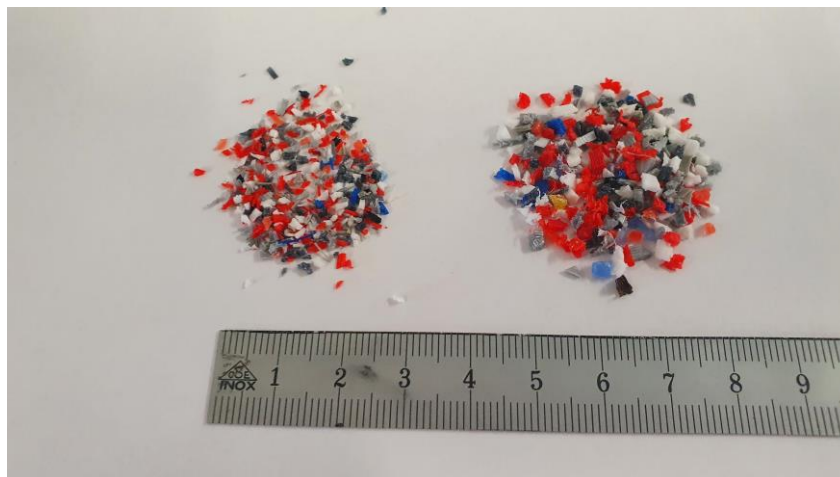


## Versuche zur Herstellung von Filamenten aus PLA-Abfällen die beim 3D-Druck anfallen

### Inhalt

1. Macht Kunststoff Recycling Sinn? .....	2
2. Herstellung von eigenem Filament aus PLA-Abfällen.....	3
2.1. Eingesetzte PLA-Materialien.....	3
2.2. Verwendete Geräte.....	3
3. Ergebnisse der Versuche.....	5
3.1. PLA-Neumaterial .....	5
3.2. Mischungen aus PLA-Abfällen und Neumaterial.....	5
3.3. 100 % Abfall PLA.....	7
3.4. Weitere Ergebnisse .....	8
3.4.1. Partikelgrösse .....	8
3.4.2. Brückenbildung im Einfülltrichter/“Ratholing“.....	9
3.4.3. Energieverbrauch der Extrusion.....	9
4. Schlussfolgerungen .....	9



## 1. Macht Kunststoff Recycling Sinn?

In dieser allgemeinen Form, lässt sich diese Frage nicht beantworten, zu gross ist die Vielfalt der industriell genutzten Kunststoffe. Dementsprechend gross ist der Aufwand für die Trennung und Sortierung der Materialien in sortenreine Fraktionen. So zeigen verschiedene Studien<sup>1,2,3</sup> dass die Separatsammlung von gemischten Kunststoffen aus Haushaltungen im Vergleich zur Entsorgung, je nach gewählten Rahmenbedingungen (Hol- resp. Bringsammlung, Verwertungstechnologie für die aufbereiteten Kunststoffe, Alternativen zur Separatsammlung wie; Deponierung, thermische Verwertung mit Wärmenutzung/Stromproduktion, Strommix etc.) zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen führt.

Generell lässt sich aber festhalten, dass je sauberer und sortenreiner die Sammlung erfolgt umso vorteilhafter ist das Recycling von Kunststoffen, selbst gegenüber einer Verbrennung mit Wärmenutzung. Als typisches Beispiel sei die PET-Sammlung von Getränkeflaschen genannt, die in der Schweiz eine Recyclingquote von ca. 80% [2019] erreichte. Wird aus 100%-Recycling-PET wieder eine Getränkeflasche produziert, so ist diese zwar 20% schwerer als eine Flasche aus 100% neuem Material, ihr ökologischer Fussabdruck beträgt aber nur gerade ein Viertel des Fussabdrucks einer Flasche aus Neumaterial<sup>2</sup>.

Im Rahmen eines mehrjährigen Projektes des Fraunhofer – Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit konnte gezeigt werden, dass PLA-Produktionsabfälle ohne wesentlich Einbussen der mechanischen Eigenschaften recycelt werden können<sup>4</sup>. Eine Studie<sup>5</sup> die an der Hellenic Mediterranean University durchgeführt wurde ergab sogar, dass die mechanischen Eigenschaften von ABS durch wiederholtes Extrudieren sogar zunahm. Es ergab sich eine Zunahme der untersuchten mechanischen Eigenschaften (Zug-, Druck-, Biege-, Schlagfestigkeit sowie Mikrohärtigkeit) durchgeführt um 30 % zwischen dem dritten und fünften Recyclingschritt. Anschliessen nahmen die Eigenschaften sehr schnell ab. Eine ebenfalls kürzlich publizierte Studie<sup>6</sup> untersucht und bewertet verschiedene Recyclingverfahren von post-industriellen und post-consumer PLA-Abfällen und vergleicht diese mit der thermischen Verwertung in einer KVA. Die Ergebnisse der Lebenszyklusaussagen zeigen dass alle Recyclingverfahren gegenüber der thermischen Verwertung Umweltvorteile aufweisen. Der Ersatz von PLA-Neuware durch Recyclate führt zu einer Verringerung von Treibhausgasemissionen sowie zu Einsparungen beim Primärenergiebedarf. Neben diesen Vorteilen, weisen die Recyclingverfahren weitere Vorteile auf, da die Produktion

<sup>1</sup> Separatsammlung von Kunststoffabfällen in der Zentralschweiz, Holinger AG und treeze ltd, 2015

<sup>2</sup> Kunststoff Recycling und Verwertung, Ökonomisch-ökologische Analyse von Sammel- und Verwertungssystemen von Kunststoffen aus Haushalten in der Schweiz, Carbotec AG und UMTEC, 2017

<sup>3</sup> PLA-Abfälle im Abfallstrom, Fraunhofer UMSICHT, 2017

<sup>4</sup> Recycling von Polymilchsäure und Verwendung der recycelten Polymilchsäure für Verpackungsanwendungen, IGF-Vorhaben-Nr. 44 EN, Fraunhofer-IBF, 2011-2013

<sup>5</sup> Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Acrylonitrile- Butadiene- Styrene over Multiple Recycling Processes., N. Vidakis et al., Sustainability April 2020

<sup>6</sup> Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid, Daniel Maga et al., 2019

von PLA auf biogenen Rohstoffen wie Mais, Zuckerrohr, Zuckerrüben etc. basiert. Der landwirtschaftliche Anbau dieser Produkte bewirkt eine Überdüngung sowohl von Gewässern wie auch des landwirtschaftlich genutzten Bodens. Zusätzlich findet eine Versauerung der Böden statt. Abgesehen davon ist es angesichts der weltweiten Ernährungssituation fragwürdig, landwirtschaftliche Nutzfläche zur Produktion von Rohstoffen für die Kunststoffherstellung zu verwenden. Angesichts dieser Ergebnisse, macht das Recycling von sortenreinen PLA-Abfällen (Fehldrucke, Stützstrukturen etc.) die beim 3D Druck entstehen durchaus Sinn.

## **2. Herstellung von eigenem Filament aus PLA-Abfällen**

### **2.1. Eingesetzte PLA-Materialien**

Als Ausgangsmaterial wurden einerseits neue PLA-Pellets von 3Devo (Natureworks 4043D) und von fabru (fabru.eu, kein MSDS veröffentlicht) verwendet. Zudem wurden diverse alte 2.85mm Filamente eingesetzt, die schon mehrere Jahre offen in einem Raum gelagert waren und deren Hersteller sich nicht mehr eruieren liess. Weiter wurden PLA-Abfälle (Fehldrucke und Stützstrukturen von verschiedenen Quellen gesammelt, wobei auch hier die Qualität resp. der Hersteller des PLA's nicht eruiert werden konnten.

### **2.2. Verwendete Geräte**

Mit einem Shredder (SHR3D IT von 3Devo) wurden die Abfälle soweit zerkleinert, dass sie durch ein Sieb mit einer Kantenlänge von 4 mm durchfielen. Das geschredderte Material wurde jeweils während mindestens 18 h bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Der Gewichtsverlust beim Trocknen betrug jeweils nur wenige Prozente.

Als Filament Extruder kam ein kompakter Einwellen-Extruder von 3Devo (Precision 350) zum Einsatz der mit vier einzeln regelbaren Heizzonen ausgerüstet war. Ursprünglich war der Extruder mit einer 4 mm Düse versehen. Im Verlaufe der Versuche wurde diese gegen eine 2 mm Düse ausgetauscht, da ausschliesslich 1.75 mm Filament hergestellt wurde. Der Extruder war zudem mit einer optischen Dickenmessenrichtung ausgestattet, welche die Drehzahl eines Rollenpaares steuerte zwischen denen das produzierte Filament hindurchgezogen wurde. Wenn der Durchmesser grösser als die eingestellte Grösse war, erhöhte die Steuerung die Drehzahl des Rollenpaares. Durch den dadurch entstehenden Zug auf das noch weiche Filament, verringerte sich der Durchmesser. Im gegenteiligen Fall wurde die Drehzahl des Rollenpaares reduziert, wodurch sich der Durchmesser des Filaments durch den verminderten Zug des Rollenpaares vergrösserte. Anschliessend wurde das produzierte Filament auf eine Spule aufgerollt.

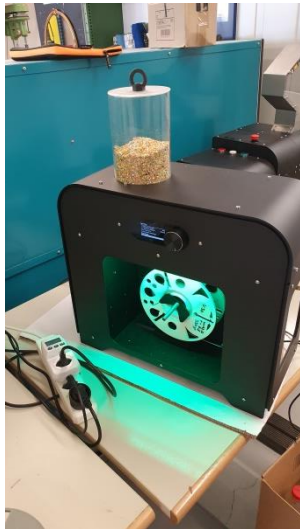


Abb. 1: Extruder



Abb. 2: Extruderdisplay



Abb. 3: Austrittsdüse (oben), Kühlventilatoren (Mitte), optische Dickenmessung oberhalb des Rollenpaares (unten)

Der Extruder war mit einem Datenlogging System ausgerüstet welches in Echtzeit die folgenden Parameter mass:

- Temperaturen der einzelnen Heizzonen sowie die Leistungen der entsprechenden Heizungen
- Filamentdurchmesser
- Drehzahl der Extruderschnecke
- Aufgenommene Leistung des Extrudermotors
- Drehzahl des Rollenpaares

Zusätzlich konnte die Drehzahl der beiden Ventilatoren welche das Filament unmittelbar nach dem Austritt aus der Düse kühlten, variiert werden. Für eine optimale Konstanz des Durchmessers des produzierten Filaments war eine gute Abstimmung der Temperaturen der vier Heizzonen, der Drehzahl der Extruderschnecke sowie der Drehzahl der Kühlventilatoren notwendig. Der Hersteller des

Extruders lieferte dazu gute Standard-Datensets für „neue“ PLA-Pellets die jedoch für das verwendete Recyclingmaterial angepasst werden mussten. Vor den eigentlichen Versuchen musste der Extruder mit einem speziellen Kunststoff (DevoClean Midtemp) welches faseriges Material enthielt, gereinigt werden um allfällige Verunreinigungen im Extruder zu entfernen. Anschliessend wurde der Extruder mit HDPE „gespült“.

### 3. Ergebnisse der Versuche

#### 3.1. PLA-Neumaterial

So vorbereitet wurden die ersten Versuche mit PLA-Neumaterial gefahren. Ziel war in allen Versuchen ein Filament mit einem Durchmesser von 1.75 mm herzustellen. Es zeigte sich, dass mit den PLA-Werks-Einstellungen des Extruders ein Filament mit einem Durchmesser von 1.75 +/- 0.05 mm hergestellt werden konnte. Das Resultat hätte allenfalls mit einer Optimierung der Parameter verbessert werden können. Das so hergestellte Filament konnte problemlos auf einem 3D-Drucker mit einer 0.4mm Düse (Prusa i3 Mk3S) verdruckt werden.

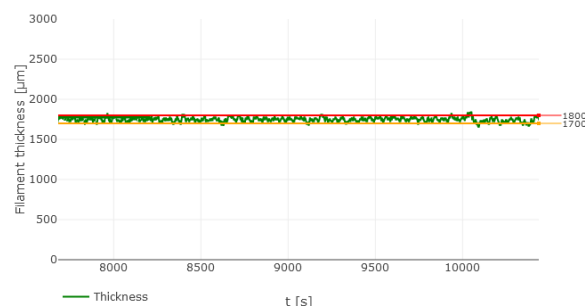


Abb. 4: PLA-Pellets (Neumaterial)

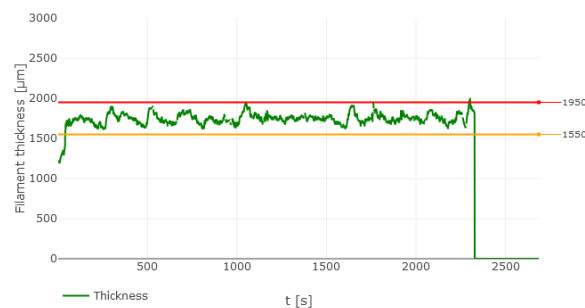
#### 3.2. Mischungen aus PLA-Abfällen und Neumaterial

Geshreddertes „Alt-Filament“ (2.85mm) wurde mit PLA-Pellets im Verhältnis 1:1 resp. 2:1 gemischt und in den Einfülltrichter des Extruders eingefüllt. Befürchtungen, dass sich das Material aufgrund der unterschiedlichen Partikelgrösse und Form entmischen würde, bewahrheiteten sich nicht.



**Abb. 5: Mischung aus geshreddertem „Alt-Filament“ und PLA-Pellets**

Auch neigte das Material im Einfülltrichter nicht zur Brückenbildung. Im Vergleich zu Neumaterial nahm die Konstanz des Durchmessers des Filaments jedoch deutlich ab. Selbst nach einer Optimierung der Extruder Parameter (Temperatur der Heizzonen, Extruderdrehzahl, Leistung der Kühlventilatoren) betrug der Durchmesser  $1.75 \pm 0.2\text{mm}$  in Extremfällen sogar mehr.



**Abb. 6: Mischung aus „Alt-filament“ und PLA Pellets (4mm Extruderdüse)**

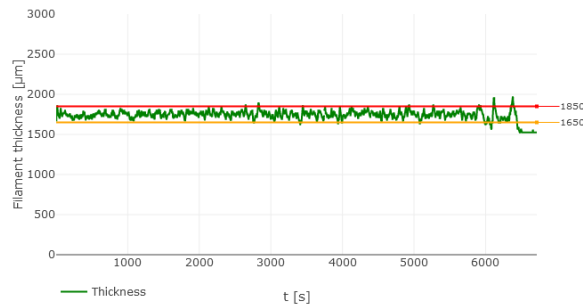
Die Temperaturen im hinteren Teil des Extruders (d.h. unmittelbar vor dem Austritt) mussten bei Abfall-PLA im Vergleich zu Neumaterial leicht (ca.  $5^\circ\text{C}$ ) gesenkt werden. Es zeigte sich, dass die grössten Abweichungen des Durchmessers durch im Filament eingeschlossene Verunreinigungen verursacht wurden



**Abb. 7: Verunreinigung führt zu Verdickung des Filaments**



Nach einem Ersatz der 4mm Extruder Düse durch eine 2mm Düse konnte eine deutliche Verbesserung erreicht werden. Der Durchmesser des produzierten Filaments lag bei 1.75 mm +/-0.1mm.



**Abb. 8: Mischung aus „Alt-filament“ und PLA Pellets (2mm Extruderdüse)**

Sie konnten gut gedruckt werden, obschon das Filament sporadisch im Drucker „verklebte“, da es stellenweise zu „dick“ war.



**Abb. 9: Unregelmässigkeiten im Filament**

Verstopfungen der Druckerdüse aufgrund von Verunreinigungen traten nur sehr selten auf, was wahrscheinlich auch der Tatsache geschuldet war, dass für diese Versuche der 3D-Drucker mit einer 0.6 mm Düse ausgerüstet wurde. Dadurch passierten auch kleine Verunreinigungen und der Druckprozess musste nicht abgebrochen werden.

### **3.3. 100 % Abfall PLA**

Neben geshreddertem „Alt-Filament“ wurden bei dieser Versuchsserie auch geshredderte Fehldrucke und Stützstrukturen verwendet. Es zeigte sich, dass im Vergleich zu den Versuchen mit Mischungen aus „altem“ und „neuem“ PLA die Temperaturen der Heizzonen im Extruder deutlich, d.h. um ca. 10°C abgesenkt werden mussten. Zusammen mit der 2 mm Düse am Extruder liess sich schliesslich aus 100% Altmaterial ein Filament herstellen, das über weite Strecken einen Durchmesser von 1.75 +/- 0.1 mm aufwies.

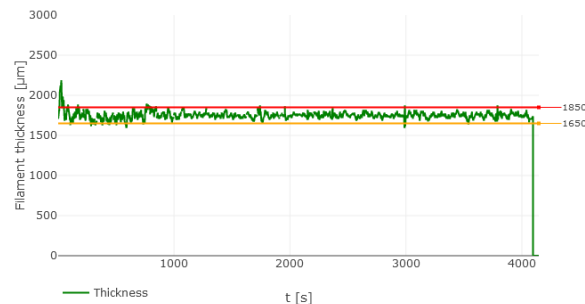


Abb. 10: 100% PLA-Abfälle gemischt (2mm Extruderdüse)

Dieses Filament liess sich auch grundsätzlich mit dem 3D-Drucker verdrucken. Die verbliebenen Unregelmässigkeiten des Durchmessers führten weder dazu, dass sich das Filament in der Zuführung oder im Druckkopf „verklebte“, noch führte es zu Unregelmässigkeiten in den gedruckten Objekten. Hingegen führten im Filament enthaltenen Verunreinigungen dazu, dass die Druckerdüse (0.4mm) jeweils in relativ kurzer Zeit verstopfte.



Abb. 11: Verunreinigung im Filament aus PLA-Abfall

Auch das Absieben der Feinfraktion (< 1mm) des Shreddergutes führte nicht zu einer Verbesserung der Situation, da die Verunreinigungen offensichtlich nicht nur im Feingut enthalten waren.

### 3.4. Weitere Ergebnisse

#### 3.4.1. Partikelgrösse

Es wird ausgeführt (z.B. in Grundlagen zur Extrusion<sup>7</sup>), dass ein (zu) hoher Feinanteil im Aufgabegut bei einem Einwellen-Extruder zu einem unregelmässigen Massefluss führen würde. Als Konsequenz wäre auch der Durchmesser des extrudierten Filaments unregelmässig. Bei einigen Versuchen, bei denen der Extruder noch mit der 4mm Düse ausgerüstet war, wurde daher der Feinanteil (< 1mm) im geshredderten Material abgesiebt, bevor es in den Extruder gegeben wurde. Ein Effekt konnte aber nicht festgestellt werden, der Durchmesser des

<sup>7</sup> [http://www.hevo-plastics.com/html/grundlagen\\_der\\_extrusion.html](http://www.hevo-plastics.com/html/grundlagen_der_extrusion.html)



extrudierten Filaments schwankte unverändert recht stark. Auch ein mehrfaches Shreddern der PLA Abfälle führte zwar zu einer homogeneren Partikelgrösse, das Problem des sehr unregelmässigen Durchmessers blieb aber bestehen. Das Problem liess sich erst mit dem Einbau der 2mm Düse (Vgl. oben) beheben.

### **3.4.2. Brückenbildung im Einfülltrichter/“Ratholing“**

Sowohl das PLA Neumaterial in Form der eiförmigen Pellets (ca. 5mm), wie auch geschreddertes Filament (2.85mm) welches aus zylinderförmigen Stücken < 4mm bestand rutschten problemlos im Einfülltrichter nach unten und neigten nicht zur Brückenbildung. Im Gegensatz dazu zeigte das Aufgabegut aus geschredderten PLA-Abfällen eine ausgeprägte Brückenbildung resp. sog. „ratholing“. Das Material musste in kurzen zeitlichen Abständen im Einfülltrichter aufgerührt werden, ansonsten floss kein Material mehr in den Einzugsbereich der Extruderschnecke nach.

### **3.4.3. Energieverbrauch der Extrusion**

D. Maga et al.<sup>6</sup> verwenden für ihren Vergleich der Recyclingverfahren von PLA-Abfällen den Wert von 207 kWh/t PLA für die Extrusion. Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurden Werte zwischen 170 – 570 kWh/t PLA gemessen. Sie liegen somit im Bereich des Literaturwertes. Hierbei ist zu bemerken, dass diese Zahlen jeweils auf kleinen Mengen an produziertem Filament (100 – 500 gr) beruhen und daher mit relativ grossen Unsicherheiten versehen sind.

## **4. Schlussfolgerungen**

Die Versuche zeigten, dass die Herstellung von Filament für den 3D-Druck aus recycelten PLA-Abfällen von Fehldrucken, Stützmaterial etc. grundsätzlich möglich ist. Die Konstanz des erzeugten Filamentdurchmesser lag bei ca. +/- 0.1 mm bei einem Durchmesser von 1.75 mm. Sicherlich lässt sich die Konstanz durch die Optimierung der Extruderparameter (Temperaturen der verschiedenen Heizzonen, Drehzahl der Extruderschnecke, Kühlung des austretenden Filaments etc.) noch verbessern. Bei der Verwendung von Neumaterial liess sich – ebenfalls ohne Optimierung der Parameter – eine Konstanz von +/- 0.05 mm erreichen.

Die Herstellung scheiterte aber an den Verunreinigungen die an den Fehldrucken anhafteten und die schlussendlich im extrudierten Filament wiederzufinden waren. Diese Verunreinigungen passierten zwar die 2 mm Düse des Extruders, obschon sie z.T. auch zu minimalen Verdickungen im Filament führten. Sie führten aber in vielen Fällen zu einer Verstopfung der 0.4 mm Düse des 3D-Druckers. Eine Literaturrecherche und auch Rückfragen bei Filamenthersteller ergaben, dass dieses Problem nur durch ein Schmelzfilter gelöst werden kann. Dabei wird

der Kunststoff in geschmolzenem Zustand filtriert und so die Verunreinigungen entfernt. Wenn die Menge der Verunreinigungen nicht allzu gross ist, kann diese Filtration direkt im Filamentextruder, vor der Austrittsdüse erfolgen. Leider verfügt der verwendete Extruder nicht über diese Möglichkeit, sodass an diesem Punkt die Versuche beendet wurden.

Zug, 10.8.2020 / rk