,00	<b>3.019,69</b>
0847 Abschreibungen auf vorhaben-spezifische Anlagen	3.500,00	0,00
0848 Abschreibungen auf sonstige ge-nutzte Anlagen des FE-Bereichs	0,00	0,00
0850 <b>sonstige unmittelbare Vorhaben-kosten</b>	10.500,00	<b>0,00</b>
<b>0855 Summe unmittelbare Vorhaben-kosten (Pos. 0813 – 0850)</b>	<b>190.354,00</b>	<b>128.320,32</b>
0856 Kosten innerbetrieblicher Leistungen	0,00	0,00
0860 Verwaltungskosten	0,00	0,00
<b>0881 gesamte Selbstkosten des Vorhabens (Summe Pos. 0855 – 0860)</b>	<b>190.354,00</b>	<b>128.320,32</b>

## II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Während der Versuche wurden verschiedene Chargen von galvanisierten Kunststoffteilen getestet und verarbeitet. Durch die ERLOS wurden damit die Voraussetzungen für die nachfolgende biologische Behandlung und damit für die Arbeiten der anderen Projektpartner (insb. BTU) geschaffen. In der Folge der Behandlungskette wurden die aus der biologischen Behandlung ausgeschleusten Kunststoffe hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit in Kunststoffverarbeitungs-maschinen (Extruder und 3-D-Druck) erfolgreich untersucht.

Alle durchgeführten Arbeiten und Untersuchungen waren für den Projekterfolg essentiell notwendig. Ohne die Einzelarbeiten, die Demontage- und Zerkleinerungsarbeiten sowie die Untersuchungen zur Mischung und Verarbeitung der polymeren Rezyklate wäre es nicht möglich gewesen, die Technologie in der vorliegenden Form zu entwickeln. Erst durch die vollständige Durchführung aller Einzelprozesse im Zusammenhang konnte eine zusammenhängende Technologiekette nachgewiesen werden.



Ohne die erteilte Bundesmittelförderung wäre es den beteiligten mittelständischen Projektunternehmen und der Universität nicht gelungen, in dem genutzten Zeitrahmen entsprechende Finanzmittel eigenständig zu generieren und für die Forschungsarbeiten zu investieren. Durch die Konzipierung und Entwicklung der Labor- und Technikumsanlagen mussten erhebliche Finanzmittel für die Vorversuche, Anlagentechnik, Personal- und Laborkosten sowie Verbrauchsmittel im Projekt aufgebracht werden. Die hohe Komplexität des Vorhabens bedingt daher eine signifikante Bindung von finanziellen und wissenschaftlichen Ressourcen, die für die industriellen Projektpartner eine Weiterführung des Tagesgeschäfts erheblich erschwert hätten. Trotz viel versprechender positiver Marktpotenziale, verbleibt ein nicht unerhebliches Risiko für die vorwettbewerbliche Forschung und Weiterentwicklung. Eine Finanzierung des Vorhabens aus Eigenmitteln hätte für die Erlös daher aufgrund seiner Größe ein nicht tragbares Risiko dargestellt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle geleisteten Arbeiten für die Abarbeitung der Projektinhalte und damit den Nachweis der Funktionalität erforderlich waren. Es wurden keine Arbeiten durchgeführt, die nicht im Sinne des Projekterfolges notwendig waren.

#### **II.4 Nutzbarkeit und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Im Rahmen des durchgeführten Projektes konnte die Machbarkeit der Demontage, Zerkleinerung, Biologischen Aufbereitung und Nachbehandlung sowie die Verwertung der hergestellten Kunststoffrezyklate mit der entwickelten technologischen Verfahrenskette erfolgreich nachgewiesen werden. Die erarbeitete Technologie stellt eine ökologisch sinnvolle Alternative zu der bisher praktizierten Verwertung dar.

Während der Projektlaufzeit sind keine Erkenntnisse aus dem Netzwerk der Projektteilnehmer erkennbar geworden, die die Aussagekraft der Untersuchungen und ihrer Nutzbarkeit in der anschließenden Verwertungsphase oder industriellen Umsetzung grundsätzlich in einem anderen Licht darstellen würden.

Die industrielle Umsetzbarkeit der biologischen Laugung für galvanisierte Kunststoffe ist zwar momentan aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit vorerst nicht möglich, wird durch die Geschäftsführung der Erlös jedoch weiter intensiv beobachtet und regelmäßig überprüft. Die Erkenntnisse aus der geplanten Umsetzung in Form einer kleineren Produktionsanlage beim Projektpartner m&k werden diesbezüglich verfolgt und in eine Entscheidung zur weiteren Realisierung einfließen.

## II.5 Fortschritte bei anderen Stellen

Für die wesentlichen innovativen Bestandteile der im Rahmen des Verbundvorhabens ReMets+ entwickelten Recycling-Verfahrenskette konnten keine konkurrierenden Entwicklungen recherchiert werden, die über das im Verbundprojekt erreichte Niveau hinaus gehen.

Von anderen F/E-Projekten zum Bioleaching im Zusammenhang mit dem Second-Use werthaltiger Materialien/ Recyclate, sind der ERLOS bisher keine realisierten Industrieanlagen bekannt. Die Realisierung von ähnlichen Vorhaben ist generell nur im Altlastenbereich (Abbau von armen Erzen in Tailings im Kupferbergbau oder Sanierung von Halden im Nickelbergbau) bekannt. Dazu wurden jedoch keine speziellen Reaktoren entwickelt, sondern die Laugung erfolgt zumeist in-situ durch Sprinkleranlagen.

Neben der ERLOS und den Industriepartnern des ReMets+ - Projektes sind derzeit als Verwerter für Wertstoffe aus der getrennten Sammlung von Abfällen in Europa nur die von der Universität Lüttich (Belgien) betriebenen F/E-Vorhaben zur biotechnologischen Aufbereitung von separierten Nichteisenmetall-Fraktionen aus dem Shredderleichtgut bekannt. Diese Projekte favorisieren jedoch eine andere technische Lösung (intensive Zerkleinerung und anschließende biologische Laugung im Rührreaktor). Eine Verarbeitung von getrennt gesammelten Komponenten aus dem ELV-Recycling ist dabei nicht vorgesehen.

## II.6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

An den beiden folgenden Veröffentlichungen zum Vorhaben war die ERLOS beteiligt:

- Markowski, J., Ay, P., Pempel, H., Logsch, F., Recycling of metal-coated plastic parts from end-of-life-vehicles (ELV) with biotechnological methods, XXVIII International Mineral Processing Congress (IMPC 2016), Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Paper 191, 11.-15.9.2016, Québec (Kanada)
- Markowski, J., Pempel, H., Ay, P., Recovery of nickel-containing coatings with hydro-biotechnological methods, COM 2017, The 56th Annual Conference of Metallurgists, hosting World Gold and Nickel-Cobalt, 27.-30.8. 2017, Vancouver (Kanada)

Insgesamt hat das Projekt überdurchschnittliches Interesse sowohl im Inland als auch im Ausland geweckt. In vielen Gesprächen bei Konferenzen oder anderen Veranstaltungen wurden die Ergebnisse interessiert aufgenommen, da sich Arbeiten im Bioleaching weltweit nach wie vor weitgehend auf die Arbeit mit erzbasierten Materialien beschränken. Das Bioleaching mit Abfallstoffen wurde mit Respekt zur Kenntnis genommen. Die Gesprächspartner der Erlös stammten zu etwa 25% aus der Wissenschaft, ca. 45% aus der Recyclingindustrie, ca. 25% aus Ingenieurbüros sowie ca. 15% aus Behörden, wobei das Interesse gleichermaßen in- und ausländisch geprägt war.