

Abschlussbericht zu Aktenzeichen 37415/01 – 41  
Projektlaufzeit: November 2021 - Juli 2024

# **Rec@school**

## **Recycling für den 3D-Druck an Schulen**

Verfasser: Dipl.-Ing. Franz Haas

Zentrum für additive Fertigung (ZaF)  
Ostfalia Lern- und Innovationsfabrik (OLIF)

Wolfenbüttel, im Dezember 2024

---

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>Gegenstand und Zielsetzung des Projekts</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Ergebnisse</b> .....	<b>5</b>
1.1 Umwelt- und Nachhaltigkeitsbildung am Beispiel Smartphone .....	5
1.2 Vermitteln von Kompetenzen und Techniken zum Reparieren von Gegenständen .	7
1.3 Lehrübertrag von dem Projektteam auf Lehrende .....	9
1.4 Leitfaden und Unterrichtsmaterial.....	10
1.5 Aufbau eines regionalen Recyclingkreislaufs für 3D-Druckabfälle .....	11
1.6 Stand der Filamenterzeugung .....	13
1.7 Entwicklung eines innovativen Mehrwegbehälters für Filament .....	17
1.8 Öffentlichkeitsarbeit.....	19
1.9 Fazit/ Ausblick.....	20
<b>Quellen</b> .....	<b>21</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>22</b>

---

# Zusammenfassung

## *Gegenstand und Zielsetzung des Projekts*

Der weltweit rasant ansteigende Kunststoffverbrauch und die damit verbundenen Probleme mit Kunststoffmüll und Mikroplastik stellt die Welt vor große Herausforderungen. In Deutschland wird der größte Anteil der Kunststoffabfälle (etwa 67%) thermisch verwertet, also verbrannt, und nur ein kleinerer Teil (etwa 32%) werkstofflich verwertet, was oft in einem „Downcycling“ resultiert. Angesichts der Verbreitung von Kunststoff-3D-Druckern in privaten Haushalten wird mit einem weiteren Anstieg der Kunststoffabfälle gerechnet. Das Projekt „Rec@school“ zielt darauf ab, durch Umwelt- und Nachhaltigkeitsbildung in Schulen ein Umdenken zu bewirken und die Ansätze „Reuse, Reduce, Recycle“ zu vermitteln. Ziel ist es, den Umgang mit 3D-Drucktechnologie und Kunststoffen zu verbessern und praktisch in die Umweltthematik einzuführen.

## *Umwelt- und Nachhaltigkeitsbildung am Beispiel Smartphone*

Im Projekt werden Smartphones demontiert, um deren Materialien und Wertstoffströme zu analysieren. Dies ermöglicht ein praktisches Lernumfeld, das zur kritischen Auseinandersetzung mit der Lebensdauer von Produkten anregt. Die Schüler\*innen lernen, Kunststoffe zu unterscheiden und verstehen die Problematik der Kunststoffentsorgung, wobei Smartphones aufgrund ihrer Alltagsrelevanz eine starke emotionale Verbindung schaffen.

## *Kompetenzvermittlung im Reparieren von Gegenständen*

Anhand von 3D-Drucktechnologie und CAD-Programmen werden Reparaturmethoden vermittelt. Dadurch werden Schüler\*innen befähigt, defekte Gegenstände zu identifizieren und mithilfe eigens konstruierter Ersatzteile zu reparieren, was sowohl praktische Fähigkeiten als auch ein Bewusstsein für langlebigere Produkte fördert.

## *Recyclingkreislauf für 3D-Druckabfälle*

Ein regionaler Recyclingkreislauf für 3D-Druckabfälle wird aufgebaut. Schüler\*innen erfahren dabei die Herausforderungen des Recyclings aus erster Hand kennen und lernen, Kunststoffabfälle zu sammeln und zu neuem Filament zu verarbeiten. Obwohl technische Schwierigkeiten mit einem Extruder die Entwicklung verzögerten, bleibt das Ziel eines effektiven Recyclingkreislaufs bestehen und wird nun Zug um Zug umgesetzt

---

### *Lehrübertrag und Unterrichtsmaterial*

Im Rahmen des Projekts wurden Unterrichtsmaterialien und ein Leitfaden erstellt um eine einfache Übertragung des Projekts auf andere Schulen oder Organisationen zu ermöglichen. Sie werden im Internet unter <https://www.ostfalia.de/cms/de/olif/recATschool/> zur Verfügung gestellt.

### *Öffentlichkeitsarbeit und Fazit*

Das Projekt „Rec@school“ wurde über verschiedene Medien und Veranstaltungen kommuniziert, um das Bewusstsein für Umweltthemen zu schärfen. Die Ziele des Projekts wurden erfolgreich erreicht, indem Kooperationsstrukturen aufgebaut wurden. Die Schüler\*innen zeigten sich engagiert, und das Programm hat sich als Lernmodul an einigen Schulen fest etabliert.

Aus unserer Sicht stellt „Rec@school“ einen effektiven Ansatz zur Förderung von Umweltbewusstsein und praktischen Fähigkeiten im Umgang mit Kunststoffen dar, der durch Schulprojekte und langfristige Kooperationen weiterwirken soll.

---

## Gegenstand und Zielsetzung des Projekts

Obwohl weltweit der Kunststoffverbrauch rasant zunimmt und es mannigfaltige Probleme mit Kunststoffmüll und Mikroplastik gibt, ist die Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland unbefriedigend. Der größte Teil, etwa 67 %, werden lediglich thermisch verwertet, also verbrannt, und ist somit dem Wertstoffkreislauf entzogen. Ein anderer großer Teil, etwa 32 %, werden zwar werkstofflich verwertet, es entsteht dabei allerdings Kunststoff „zweiter Wahl“ der in der Regel nur für Produkte minderer Qualität, wie z.B. Parkbänke, verwendet wird (Schyns und Shaver 2021). Die Verwertung ist also quasi ein „Downcycling“. Das Aufkommen und die stark zunehmende Verbreitung von Kunststoff-3D-Druckern in privaten Haushalten lässt einen weiteren Anstieg von Kunststoffabfällen erwarten.

Mit dem Projekt „Rec@school“ soll der Problematik entgegengewirkt werden. Durch Umwelt- und Nachhaltigkeitsbildung von Schüler\*innen und Lehrer\*innen als Multiplikatoren, soll ein Umdenken und Umlenken angeregt werden.

Anhand des Ansatzes „Reuse, Reduce, Recycle“ soll ein sinn- und verantwortungsvoller Umgang mit der innovativen neuen Technik „3D-Druck“ und der Ressource Kunststoff angestoßen werden.

Um mittels praktischer Tätigkeit in die Umweltthematik einzusteigen werden an den Schulen zunächst Smartphones demontiert, ihre Bestandteile analysiert und Wertstoffströme betrachtet sowie sich kritisch mit deren Produktlebensdauer auseinandergesetzt. Danach geht es um die folgenden Kernelemente:

**Reuse:** Die Vermittlung von Techniken und Kompetenzen, um Gegenstände zu reparieren und daher ihre Nutzungsdauer zu verlängern. 3D-Scanner und -Drucker unterstützen dabei. Es soll ein Umdenken angeregt und das Bewusstsein gestärkt werden, selbst in der Lage zu sein, Gegenstände zu reparieren.

**Reduce:** 3D-Drucker sind prinzipiell materialeffizient. Um dieses Potential voll auszuschöpfen ist etwas Hintergrundwissen notwendig. Teil des Projektes ist daher auch ein Workshop für die Lehrkräfte der beteiligten Schulen. Zum einen geht es um die Vernetzung untereinander, zum anderen um praktisches Arbeiten mit dem 3D-Drucker und speziellen materialsparenden Konstruktionsmethoden.

**Recycle:** Unter Mitwirkung der Schüler\*innen wird ein regionaler Wertstoffkreislauf für 3D-Druckabfälle aufgebaut. Dabei werden 3D-Druck-Abfälle der Hochschule sowie Schulen der

---

Region gesammelt und daraus neues 3D-Druck-Material (Filament) erzeugt, welches den abgebenden Einrichtungen wieder zufließt. Anhand des Aufbaus dieses Recyclingkreislaufes lernen die Schüler\*innen praktisch, was es bedeutet Kunststoff zu recyceln, welche Schwierigkeiten auftreten und Alternativen, wie man den aktuellen Herausforderungen beim Thema Kunststoffmüll begegnen kann. Die Verzahnung von theoretischen Unterrichtsinhalten und praktischen Workshops führen zu einem tieferen Verstehen und Verankern der Inhalte. Perspektivisch können und sollen lokale Unternehmen mit in den Wertstoffkreislauf einbezogen werden.

Im Rahmen des Projektes sollen Unterrichtsmaterialien sowie ein Leitfaden erstellt werden. Nach Projektende sollen die Unterrichtsmaterialien zur freien Verfügung unentgeltlich zur Verfügung gestellt werden. Mit Ihnen, sowie mit dem Leitfaden, der bei der Implementierung unterstützen soll, kann das Projekt einfacher auf andere Schulen/ Organisationen übertragen werden.

Die Ziele im Überblick:

- Umwelt- und Nachhaltigkeitsbildung am Beispiel Smartphone
- Vermitteln von Kompetenzen und Techniken zum Reparieren von Gegenständen
- Aufbau eines regionalen Recyclingkreislaufs für 3D-Druckabfälle unter Einbeziehung von Schülerinnen und Schülern
- Erstellung von Unterrichtsmaterialien und eines Leitfadens zur einfachen Projektübertragung

---

# 1 Ergebnisse

## 1.1 Umwelt- und Nachhaltigkeitsbildung am Beispiel Smartphone

Für den praktischen Einstieg in das Thema wurde die eigenständige Demontage von Smartphones gewählt. Es handelt sich um einen alltäglichen und von den meisten viel genutzten Gegenstand, über dessen materialtechnische Zusammensetzung aber den wenigsten bekannt ist. An zwei der Schulen befanden sich bereits Sammelboxen für Smartphones des Naturschutzbundes Deutschland e. V. (NABU), die beiden anderen haben auf unsere Empfehlung hin diese bestellt. Zum Auftakt der Praxisphase lagen somit eine ausreichende Menge an Smartphones vor, die für eine Demontage geeignet sind. Trotz meist fehlender Vorkenntnisse konnten die meisten Schüler\*innen die Smartphones eigenständig demontieren (siehe Abbildung 1). Das Projektteam stand dabei unterstützend zur Seite, falls die Schüler\*innen nicht weiterkamen. Nach dem Zerlegen der Smartphones wurden im Detail die meisten Bauteile/Module und die darin enthaltenen Materialien/Rohstoffe gemeinsam ausgearbeitet. Die Kunststoffe bilden mit 56% den größten Anteil und wurden jeweils im anschließenden Themenblock vertieft behandelt. Zunächst generelle Grundlagen, wie die Unterscheidung nach Typen und anschließend mit dem Fokus auf Thermoplaste, die gerade im Sinne des Kreislaufgedankens aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften recycelt werden können.

Weiterhin wurde die Problematik der Kunststoffentsorgung und die Verschmutzung der Weltmeere behandelt. In einer praktischen Übung lernten die Schüler\*innen Kunststoffe anhand deren Kennzeichnung zu unterscheiden und auch, worin sich Kunststoffe verstecken können, wie z. B. in einer Aluminium-Getränkedose (siehe Abbildung 2).



Abbildung 1: Schüler\*innen demontieren alte Smartphones (Foto: Ostfalia)



*Abbildung 2: Verschiedene Kunststoffe und ihre Kennzeichnung (Foto: Ostfalia)*

Weiterhin wurde angesprochen, dass viele Lebensmittelverpackungen für frische Lebensmittel wie, z.B. für Käse oder Wurst, aufgrund ihres mehrschichtigen Aufbaus aus bis zu 17 verschiedener Kunststofffolien, für Recycling ungeeignet sind.

Die Wahl des Smartphones als Einstieg hat sich sehr bewährt. Durch die persönliche Verbindung zu dem Objekt war eine direkte Verbindung zu der Umwelt- und Nachhaltigkeitsthematik gegeben.

## 1.2 Vermitteln von Kompetenzen und Techniken zum Reparieren von Gegenständen

Im anschließenden Themenblock wurden den Schülerinnen zunächst die Grundlagen des 3D-Drucks und später des Konstruierens mittels eines CAD-Programms vermittelt. Anhand eines Vorzeigeobjekts, einer Trillerpfeife, wurden die Grundlagen des Konstruierens beispielhaft Schritt für Schritt erklärt. Anschließend war jede\*r dazu aufgerufen sich an einer eigenen Konstruktion zu versuchen. Die Schüler\*innen wurden bereits in der Vorbereitungsphase dazu aufgefordert, sich in ihrem alltäglichen Umfeld nach Gegenständen umzuschauen, die defekt sind und mittels 3D-Druck repariert werden könnten. Mit Hilfe der Projektbeteiligten wurden Ersatzteile konstruiert. Dabei wurde großes Augenmerk daraufgelegt, warum ein Bauteil versagt hat und überlegt (und umgesetzt) inwiefern es sich verbessern lässt, um die zukünftige Lebensdauer zu verlängern (vgl. Beispiel Fenderpumpe auf der nächsten Seite). Zwei Beispiele für reparierte Bauteile sind in Abbildung 3 dargestellt.

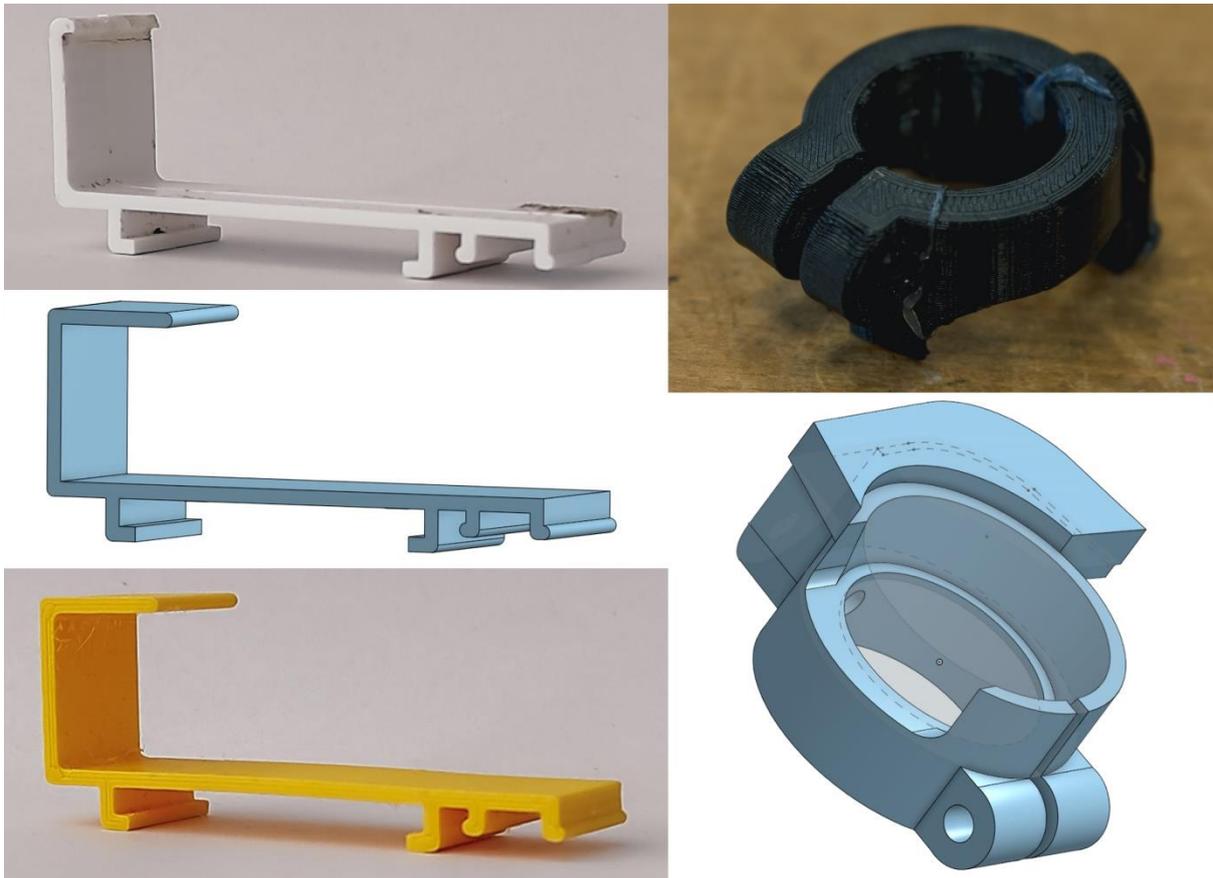


Abbildung 3: Beispiele für reparierte Bauteile

Links: Gebrochene Halterung eines Fensterrollos - Originalteil, CAD-Modell und 3D gedrucktes Teil;

Rechts: gebrochene Halterung an einer Simson Schwalbe - Originalteil und CAD-Modell (Abbildung: Ostfalia)

Viele Schüler waren verblüfft wie einfach sich zum Teil Alltagsobjekte reparieren lassen und welche neuen Möglichkeiten 3D-Druck dabei eröffnet. Es wird keine besondere Fingerfertigkeit

bei der Benutzung verschiedener Werkzeuge gebraucht, sondern lediglich Kenntnisse in der Benutzung von Messwerkzeugen und CAD-Programm. Auch ein eigener 3D-Drucker ist nicht erforderlich, da die Schüler in der Regel Zugang zu den 3D-Druckern ihrer Schule haben.

### **Beispiel für konstruktive Verbesserung um die zukünftige Lebensdauer zu erhöhen**

Bootsfender sind Schutzkörper, ähnlich sehr robusten Luftballonen, die das Reiben eines Schiffsrumpfes an der Hafenummauer (Kai) verhindert, siehe Abbildung 4. Im Freizeitbereich wird zum Aufpumpen der Fender häufig eine Handpumpe genutzt. Die Tülle einer solchen Handpumpe ist gebrochen, ein Ersatzteil nicht mehr erhältlich, siehe Abbildung 5 oben.



Abbildung 4: Fender zwischen Schiffsrumpf und Hafenummauer  
(Bild von Kamel15, lizenziert unter CC BY-SA 3.0  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Fender\\_\(Schiffahrt\)#/media/Datei:Fender\\_2008\\_PD\\_2.JPG](https://de.wikipedia.org/wiki/Fender_(Schiffahrt)#/media/Datei:Fender_2008_PD_2.JPG))



Abbildung 5: oben: gebrochene Originaltülle, darunter: optimiertes 3D-Druck Bauteil  
(Foto: Ostfalia)

#### Versagensursache:

- Die Pumpentülle ist sehr lang. Fällt die Pumpe auf diese kommt es zu einem sehr hohen Biegemoment im Bereich des Überganges von Mutter zu Tülle, siehe auch Bruchstelle in Abbildung 5.
- Bei Querschnittsprüngen kommt es zu hohen Kerbspannungen mit hoher Bruchgefahr. Beim vorliegenden Bauteil ist die Verrundung sehr gering.
- Die ursprüngliche Tülle scheint ein Spritzgussteil zu sein. Das verwendete Material ist hart und spröde.

#### Umgesetzte Verbesserungen:

- Verkürzung der Tüllenlänge
- Verwendung eines schlagzähen Materials (PA6)
- Deutliche Vergrößerung der Verrundung und Verwendung der „Methode der Zugdreiecke“<sup>1</sup> um die Kerbspannung weiter zu verringern

<sup>1</sup> <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/von-zugdreiecken-und-zwerggradien-a-cf5aa837d3187f246ee0eefb894c26e3/>  
Kurz-URL: <https://j2n.eu/r/mQoTe> Aufgerufen am 21.11.2024

---

### 1.3 Lehrübertrag von dem Projektteam auf Lehrende

In der zweiten Phase des Projekts wurde die Vermittlung der Inhalte, nicht wie zuvor von dem Projektteam, sondern von Lehrer\*innen übernommen. Sie diente der Erprobung der erstellten Unterlagen und ermöglichte den Blick von außen. Dabei konnte evaluiert werden was besonders gut funktioniert und wo es Verbesserungspotential gibt. Alle vier bereits beteiligten Schulen waren dabei involviert. Zusätzlich wurde der Kontakt zu drei neuen Schulen aufgenommen. Eine der bereits bestehenden Schulen hatte schon früh den Wunsch geäußert das Projekt nicht nur auf eine kleine Gruppe innerhalb einer Projektwoche zu begrenzen, sondern auf einen gesamten Jahrgang aufweiten zu wollen. Aufgrund der deutlich höheren Anzahl an Schüler\*innen musste die Organisation sowohl seitens der Schule als auch an der Ostfalia angepasst werden. Die grobe Aufteilung in die drei Oberthemen Smartphones, Kunststoffverpackung und Konstruktion blieb erhalten, das Raumkonzept wurde an die gesteigerte Teilnehmerszahl angepasst (Abbildung 6).



*Abbildung 6: Phase 2: Jahrgang bei der Projektwoche unter der Leitung von Lehrenden (Foto: Ostfalia)*

Mit einer anderen Schule wurde eine offene Projektwoche gestaltet, bei der die Jahrgänge 7 bis 10 gemischt wurden. Aufgrund des Wechsels der Ansprechpartner an der Schule, haben die beteiligten Lehrer\*innen das Projekt zum ersten Mal umgesetzt und wurden dabei von den Projektmitarbeitenden begleitet und unterstützt. Bei anderen Schulen wurde das Projekt in wöchentlichen Einheiten unterrichtsbegleitend während des Schuljahres eingesetzt.

Während der 2. Projektphase zeigte sich, dass sich der modulare Aufbau des Rec@school Projekts gut bewährt und sowohl für den Einsatz in einer Projektwoche als auch unterrichtsbegleitend geeignet ist. Aus der Fülle der Materialien können sich Lehrende die für sie passenden auswählen und ggf. mit eigenen Materialien kombinieren.

## 1.4 Leitfaden und Unterrichtsmaterial

Im Rahmen des Projekts Rec@school - Recycling für den 3D-Druck an Schulen“ wurde ein Leitfaden erstellt, der es Schulen und anderen Institutionen erleichtern soll das vorliegende Projekt, ggf. leicht abgewandelt und auf die jeweiligen Bedürfnisse angepasst, durchzuführen. Abbildung 7 zeigt das Inhaltsverzeichnis, die Titel- und eine Beispielseite.



Abbildung 7: Inhaltsverzeichnis, Titelseite und Beispielseite des Leitfadens Rec@school (Abbildung: Ostfalia)

Bei der Erstellung des Leitfadens wurde darauf geachtet, dass er überregional einsetzbar ist. Der Leitfaden sowie weitere ergänzende Lehrmaterialien wie z.B. Präsentationen zu verschiedenen Themen für den Unterricht lassen sich unter <https://www.ostfalia.de/cms/de/olif/recATschool/> herunterladen oder unter [zaf@ostfalia.de](mailto:zaf@ostfalia.de) gegen eine geringe Schutzgebühr in gedruckter Form bestellen.

---

## 1.5 Aufbau eines regionalen Recyclingkreislaufs für 3D-Druckabfälle

In den am Projekt beteiligten Schulen wurde die Idee eines regionalen Recyclingkreislaufs vorgestellt und mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert. Die Idee fand positiven Anklang, und es war mitreißend, wie die Schülerinnen und Schüler sich in die Diskussion einbrachten. Zwei Punkte sollen hier besonders hervorgehoben werden:

An einer Schule schlug eine Schülerin vor, das Projekt im Stadtschülerrat der Stadt Braunschweig vorzustellen, um weitere Interessierte zu gewinnen und in den Recyclingkreislauf einzubinden. Dies könnte zu einer stadtweiten Vernetzung führen und das Projektziel unterstützen, Schülerinnen und Schüler für Umweltthemen und Nachhaltigkeit zu sensibilisieren.

Eine andere Schule zeigte sich besonders kreativ in Bezug auf die Frage, wie die 3D-Druckabfälle zur Ostfalia gelangen könnten. Einer der beteiligten Lehrer wohnt in Wolfenbüttel in direkter Nachbarschaft zur Ostfalia und pendelt täglich mit dem Rad die 15 km zu seiner Schule nach Braunschweig. Die Schülerinnen und Schüler konnten ihn dafür gewinnen, regelmäßig 3D-Druckabfälle in seiner Fahrradtasche mitzunehmen und zum Recycling abzugeben.

3D-Druck Abfallsammelstationen wurden an der Ostfalia (Abbildung 8) und den beteiligten Schulen eingerichtet. Dort werden 3D-Druckabfälle sortenrein getrennt und bis zur Wiederverwendung aufbewahrt. Weiterhin wurde an der Ostfalia, an prominenter Stelle, die Recyclingstation aufgebaut und in Betrieb genommen, siehe Abbildung 9.

Bei der Realisierung des Recyclingkreislaufs ergaben sich unterschiedliche Probleme. Ein Problem war die Herstellung von Filament mit geringen Durchmesserschwankungen. Ziel des Projekts war Filament mit einem Durchmesser von 1,75 mm und einer Durchmessertoleranz von  $\pm 0,05$  mm herzustellen. Zu Projektbeginn wurde davon ausgegangen, dass der dafür angeschaffte Extruder dazu problemlos in der Lage sei. Im Laufe des Projekts stellte sich jedoch im Rahmen mehrerer systematischer Untersuchungen heraus, dass dem nicht so ist. Das Vorgehen zur Verbesserung dieses Problems wird im folgenden Kapitel dargestellt.



Abbildung 8: Sammelstation für 3D-Druckabfälle an der Ostfalia (Foto: Ostfalia)



Abbildung 9: Recyclingstation für 3D-Druckabfälle an der Ostfalia (Foto: Ostfalia)

## 1.6 Stand der Filamentherzeugung

Für das Projekt wurde ein Extruder der niederländischen Firma 3devo vom Typ Composer 450 angeschafft, siehe Abbildung 11. Laut Spezifikation des Herstellers ist dieser Extruder in der Lage, Filament mit einem Durchmesser von 1,75 mm und einer Toleranz von  $\pm 0,05$  mm herzustellen. Das Einhalten des engen Toleranzbandes ist wichtig, da 3D-Drucker keine Messeinrichtung für den Filamentdurchmesser besitzen und auf einen festen Volumenstrom eingestellt werden. Wird der Volumenstrom über- oder unterschritten, nimmt die Bauteilqualität ab oder der Drucker verstopft.

Abbildung 10 zeigt den Messchrieb eines mit dem Composer450 gefertigten Filamentstrangs für den Zieldurchmesser von 1,75 mm. Die Grenzen des Toleranzbandes 1,8 mm und 1,7 mm sind durch farbliche horizontale Linien gekennzeichnet.

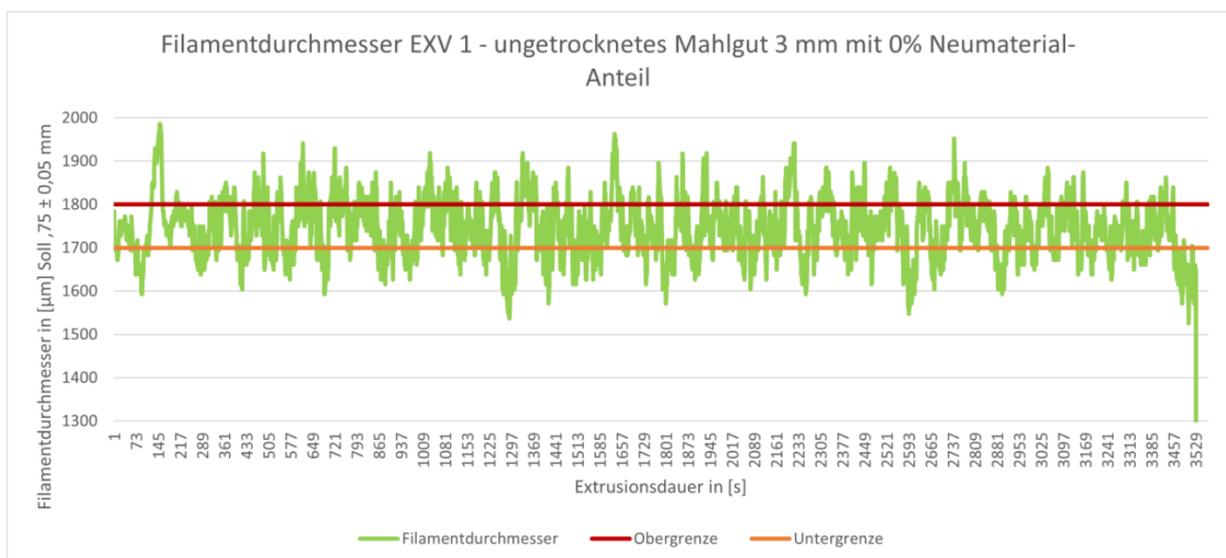


Abbildung 10: Messchrieb eines mit dem 3Devo erzeugten PLA Filamentstrangs (Sperling 2022)

Ein Filament mit derartigen Durchmesserschwankungen ist für den 3D-Druck ungeeignet. Insbesondere das Überschreiten des Durchmesserwertes 1,9 mm ist kritisch. Es führt zu einem Verstopfen des 3D-Druckers im Bereich der Extrusionseinheit.

Beim Überschreiten des Durchmessers sind zwei Effekte zu unterscheiden:

- Zum einen kommt es immer wieder zu Durchmesserschwankungen (eher breitere Bereiche), die 1,9 mm im Durchmesser überschreiten.
- Zum anderen kommt es hin und wieder zu einem „Blob“, einer Kunststofffräne, die am Filament anhaftet.

Da die skizzierten Herausforderungen das Projekt im Bereich „Aufbau eines lokalen Recyclingkreises“ derart aufgehalten haben, dass eine Projektverlängerung beantragt werden

---

musste, soll im Folgenden näher auf die technischen Hintergründe und die gewonnenen Erkenntnisse eingegangen werden.

### **Systembeschreibung**

Der Extruder verfügt über einen transparenten Einfüllstutzen in den das Mahlgut gegeben wird (Abbildung 11). Von dort gelangt das Mahlgut in eine Schnecke, die es durch vier Heizzonen fördert und schließlich durch eine Düse presst.

Der aus der Düse austretende Filamentstrang wird durch zwei Lüfter gekühlt (Abbildung 12), bevor er durch eine Messeinrichtung geführt wird. Hinter der Messeinrichtung ist eine Abzugsvorrichtung angebracht. Ihre Drehzahl wird in Abhängigkeit des gemessenen Filamentdurchmessers geregelt. Anschließend wird der Filamentstrang um 90° in die Horizontale umgelenkt und führt durch ein seitlich verschiebbares Auge. Dieses dient dazu das Filament Strang neben Strang auf der Spule aufzuspulen.



*Abbildung 11: Extruder „Composer 450“ von 3Devo mit Filamentspule im unteren Bildbereich (Foto: Ostfalia)*



Düse

Lüfter/ Kühlung

Filamentstrang

Messeinrichtung

Abzugsvorrichtung

Umlenkung

Seitlich verschiebbares Auge

Abbildung 12: Seitenansicht 3Devo Extruder mit Benennung wesentlicher Bestandteile (Abbildung: Ostfalia)

## Problemanalyse

1. Die Messeinrichtung ist aus technischen Gründen sehr weit von der Düse entfernt. Das Filament benötigt für die Strecke vom Austritt aus der Düse bis zur Messeinrichtung mehrere Sekunden. Daher ist eine klassische Regelung nicht möglich.
2. Die Lüftereinstellung ist stark subjektiv, das Kühlergebnis ungleichmäßig.
3. Laut der „goldenen Regel der Messtechnik“ sollte die Toleranz eines Messgerätes ein Zehntel, im äußersten Falle ein Fünftel des zu messenden Wertes nicht überschreiten. Das vorhandene Messgerät misst im Bereich von 0,1 mm und ist damit nicht fähig, vgl. (Nottrodt 2023).
4. Das Auftreten von Blops führt zu einem Ansprechen der Regelung, in deren Folge der nächste Teilbereich des Filamentstrangs zu dünn wird.

## Mögliche Abstellmaßnahmen

- a. Aufgrund von Problem 1 muss das oberste Ziel sein, Filament ohne Blops herzustellen. Der Ausfluss aus der Düse muss so gleichförmig wie irgend möglich sein. Ohne dies ist eine Regelung unter den gegebenen Bedingungen nicht möglich

---

Mögliche Ursachen und Abstellmaßnahmen für Blops:

- i. Feuchtes Mahlgut → Mahlgut trocknen
  - ii. Nicht vollständig aufgeschmolzenes Mahlgut durch stark unterschiedliche Korngrößen → Mahlgut sieben
  - iii. Mahlgut hat verschiedene Schmelzpunkte → zum Ausschließen dieses Punktes versuchsweise Aufbereitung von 3D-Druck Abfällen eines einzelnen Filamentherstellers und gleicher Farbe
  - iv. Untersuchung der Blops mittels Computertomographie
- b. Aufbau einer den Filamentstrang umringenden Luftströmung
  - c. Aufbau einer alternativen fähigen Messmethode. Vorarbeiten wurden in (Nottrodt 2023) vorgenommen.
  - d. Aufbau einer „behutsamen“ Regelschleife. D.h. im Gegensatz zu einer klassischen Regelschleife, die sehr schnell reagiert, gilt es hier langsam, ähnlich einer Asymptote, auf den Zielwert zuzusteuern.

## **Ergebnisse**

Die vorgenommenen Untersuchungen und Ergebnisse sind sehr umfangreich und würden den Rahmen dieses Berichtes sprengen. Sie werden im Rahmen zweier wissenschaftlicher Arbeiten (Ratayczak 2024), (Rubba 2024), im Januar 2025 unter <https://www.ostfalia.de/cms/de/olif/recATschool/> veröffentlicht.

Die Durchmesserschwankungen konnten mit den durchgeführten Maßnahmen deutlich verbessert werden und liegen derzeit im Bereich  $\pm 0,06$  mm. Wir gehen davon aus in den nächsten Wochen den Zielbereich von  $\pm 0,05$  mm zu erreichen.

---

## 1.7 Entwicklung eines innovativen Mehrwegbehälters für Filament

Prinzipiell sind alle Filamente mehr oder weniger hygroskopisch (Kast 2018), (Nobufile o.D.). Diese Eigenschaft hat negative Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit und die (Oberflächen-) Qualität der 3D-gedruckten Objekte, da sie in der Regel durch die Feuchtigkeitsaufnahme des Filaments abnimmt. Aus diesem Grund werden fabrikneue Filamentspulen direkt nach der Herstellung in einen Kunststoffbeutel eingeschweißt und so an den Kunden ausgeliefert, siehe Abbildung 13.



Abbildung 13: Filamentspulen verschiedener Hersteller im Anlieferzustand (Abbildung: Ostfalia)

Im Projekt Rec@school wurde beschlossen, auf das Einschweißen zu verzichten und stattdessen eine „Mehrwegverpackung“ anzubieten, siehe Abbildung 14. Dabei handelt es sich um einen Mehrwegtransportbehälter, der gleichzeitig als Trockenbox genutzt wird, genannt OMTB<sup>2</sup>. Dies stellt sicher, dass das Filament seine Qualität nicht nur bis zur Auslieferung an den Kunden, sondern während der gesamten Gebrauchsdauer behält. Ein integrierter Behälter, gefüllt mit Silikagel, sorgt für die anhaltende Trockenheit des Filaments. Das Silikagel ist mit einem Indikator ausgestattet, der durch einen Farbumschlag anzeigt, wann es gesättigt ist und keine weitere Feuchtigkeit aufnehmen kann, siehe Abbildung 15. Ein Sichtfenster ermöglicht die Überprüfung des Zustands. Für eine hohe Flexibilität bei der Wahl des Aufstellortes kann das Filament wahlweise auf der Ober- oder Unterseite herausgeführt werden. Die drehbare Lagerung der Filamentspule sorgt für eine leichtgängige Förderung des Filaments.

Wird im Rahmen des Projektes eine Filamentspule hergestellt, wird sie umgehend in die OMTB gepackt. Interessierte können nach Entrichtung einer Pfandgebühr eine OMTB gefüllt mit

---

<sup>2</sup> Ostfalia **M**ehrweg **T**ransport- und **T**rocken**box**

Filament<sup>3</sup> und Silikagel ausleihen. Ist das Filament aufgebraucht, wird die OMTB mit der leeren Filamentspule zurückgegeben und gegen eine OMTB mit gefüllter Filamentspule und frischem Silikagel ausgetauscht. Die leere Filamentspule wird zum aufspulen von neuem Filament wiederverwendet, das gesättigte Silikagel wird regeneriert und steht danach einem anderen Interessenten zur Verfügung.



Abbildung 14: Ostfalia Mehrweg Transport- und Trockenbox OMTB (Abbildung: Ostfalia)

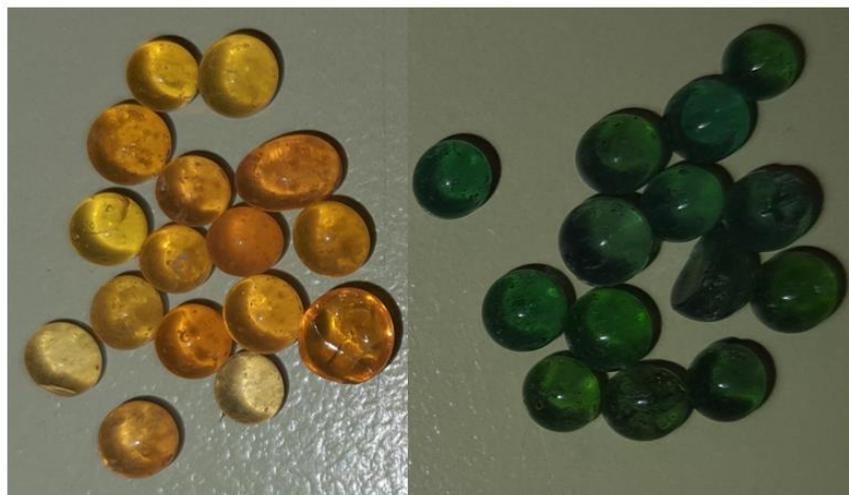


Abbildung 15: Silikagel trocken, gesättigt (Foto: Ostfalia)

<sup>3</sup> Für das Filament ist ein Unkostenbeitrag zu entrichten, der sich nach der Menge und Qualität der angelieferten 3D-Druckabfällen bemisst.

## 1.8 Öffentlichkeitsarbeit

- CJD-Gymnasiums - Beitrag über den offiziellen Facebook-Account 25.05.2022  
<https://www.facebook.com/CJD.Campus/posts/pfbid039G8JDLfzPPW4PHWa2p1TjMbpXT7JtiRtP4eKxWubGiLub5aCic2HuVEiYr1hzS2I>
- Oberschule Sickte - Artikel über den offiziellen Instagram-Account am 05.07.2022  
<https://www.instagram.com/p/CfoSiK0KnNE/?hl=de>
- Ostfalia Hochschule – Pressemitteilung am 14.07.2022  
<https://www.ostfalia.de/cms/de/huk/kommunikation/presse/pressemitteilungen-2022/projekt-recschool-der-fakultaet-maschinenbau/>
- Online-Artikel der Braunschweiger Zeitung am 15.07.2022  
<https://www.braunschweiger-zeitung.de/wolfenbuettel/article235901759/Praktische-Umweltbildung-fuer-Sickter-Oberschule.html>
- Lokale Titelseite in der Printausgabe der Wolfenbütteler Zeitung am 16.07.2022
- Zeitungsartikel im Wolfenbütteler Schaufenster am 17.07.2022  
[https://www.schaufenster.wf.de/medien/Aktuelle\\_Ausgaben/Wolfenbuettel\\_1/1\\_1.pdf](https://www.schaufenster.wf.de/medien/Aktuelle_Ausgaben/Wolfenbuettel_1/1_1.pdf)
- Teilnahme am Nachhaltigkeitsmarkt des jährlich in Braunschweig stattfindenden Kulturfestivals „Kultur im Zelt“ mit Zeitungsartikel.



Abbildung 16: Kultur im Zelt (Foto: Ostfalia)

- Vorstellung des Projekts auf der Conference on Learning Factories (CLF) in Reutlingen (Mai 2023) mit dem Paper *Using Learning Factories to Provide Environmental Education in Schools while Attracting the Next Generation of STEM Students* (Frost, Brüggemann, und Haas 2023)
- Veröffentlichung des Projekts im Internet mit Downloadmöglichkeit der Projektmaterialien <https://www.ostfalia.de/cms/de/olif/recATschool/>
- Einrichten der Recyclingstation an prominenter Stelle in der Hochschule, versehen mit einem großen Banner
- Presseerklärung zum Projektabschluss mit Informationen zur Downloadmöglichkeit von Leitfaden und Lehrmaterialien, geplant für Januar 2025.

---

## 1.9 Fazit/ Ausblick

Die Projektziele wurden aus unserer Sicht vollständig erreicht. Über das Projekt hinaus sind langfristige Kooperationen entstanden. So wird beispielsweise im Januar 2025 ein neues Schulprojekt mit Schüler\*innen der Klassenstufe 13 durchgeführt, bei dem Lernmaterialien aus dem Rec@school Projekt eingesetzt werden. Die Ostfalia ist hierbei im Rahmen einer Exkursion eingebunden. Die Schülerinnen werden vor Ort aktiv tätig sein und das werkstoffliche Recycling direkt erleben. Auch an anderen Schulen in der Umgebung finden die Lernmaterialien Anwendung.

Die Schüler\*innen haben sich im Projektverlauf intensiv mit der Thematik der Umwelt- und Nachhaltigkeitsbildung auseinandergesetzt. Wir waren positiv überrascht vom Engagement und den Ideen, die sie entwickelten und wie sie sich eingebracht haben. Das Smartphone hat sich als effektiver Einstieg bewährt, ebenso der hohe praktische Anteil, sei es beim Erkennen und Zuordnen von (mitgebrachten) Kunststoffen, beim Konstruieren von Ersatzteilen oder bei praktischen Arbeiten im Bereich des Filamentrecyclings.

Im Hinblick auf den regionalen Recyclingkreislauf wird dieser nun, nach der Behebung der „Kinderkrankheiten“ am Extruder, zunehmend implementiert. Die Finanzierung von studentischen Hilfskräften, die die Arbeiten daran betreuen, ist noch offen.

In der Zusammenarbeit mit den Schulen wurde deutlich, dass großes Interesse an einem solchen Projekt besteht, sei es im Rahmen einer Projektwoche oder unterrichtsbegleitend über mehrere Wochen. Besonderen Zuspruch erhielten wir während der Phase des Projektes, als wir selbst an die Schulen gingen und das Projekt durchführten. In der folgenden Projektphase, in der die Lehrkräfte mit den bereitgestellten Unterlagen die Projekte leiten sollten, traten einige Hemmnisse auf. Dies ist verständlich, bedeutet es doch für die Lehrkräfte, sich in einem ohnehin vollen Arbeitsalltag mit einer neuen Thematik auseinandersetzen zu müssen. An den Schulen, die diese Hürde überwand, ist Rec@school ein fester Bestandteil des Schuljahresprogramms geworden.

---

## Quellen

- Frost, Artur, Holger Brüggemann, und Franz Haas. 2023. „Using Learning Factories to Provide Environmental Education in Schools While Attracting the Next Generation of STEM Students“. *SSRN Electronic Journal*. doi:10.2139/ssrn.4469885.
- Kast, Oliver. 2018. „Beitrag zum tieferen Verständnis der Trocknung hygroskopischer Kunststoffe“. Stuttgart. [https://www.researchgate.net/profile/Oliver-Kast/publication/340338662\\_Beitrag\\_zum\\_tieferen\\_Verstandnis\\_der\\_Trocknung\\_hygroskopischer\\_Kunststoffe/links/5f1010d9a6fdcc3ed70b659d/Beitrag-zum-tieferen-Verstaendnis-der-Trocknung-hygroskopischer-Kunststoffe.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Oliver-Kast/publication/340338662_Beitrag_zum_tieferen_Verstandnis_der_Trocknung_hygroskopischer_Kunststoffe/links/5f1010d9a6fdcc3ed70b659d/Beitrag-zum-tieferen-Verstaendnis-der-Trocknung-hygroskopischer-Kunststoffe.pdf).
- Nobufile. o.D. „Erreichen einer exzellenten 3D-Druckqualität: die Rolle des Trocknens und Lagerns des Filaments“. <https://www.nobufile.com/post/filament-trocknen-petg-pctg-pla>.
- Nottrodt, Frederik. 2023. *Untersuchung der Eignung von Messmitteln zur Regelung von Filamentextrudern*. Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften. Studienarbeit.
- Ratayczak, Constantin. 2024. *Systematische Untersuchung und Optimierung der Extrusionsergebnisse eines Desktopfilamentextruders*. Wolfenbüttel: Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften. Studienarbeit.
- Rubba, Laurenz. 2024. *Vermessung von Filamenten zur Bewertung der Durchmessertoleranz und Druckbarkeit*. Wolfenbüttel: Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften. Studienarbeit.
- Schyns, Zoé O. G., und Michael P. Shaver. 2021. „Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review“. *Macromolecular Rapid Communications* 42(3): 2000415. doi:10.1002/marc.202000415.
- Sperling, Anja. 2022. *Filamentherstellung aus 3D-Druckabfällen*. Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften. Studienarbeit.

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schüler*innen demontieren alte Smartphones .....	5
Abbildung 2: Verschiedene Kunststoffe und ihre Kennzeichnung .....	6
Abbildung 3: Beispiele für reparierte Bauteile .....	7
Abbildung 4: Fender zwischen Schiffsrumpf und Hafenmauer .....	8
Abbildung 5: optimiertes 3D-Druck Bauteil .....	8
Abbildung 6: Phase 2: Jahrgang bei der Projektwoche unter der Leitung von Lehrenden.....	9
Abbildung 7: Inhaltsverzeichnis, Titelseite und Beispielseite des Leitfadens Rec@school....	10
Abbildung 8: Sammelstation für 3D-Druckabfälle an der Ostfalia.....	12
Abbildung 9: Recyclingstation für 3D-Druckabfälle an der Ostfalia .....	12
Abbildung 10: Messschrieb eines mit dem 3Devo erzeugten PLA Filamentstrangs .....	13
Abbildung 11: Extruder Composer 450 von 3Devo .....	14
Abbildung 12: Seitenansicht 3Devo Extruder mit Benennung wesentlicher Bestandteile .....	15
Abbildung 13: Filamentspulen verschiedener Hersteller im Anlieferzustand .....	17
Abbildung 14: <b>Ostfalia Mehrweg Transport- und Trockenbox OMTB</b> .....	18
Abbildung 15: Silikagel trocken, gesättigt .....	18
Abbildung 16: Kultur im Zelt .....	19