

Untersuchungen zur Degradation bei wertstofflichem Recycling am Beispiel von PLA

Verfasser des Aufsatzes: Bremer, Mats; Schneider, Nick; Prof. Dr.-Ing. Wahl, Michael

Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, Hoppstädten-Weiersbach, Deutschland

Die steigende Beliebtheit und Nutzung der additiven Fertigung mittels Fused Filament Fabrication (kurz FFF) resultiert in einem immer größer werdenden Bedarf an Kunststoffen. Der FFF Prozess neigt durch die Verwendung von Stützstrukturen, Filamentresten und Fehldrucken zu einer erhöhten Generierung an Abfällen, welche im Umkehrschluss aufgrund der Beliebtheit ebenfalls zunehmen. Das Recycling von Kunststoffabfällen für die additive Fertigung ist grundsätzlich möglich, jedoch aufgrund der Degradation der Werkstoffe durch den Wiederaufbereitungsprozess in der Häufigkeit limitiert. Des Weiteren zeigten verschiedene Studien in der Vergangenheit stark unterschiedliche Ergebnisse in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften der recycelten Materialien. Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Arbeit mit dem Einfluss der mehrfachen Wiederverwendung des Kunststoffmaterials Polylactid (PLA) auf dessen mechanischen Eigenschaften und allgemeine Druckbarkeit. Zu diesem Zweck durchlief das Material einen Kreislauf zur Filamentherstellung insgesamt fünfmal. Im Rahmen jedes Durchlaufs werden zwei unterschiedliche Arten von Probekörpern angefertigt. Das restliche Material diente als Basis für den nachfolgenden Recyclingdurchlauf. Dadurch erarbeitet die vorliegende Studie den Einfluss der wiederholten Filamentherstellung ohne die zusätzliche Nutzung durch einen 3D-Drucker. Mit Hilfe der Probekörper erfolgte die Überprüfung der mechanischen Eigenschaften des Materials sowie die Maßhaltigkeit der gedruckten Objekte. Die Maßhaltigkeit wurde mit Hilfe eines 3D-Scanners ausgewertet. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die wiederholte Filamentherstellung nur einen sehr geringen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Druckbarkeit des Materials ausübte. Die Reduktion der ermittelten mechanischen Eigenschaften vom ersten zum letzten Durchlauf beläuft sich auf ca. 5% für das E-Modul, ca. 2% für die Zug- bzw. Streckspannung und ca. 7% für die Bruchspannung. Auch für die Maßhaltigkeit wurde eine minimale Reduktion über das gesamte Bauteil festgestellt. Dies zeigt, dass eine wiederholte Nutzung des Ausgangsmaterials für die Wiederaufbereitung in der

Filamentherstellung geeignet ist, somit können alte Filamentreste bzw. nicht ausreichende Filamentmengen zu neuem Filament verarbeitet werden.

The increasing popularity and use of additive manufacturing by means of Fused Filament Fabrication (FFF for short) results in an ever-growing demand for plastics. Due to the use of support structures, insufficient filament remnants and misprints, the FFF process tends to generate more waste, which in turn is also increasing due to its popularity. The recycling of plastic waste for additive manufacturing is possible in principle, but limited in frequency due to the degradation of the materials through the reprocessing process. Furthermore, various studies in the past showed widely varying results in terms of the mechanical properties of the recycled materials. For this reason, this work deals with the influence of multiple reuse of the plastic material polylactide (PLA) on its mechanical properties and general printability. For this purpose, the material passed through a filament production cycle a total of five times. During each run, two different types of test specimens were made. The remaining material served as the basis for the subsequent recycling run. Thus, the present study elaborates the influence of repeated filament production without the additional use of a 3D printer. The test specimens were used to check the mechanical properties of the material and the dimensional accuracy of the printed objects. The dimensional accuracy was evaluated with the help of a 3D scanner. The results of the study showed that repeated filament production had very little effect on the mechanical properties and printability of the material. The reduction in the determined mechanical properties from the first to the last run amounts to about 5% for Young's modulus, about 2% for tensile or yield stress, and about 7% for breaking stress. A minimal reduction was also observed for dimensional stability over the entire component. This shows that repeated use of the starting material is suitable for reprocessing in filament production, thus old filament remnants or insufficient filament quantities can be processed into new filament.

Einleitung

Die additive Fertigung ist ein rapide wachsender Technologiezweig, dessen weltweiter Jahresumsatz innerhalb von zehn Jahren (2009 bis 2019) um das 11-fache angestiegen ist McCue [1]. In den kunststoffverarbeitenden Bereichen der additiven Fertigung war der Marktanteil der Fused Filament Fabrication (kurz FFF) Drucker bzw. Fused Deposition Modeling (kurz FDM) Drucker 2018 laut 3D-Hubs [2] mit ca. 70% der mit Abstand größte Anteil am Markt. Mit der enormen Beliebtheit des Verfahrens steigt im Umkehrschluss auch der Verbrauch des benötigten Kunststoff – Filaments. Unsere heutige Gesellschaft legt immer größeren Wert auf den nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen, sodass das Thema Recycling auch in der additiven Fertigung eine immer wichtigere Rolle einnimmt.

Song & Telenko [3] untersuchten das Abfallaufkommen bei der Nutzung von FDM-Druckern in einem MakerSpace. Es zeigte sich, dass 34,6 % des gedruckten Materials als Abfall verschwendet worden ist. Diese Abfälle entstehen durch Stützstrukturen, Filamentreste sowie durch Fehldrucke im FFF-Prozess. Dieses Ergebnis zeigt, dass ein Recyclingkreislauf für die eingesetzten Kunststoffe in der additiven Fertigung großes Potential besitzt. Das Life – Cycle Assessment von Zhao et al. [4] zeigte, dass ein Closed-Loop Recycling Ansatz zur Herstellung von Filament die nachhaltigste Option darstellt. Die Ergebnisse von Zhao et al. [4] demonstrieren jedoch auch, dass das verwendete Material nach zwei Recycling Zyklen nicht mehr für einen FFF-Drucker verwertbar war. Als Grund wird eine enorme Reduzierung der Schmelzviskosität des verwendeten Materials, in diesem Fall Polylactid (kurz PLA), genannt. Für die Ergebnisse von Zhao et al. [4] gilt jedoch, dass das verwendete Material nicht nur mehrfach extrudiert wurde, sondern auch mehrfach für den 3D-Druck genutzt wurde.

Die Ergebnisse von Cruz Sanchez et al. aus 2015 [5] zeigen, dass ein fünffacher Recycling-Prozess geringe Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften ausübt. Für den Recyclingprozess wurde das verwendet Filament mehrfach wiederverwendet. Dabei wurden die gedruckten Zugproben je Zyklus nicht für den darauffolgenden Zyklus verwendet. Das Zugmodul sowie die Bruchfestigkeit blieben über die Ergebnisse hinweg größtenteils konstant. In 2017 untersuchte Cruz Sanchez et al. [6] das Verhalten von PLA nach wiederholten Recyclingzyklen erneut. Hierzu analysierten Cruz Sanchez et al [6] vier verschiedene Recycling-Methoden für den Kunststoff PLA. Dabei durchlief das Material für jede Methode jeweils fünf Zyklen. Neben der Auswirkung der wiederholten Filamentherstellung, wurde ebenfalls die Auswirkung der mehrfachen Verwendung durch einen 3D-Drucker sowie den Spritzguss analysiert. Die Ergebnisse alle Methoden zeigten signifikante Minderungen in vielen relevanten Zugversuchskennwerten wie z.B. der Zugspannung, Bruchspannung und der Dehnung nach fünf Recyclingdurchläufen. Einzig das E-Modul zeigte einen kontinuierlichen Anstieg, welcher auf die Reduzierung der Viskosität und die damit geringe Anzahl an Poren in den gedruckten Proben zurückgeführt wurde. Für die Ergebnisse von Anderson [7] wurde neuwertiges PLA mit einmalig recyceltem PLA anhand verschiedener Probekörper verglichen. In Bezug auf die Kennwerte der Zugfestigkeit konnte eine Verminderung der Zugspannung um 10% nach nur einem Recycling- Zyklus festgestellt werden. Die anderen Kennwerte zeigten statistisch keine Änderungen. Für die Herstellung des recycelten Filaments wurden die Zugproben des neuwertigen Materials geschreddert und zu Filament extrudiert.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Forschungsergebnisse im Bereich der Materialwiederverwertung von PLA für die additiven Fertigung, untersucht die vorliegende Arbeit die wiederholte Wiederverwendung von PLA zur Filament Herstellung. Bei PLA handelt es sich um vielfach eingesetzten Kunststoff für das FFF-Verfahren, da sich das Material leicht verarbeiten lässt und ein technisch gut

ausgereiftes Eigenschaftsprofil besitzt. Für die Studie wurden fünf gleiche Recycling Zyklen nacheinander durchgeführt. Der genaue Ablauf der Zyklen wird in Kapitel 3 beschrieben. Um die Qualität des hergestellten Filaments zu bewerten, wurden mit Hilfe von Zugproben die mechanischen Eigenschaften bestimmt. Darüber hinaus wurde anhand an Benchmark Bauteilen überprüft, ob Änderungen im Materialverhalten über die fünf Zyklen in Bezug auf die Verarbeitung in einem handelsüblichen FFF-Drucker auftreten. Hierzu wurden außerdem die gedruckten Bauteile mit einem 3D-Scanner ganzheitlich vermessen und verglichen. Die Qualitätskontrolle von additiv gefertigten Objekten mit Hilfe von optischen Messgeräten wurde bereits in den Arbeiten von O. Holzmond et al [8] und W.Kwangwoo et al. [9] erfolgreich angewandt

Theorie

Kunststoff Recycling

Die Wiederverwertung von Kunststoffen hat aufgrund des zunehmenden Abfallaufkommens und der Begrenztheit von Rohstoffen einen wichtigen Stellenwert. Es wird dabei zwischen der werkstofflichen, rohstofflichen und energetischen Wiederverwertung unterschieden. Nach der Abfallhierarchie der Europäischen Gemeinschaft ist die stoffliche Wiederverwertung die erstrebenswerteste Behandlungsmethode [10]. Beim werkstofflichen Recycling werden Kunststoffabfälle zu Formmassen für die erneute Herstellung von Formteilen aufbereitet. Die Aufbereitung erfolgt dabei ausschließlich durch physikalische Behandlungen wie dem Filtern, Aufschmelzen, Compoundieren und Granulieren. Die Moleküle des Kunststoffs sollen bei dieser Wiederverwertung so unversehrt wie möglich bleiben. Als Ausgangsmaterial kommen hierbei nur Thermoplaste wie z.B. PLA in Frage. [11].

Im Fall der vorliegenden Arbeit wird das verwendete Material mehrfach aufgeschmolzen, zu Filament extrudiert und im Anschluss granuliert, wodurch das Material wiederholt einem mechanischen und thermischen Materialabbau bzw. einer Degradation ausgesetzt ist. Aufgrund dieser Zersetzung können Kunststoffe grundsätzlich nur in einer begrenzten Anzahl an Wiederholungen wiederverwertet werden, ehe das Material für die weitere Verwendung zu stark degradiert ist. Für die Herstellung von qualitativ hochwertigen Produkten aus Rezyklat, müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt werden. So darf das Polymer in der vorherigen Nutzphase nicht übermäßig geschädigt worden sein. Außerdem ist die Sicherstellung eines gewissen Kunststoffreinheitsgrads erforderlich [11, 12].

3D-Scan

3D-Scanner stellen die Möglichkeit dar, Objekte durch eine berührungslose optische Vermessung zu digitalisieren. Dabei können 3D-Scanner nach Marxer et al. [13] ihrem Funktionsprinzip oder ihrem Einsatzgebiet unterteilt werden. U.a. können als Funktionsprinzip z.B. die Streifenlichtprojektion oder das Lichtschnittverfahren genannt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Streifenlichtscanner verwendet. Solche Geräte bestehen aus einem Kameraobjektiv und einem Projektor, der ein zeitmoduliertes Lichtmuster auf das Bauteil projiziert. Zur Erstellung der 3D-Punktwolken wird eine Kombination aus dem Gray-Kode Verfahren und einem Phasenverschiebungsverfahren verwendet. [14]. Der Anwender muss für eine komplette Aufnahme eines Objektes, entweder das Objekt drehen oder den Scanner um das Objekt bewegen. Für jede neue Position erstellt der Scanner eine neue dreidimensionale Einzelansicht. Für die Darstellung des kompletten Bauteils werden alle erstellten Einzelansichten zu einem kompletten Modell zusammengeführt. Diese Zusammenführung wird auch als „Stitching“-Prozess bezeichnet. Die Genauigkeit des verwendeten Scanners liegt bei Objekten mit

einer reflektierenden Oberfläche bei ca. 20 µm [15]

Methoden und Material

Für die Untersuchung der Degradation von PLA durch die multiple Verarbeitung zu Filament mittels Extrusion werden insgesamt fünf Verarbeitungszyklen durchgeführt. Die eingesetzte Prozesskette ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Anfangs wird das Ausgangsmaterial beschrieben, sowie die Testkörper erläutert. Im Anschluss wird zunächst die gesamte Prozesskette kurz erläutert. Zuletzt werden die die Qualitätskriterien für die Evaluation beschrieben.

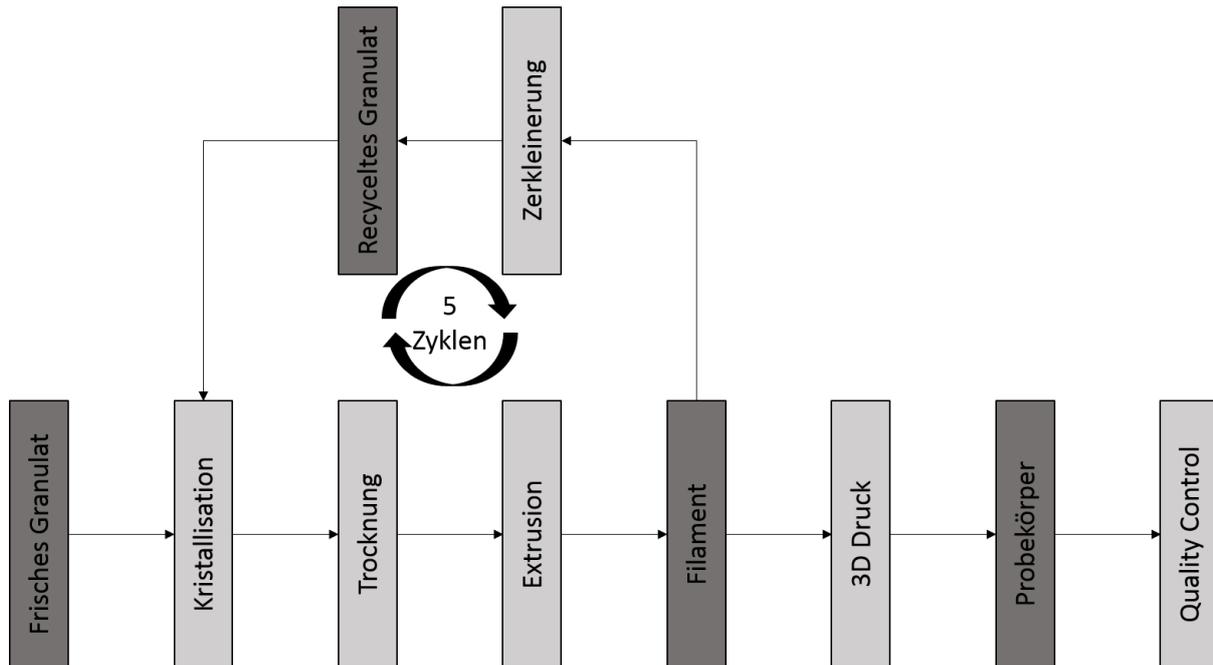


Abbildung 3-1 Angewandte Prozesskette für die Herstellung von recyceltem Material

Als Ausgangsmaterial der Versuchsreihe wird Granulat des Typs PLA-HS (High Strength) der W2 Polymer GmbH [16] eingesetzt. Dieser Polylactid-Typ ist zur Anwendung in der additiven Fertigung nach dem Schmelzschichtverfahren vorgesehen. Das Granulat hat eine Linsenform. Für die vorliegende Arbeit wurden insgesamt 5 kg PLA Granulat eingesetzt. Je Zyklus verringerte sich die Menge um den benötigten Filament Bedarf für die Testkörper. Es erfolgt dabei die Anfertigung von 2 Benchmark-Körpern zur Untersuchung des Verarbeitungsverhaltens und äußeren Erscheinungsbilds, sowie von 14 Probekörpern für den Zugversuch je Zyklus. Für die Zugproben Testkörper wird der Typ 1B gemäß DIN EN ISO 527-2:2012-06 [17] bzw. Typ A2 gemäß DIN EN ISO 20753:2019-02 [18] verwendet. Dieser Typ entspricht den vermehrt genutzten Probekörpern innerhalb der erwähnten Publikationen [5,6]. Zur Untersuchung der multiplen Extrusion bezüglich der Auswirkung auf das Verarbeitungsverhalten des Materials im FFF-Prozess und dem äußeren Erscheinungsbild gedruckter Bauteile, wird das #3DBenchy von Creative-Tools.com als Probekörpergeometrie lizenziert unter CC BY-ND 4.0 eingesetzt. Das #3DBenchy ist das geläufigste Objekt zum Testen von FFF-Druckern und Materialien. Für die Wiederverwertung des Materials wird nur das extrudierte Filament granuliert und anschließend im neuen Zyklus verwendet. Damit untersucht diese Arbeit nur den Einfluss von mehrfacher Filament – Extrusion. Der Einfluss von zusätzlich mehrfacher Nutzung in einem 3D-Drucker wird nicht erarbeitet. Die hier untersuchte Recycling Methode wird von Cruz Sanchez et al in 2015 und 2017 [5,6] ebenfalls untersucht, sodass ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen möglich ist. Je Durchlauf wurden die

Prozessparameter aus Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 über die in Abbildung 3-1 dargestellten Arbeitsschritte eingesetzt. Im Verlauf dieser Arbeit wird für die jeweiligen Zyklen folgende Nomenklatur verwendet: Die Zyklen werden fortlaufend nummeriert, der erste Zyklus wird als R0 betitelt, der fünfte Zyklus als R4.

Durch den Extrusionsprozess wird das Granulat zu Filament mit einem Solldurchmesser von 1,75 mm verarbeitet. Der Toleranzbereich des Durchmessers von handelsüblichem Filament beträgt ca. $\pm 0,05$ mm [16]. Für die Extrusion wurde die Anlage aus Abbildung 3-2 mit den angegebenen Prozessparametern aus Tab. 1 eingesetzt. Diese Anlage kam für die Ergebnisse von Anderson [7] ebenfalls zum Einsatz. Cruz Sanchez et al. [5,6] nutzten einen Doppelschneckenextruder mit drei Heizzonen.

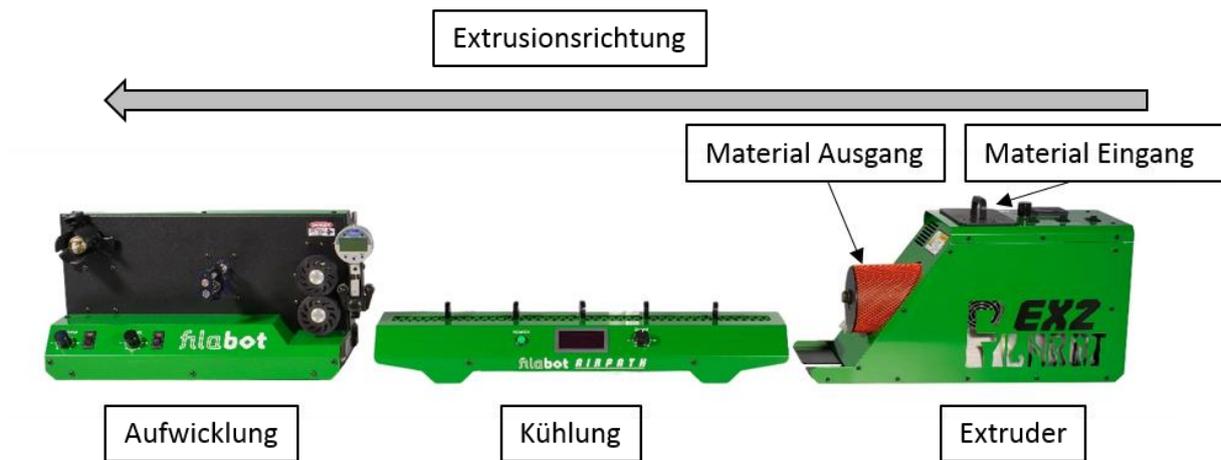


Abbildung 3-2 Filabot Filamaker Aufbau zur Erzeugung der Filamente

Tabelle 3-1 Prozessparameter der jeweiligen Prozessschritte zur Erzeugung der Filamentproben

Kristallisation	
Temperatur in [°C]	95
Dauer in [min]	30
Menge je Durchgang in [kg]	1
Anzahl Durchgänge	5
Trocknung	
Temperatur in [°C]	85
Dauer in [h]	4.5
Menge je Durchgang in [kg]	1
Anzahl Durchgänge	5
Extrusion	
Düsendurchmesser in [mm]	1.75
Temperatur in [°C]	183
Drehzahl der Schnecke in [1/min]	14
Lüfterdrehzahl in [%]	100
Wicklungsgeschwindigkeit in [cm/s]	3.4 – 4.0

Das Filament wird im nachfolgenden Arbeitsschritt zur Herstellung von Testkörpern mittels FFF-Prozess eingesetzt. Für die Herstellung der Testobjekte wird der Original Prusa i3 MK3S eingesetzt. Die Ausrichtung der Modelle auf dem Druckbett ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Druckparameter sind in Tabelle 3-2 aufgelistet.

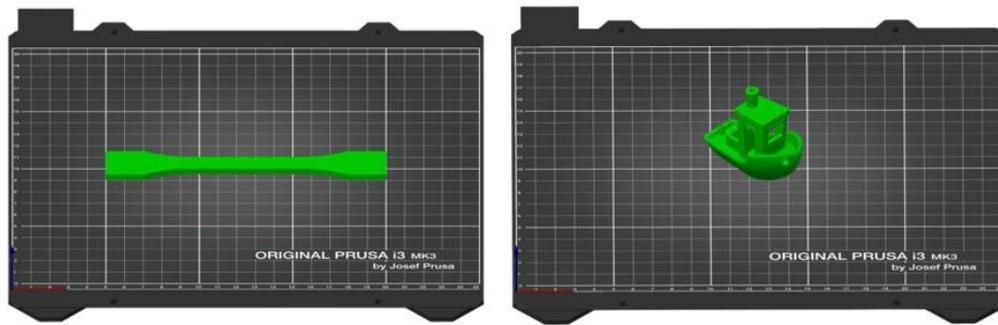


Abbildung 3-3 Darstellung der Positionierung und Ausrichtung der gedruckten Testkörper. Links der Zugprobenkörper. Rechts das #3D-Benchyboot

Da lediglich die Auswirkung der Verarbeitungszyklen auf die Zugeigenschaften untersucht und nicht die vollständige Steifigkeitsmatrix des Materials bestimmt werden soll, erfolgt die Anfertigung der Probekörper im FFF-Prozess mit nur einer Bauteilorientierung. Dies stimmt mit den Vorhergehensweisen von [5-7] überein. Die Druckparameter stammen aus Angaben des Granulatherstellers und wurden übernommen.

Tabelle 3-2 Prozessparameter für die jeweiligen Probekörper für den Prozessschritt 3D-Druck.

<u>Kategorie</u>	<u>Parameter</u>	<u>Einstellung Benchmarkkörper</u>	<u>Einstellungen Zugprobekörper</u>
Filament	Durchmesser	gemittelter Durchmesser der jeweiligen Filamentspule	gemittelter Durchmesser der jeweiligen Filamentspule
	Extrusionsfaktor	1	1
	Dichte	1,24 g/m ³	1,24 g/m ³
	Temperatur Extruder	205 °C	205 °C
	Temperatur Druckbett	60 °	60 °
Kühlung	Lüftergeschwindigkeit	100 %	100 %
	Anzahl der ersten Schichten ohne Lüfter	2	2
Schichten und Umfänge	Schichthöhe	0,15 mm	0,2 mm
	Höhe der ersten Schicht	0,2 mm	0,2 mm
	Anzahl der Konturen	2	2
	Anzahl der massiven Schichten für Decke/Boden	5	2
	Nahtposition	Hinten	Nächste
Infill	Füllichte	25 %	100 %
	Füllmuster	Gitternetz	Gradlinig
	Decken-/Bodenfüllmuster	Geradlinig	-
	Füllwinkel	45/-45 °	45/-45 °
Geschwindigkeit	Konturen	25 mm/s	45 mm/s
	Außenkonturen	25 mm/s	25 mm/s
	Infill	40 mm/s	80 mm/s
	Eilgang	80 mm/s	80 mm/s
	Druckgeschwindigkeit der ersten Schicht	20 mm/s	20 mm/s
Sonstiges	Standardextrusionsbreite	0,45 mm	0,45 mm
	Infill/Kontur Überlappung	20 %	
	Elefantenfußkompensation	0,1 mm	

Das restliche Filament wird im Zerkleinerungsprozess zu Regranulat verarbeitet. Im Anschluss kann das hergestellte Regranulat zur erneuten Verarbeitung für den nächsten Zyklus eingesetzt werden. Zu diesem Zweck werden die bisherig beschriebenen Prozessschritte wiederholt.

Zuletzt werden die festgelegten Qualitätsmerkmale evaluiert. Folgende Kriterien werden über den Verlauf der Prozesskette analysiert und bewertet:

- Modellbeschaffenheit und Flächenvergleich #3D–Benchy
- Maßhaltigkeit der gedruckten Zugproben
- Mechanischen Eigenschaften der Zugproben

Für die Modellbeschaffenheit des #3D-Benchy werden jeweils zwei Modelle pro Zyklus angefertigt und das bessere der beiden für den Qualitätsvergleich eingesetzt. Auf diese Weise ist die Kompensation von unvorhersehbaren Schwankungen im 3D-Druck sichergestellt und somit wird das bestmögliche Modell ausgewertet. Der Vergleich wird hinsichtlich Kriterien wie dem Farbton, der Oberflächenbeschaffenheit, der Fädenbildung, dem Verzug sowie den Schwierigkeiten bei der Modellherstellung z.B. durch Verstopfung der Düse oder einer schlechten Betthaftung vollzogen.

Für den Flächenvergleich der #3D-Benchy-Boote wurden je Zyklus ein Probekörper mit Hilfe eines 3D-Scanners erfasst. Für die vorliegende Arbeit kam ein Comet L3D 5M der Firma Zeiss zum Einsatz. Dieser Streifenlichtscanner erfasst mit Hilfe eines zeitlich modulierten schwarz blauem Lichtmuster die Oberfläche von Objekten. Der Arbeitsabstand des Scanners beträgt 750 mm. Für die Erstellung der Punktwolke wurde das Objekt mit Hilfe eines vollautomatischen Drehtisches zwischen den Einzelaufnahmen gedreht. Damit die Punktwolke möglichst viel Informationen enthält, wurde das Objekt aus zwei unterschiedlichen Positionen erfasst. Für jede Position wurde mit Hilfe des Drehtisches das Objekt um insgesamt 360° in 12 Einzelaufnahmen gedreht, daher besteht die Punktwolke aus insgesamt 24 Einzelaufnahmen. Für ein besseres Ergebnis wurden die gedruckten Testkörper mit einem Mattierungsspray eingesprüht. Für den Flächenvergleich wurde ein Soll/Ist- Vergleich mit dem STL-Körper des #3D-Benchy erstellt. Als Sollkörper dient die STL-Datei des #3D-Benchy-Boots, auf dessen Basis die additive Fertigung der Modelle erfolgte. Der Ist-Körper entspricht dann dem jeweiligen Scan des untersuchten Probekörpers. Für die Ausrichtung der Daten wurden die Auflagefläche des Bootes auf dem Druckbett verwendet.

Die Bestimmung der Maßhaltigkeit der Zugproben erfolgt mit einem digitalen Mikrometer sowie einer digitalen Schieblehre. Die Sollmaße der Zugproben sind in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Tabelle 3-3 Sollmaße inkl. Toleranzbereiche des Zugprobekörpers 1B aus der [17, 18]

Maße	Sollwert [mm]	Toleranzbereich [mm]
Gesamtlänge l_3	≥ 150	/
Länge des engen parallelen Teils l_1	60	± 0.5
Radius r	60	± 0.5
Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten l_2	108	± 1.6
Breite an den Enden b_2	20	± 0.2
Breite des engen Teils b_1	10	± 0.2
Bevorzugte Dicke h	4	± 0.2

Für die Auswertung werden die Maße b_1 und h aus Abbildung 3-4 ermittelt. Zu diesem Zweck werden für jedes Maß drei Messungen unternommen und die Werte arithmetisch gemittelt.

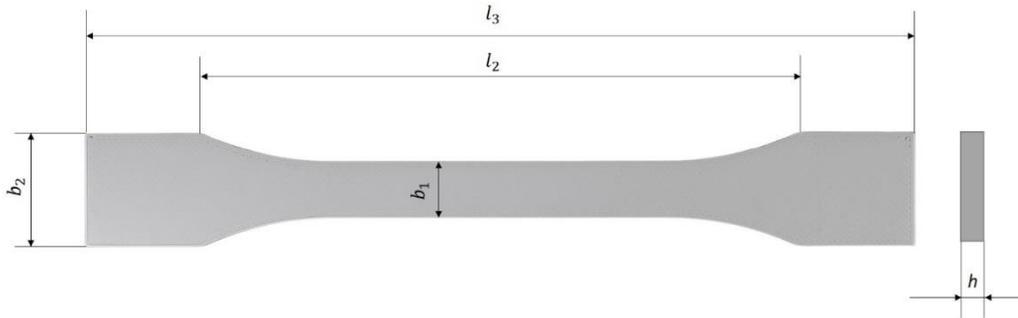


Abbildung 3-4 Darstellung der wichtigen Maße für die Zugprobekörper aus [17, 18]

Diese Maße ergeben die Anfangsquerschnittsfläche der Probe und sind deshalb für die Ermittlung der Spannung beim Zugversuch erforderlich. Die Durchführung der Zugversuche erfolgt erst nach vollständiger Verrichtung sämtlicher Verarbeitungszyklen. Auf diese Weise können dieselben Umgebungsbedingungen (z.B. Klima) für die Probekörper der unterschiedlichen Zyklen sichergestellt werden. Die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der gedruckten Zugproben erfolgt nach den DIN EN ISO Normen [17-21]. Laut Norm fallen die Spannungs- Dehnungs-Diagramme von Kunststoffen in eine von vier Kategorien. Der für PLA typischer Verlauf ist in Abbildung 3-5 verallgemeinert dargestellt.

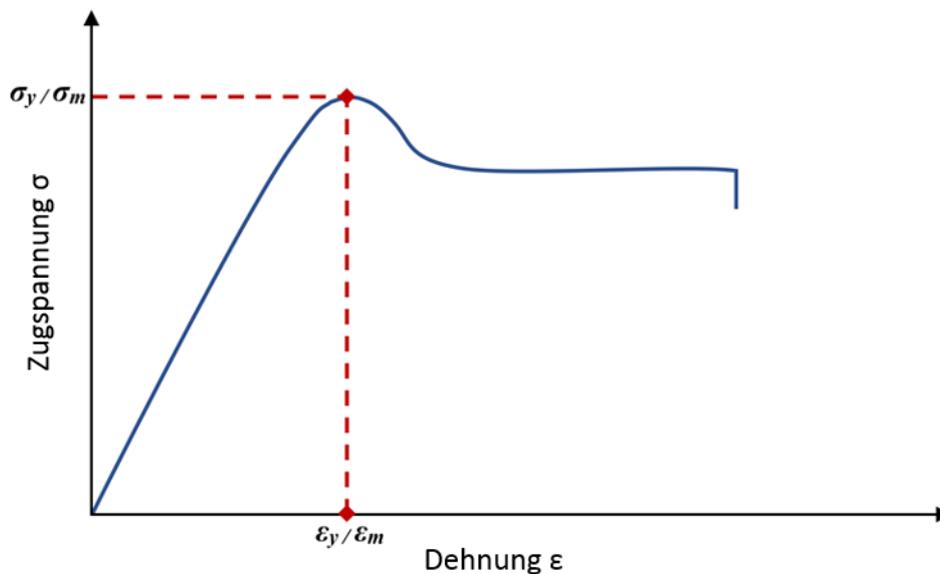


Abbildung 3-5 Verallgemeinerter Verlauf des Spannungs-Dehnungs-Diagramms für den Werkstoff PLA. In Anlehnung an [18]

Die in den späteren Diagrammen dargestellte Zugfestigkeit entspricht somit der Zugfestigkeit bzw. Streckspannung laut DIN EN Norm. Der Zugmodul E wird über die Steigung einer Regressionsgerade für die Spannungs-/Dehnungs-Werte im Dehnungsbereich von $0,0005 \leq \epsilon \leq 0,0025$ bestimmt. In diesem Fall werden die Dehnungswerte dimensionslos eingesetzt [18]. Für den Zugversuch wird die Universalprüfmaschine MTS 20/M verwendet. Zusätzlich kommt der Extensometer MTS 634.25F-54 zum Einsatz. Mit dem Extensometer wird die Längenänderung der Probekörper bis zur Streckdehnung aufgezeichnet. Oberhalb der Streckdehnung wird die Längenänderung über die Querschnittsveränderung der Prüfmaschine ermittelt. Die ausgewählten Parameter für die Zugprüfung basieren auf den Angaben aus den Normen [17,18,20,21]. Die Parameter für die Zugversuche stehen in Tabelle 3-4 Prozessparameter für die durchgeführten Zugversuche Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4 Prozessparameter für die durchgeführten Zugversuche

Kategorie	Parameter	Einstellung
Probekörper	Anzahl	14
	Messlänge L_0	50 mm
Spanneinrichtung	Art der Spannvorrichtung	Keilspannzeug
	Klemmabstand L	115 mm
Prüfgeschwindigkeiten	Prüfgeschwindigkeit v_1	1 mm/min
	Umschaltpunkt $v_1 \rightarrow v_2$	Dehnung $\varepsilon_2 = 0.25 \%$
	Prüfgeschwindigkeit v_2	50 mm/min
Prüfklima	Umgebungstemperatur	$21.6 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$
	Relative Luftfeuchtigkeit	$42 \pm 1.2 \%$ RH

Die erforderliche Prüfgeschwindigkeit für den Zugmodul gemäß der Normen [21,21], unterscheidet sich von der benötigten Geschwindigkeit für die anderen Kenngrößen wie z.B. der Bruchspannung [20,21]. Aus diesem Grund ist die Geschwindigkeit für den Zugversuch so gewählt, dass das Querhaupt zu Beginn der Prüfung mit 1 mm/min verfährt. Diese Prüfgeschwindigkeit wird für den gesamten Dehnungsbereich zur Ermittlung des Zugmoduls angewendet. Im Anschluss daran ändert sich die Geschwindigkeit des Querhaupts auf 50 mm/min und wird für den restlichen Verlauf des Versuchs eingehalten. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, alle Kenngrößen für eine Zugprobe innerhalb eines Durchlaufs zu ermitteln. Dabei ist die beschriebene Prozedur mit den Richtlinien von [18] konform

Ergebnisse

In einem ersten Schritt erfolgte die Fertigung der 3D-Benchy-Boote. Ein rein optischer Vergleich zwischen den gedruckten Probekörper von Zyklus R0 – R4 ist in Abbildung 4-6 zu sehen.



Abbildung 4-6 Visueller Vergleich der gedruckten Testkörper. Ganz links steht der Testkörper des ersten Zyklus (R0), ganz rechts der Probekörper des letzten Zyklus (R4)

Aus dem rein visuellen Vergleich ist kein direkter Unterschied zwischen den Probekörpern zu erkennen. Der Flächenvergleich basierend auf den 3D-Scans ist in Abbildung 4-7 demonstriert. Der Flächenvergleich wurde für das Benchyboot aus dem ersten Zyklus (R0) und dem letzten Zyklus (R4) durchgeführt.

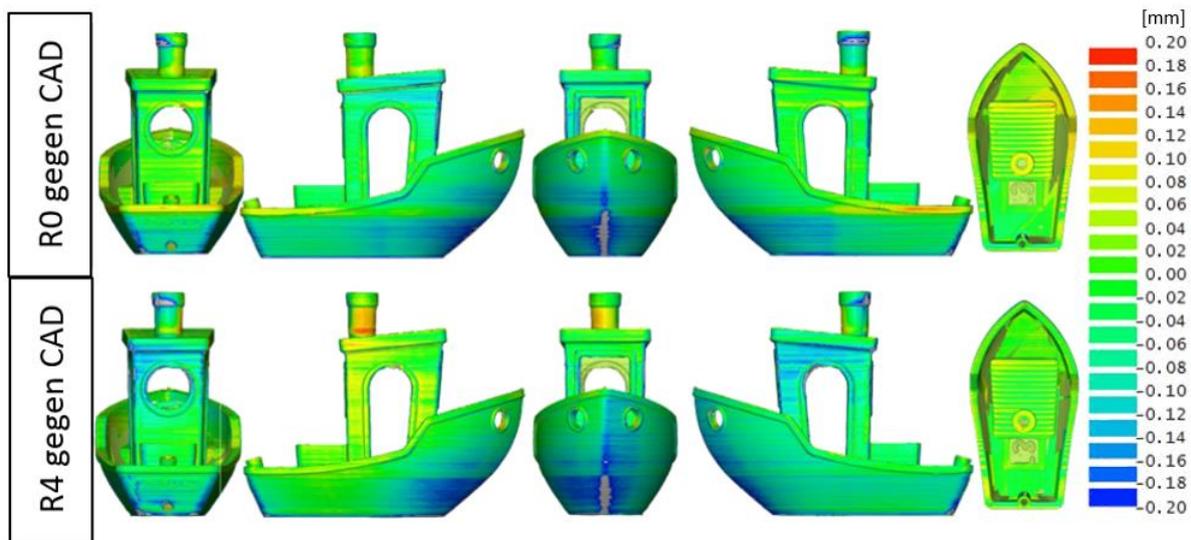


Abbildung 4-7 Soll/Ist Flächenvergleich für drei Benchyboote. Oben der Vergleich für das Boot aus dem ersten Zyklus (R0). Unten ist der Abgleich für das Boot des fünften Zykluses (R4).

Für den Flächenvergleich ist der Probekörper aus den fünf relevanten Ansichten zu sehen. Die Ansicht von unten ist nicht in der Übersicht enthalten, da diese Fläche als Ausgangsfläche für den Überlagerungsprozess diente. Somit entstanden an der unteren Fläche keine Abweichungen. Die roten Bereiche des Vergleiches entsprechen einem Übermaß des Ist-Körpers bezogen auf den Sollkörper. Blaue Bereiche spiegeln ein Untermaß wieder, hier ist der Ist-Körper kleiner als der Soll-Körper. Graue Bereiche fallen außerhalb der angezeigten Abweichungsskala von ± 0.2 mm.

Nachfolgend wurden die Zugproben gefertigt und auf Maßhaltigkeit überprüft. Für den Vergleich wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen je Maß über die jeweiligen Zyklen berechnet. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-5 Überprüfung der Maßhaltigkeit der gedruckten Zugprobekörper für alle Recyclingzyklen.

Recyclingzyklus	Dicke [mm]		Breite Einschnürung [mm]	
	Mittelwert \bar{h}	s	Mittelwert \bar{b}_1	s
R0	4,04	0,02	9,98	0,02
R1	4,01	0,02	9,94	0,02
R2	4,03	0,04	9,97	0,03
R3	4,03	0,02	9,96	0,02
R4	4,01	0,01	9,95	0,01

Die aufgelisteten Maße h und b_1 aus Tabelle 4-5 sind die wichtigsten Maße für die späteren Zugversuche, da mit diesen Parametern die Fläche der Zugproben bestimmt wird. Die Toleranzen für die jeweiligen Maße der Zugprobe sind in Tabelle 3-3 zu sehen.

Im Anschluss wurden die Zugversuche durchgeführt. Abbildung 4-8 zeigt beispielhaft die Spannungs-Dehnungs-Diagramme der 14 Zugproben aus dem fünften Zyklus R4.

Zyklus R4 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm

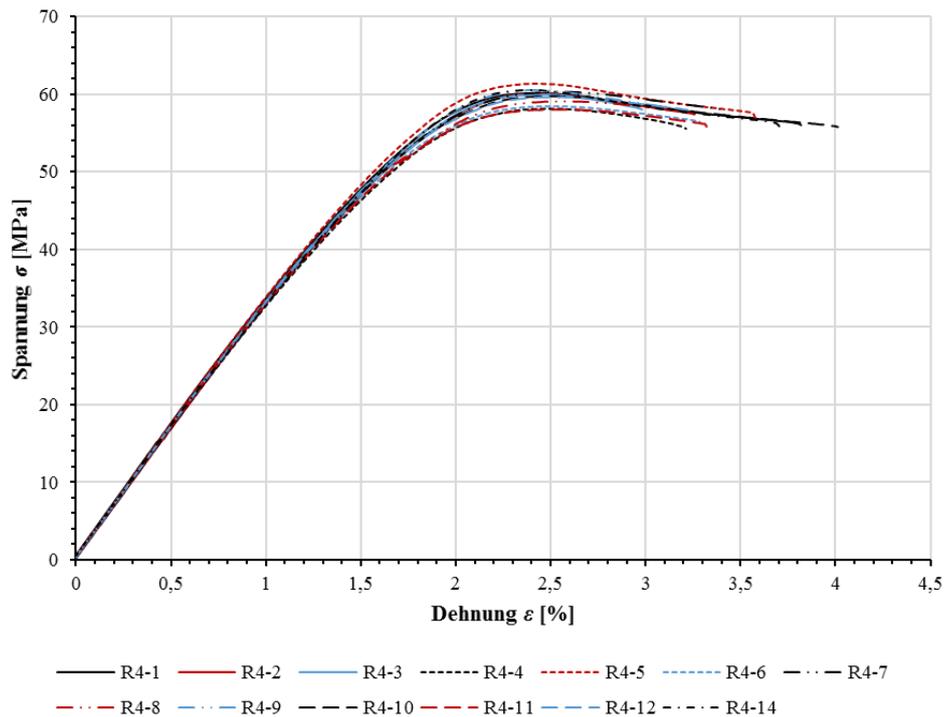


Abbildung 4-8 Spannungs-Dehnungs Diagramme für die Zugproben des fünften Zykluses.

Das Diagramm in Abbildung 4-8 demonstriert ein konstantes Verhalten der Probekörper. Des Weiteren ist gut zu erkennen, dass der in Abbildung 3-5 dargestellte allgemeine Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve das abgebildete Verhalten in Abbildung 4-8 hinreichend gut beschreibt.

In den Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 sind die Resultate der Zugversuche zu sehen. Abbildung 4-9 stellt die Übersicht über die jeweiligen E-Module dar.

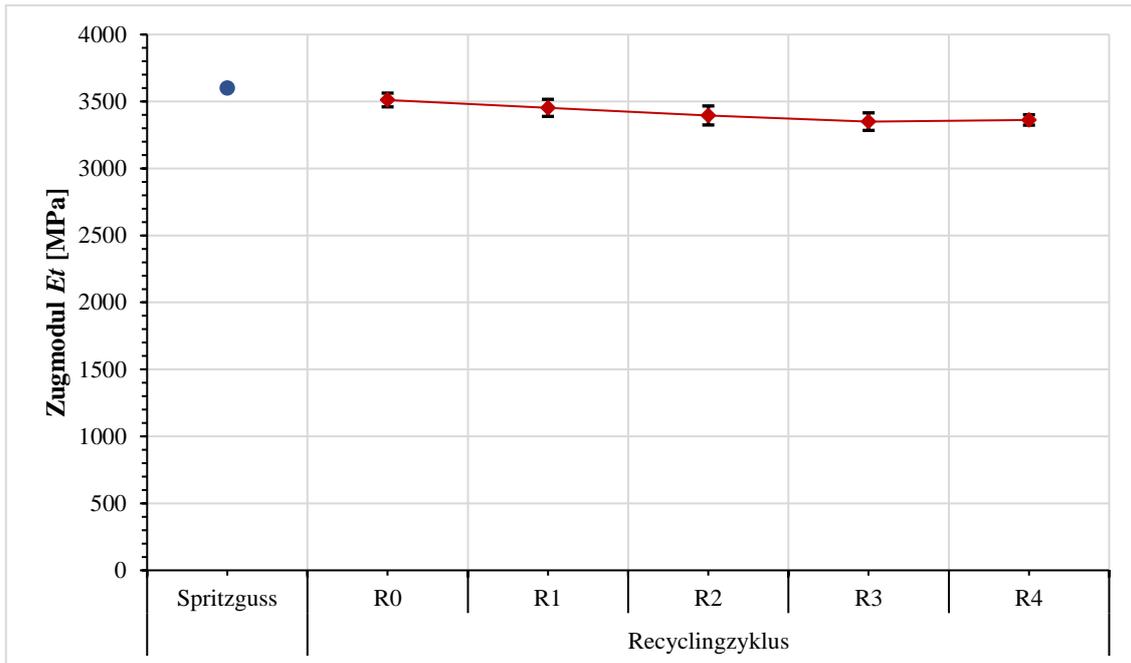


Abbildung 4-9 Darstellung der gemittelten E-Module über die fünf Recyclingzyklen.

Bei den dargestellten Messwerten in Abbildung 4-9 handelt es sich um die Mittelwerte auf Basis der jeweils 14 Zugproben des jeweiligen Recyclingdurchlaufes. Die gemittelte E-Module zeigen nur geringe Schwankungen und es zeichnet sich ein schwacher Abfall des E-Moduls ab. Der Hersteller gibt als Referenzdaten Werte aus dem Spritzguss an. Es ist davon auszugehen, dass die Angaben aus dem Spritzguss leicht über den gedruckten Werten liegen. In Abbildung 4-10 sind die Zugfestigkeit und Bruchspannungen der Probekörper abgebildet. Da die Streckspannung mit der Zugfestigkeit gleichzusetzen ist, wurde auf die explizite Darstellung der Streckspannung verzichtet.

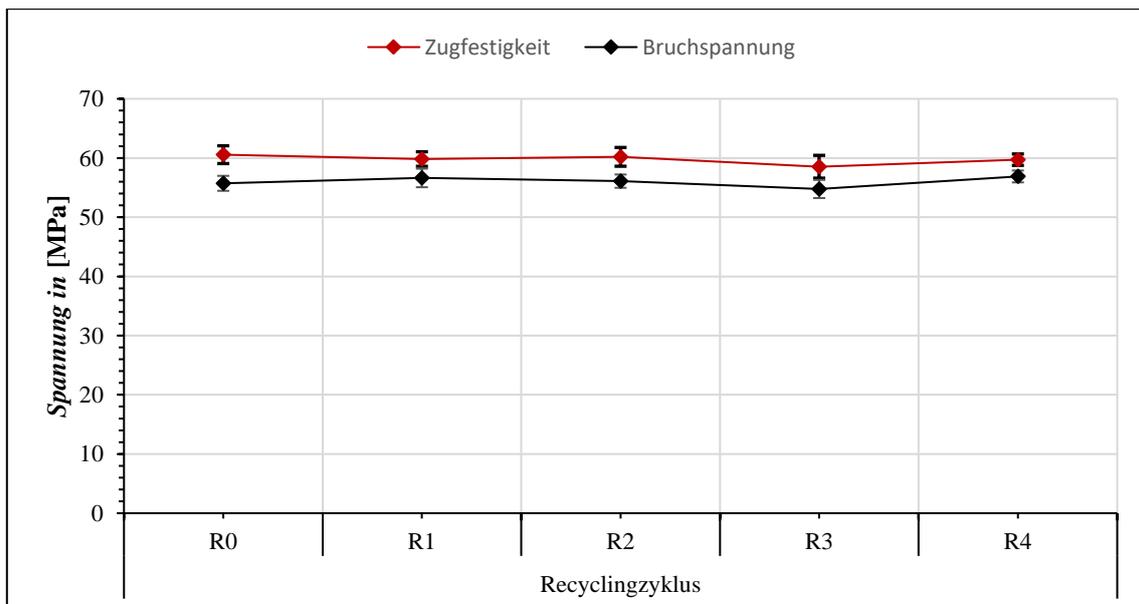


Abbildung 4-10 Darstellung der gemittelten Zugfestigkeit und Bruchspannung über die fünf Recyclingzyklen

Abbildung 4-10 demonstriert, dass die ermittelten Werte der Zugfestigkeit und der Bruchspannung nur gering schwanken. Der Verlauf der Zugfestigkeit bleibt über die Recyclingzyklen nahezu konstant. Die Werte der Bruchspannung hingegen durchlaufen leichte Änderung.

Da die Daten der aufeinander folgenden Recyclingzyklen augenscheinlich alle sehr nah aneinander liegen, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Die zu testende Nullhypothese ist, dass das Recycling Verfahren keine Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Ausgangsmaterials PLA hat. Die Alternativhypothese lautet dementsprechend, dass die wiederholte Wiederverarbeitung des Kunststoffes die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Das Signifikanzniveau liegt bei 5% bzw. $\alpha = 0.05$. die Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 4-6 aufgelistet.

Tabelle 4-6 Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse für die Ergebnisse der Zugversuche.

	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
E-Modul	15.50	5.93E-09	2.513
Zugfestigkeit	3.80	0.0077	2.513
Bruchspannung	5.61	0.0006	2.513

Aus der Varianzanalyse geht hervor, dass die Nullhypothese wiederlegt wird und somit die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes durch die wiederholte Wiederverarbeitung beeinflusst werden.

Diskussion

Die Filamentspulen sämtlicher Verarbeitungszyklen wurden ohne Schwierigkeiten im 3D-Druckprozess verarbeitet. Im Gegensatz zu den Resultaten in der Publikation von Anderson [7], treten keine Extrusionsunterbrechungen durch die Verstopfung der Düse auf. Zudem haben die hergestellten Filamente eine gute Druckbetthftung und das Material der einzelnen Bauteilschichten wird gleichmäßig aufgetragen. Die letztendlich erlangten #3D-Benchy-Boote aus Abbildung 4-6 weisen eine ebene Oberflächenbeschaffenheit, die Abweichungen liegen zwischen -0,2 und 0,2mm, sowie eine gute Kanten- und Detailwiedergabe auf. Die Neigung zur Ausbildung von Fäden (Stringing) ist für alle Kreisläufe gering. Bei der Gegenüberstellung der Benchmark-Körper aus den verschiedenen Verarbeitungszyklen ist hinsichtlich des äußeren Erscheinungsbilds kein Unterschied feststellbar. Somit verursacht die multiple Extrusion von PLA im Rahmen der Versuchsreihe keinen Qualitätsverlust bezüglich der äußeren Gestalt. Diese Erkenntnis weicht somit von den Resultaten aus der Publikation von Zhao et al [4]. ab. In der Untersuchung von Zhao et al. konnte das PLA-Filament nach dem zweiten Zyklus aufgrund eines drastischen Abfalls der Viskosität nicht mehr verarbeitet werden. In diesem Zusammenhang muss angemerkt werden, dass das Material in deren Untersuchung zusätzlich der mehrfachen Verarbeitung im 3D-Drucker ausgesetzt worden ist. Dieser Faktor stellt den möglichen Auslöser für die stärkere Degradation dar.

Der Flächenvergleich aus Abbildung 4-7 demonstriert die Maßhaltigkeit der gedruckten #3D-Benchyboote. Der Vergleich zwischen dem Boot des ersten Zyklus (R0) und des letzten Zyklus (R4) zeigt, dass die Maßhaltigkeit mit steigendem Recyclingzyklus geringfügig abnimmt. Die beiden Seitenansichten demonstrieren diesen Sachverhalt am besten. Der Bereich unterhalb des Schornsteins des R0-Bootes weist ein leichtes Untermaß auf (2. Bild der oberen Reihe der Oberflächenvergleiche aus Fig. 9). Die gleiche Geometrie hat beim Probekörper des letzten Zyklus ein leichtes Übermaß und der Schornstein zeigt eine orange-rote Verfärbung, die beim Boot des ersten Zyklus nur geringe Abweichungen hatte. Solche Bereiche lassen sich auch in den anderen Ansichten finden, sodass von einer Verschlechterung der Maßhaltigkeit durch wiederholtes Recycling ausgegangen werden kann. Die Ursache für die Verschlechterung liegt vermutlich in der verringerten Viskosität des recycelten Materials. Das Druckergebnis wird auch nach dem letzten Zyklus als gut bewertet.

Wie für die Benchmark-Körper zuvor, erfolgt auch die Herstellung der Zugproben für sämtliche Kreisläufe reibungslos. Aus Tabelle 4-5 wird deutlich, dass sich die arithmetischen Mittelwerte der ausgewerteten Maße inkl. der Standardabweichungen Kreislauf gut mit den Sollmaßen des Probekörpertyps 1B decken. Dabei ist keine Verschlechterung der Maßhaltigkeit mit konsekutiven Verarbeitungszyklen feststellbar. Dies steht im Kontrast zu den Ergebnissen aus Abbildung 4-7, jedoch muss hier beachtet werden, dass die Geometrien des #3D-Benchy Bootes im Vergleich deutlich komplexer ausfallen, sodass eine maßhaltige Fertigung ebenfalls schwieriger ist.

Die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse aus Tabelle 4-6 zeigt, dass für alle mechanischen Eigenschaften die zunächst aufgestellte Nullhypothese wiederlegt wird. Die jeweiligen Prüfgrößen sind größer als der kritische Wert und der P-Wert ist kleiner als das zuvor festgelegt $\alpha(0.05)$. Die Varianzanalyse demonstriert, dass für das E-Modul eine stärkere Aussage getroffen werden kann, als für die restlichen Eigenschaftswerte, dessen Prüfgröße F nur knapp über dem kritischen Wert F liegen. Wichtig dabei ist zu beachten, dass die Analyse keinen Aufschluss gibt ab welchem Zyklus die Nullhypothese wiederlegt wird. Jedoch kann gesagt werden, dass die hier präsentierten mechanischen Eigenschaften durch das wiederholte Recycling des Filamentes beeinflusst werden, unklar ist jedoch

ab welchem Zyklus die ermittelten Werte sich signifikant unterscheiden.

Aus Abbildung 4-9 für die Gegenüberstellung des Zugmoduls über die Recyclingzyklen kann, anders als bei den Untersuchungen von Cruz Sanchez et al. (2015 & 2017) [5,6], die eine Erhöhung des E-Moduls feststellten, eine geringfügige Verminderung des Zugmoduls durch die multiple Extrusion festgestellt werden. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass sich die Vertrauensbereiche von konsekutiven Zyklen teilweise überschneiden und deshalb nicht eindeutig unterscheiden. Insgesamt reduziert sich der Zugmodul von Zyklus R4 um ca. -4,2 % gegenüber dem von Zyklus R0. Damit stehen diese Ergebnisse im Kontrast zu den Resultaten von Anderson [7], die bereits nach einem Zyklus eine Reduzierung von -6% aufzeichnete. Ein Grund für die möglichen Unterschiede des E-Moduls ist die Drucktemperatur, welche bei Cruz Sanchez et al. [5,6] 15°C kälter ist. Die höhere Temperatur könnte eine bessere Haftung der einzelnen Probenschichten zur Folge haben. Allerdings gibt der Granulathersteller an, dass die Düsentemperatur innerhalb dieses Wertebereichs keinen Einfluss auf die Zugeigenschaften hat [16].

Die vom Hersteller angegebene Zugfestigkeit für gedruckte Probekörper von 67.37 MPa [16] ist merklich höher als der hier erreichte Wert von 60.6 MPa des ersten Zyklus (R0), welcher in Abbildung 4-10 zu sehen ist. Die Herstellerangabe für die Zugfestigkeit scheint dabei eine Ausnahmeerscheinung zu sein, da diese auch die experimentellen Ergebnisse von vorangegangenen Publikationen zu diesem PLA Typen deutlich überschreitet [5,6]. Weiterhin ist aus Abbildung 4-10 ersichtlich, dass die Zugspannung nach fünf Verarbeitungszyklen einer Änderung von knapp -1.4 % unterliegt. Die steht in einem starken Kontrast zu den Ergebnissen von Cruz et al. aus 2017 [6]. Dessen Ergebnisse zeigten Verringerungen die zwischen 20 – 71 % lagen, je nach Recycling Prozess Kette. Eine Begründung kann die Extrusionstemperatur bei der Filamentherstellung sein. Der Filamaker der Firma Filabot verfügt nicht über unterschiedliche Heizzonen, sodass das Material mit einer einheitlichen Temperatur aufgeschmolzen wird. Bei Cruz Sanchez et al. [5,6] kam eine Doppelschnecken Extrusionsanlage zum Einsatz die über drei Heizzonen verfügte, die bei der Filamentherstellung unterschiedliche Temperaturen hatten. Bei der Betrachtung des Herstellungsprozesses fällt außerdem auf, dass die Drehzahl der Schnecken bei Cruz Sanchez et al. mit einem Wert von 60 rpm deutlich schneller war, als die hier verwendeten 14 rpm (s. Tabelle 3-1). Die unterschiedlichen Verhältnisse bei der Filamentherstellung könnten eine Ursache sein und sollten in zukünftigen Arbeiten untersucht werden. Eine weitere mögliche Begründung kann aus den hier präsentierten Ergebnisse nicht gefunden werden, da bei den Arbeiten von Cruz et al das gleiche Ausgangsmaterial verwendete wurde wie in dieser Arbeit.

Die Ergebnisse der Bruchspannung aus Abbildung 4-10 demonstrieren ein nahezu konstantes Verhalten. Bei genauerer Betrachtung lässt sich ermitteln zwischen der Bruchspannung des ersten Zyklus (R0) und des letzten Zyklus eine Steigerung der Bruchspannung von 2% stattgefunden hat. Diese Beobachtung passt zu den experimentellen Prüfergebnissen von Cruz Sanchez et al. (2015) [5] für Probekörper desselben PLA Typs. Dies steht in einem direkten Kontrast zu den Ergebnissen von Cruz Sanchez et al. aus 2017 [6], wo für die Bruchspannung für alle Recycling Prozessketten eine Reduzierung zwischen 15 – 73% festgestellt wurde.

Die beschriebenen Prüfergebnisse dieser Arbeit zeigen somit auf, dass die multiple Filament-Extrusion mit einem Einschneckenextruder der Firma Filabot keinen merklichen Einfluss auf die Zugeigenschaften gedruckter Probekörper, mit Ausnahme des Zugmoduls, hat. Der Zugmodul hat nach fünf Verarbeitungszyklen um 4,2 % abgenommen. Die Erkenntnisse stehen mit den Ergebnissen

vorangegangener Publikationen im Einklang, bei denen die Auswirkung der multiplen Extrusion auf PLA untersucht worden ist. Im Vergleich zu diesen Publikationen ist die Veränderung der Kenngrößen noch geringer ausgefallen [5]. Eine mögliche Ursache für diesen Unterschied können die erwähnten Differenzen bei den Parametern für den 3D-Druckprozess sein. Im Gegensatz dazu, unterscheiden sich die Resultate deutlich von Arbeiten, bei welchen das PLA nicht nur mehrfach extrudiert, sondern auch wiederholt im 3D-Druckprozess verarbeitet worden ist. In solchen Publikationen geht mit der wiederholten Verarbeitung, ein drastischer Abfall der Zugeigenschaften einher [4,6,7].

Fazit

Die hier präsentierte Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen von mehrfachem Recycling auf die mechanischen Kennwerte, sowie das Verarbeitungsverhalten in der additiven Fertigung für den Kunststoff PLA. Es wurden fünf gleichbleibende Recyclingzyklen durchgeführt, dabei wurde das Ausgangsmaterial zu Filament verarbeitet, im Anschluss wurden je Zyklus 16 Probekörper angefertigt, 14 Zugproben und 2 #3D-Benchyboote. Der Rest des Filaments wurde mit Hilfe eines Granulators zu Pellets verarbeitet und dann erneut zu Filament extrudiert. Ausgehend von dieser Methodik erfolgte in dieser Arbeit die Analyse der Auswirkungen der mehrfachen Wiederwendung des Ausgangsmaterials zur Filamentherstellung. Die Qualität des Materials des jeweiligen Kreislaufs ist evaluiert worden. Als Merkmale sind der Filamentdurchmesser, das Verarbeitungsverhalten im 3D-Drucker sowie die Qualität gedruckter Bauteile hinsichtlich des äußeren Erscheinungsbilds, der Maßhaltigkeit und der mechanischen Eigenschaften untersucht worden. Die Resultate zeigten, dass für alle Zyklen ein durchgehend konstanter Filamentdurchmesser erzielt werden konnte. Die Ergebnisse für die Maßhaltigkeit der #3D-Benchyboote zeigte, dass die Maßhaltigkeit mit zunehmender Wiederverwendung abnimmt, die Werte aber alle noch innerhalb des festgelegten Toleranzfeldes von ± 0.2 mm lagen. Der Grund für die reduzierte Maßhaltigkeit ist die höhere Fließrate des Materials, aufgrund der Recycling Zyklen. Diese Vermutung kann durch die präsentierten Schliffbilder der getesteten Zugproben bestätigt werden, da die Zugprobe des letzten Zyklus deutlich weniger Poren zeigte, als eine Probe des zweiten Zyklus. Die mechanischen Eigenschaften wurden durch die mehrfache Wiederwendung nur geringfügig reduziert. Bei manchen Kennwerten wie z.B. der Bruchspannung konnte sogar eine Steigerung aufgezeigt werden. Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Tabelle 6-7 aufgelistet.

Tabelle 6-7 Auflistung der relativen Änderung der untersuchten Werkstoffkennwerte nach fünf Recyclingzyklen

	E-Modul	Zugfestigkeit	Bruchspannung
Nach 5 Zyklen	-4.2 %	-1.4%	+2.0%

Damit stehen die Ergebnisse im Kontrast zu Resultaten aus vorangegangenen Arbeiten, welche sich jedoch auch bereits vor dieser Arbeit z.T. widersprochen haben. Ein Grund dafür könnte das Ausgangsmaterial für die Filamentherstellung sein. Im Rahmen dieser Arbeit wurde frisches Granulat wiederholt zu Filament verarbeitet, wobei bei anderen Arbeiten Druckreste für die Filamentherstellung herangezogen wurden. Als weiterer möglicher Grund für den Kontrast wird die Art und Weise der Filamentextrusion vermutet. Das hier genutzte Filament wurde mit Hilfe einer Einschneckenextruder-Anlage mit nur einer Heizzone bei sehr langsamen Geschwindigkeiten erzeugt. Darüber hinaus wurde das Granulat in Form von einheitlichen Pellets dem Filament-Herstellungsprozess hinzugefügt. Diese Vermutungen werden in zukünftigen Arbeiten untersucht. Die Resultate der Versuchsreihe zeigen somit auf, dass die multiple Extrusion von PLA nach fünf Zyklen

einen vernachlässigbaren Einfluss auf die untersuchten Qualitätsmerkmale hat. Diese Ergebnisse bekräftigen die werkstoffliche Wiederverwertbarkeit von PLA zu Filament für die additive Fertigung nach dem Schmelzschichtverfahren.

Literatur

Bücher

- [10] Hellerich, W., Harsch, G., & Baur, E. (2010). *Werkstoff-Führer Kunststoffe* (10. Ausg.). Carl Hanser Verlag, S. 54 bis 57
- [13] C. P. Keferstein; M. Marxer. 2015. *Fertigungsmesstechnik*. 234-238. Springer Vieweg. Wiesbaden

Zeitschriften

- [3] Song, R., & Telenko, C. (2017). Material and energy loss due to human and machine error in commercial FDM printers. *Journal of Cleaner Production*, 148, S. 895-904. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.171
- [4] Zhao, P., Rao, C., Gu, F., Sharmin, N., & Fu, J. (2018). Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 197(1), S. 1046-1055. doi:10.1016/j.jclepro.2018.06.275
- [5] Fabio Alberto Cruz Sanchez, Silvia Lanza, Hakim Boudaoud, Sandrine Hoppe, Mauricio Camargo. Polymer Recycling and Additive Manufacturing in an Open Source context: Optimization of processes and methods. Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, ISSF 2015, Aug 2015, Austin, TX, United States. pp.1591-1600. hal-01523136
- [6] Cruz Sanchez, F. A., Boudaoud, H., Hoppe, S., & Camargo, M. (2017). Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues. *Additive Manufacturing*, 17, S. 87-105. doi:10.1016/j.addma.2017.05.013
- [7] Anderson, I. (2017). Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 4(2), S. 110-115. doi:10.1089/3dp.2016.0054
- [8] Oliver Holzmond, Xiaodong Li, In situ real time defect detection of 3D printed parts, *Additive Manufacturing*, Volume 17, 2017, Pages 135-142,

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.003>

- [9] Kwangwoo Wi, Vignesh Suresh, Kejin Wang, Beiwen Li, Hantang Qin, Quantifying quality of 3D printed clay objects using a 3D structured light scanning system, Additive Manufacturing, Volume 32, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100987>.
- [14] J. Geng, "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial," Adv. Opt. Photon. 3, 128-160 (2011). <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>
- [15] Einfluss einer zusätzlichen Glasscheibe auf ein optisches 3D-Messsystem; Mats Bremer, Michael Wahl and Slawomir Kedziora; tm - Technisches Messen, 2020, Volume 87, Number 7-8, Page 477; DOI: 10.1515/teme-2019-0105

Normen

- [12] Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, ABl. L 312, Artikel 4
- [17] DIN EN ISO 527-2:2012-06, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012). (2012)
- [18] DIN EN ISO 20753:2019-02, Kunststoffe - Probekörper (ISO 20753:2018). (2019)
- [19] DIN EN ISO 527-1:2019-12, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019). (2019).
- [20] DIN EN ISO 10350-1:2018-03, Kunststoffe - Ermittlung und Darstellung vergleichbarer Einpunktkennwerte - Teil 1: Formmassen (ISO 10350-1:2017). (2018)
- [21] DIN EN ISO 20028-2:2017-07, Kunststoffe - Thermoplastische Polyester (TP)-Werkstoffe - Teil 2: Herstellung von Probekörpern und Bestimmung von Eigenschaften (ISO 20028-2:2017). (2017).

Internet

- [1] McCue, T. (8. Mai 2020). *Additive Manufacturing Industry Grows To Almost \$12 Billion In 2019*. Abgerufen am 2022.01.14 von forbes.com:

<https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2020/05/08/additive-manufacturing-industry-grows-to-almost-12-billion-in-2019/#:~:text=Additive%20Manufacturing%20Industry%20Grows%20To%20Almost%20%2412%20Billion%20In%202019>

- [2] 3D Hubs. (2018). *Digital Manufacturing Trends Q3/2018* S.6. 3D Hubs.
- [11] Rudolf Wiegand und Partner GmbH. (kein Datum). PLA – das Filament für Einsteiger und Profis. S 9 – 17. Abgerufen am 2022.01.14 von filamentpreis.de: <https://www.filamentpreis.de/materialien/pla/>
- [16] NatureWorks LLC. (o.D.). *Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet - 3D Printing Monofilament*. Abgerufen am 23. Februar 2021 von https://www.natureworkslc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_3D-monofilament_pdf.pdf?la=en

Kontaktangaben

Prof. Dr.-Ing Michael Wahl
Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld
Postfach 13 80
55761 Birkenfeld
Email: m.wahl@umwelt-campus.de
WEB: <https://www.umwelt-campus.de/mwahl/>

Mats Bremer
Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld
Postfach 13 80
55761 Birkenfeld
Email: m.bremer@umwelt-campus.de