



Ostfalia
Hochschule für angewandte
Wissenschaften

Studienarbeit

Systematische Untersuchung und Optimierung der Extrusionsergebnisse eines Desktopfilamentextruders

Fakultät Maschinenbau

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften

Constantin Ratayczak

Erstprüfer: Prof. Dr. Marcus Menzel

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Franz-Gregor Haas

Abgabedatum: Vorabversion

Zusammenfassung

In der globalen Gesellschaft und in der Industrie gewinnt das Thema Nachhaltigkeit stetig an Bedeutung. Bei der Anwendung von additiven Fertigungsverfahren wie dem Fused Layer Modeling entsteht eine signifikante Menge an Abfall. Durch Etablierung eines Werkstoffkreislaufs soll dieser Abfall wieder zu 3D-Druck-Filament verarbeitet werden. Die Herstellung von Filament erfordert jedoch die Einhaltung enger Durchmesser- und Formtoleranzen, sodass sich die Erzeugung von verwendbaren Filament als äußerst komplex und umfangreich herausstellt.

Diese Arbeit findet im Rahmen einer Zusammenarbeit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Wolfenbüttel statt. Dafür wurde das Projekt Rec@School ins Leben gerufen. Dabei werden 3D-Druck-Abfälle in umliegenden Schulen, sowie in der Ostfalia gesammelt und recycelt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es aus diesen 3D-Druck-Abfällen ein brauchbares Filament herzustellen, welches in seinen Eigenschaften, insbesondere Rundheit, Durchmessertoleranz und Feuchtigkeit vergleichbar zu industriell hergestelltem Filament ist. Da dies mit dem eingesetzten Extruder (3devo, COMPOSER 450 FILAMENT MAKER) im Anlieferungszustand nicht möglich ist, wurden verschiedene Umbauten und Optimierungen vorgenommen und auf ihre Wirksamkeit überprüft. Weiterhin wurde der Einfluss der Beimischung von Neumaterial, im Weiteren als Virginmaterial bezeichnet, in Form von Mahlgut in verschiedenen Anteilen untersucht.

Die vorgenommenen Maßnahmen zeigen vor allem, dass eine Homogenität des Granulats eine signifikante Rolle für die Erzeugung von brauchbarem Filament spielt. Besonders gute Ergebnisse wurden erzielt, wenn eine strenge Trennung des Ausgangsmaterials nach Hersteller und Farbe vorgenommen wurde. Zudem muss sichergestellt werden, dass das Mahlgut aus Körnern vergleichbarer Größe besteht und eine möglichst geringe Feuchte im verwendeten Material vorzufinden ist.

Schlüsselwörter: 3Devo, Filament-Recycling, 3D-Druck-Recycling, Filamentherzeugung

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form in keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wolfsburg

XX.XX.2025

Constantin Ratayczak

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund der Arbeit	1
1.2	Aufgabenstellung	1
1.3	Grundlagen der Filamentherstellung	2
2	IST-Analyse	4
2.1	Ausgangsmaterial	4
2.2	Der Extruder	6
2.2.1	Zustand zu Beginn	6
2.2.2	Aufbau des Extruders	7
3	Stand der Technik	10
3.1	Marktübersicht	10
3.1.1	Industriemaschinen	11
3.1.2	3devo	12
3.1.3	DIY-Maschinen	12
3.1.4	Toleranzfelder für Durchmesser, Ovalität und Feuchtigkeit	14
3.2	Anforderungen an das Filament und den Extruder	15
4	Definition der Bedienungen	20
4.1	Messung	21
4.2	Extrusion	22
5	Verbesserungen des Extruders	24
5.1	Lüftung optimieren	24
5.2	Adapter Extruder-Trockner	27
6	Verbesserungen der Einsatzmasse	28
6.1	Sieben der Einsatzmasse	28
6.2	Trocknung von Einsatzmasse	32
6.3	Homogenität der Einsatzmasse	37
6.4	Beimischung von Virginmaterial	43

7	Weitere Verbesserungen und Ergebnis	49
8	Zusammenfassung	52
9	Ausblick	54
	Literaturverzeichnis	55
	Abbildungsverzeichnis	58
	Tabellenverzeichnis	62
	Anhang	62
	Inhalt USB Stick	87

1 Einleitung

1.1 Hintergrund der Arbeit

An der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften sowie in verschiedenen Schulen rund um Wolfenbüttel entstehen durch Lehrveranstaltungen und Prototypenbau – insbesondere im Rahmen des sogenannten "Rapid Prototyping" – regelmäßig Abfälle aus der additiven Fertigung. Vor allem das Fused Layer Modeling (FLM)-Verfahren trägt zu einem Großteil dieser Abfälle bei, die häufig im Hausmüll entsorgt werden.

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt hat das Ziel Recycling anstelle von Downcycling der 3D-Druck-Abfälle zu betreiben. Damit ist gemeint, dass geeignete 3D-Druck-Abfälle der Ostfalia und der teilnehmenden Schulen gesammelt und zu 100% recycelt werden. Aktuell wird ca. 67% der Kunststoffabfälle verbrannt und 33% werden "downgecycelt", also zu Kunststoffmahlgut minderer Qualität weiterverarbeitet. Ein höherer Recyclinganteil innerhalb des Hausmülls ist derzeit aufgrund der aufwendigen Trennung verschiedener Kunststoffarten und der damit verbundenen Kosten nur schwer umsetzbar. Die Vermischung der Kunststoffe stellt dabei ein erhebliches Problem dar, da unterschiedliche Schmelzpunkte und Materialeigenschaften die Qualität des recycelten Produkts beeinträchtigen können.

Da die entstandenen Kunststoffabfälle im 3D-Druck isoliert betrachtet jedoch sehr gut recycelbar sind, werden diese im Rahmen des Projekts "Rec@School - Recycling für den 3D-Druck an Schulen" der Ostfalia Lern- und Innovationsfabrik (OLIF) an teilnehmenden Schulen und der Ostfalia gesammelt. Ziel ist es, die Materialien in einem Recyclingprozess zu wiederverwendbarem Filament zu verarbeiten. Durch dieses Projekt soll ein geschlossener Kreislauf echten Recyclings (circular economy) des verwendeten Filaments entstehen. Abbildung 1.1 zeigt plakativ die Projektzielübersicht.



Abbildung 1.1: Rec@School Banner, Quelle: [OLIF2024]

1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, aus 3D-Druck Abfällen – wie beispielsweise Druckfehlschlägen, Stützstrukturen oder nicht mehr benötigten Prototypen – durch einen Recyclingprozess

neues Filament herzustellen. Das hergestellte Filament soll dabei gewisse Toleranzfelder in den Eigenschaften Durchmesser, Feuchtigkeit und Form einhalten (siehe Kapitel 3.1.4 auf Seite 14) und in seiner Qualität Neumaterial nahe kommen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung eines einfachen und leicht nachvollziehbaren Prozesses, der eine Nachahmung durch jedermann, also nach der Do-it-yourself (DIY)-Methode, ermöglicht. Die verwendeten Maschinen und Verfahren sollen daher möglichst leicht zugänglich und einfach nachzustellen sein. Auch Modifikationen an Maschinen und Materialien sollen so gestaltet werden, dass sie problemlos von Privatpersonen, aber auch von kleinen, mittelständischen Unternehmen nachvollzogen und umgesetzt werden können. In Hinblick auf die möglichst einfache Nachahmung sollen die Ergebnisse dieser Arbeit veröffentlicht werden.

1.3 Grundlagen der Filamentherstellung

Bei Filament handelt es sich um thermoplastische Polymere in Form eines Drahtes. Filament ist das Material, welches im FLM-Verfahren eingesetzt wird. Das Fused Layer Modeling (FLM) lässt sich grundsätzlich als extrusionsbasiertes Freiraum-Verfahren beschreiben. Es macht sich die temperaturabhängige und reversible Verformbarkeit von Filament zu Nutze. Dabei wird das Filament in eine beheizte Düse geführt, erhitzt und das anschließend formbare Filament durch Filamentvorschub schichtweise auf ein Druckbett aufgetragen. Bei der Abkühlung, die teilweise durch Lüfter beschleunigt wird, härtet das gedruckte Material aus und bleibt in der vorgegebenen Form. Die Formgebung erfolgt durch ein 3D-Modell, welches mittels Software in Maschinencode übersetzt wird. Durch Bewegung des Druckbettes und Druckkopfes mittels Maschinencode in x-, y- und z-Richtung entsteht die vorgegebene Form.

Für die Herstellung von Filamenten, die im 3D-Druck verwendet werden, kommen in den meisten Fällen sogenannte Einzelschneckenextruder zum Einsatz [Veit2023].

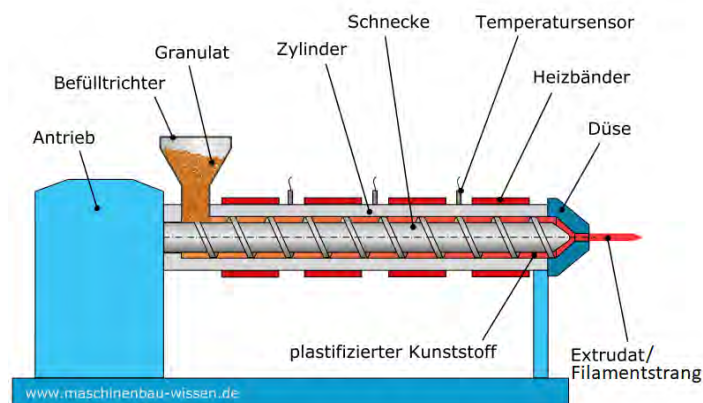


Abbildung 1.2: Funktionsweise Einzelschneckenextruder, Quelle: [Maschinenbau-Wissen2024]

Die Funktionsweise eines Extruders (siehe Abbildung 1.2 auf Seite 2) lässt sich wie folgt beschreiben:

Das Ausgangsmaterial, in Form von Mahlgut, wird in den Befülltrichter eingeführt. Mittels einer rotierenden Schnecke wird das Mahlgut in dem durch Heizbänder erhitzten Zylinder gefördert. Während dieses Vorgangs schmilzt das Mahlgut und wird zu plastifiziertem Kunststoff. Die Temperatur wird durch Temperatursensoren durchgehend kontrolliert und bei Bedarf an den eingestellten Wert angepasst. Das aufgeschmolzene Mahlgut wird anschließend durch eine Düse gepresst, wodurch der Filamentstrang geformt wird.

Eine problemlose Verarbeitung von Filament durch einen 3D-Drucker hängt direkt mit dem Filamentdurchmesser und damit mit dem Volumenstrom zusammen. Die meisten 3D-Drucker besitzen keine Regelung für schwankende Filamentdurchmesser. Bedingt dadurch ist ein konstanter Filamentdurchmesser bzw. Volumenstrom für ein qualitativ hochwertiges Druckergebnis unerlässlich. Abbildung 1.3 zeigt, dass durch eine 10% höheren Durchmesser der Querschnitt und damit auch der Volumenstrom um 21% steigt, da der Durchmesser quadratisch in die Querschnittsberechnung eingeht.

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

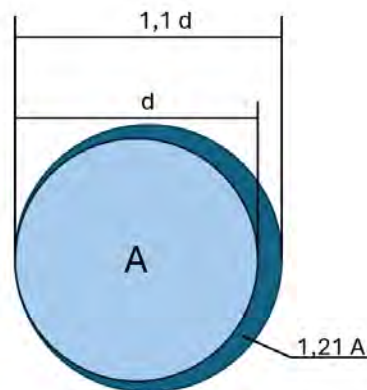


Abbildung 1.3: Einfluss des Durchmessers auf den Querschnitt. [Eigene Darstellung]

Ein schwankender Durchmesser kann durch die fehlende Regelung Über- und Unterextrusion¹ am Bauteil und/oder zu einer Verstopfung der Filamentförderung führen.

¹Überextrusion bezeichnet eine übermäßige Materialförderung im 3D-Druck, die zu Maßungenauigkeiten und unsauberen Oberflächen führt. Unterextrusion hingegen entsteht bei unzureichender Materialförderung, was Lücken, instabile Strukturen und verminderte Festigkeit verursacht.

2 IST-Analyse

2.1 Ausgangsmaterial

In dieser Arbeit wird das Material Polylactic Acid (PLA) fokussiert betrachtet. Die Wahl von PLA als Untersuchungsgegenstand basiert auf dem hohen Anteil von PLA an den Gesamterzeugnissen der Ostfalia Hochschule, sowie der umliegenden Schulen. PLA ist ein thermoplastischer Polyester, der aus nachwachsenden Rohstoffen wie Maisstärke und Zuckerrohr hergestellt wird. PLA zeichnet sich durch eine vergleichsweise geringe Schmelztemperatur von etwa 180-220°C aus und weist im Vergleich zu anderen Filamenten wie Polyethylenterephthalat Glykol (PETG) oder Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat (ABS) nur eine geringe Neigung zur Schrumpfung auf. Zusätzlich ist PLA für seine exzellente Haftung auf der Druckplatte bekannt, was die Notwendigkeit für zusätzliche Haftmittel oder spezielle Bauplattformen oft überflüssig macht. Diese Eigenschaften machen PLA zu einem sehr häufig eingesetzten 3D-Druck-Werkstoff (siehe Abbildung 2.1).

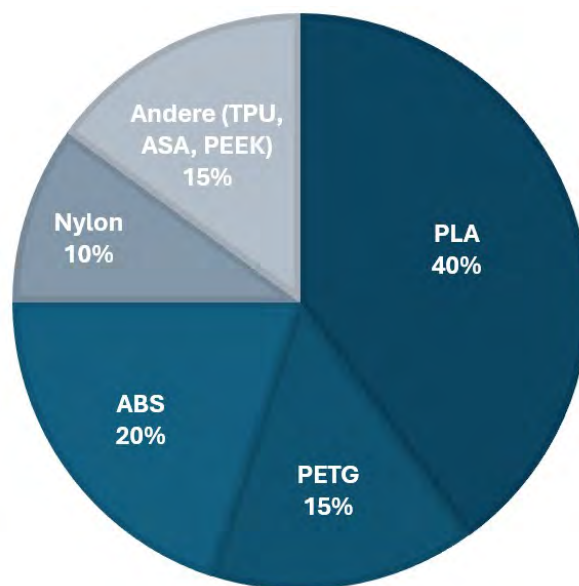


Abbildung 2.1: Marktanteil verschiedener Filamente, Quelle:[[GrandResearchReport2024](#)]

Bedingt durch das Schreddern als Teil des Recyclingprozesses liegt das Material zu Anfang in Form von Mahlgut vor. Dieses Mahlgut weist eine Heterogenität in Bezug auf Korngröße und Form auf. In Tabelle 1 auf Seite 5 wurde eine Materialcharge nach unterschiedlichen Korngrößen klassifiziert.

Korngröße in mm	Masse in g	Gewichtsanteil in %
>3	12	<1
3-2	2502	62
2-1	1180	29
1-0,5	271	7
<0,5	55	1
Gesamt	4020	100

Tabelle 1: Masseverteilung nach Korngröße. [Eigene Darstellung] Messmittel: VEVOR Präzisionswaage 5000g

PLA ist ein hygroskopisches Material, das dazu neigt, Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufzunehmen. Dieser Aspekt ist für die Extrusion ungünstig, da ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt die Qualität negativ beeinflusst, indem er zu unregelmäßigem Fluss und Dampfblasenbildung führt [Soukup2021]. Die Analyse einer Materialcharge ergab einen Feuchtigkeitsgehalt in Höhe von 0,35%, was über der Feuchte von Filamenten ohne bekannten Feuchtigkeitsproblemen liegt (siehe Tabelle 2 auf Seite 15). Die untersuchte Materialcharge war eine Mischung von PLA verschiedener Hersteller und Farben.

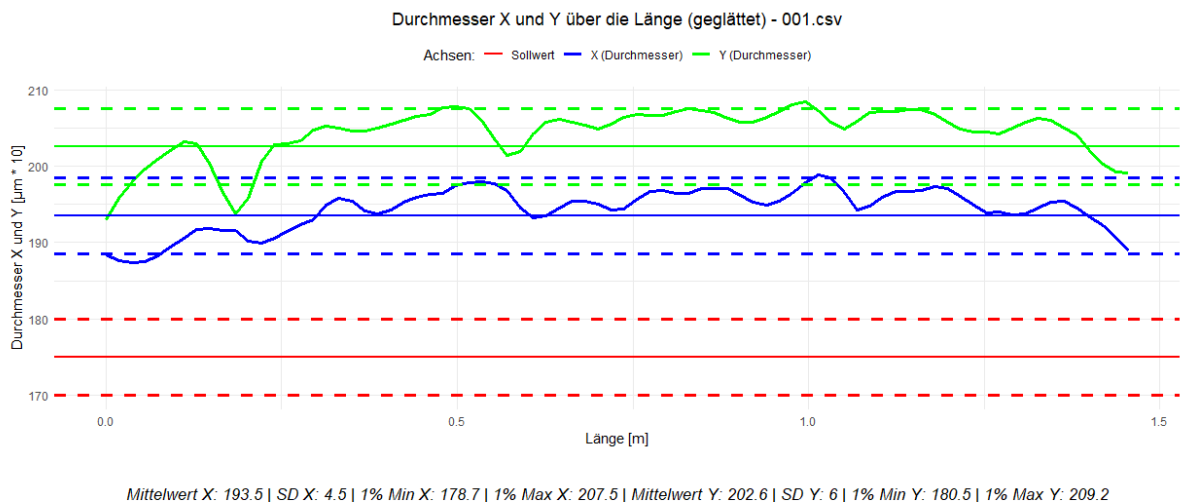


Abbildung 2.2: Durchmesserverlauf Spule 001. Messung auf zwei Achsen: X = Blau, Y = Grün. Angestrebter Toleranzbereich in Rot. [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Abbildung 2.2 auf Seite 5 zeigt den Durchmesserverlauf über 1,5m von Spule 001, die den IST-Zustand abbildet. Das verwendete Mahlgut wurde nach dem schreddern nicht weiter bearbeitet und direkt extrudiert. Die x-Achse gibt die Filamentlänge in Metern an, die y-Achse den Durchmesser in μm^{10} . Die durchgezogenen Linien in Rot, Grün und Blau stellen die Mittelwerte dar, die gestrichelten Linien den Toleranzbereich von $\pm 0,05mm$ (siehe Kapitel 3.1.4 auf Seite 14). Grün zeigt den Durchmesser in y-Richtung. Blau zeigt den Durchmesser in x-Richtung.

Auffällig ist der erhöhte Durchmesser um **HIER NEUE EINHEIT VON LAURENZ!** $20\mu m^{10}$ bzw. $30\mu m^{10}$. Außerdem sind primär am Anfang Toleranzüberschreitungen zu erkennen. Diese weisen auf eine Prozessinstabilität zu Beginn hin. Dennoch bleibt der Durchmesser über weite Längen im Toleranzbereich, was die grundsätzliche Eignung des Composer 450 bestätigt. Vereinzelt treten jedoch Ausreißer auf (siehe Abbildung 6.9 auf Seite 38). Eine Ursachenforschung (siehe Kapitel 6.3 und 5.1) und ergriffene Maßnahmen (siehe Kapitel 5 und 6) werden im Verlauf dieser Arbeit betrachtet.

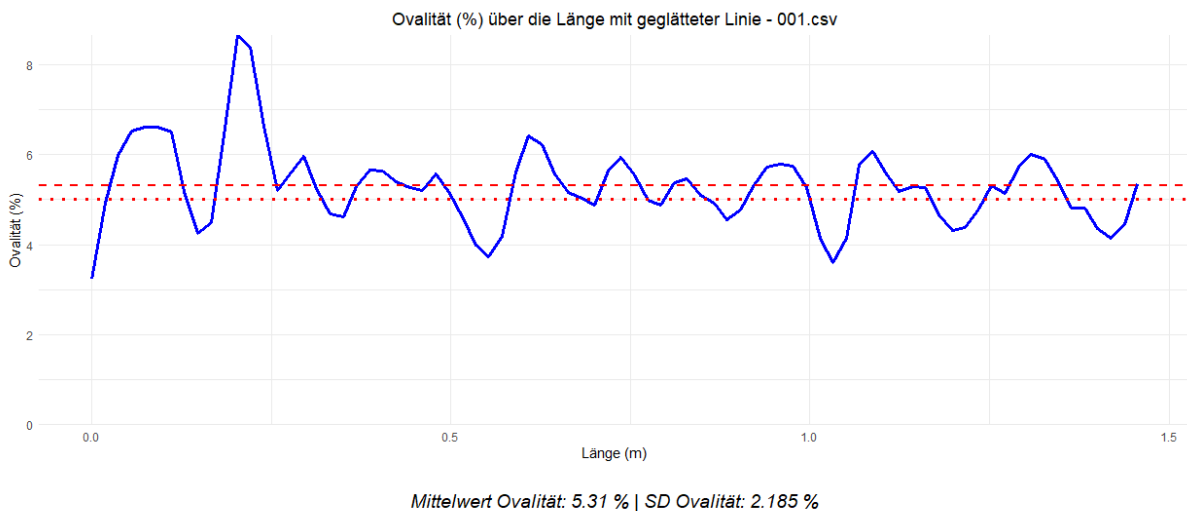


Abbildung 2.3: Ovalitätsverlauf (Blau) Spule 001. Gepunktet: Grenzwert von 5%. Gestrichelt: Erreichte Ovalität in %. [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Für eine fundierte Betrachtung der folgenden Abbildung ist zunächst eine Erläuterung des Begriffs Ovalität notwendig. **HIER DANN DAS VON LAURENZ???**

Durch die Verlagerung nach oben von y im Vergleich zu x eine Ovalität zu erkennen. Diese wird auch durch Abbildung 5.4 auf Seite 26 aufgezeigt. In dieser Abbildung ist auf der x-Achse erneut die gemessene Länge von 1,5m zu erkennen. Auf der y-Achse ist die Ovalität in % angegeben. Die gepunktete Linie ist die angestrebte Ovalität von 5% (siehe Kapitel 3.1.4 auf Seite 14). Die gestrichelte Linie der gemessene Mittelwert. Die gemessene Ovalität liegt für Spule 001 bei 5,3%. Das Thema Ovalität wird im Verlauf dieser Arbeit weiter betrachtet.

2.2 Der Extruder

2.2.1 Zustand zu Beginn

Der Composer 450 der Firma 3devo wird als Extruder für dieses Projekt verwendet. Dieser befand sich zu Beginn in einem umgebauten Zustand. Dies war das Resultat

aus mehreren vorangegangenen Studienarbeiten von Fr. Sperling, Hr. Strobel und Hr. Nottrodt. Um eine klar definierte Vergleichsbasis zu schaffen, wurde der Extruder zurück in seinen Auslieferungszustand zurückgebaut. Dafür wurde die nachträglich eingebaute Messvorrichtung entfernt und eine gründliche Reinigung der Extruderspindel vorgenommen. Die Reinigung war nötig, um altes Material, PLA, aber auch PETG, zu entfernen und eine unbeeinflusste Extrusion des eigenen Materials sicherzustellen.

2.2.2 Aufbau des Extruders

Abbildung 2.4, 2.5, 2.6 und 2.7 auf den nachfolgenden Seiten zeigen den grundsätzlichen Aufbau des Extruders. Mit einem Maschinenvolumen von 506 x 216 x 448 mm ist das Gerät in etwa so groß wie ein Desktop PC und damit für einen Extruder klein. Das Netzteil des Composer 450 (1) stellt die nötige Versorgungsspannung für den Extruder zur Verfügung. Die Steuerplatine (2) ist für die Steuerung der Hardwarekomponenten des Extruders zuständig. Angetrieben wird die Schnecke durch einen Elektromotor an einem Schneckengetriebe (3). Durch das Display und das Bedienelement (4) kann der Nutzer Änderungen am Verfahren umsetzen, wie z.B. Umdrehungsgeschwindigkeit der Spindel, Temperaturen der einzelnen Heizkammern und Materialpresets. Mittels der Spulenaufnahme(5) kann eine handelsübliche Filamentspule aufgenommen und rotiert werden. Durch die Filamentführung (6) wird eine saubere Aufwicklung des Filamentstranges sichergestellt. Diese sitzt auf einer Gewindespindel (7), welche durch einen Schrittmotor (8) angetrieben wird und so die Filamentführung in x-Richtung verfahren kann. Die Düse (9) ist für die Extrusion des Materials zuständig. Sie hat einen Durchmesser von 4mm. Hierbei ist es besonders wichtig zu betrachten, dass das Filament kurz vor der Extrusion einen 90° (14) Winkel durchläuft. Dies ist im Vergleich zu anderen Extrudern untypisch. Die Radiallüfter (10) kühlen das Filament kurz nach der Extrusion ab und sorgen dafür, dass das Material erstarrt. Durch die Puller (11) wird der Filamentstrang nach der Extrusion auf den gewählten Durchmesser gebracht. Sie ermöglichen eine Extrusionsgeschwindigkeit von ca. 1,5 m/min. Eine handelsübliche Filamentspule wird so also innerhalb von ca. 3,5h befüllt. Dafür wird die Geschwindigkeit der Puller durch eine Regelung je nach Filamentdurchmesser verringert oder erhöht. Der Filamentdurchmesser wird von dem Sensor (13) gemessen. Bei der Messeinheit handelt es sich um einen optischen Sensor, welcher mittels Infrarot-LED und -Sensor den Filamentdurchmesser auswertet. Es wird der Kontrastunterschied von Filament und Hintergrund ausgewertet und so die Außenkanten als Durchmesser festgelegt. Durch diesen Sensor können Durchmesser von 0,5 bis 3mm mit einer Genauigkeit von $\pm 43 \mu\text{m}$ gemessen werden [Nottrodt2023]. Hier ist es wichtig zu erwähnen, dass es einen Abstand von 145mm zwischen Düse (9) und Sensor (13) gibt. Dieser Abstand erschwert die Regelung des Filamentdurchmessers erheblich, da eine längere Zeit von Extrusion zu Messung vergeht. Die vier Heizelemente (12) werden unabhängig voneinander angesteuert und können eine maximale Temperatur von 450°C erreichen.

Dadurch kann eine breite Palette an Filamenten extrudiert werden. Der Composer 450 wird für ca. 5000€ von 3devo verkauft².

²In der Zwischenzeit wurde von 3devo ein Nachfolgeprodukt, der Filament Maker TWO vorgestellt. Deshalb wurde der Composer 450 in den Filament Maker ONE umbenannt. In dieser Studienarbeit wird dennoch weiterhin der ursprüngliche Name Composer 450 verwendet.

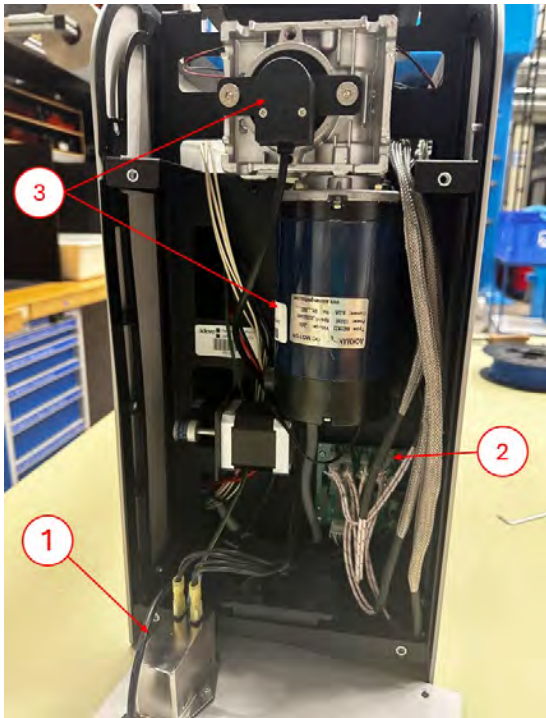


Abbildung 2.4: Antrieb und Steuerung vom Composer 450. [Eigene Darstellung]

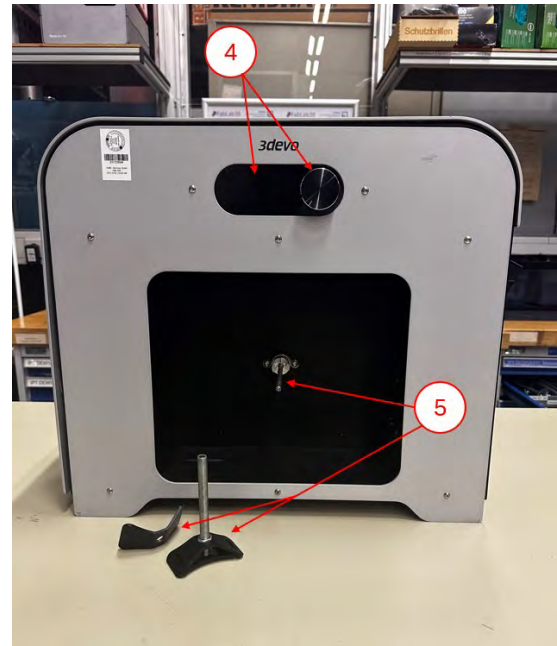


Abbildung 2.5: Seitenansicht vom Composer 450. [Eigene Darstellung]

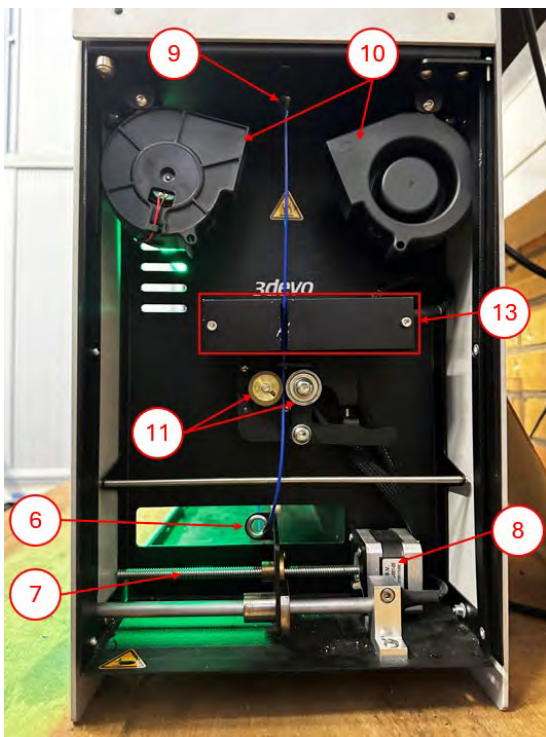


Abbildung 2.6: Kühl-, Mess- und Abzugsvorrichtung Composer 450. [Eigene Darstellung]

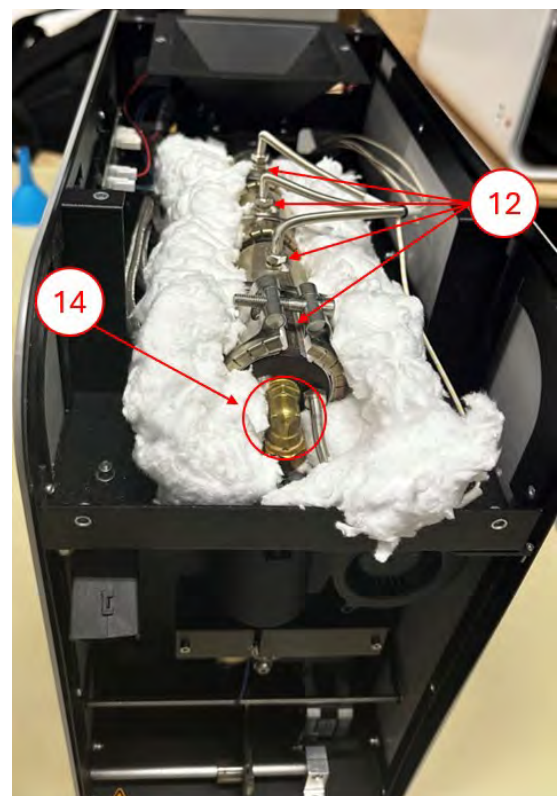


Abbildung 2.7: Heizelemente, Isolierung und Filamentumlenkung Composer 450. [Eigene Darstellung]

3 Stand der Technik

Im Rahmen von diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik gegeben. Hierbei werden sowohl industrielle Maschinen als auch im privaten Bereich eingesetzte Maschinen, insbesondere aus sogenannten DIY-Projekten, vorgestellt. Außerdem werden auch Filamente untersucht, welche mit Industriemaschinen hergestellt wurden. Nach dieser Bestandsaufnahme werden die spezifischen Ziele dieser Arbeit formuliert, wobei der Fokus darauf liegt, welche Verbesserungen auf das eigene Verfahren angewandt werden können.

3.1 Marktübersicht

Durch die leichtere Zugänglichkeit und Handhabung von 3D Druckern für Privatpersonen ist die Nachfrage an diesen stark gestiegen und wird laut vieler Prognosen in den nächsten Jahren auch weiterhin steigen (Siehe Abbildung 3.1). Im direkten Zusammenhang damit steht auch die stark erhöhte Nachfrage nach Filamenten für den FLM-Drucker Bereich. Dieses Filament wird in großen Mengen in Asien, aber auch in Europa, beispielsweise durch die tschechische Firma Prusa Research³ hergestellt [[Prusament](#)].

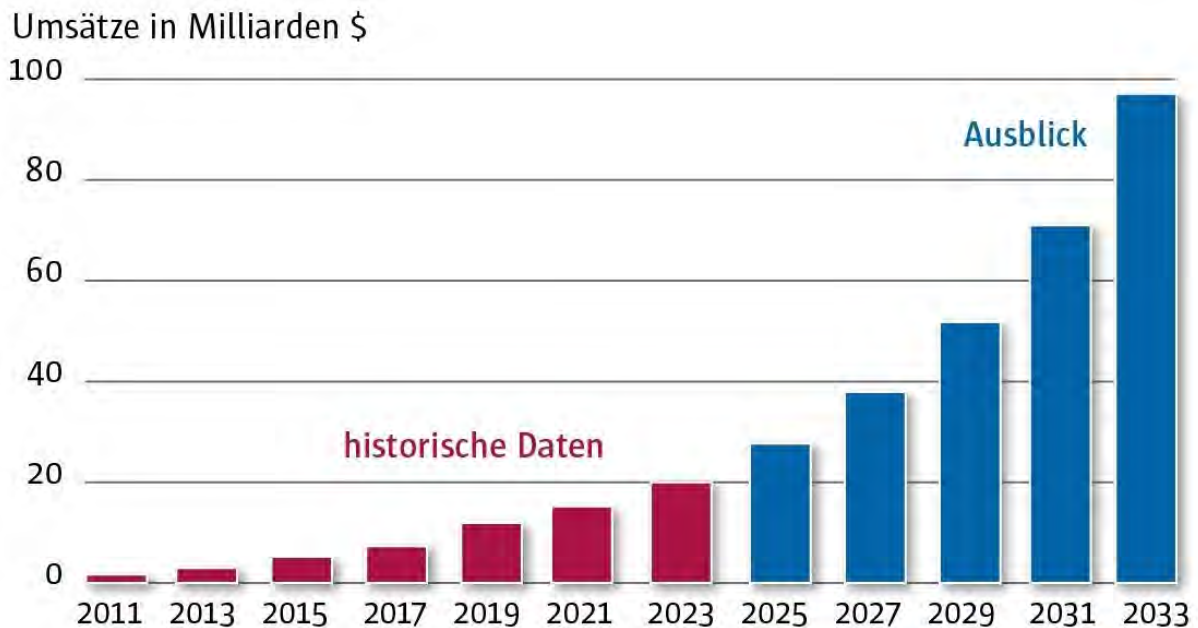


Abbildung 3.1: Marktentwicklung 3D-Drucker, Quelle: [[Wohler2024](#)]

³Prusament wird für diese Arbeit als Beispiel genommen, da es sehr weit verbreitet ist und als qualitativ hochwertiges Filament bekannt ist

3.1.1 Industriemaschinen

Für die Massenproduktion von Filament werden spezielle Industrieanlagen verwendet, wie beispielsweise von der Firma [PMH] aus Königswinter, Deutschland (siehe Abbildung 3.2) und von der Firma [Songhu] aus Donggauan, China.



Abbildung 3.2: Extrusionslinie der Firma PMH, Quelle: [PMH]

Industrieanlagen besitzen einen deutlich größeren Maschinenfootprint (12 x 1,5m bei PMH) als der hier verwendete Extruder der Firma 3devo. Der größere Bauraum ist auf den grundsätzlich größeren Extruder zurückzuführen, da die Spindel, Heizelemente, Kühlung und Messeinheit deutlich größer als die von 3devo aufbauen. Durch die Heizelemente können die meisten Industriemaschinen eine Temperatur von $>450^{\circ}\text{C}$ (PMH) erreichen und so eine sehr breite Palette an Kunststoffen extrudieren. Darüber hinaus wird bei Industrieanlagen in den meisten Fällen ein Wasserbad verwendet (PMH), um das Filament nach der Extrusion kontrolliert abzukühlen. Im Vergleich zur Lüftkühlung, wie sie beim Extruder von 3devo eingesetzt wird, hat ein Wasserbad den Vorteil, dass es eine gleichmäßigere und effizientere Abkühlung ermöglicht. In der Industrie finden sich jedoch auch Luftkühlungen, die in der Regel nur bei wasserlöslichen Filamenten verwendet werden. Industriemaschinen weisen typischerweise eine höhere Extrusionsgeschwindigkeit auf (80-100m/min bei PMH). In der Stunde können also ca. 4800 Meter Filament hergestellt werden. Dies entspricht ca. zwölf 1kg Spulen. Bis ein genauer und konstanter Filamentdurchmesser erreicht wird, ist es nötig, einen sogenannten Einlaufvorgang zu durchlaufen. Hierbei wird je nach Bedingungen eine Filamentmenge extrudiert bis alle Toleranzfelder erfüllt werden. Es handelt sich also um gesteuerte Anlagen (PMH). Es gibt keine Regelung während der Herstellung (PMH). Hierfür sind mehrere Meter Extrusion nötig, welche nicht verwendet werden können und entsorgt werden. In wenigen Fällen wie zum Beispiel bei Prusa wird das Filament des Einlaufvorgangs recycelt und daraus Filament erzeugt. [Prusament_Recycled].

Als Messsystem wird meistens ein Lasermesskopf verwendet (Songhu). Dieser misst in zwei Achsen den Filamentdurchmesser und die Ovalität. Mittels dieser Kennwerte wird die Zugeschwindigkeit des Filaments geregelt und so der gewünschte Durchmesser erreicht. Industrielle Filamentanlagen dieser Klasse werden in einem Preisbereich von 80000 bis 120000€ zum Kauf angeboten (PMH).

3.1.2 3devo

Der Extruder der Firma 3devo aus Utrecht, Niederlande, schließt die Lücke zwischen Hobbyextrudern und Industriemaschinen. Für eine genauere Beschreibung des Extruders siehe Kapitel 2.2 auf Seite 6.

3.1.3 DIY-Maschinen

Auch im DIY-Bereich wird immer häufiger Filament von Privatpersonen hergestellt. Dafür bieten viele verschiedene Maker⁴ online Stücklisten, Baupläne und sogar ganze Baukits an. Einer dieser Maker ist [ARTME3D] aus Speyer, Deutschland. Als Vergleichsobjekt für diese Arbeit wurde der desktop filament extruder mk3 ausgewählt (siehe Abbildung 3.3).



Abbildung 3.3: desktop filament extruder mk3 von ARTME 3D, Quelle: [ARTME3D]

Dieser Extruder weist mit 406x486x654mm ein etwas größeres Maschinenvolumen als der 3devo auf und eignet sich ebenfalls für den Einsatz in Privaträumen. Mit einer maximalen Temperatur von 260°C ist es dem Extruder möglich die gängigsten Materialien wie zum Beispiel PLA und PETG zu extrudieren. Spezielle Materialien, wie beispielsweise PC Blend, können auf Grund ihres hohen Schmelzpunktes nicht verarbeitet werden [Prusament_PCBlend].

⁴Als Maker bezeichnet man Personen, welche ihre Ideen verwirklichen und der DIY-Gemeinschaft zur Verfügung stellen.

Ähnlich wie der Extruder von 3devo verwendet auch der mk3 von ARTME3D eine Luftkühlung zur kontrollieren Abkühlung des frisch extrudieren Filaments. Ein erheblicher Unterschied ist die Extrusionsgeschwindigkeit. Diese liegt bei dem mk3 von ARMTME3D je nach Material bei nur 0,7 bis 1,6m/min. Für eine ganze Spule muss also mit einer Extrusionsdauer von 4-7h gerechnet werden.

Ein direkter Sensor zur Messung des Filamentdurchmessers existiert bei diesem Modell nicht. Stattdessen wird der Durchhang des Filaments erfasst (roter Kreis in Abbildung 3.4).

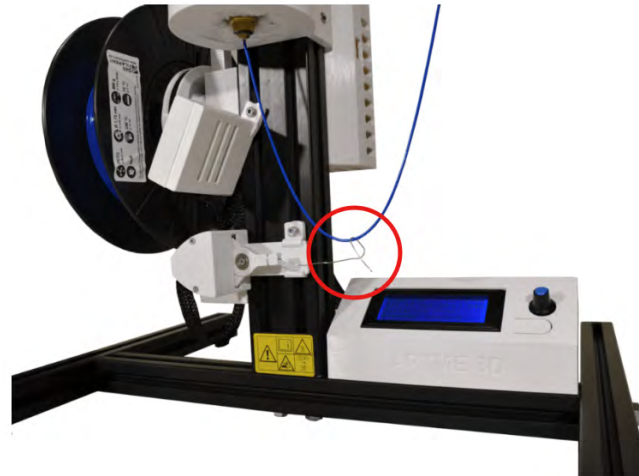


Abbildung 3.4: Funktionsweise mk3 von ARTME 3D, Quelle: [[ARTME3D2](#)]

Wird das Filament schneller extrudiert, hängt das Filament tiefer. Der Sensor erfasst dies und durch die Steuerung wird das Filament langsamer extrudiert. So wird eine konstante Extrusionsgeschwindigkeit gewährleistet. Durch den Parameter des Eigengewichts in Kombination mit vorgegebenen Einstellungen bezüglich Temperatur und Düsendurchmesser, kann so ein konstanter Filamentdurchmesser erzielt werden. Beispielsweise wird für die Herstellung von 1,75mm PLA ein Düsendurchmesser von 1,7mm empfohlen [[ARTME3D2](#)]. Eine Angabe zu der Genauigkeit des verbauten Sensors wird nicht gemacht. Laut ARTME 3D soll es möglich sein mit geschreddertem 3D Druck Abfällen eine Genauigkeit des Filamentdurchmessers von $\pm 0,07\text{mm}$ zu erreichen.

Mit Kosten von 759€ ist der mk3 deutlich günstiger als der Extruder von 3devo. Diese Preisdifferenz liegt zum einen an den verbauten Komponenten, welche bei den höherpreisigen Geräten deutlich hochwertiger sind, und zum anderen an den selbst gedruckten Teilen der DIY-Maschine.

3.1.4 Toleranzfelder für Durchmesser, Ovalität und Feuchtigkeit

Filamente für 3D-Drucker sind in verschiedenen Durchmessern erhältlich, wobei der am häufigsten verwendete Durchmesser 1,75 mm beträgt. Als Industriestandard hat sich eine Durchmessertoleranz von $\pm 0,05\text{mm}$ etabliert [Cardona2016]. Somit kann eine störungsfreie Verarbeitung des Filament durch einen herkömmlichen 3D Drucker sichergestellt werden. Ebenso wichtig für eine problemlose Verarbeitung ist die Ovalität. Ist das Filament nicht ausreichend rund kann es zu Förderproblemen und qualitativ mangelhaften Druckergebnissen kommen. Als Industriestandard für die Ovalität haben sich $<5\%$ etabliert [Prusament_Oval].

Ein weiterer wichtiger Faktor wird für qualitativ hochwertiges Filament ist die Feuchtigkeit. Hierzu werden von vielen Herstellern keine Angaben gemacht. Die Restfeuchte im Filament sollte den Wert von $0,3\%$ nicht übersteigen. Sonst kann es zu einer geringeren Haftung der Schichten untereinander, zu Blasenbildung auf den Oberflächen des Druckobjektes und im Extremfall sogar zu Rauchbildung beim Druck kommen[Hamrol2023].

Für die weitere Betrachtung von Toleranzfeldern, sowie für den Vergleich von industriell zu selbst hergestelltem Filament wurden mehrere industrielle Filamenthersteller ausgewählt. Mit dieser Auswahl wird ein breites Spektrum an Filamentherstellern abgedeckt. Von sehr günstigen bis hochpreisigen Filamenten. Zudem werden auch Filamente aus recyceltem Material herangezogen. Diese eignen sich besonders für einen Vergleich mit dem selbst hergestellten Material. Eine Auflistung aller ermittelten Werte ist in Tabelle 2 zu finden. Graphen für den Durchmesser und die Ovalität von den Filamenten von Prusa, E-Sun und Das Filament sind im Anhang dieser Arbeit (siehe Anhang 9 auf Seite 82) zu finden.

ESun ist ein Hersteller von günstigem Filament. Das Filament liegt in allen Bereichen in den Toleranzfeldern. Es ist im Industrievergleich sehr feucht. Gefertigt wird das Filament in drei Produktionsstätten in Vietnam [ESun].

Der Hersteller Das Filament ist preislich und qualitativ etwas höher angesiedelt. Gefertigt wird das Filament in Deutschland [DasFilament].

Prusament ist das von den untersuchten Filamenten beste. Preislich ist es deutlich höher angesiedelt als alle anderen aufgeführten Filamente. Es zeigt enorm enge Toleranzen in Durchmesser und Ovalität. Außerdem ist es sehr trocken. Gefertigt wird dieses Filament in Tschechien [Prusament].

Prusament bietet außerdem Filament mit einem Recyclinganteil an. Dieses erfüllt die Industriestandards und wird ebenfalls in Tschechien hergestellt [Prusament_Recycled].

Ein deutscher Filamenthersteller, welcher ausschließlich Filament mit einem Recyclinganteil von 100% anbietet ist die Recyclingfabrik. Auch dieses Filament hält alle Industriestandards ein [Recyclingfabrik].

Filamenthersteller	Durchmesser [mm]	Ovalität [%]	Feuchtigkeit [%]	Kosten [€/100g]
ESun	$\pm 0,05$	< 3	0,38	1,60
Das Filament	$\pm 0,05$	< 3	0,28	2,06
Prusament	$\pm 0,02$	2,3	0,173	2,80
Prusament Recycled	$\pm 0,05$	(e.A.)	0,093	2,35
Recyclingfabrik	$\pm 0,05$	(e.A.)	0,333	2,20
Eigene Herstellung	$\pm 0,05\text{mm}$	$< 5\%$	$< 0,2\%$	Keine Angabe

Tabelle 2: Übersicht aller Toleranzfelder der untersuchten Filamente

3.2 Anforderungen an das Filament und den Extruder

Neben den ermittelbaren Werten wie Durchmesser, Feuchtigkeit und Ovalität gibt es noch weitere Anforderungen an den gesamten Fertigungsprozess um eine qualitativ hochwertige Filamentspule zu produzieren.

Ein wichtiger Punkt ist hierbei die saubere Aufwicklung des Filaments auf die Spule, da es sonst zu Verknotungen beim Abspulen des Filamentstranges kommen kann und so ein Abbruch des 3D Druckes die Folge wäre. Hierfür wurden erneut die oben genannten Filamenthersteller untersucht und mit der Spule aus eigener Herstellung verglichen.



Abbildung 3.5: Aufwicklung von ESun. Etwas ungeordnet, einzelne Stränge verlaufen ein wenig schräg. [Eigene Darstellung]

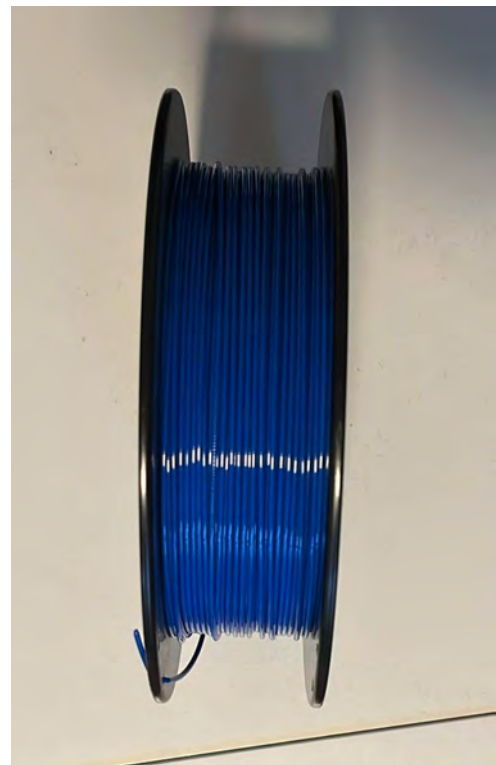


Abbildung 3.6: Aufwicklung von Das Filament. Sehr geordnet und gerade Wicklung. [Eigene Darstellung]

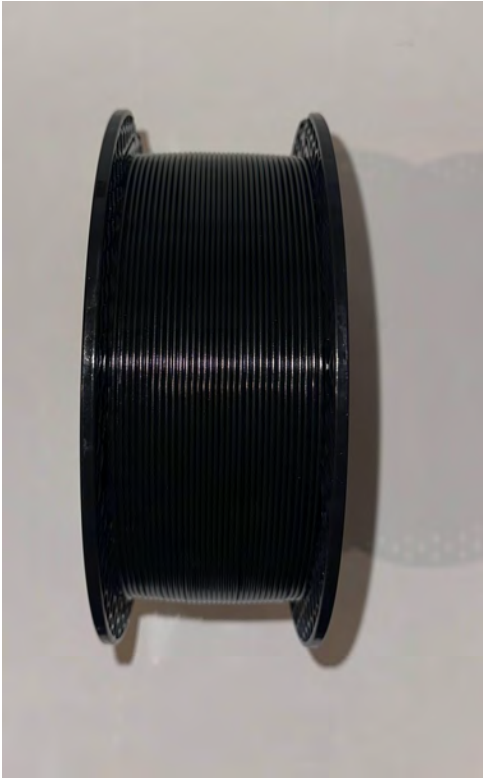


Abbildung 3.7: Aufwicklung von Prusament. Sehr geordnete und gerade Wicklung. [Eigene Darstellung]



Abbildung 3.8: Aufwicklung von Prusament Recycled. Eher ungeordnet, aber dennoch gerade Filamentstränge. [Eigene Darstellung]

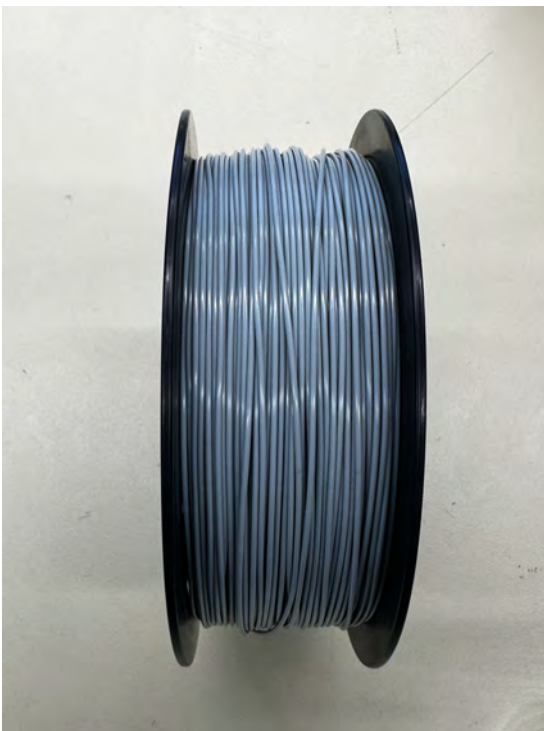


Abbildung 3.9: Aufwicklung von Recyclingfabrik. Sehr unsauber und häufig schräge Stränge. [Eigene Darstellung]



Abbildung 3.10: Aufwicklung von Filament aus eigener Herstellung. Sehr unsauber und häufig schräge Stränge. [Eigene Darstellung]

Industriell hergestellte Filamente weisen meist eine sehr saubere und geordnete Aufwicklung auf. Beispielsweise Prusament und Das Filament (siehe Abbildung 3.6 und 3.7). Die Aufwicklung des Herstellers ESun (siehe Abbildung 3.5) ist nicht so sauber wie von Prusament. Die Aufwicklungsqualität von der Prusament Recycled (3.8) und der Recyclingfabrik (3.9) sind vergleichbar. Sie sind von allen am unordentlichsten. Dennoch können sie problemlos abgewickelt werden und sind nicht Auslöser für einen Druckabbruch.

Der Extruder von 3devo besitzt hierfür eine bewegliche Filamentführung und einen Spulenhalter für handelsübliche Filamentspulen (siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 7). Durch diese wird das Filament geordnet aufgewickelt (siehe Abbildung 3.10). Optisch ist eindeutig ein Unterschied zu erkennen, allerdings lässt sich auch dieses Filament problemlos abspulen und verdrucken.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verpackung in welcher das Filament nach der Extrusion und Aufwicklung auf die Spule verpackt wird. Ein weit verbreitetes Vorgehen in der industriellen Herstellung ist in den folgenden Abbildungen zu sehen. Das Filament wird in eine Einwegkunststofftüte verpackt, eingeschweißt und vakuumiert. In den meisten Fällen wird eine kleine Tüte gefüllt mit Silicagel in die Plastiktüte beigefügt. Ziel dieser Maßnahme ist es, die Feuchtigkeitsaufnahme möglichst stark zu reduzieren und so eine Langlebigkeit des Filaments bei Lagerung zu ermöglichen. Auch hier wurden die bereits genannten Filamenthersteller untersucht.



Abbildung 3.11: Verpackung von ESun. Eingeschweißt, vakuumiert, Spule aus Karton, Silicagel in Einwegtüte. [Eigene Darstellung]



Abbildung 3.12: Verpackung von Das Filament. Eingeschweißt, vakuumiert, Spule aus Kunststoff, Silicagel in Einwegtüte. [Eigene Darstellung]



Abbildung 3.13: Verpackung von Prusament. Eingeschweißt, vakuumiert, wiederverwendbare Spule aus Kunststoff, Silicagel in Einwegtüte. [Eigene Darstellung]



Abbildung 3.14: Verpackung von Prusament Recycled. Eingeschweißt, vakuumiert, wiederverwendbare Spule aus Kunststoff, Silicagel in Einwegtüte. [Eigene Darstellung]



Abbildung 3.15: Verpackung von Recyclingfabrik. Eingeschweißt, vakuumiert, Spule aus Kunststoff, Silicagel in Behälter, sodass es gewechselt werden kann. [Eigene Darstellung]



Abbildung 3.16: Verpackung von Filament aus eigener Herstellung. Wiederverwendbare Box mit kleiner Öffnung zur Filamententnahme, Spulenhalter, Silicagel in Behälter, sodass es gewechselt werden kann. [Eigene Darstellung]

Bei allen aufgelisteten Herstellern wird eine Vakuumpackung mittels Plastiktüte verwendet. Es gibt nur wenige, kleine Unterschiede. Im Vergleich zu allen anderen verwendet ESun eine Spule aus Karton (siehe Abbildung 3.11). Da die leeren Spulen in den meisten Fällen nicht wiederverwendet werden und entsorgt werden, ist dies eine gute Alternative um den Plastikmüll zu reduzieren. Ein weiterer Unterschied besteht in der Verwendung von wiederverwendbaren Spulen seitens Prusament. Diese können durch einen simplen Handgriff in der Mitte geteilt werden. So kann eine sogenanntes Refill-Material ohne Spule [[Prusament_Refill](#)] verwendet werden.

Für die Verpackung des selbst hergestellten Filaments steht der Grundgedanke des Recyclings im Vordergrund. Als Spulen werden leere Filamentspulen von den oben genannten Herstellern verwendet. Diese werden nach dem Verbrauch des gekauften Filaments gelagert und anschließend neu gefüllt.

Eine Einwegverpackung wie sie bei allen oben genannten Herstellern verwendet wird kommt für dieses Projekt nicht in Frage. Es soll eine wiederverwendbare Verpackung verwendet werden, welche ebenfalls die Feuchtigkeitsaufnahme reduziert und eine Lagerung des Filaments ermöglicht. Dazu werden bereits existierende Trockenboxen verwendet (siehe Abbildung 3.16).

Durch eine Gummidichtung am Deckel und ein 3D gedrucktes Silicagelbehältnis beträgt die Feuchtigkeitsaufnahme nahezu null⁵ und die gesamte Verpackung kann nach Bedarf geöffnet und geschlossen werden. Die Trockenbox kann ohne weitere Maßnahmen direkt wiederverwendet werden. Die leere Filamentspule bekommt ein neues Label mit allen notwendigen Informationen⁶ und kann dann mit recyceltem Filament gespult werden. Das verwendete Silicagel wird je nach Bedarf ausgetauscht und neues Silicagel in die Behälter gefüllt. Das Silicagel sollte bei einer Farbänderung von Orange zu Grün ausgetauscht werden. Das aussortierte Silicagel kann getrocknet werden und später erneut eingesetzt werden. Es wird also eine Wiederverwendung der gesamten Verpackungseinheit gewährleistet und bis auf das Label entsteht kein Abfall.

⁵Eine Feuchtigkeitsmessung ergab, dass das Filament innerhalb von 3 Monaten 0,03% Feuchtigkeit aufgenommen hat.

⁶Materialart, Durchmesser, Toleranz und Herstellungsdatum

4 Definition der Bedienungen

Um eine strukturierte und zielgerichtete Durchführung des Projekts sicherzustellen, ist es notwendig, die einzelnen Versuche sorgfältig zu planen und basierend auf den Ergebnissen kontinuierliche Verbesserungen abzuleiten. Der Deming-Zyklus nach William Edwards Deming [Keferstein2018] bietet hierfür eine geeignete methodische Grundlage.

- **P - Plan:** Planung der notwendigen Schritte zur Durchführung der Versuche
- **D - Do:** Durchführung der Extrusion unter Einsatz aller erforderlichen Messmittel und Geräte
- **C - Check:** Überprüfung und Analyse der Ergebnisse der Extrusion
- **A - Act:** Ableitung und Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Filamentqualität auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse

Der PDCA-Zyklus gewährleistet durch seinen Kreislaufcharakter eine kontinuierliche Verbesserung der Filamentqualität anhand eines Soll-Ist-Vergleichs. Im Gegensatz zu industriellen Anwendungen, in denen oft Stichproben verwendet werden, bietet dieses Projekt die Möglichkeit, jede einzelne Probe vollständig auszuwerten.

Das Ergebnis der Extrusionsversuche wird durch verschiedene Einflussgrößen beeinflusst. Alle Einflussgrößen sind zur besseren Übersicht in einem Ishikawa Diagramm (siehe Abbildung 4.1) dargestellt. Die relevantesten Einflussgrößen wurden als Bestandteil dieser Arbeit untersucht und teilweise angepasst. Eine genauere Untersuchung aller möglichen Einflussgrößen würde den Umfang dieser Arbeit überschreiten.

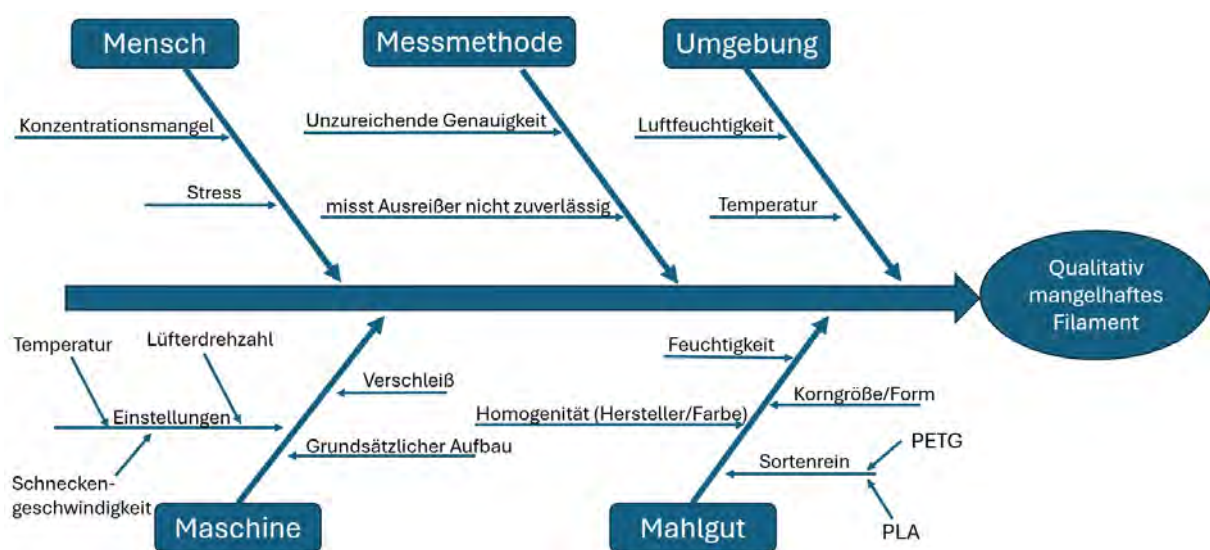


Abbildung 4.1: Ishikawa Diagramm der Einflussgrößen auf das Filament [Eigene Darstellung]

4.1 Messung

Für den PDCA-Zyklus ist ein verlässliches Messmittel unerlässlich. Für diese Arbeit stehen zwei verschiedene Messmittel zur Verfügung. Der Durchmesserensensor von 3devo (siehe Abbildung 4.2) und ein Sensor der Firma Plasmics (siehe Abbildung 4.3) aus der Schweiz. In Tabelle 3 ist eine Gegenüberstellung der beiden Sensoren zu finden.

Kriterien	3devo	Plasmics
Toleranz	$\pm 0,043\text{mm}$	$\pm 0,002\text{mm}$
Dimensionen	1	2
Messzeitpunkt	ca. 3s nach Extrusion	Nach Fertigstellung der Spule
Abtastrate	1Hz	30Hz

Tabelle 3: Vergleich der Sensoren von 3devo und Plasmics

Die beiden Sensoren unterscheiden sich deutlich. Besonders die angegebene Toleranz von $\pm 0,043\text{mm}^a$ des Sensors von 3devo ist für diese Arbeit nicht ausreichend. Der Sensor von Plasmics kann hingegen mit seiner Toleranz von $\pm 0,002\text{mm}^b$ eine ausreichend genaue Messung gewährleisten. Auch die Abtastrate von 1Hz ist für diesen Anwendungsfall zu gering. Es kann nicht gewährleistet werden, dass Ausreißer gemessen werden. Durch die eindimensionale Messung von 3devo ist es nicht möglich, die Ovalität des Filamentstranges zu erfassen und so mögliche Qualitätsmängel festzustellen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Sensor der Firma Plasmics durch eine deutlich geringere Toleranz, höhere Abtastrate und zweidimensionalen Messung gut für diese Arbeit geeignet ist. Durch die Messung des Filaments nach der Extrusion wurde ein Messaufbau (siehe Abbildung 4.4) von Laurenz Rubba erstellt, um eine hochwertige Messung zu gewährleisten. Eine detailliertere Auseinandersetzung mit diesen Sensoren ist in der Studienarbeit von Laurenz Rubba zu finden.

^aAngabe durch Datenblatt 3devo

^bAngabe durch E-Mail der Firma Plasmics



Abbildung 4.2: Infrarot-Durchmessersensor der Firma 3devo [3devo_Sensor]

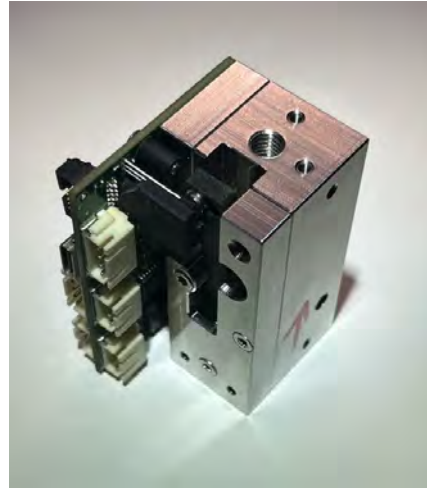


Abbildung 4.3: Sensor Plasmics [Eigene Darstellung]

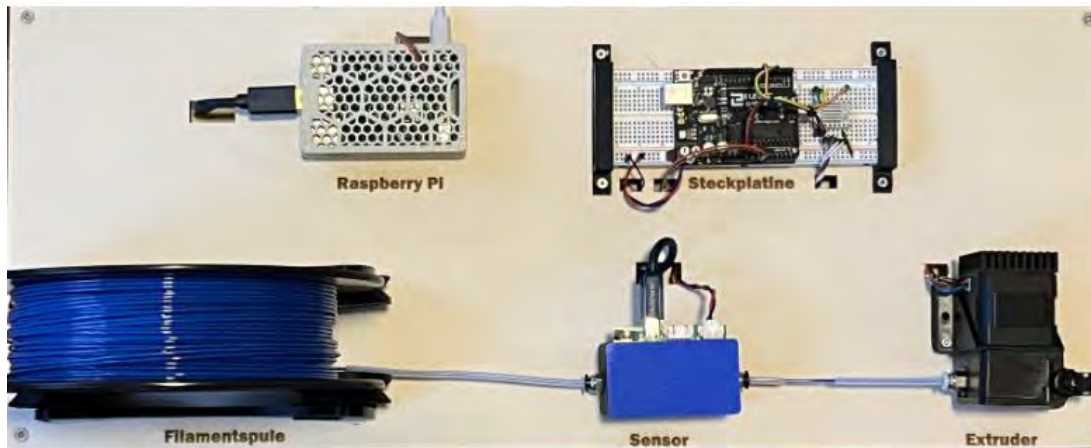


Abbildung 4.4: Messaufbau Sensor Plasmics. Leistung aus der Studienarbeit von Laurenz Rubba [Eigene Darstellung]

Um eine umfassende Dokumentation der einzelnen Spulen und den jeweiligen Änderungen, Maßnahmen und Umgebungsbedingungen zu erhalten, wurde eine Tabelle erstellt. Alle notwendigen Daten sind somit für jede Spule dokumentiert und bei Bedarf abrufbar. Die Tabelle ist im Anhang (siehe Abbildung 9.4 auf Seite 79) dieser Arbeit zu finden.

4.2 Extrusion

Um einen Vergleich der verschiedenen Extrusionsversuche zu gewährleisten sind klar definierte Bedingungen und Abläufe für die Extrusion unerlässlich. Die Firma 3devo bietet für den Composer 450 für verschiedene Materialien Presets³ an. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde das PLA 1,75mm Preset von 3devo für alle Extrusionsversuche gewählt.

³Als Preset bezeichnet man Voreinstellungen, welche vom Hersteller ermittelt wurden um ein gewisses Material zu verarbeiten

Die Umdrehungsgeschwindigkeit von der Spindel auf 3,5U/min, wodurch eine Extrusionsgeschwindigkeit von ca. 1,5m/min erreicht wird. Die Temperaturen in den vier Heizzonen werden durch dieses Presets dabei wie folgt eingestellt: Heizzone 1 = 170°C, Heizzone 2 = 190°C, Heizzone 3 = 185°C und Heizzone 4 = 170°C. Durch diese Temperatureinstellung wird eine effiziente Vermischung der einzelnen Mahlgutbestandteile gewährleistet und ein homogenes Kunststoffgemisch erzeugt. Die Lüftergeschwindigkeit der beiden Radiallüfter ist durch das Preset auf 50% eingestellt.

3devo empfiehlt außerdem die Verwendung einer Vibrationsspinne (siehe Abbildung 4.5) innerhalb des Befülltrichters. Durch Vibrationsimpulse im 3-Sekunden-Takt wird das Mahlgut kontinuierlich zu der Förderschnecke getragen und ein konstanter Materialfluss gewährleistet [3devo_Vibrationsspinne]. Wie in dem Video Zeitraffer-Befülltrichter⁴ zu erkennen ist, wird das Mahlgut trotz unterschiedlicher Kornformen gleichmäßig gefördert.



Abbildung 4.5: Vibrationsspinne [Eigene Darstellung]

Zur Standardisierung der Versuchsbedingungen wurde bei jeder Extrusion eine Mahlgutmenge von 300g (± 5 g) in den Befülltrichter gegeben. Diese konstante Mahlgutmasse trägt zur Vergleichbarkeit der Extrusionsvorgänge bei, da dadurch eine ähnliche Filamentlänge extrudiert wird.

Zwei weitere Größen, welche die Extrusion beeinflussen, sind die Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte. Da der gesamte Aufbau in einer großen Maschinenhalle aufgebaut ist, ist mit eher moderaten Schwankungen zu rechnen. Außerdem wurden die Extrusionen innerhalb der Sommermonate durchgeführt. Dennoch wurden die Temperatur und Feuchte über den gesamten Zeitraum der Arbeit, insbesondere während der Extrusionen, ermittelt und aufgezeichnet. Ein Verlauf über den gesamten Zeitraum ist im Anhang (siehe Abbildung 9.1 und 9.2 auf Seite 77) zu finden. Die gemittelten Werte während der Extrusionen sind in der Excelliste vermerkt. Für die Messungen wurde ein üblicher DHT22 verwendet, da die Genauigkeiten (± 2 -5% bei Luftfeuchte, $\pm 0,5^\circ\text{C}$ bei Temperatur) für diesen Einsatzzweck ausreichend ist. Das Datenblatt ist auf Seite 77 im Anhang zu finden.

⁴Auf dem der Arbeit beiliegenden Speichermedium in Form eines USB-Sticks vorzufinden

5 Verbesserungen des Extruders

Wie in den vorherigen Kapiteln dargestellt, ist es notwendig, Optimierungen an dem Extruder von 3devo vorzunehmen. Im Folgenden wird beschrieben warum und wie diese durchgeführt wurden. Zudem wird anhand von Graphen und Aufnahmen die Wirksamkeit aufgezeigt.

5.1 Lüftung optimieren

Die erste Maßnahme der Optimierung der Hardware des Composer 450 ist der Umbau der Kühlung für das Filament. Im Auslieferungszustand (siehe Abbildung 5.1) besteht die Filamentkühlung aus zwei Radiallüftern. Durch diese wird das Filament nach der Extrusion abgekühlt. Die Intensität der Radiallüfter lässt sich über das Display und Bedienelement einstellen.

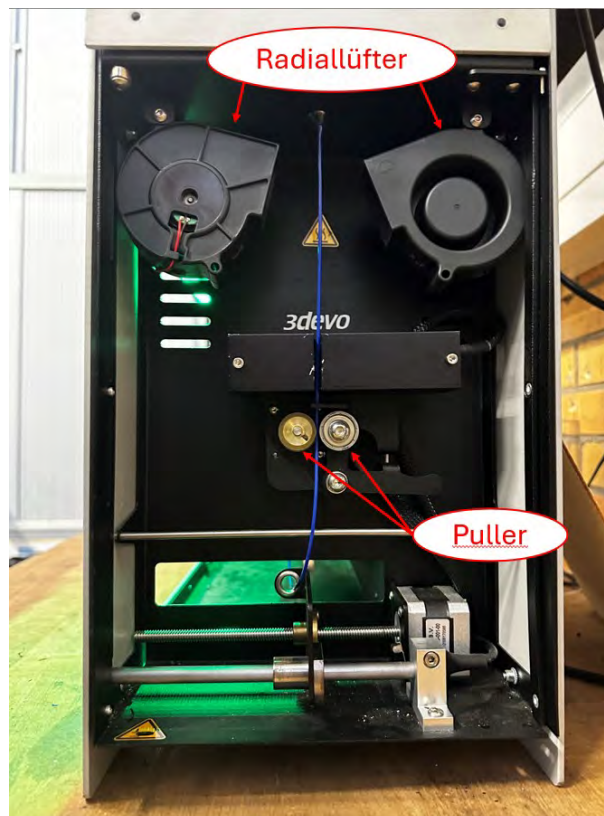


Abbildung 5.1: Auslieferungszustand Filamentkühlung mittels Radiallüfter 3devo

Die Ergebnisse der ersten Extrusionen zeigten eine starke Ovalität im Filament. Die beiden vermuteten hauptverantwortlichen Bauteile am Extruder waren die Kühlung und die Puller. Die Vermutung war, dass durch eine nicht ausreichende Kühlung – durch eine zu geringe Intensität oder eine ungleichmäßige Umströmung – das Filament nicht genügend erstarren lässt und das hochviskose Filament durch den Druck der Puller zusammengedrückt wird, was zur Ovalität führt.

Als Abstellmaßnahme wurde eine verbesserte Kühlung gewählt. Hierfür gibt es im Internet bereits einige Lösungsvorschläge für das verwendete Modell von 3devo.

Eine Lösungsmöglichkeit wurde von dem Maker NyxNK auf der Plattform Printabels⁵ veröffentlicht (siehe Abbildung 5.2). Diese wird auf den rechten Radiallüfter aufgesteckt und bietet so eine 360° Kühlung. Zudem wird die Länge der Kühlstrecke verlängert und der Angriffspunkt näher an die Düse gesetzt. Dadurch wird eine schnellere und stärkere Erstarrung des Filaments sichergestellt. Der linke Radiallüfter entfällt bei dieser Lösung. Um Energie einzusparen ist es möglich diesen vom Strom zu trennen.

Eine weitere Lösungsmöglichkeit wurde von dem Maker whatthefilament ebenfalls auf der Plattform Printabels veröffentlicht (siehe Abbildung 5.3). Durch mehrere Umlenkrollen wird die Strecke der passiven⁶ Kühlung deutlich verlängert. Dadurch wird eine stärkere Erstarrung bis zu den Pullern erreicht.



Abbildung 5.2: Möglichkeit 1: 360° Kühlung
[Kuehlung_Moeglichkeit1]



Abbildung 5.3: Möglichkeit 2: Verlängerung
der Kühlstrecke [Kuehlung_Moeglichkeit2]

Für eine fundierte Entscheidung für eine Lösungsmöglichkeit wurde eine Entscheidungsmatrix (siehe Tabelle 4) erstellt. Dabei wurden die Kriterien Funktionssicherheit, Bauraumbedarf und Fertigungsaufwand je nach Relevanz gewichtet. Die einzelnen Lösungsmöglichkeiten wurden für jedes Kriterium mit 1-10 Punkten bewertet. Anschließend wurden die erreichten Punkte mit der jeweiligen Gewichtung multipliziert und anschließend addiert.

			360° Kühlung		Verlängerung
Kriterium	Gewichtung	Punkte	gew. Punkte	Punkte	gew. Punkte
Funktionssicherheit	50%	9	4,5	6	3
Bauraumbedarf	25%	7	1,75	4	1
Aufwand	25%	8	2	4	1
Ergebnis			8,25		5

Tabelle 4: Entscheidungsmatrix Filamentkühlung

⁵<https://www.printables.com> ist eine bekannte Plattform für den Austausch von 3D-Dateien und Wissen. Sie wird von Prusa betrieben

⁶Als passive Kühlung wird das Abkühlen des Filaments durch die Umgebung bezeichnet. Also ohne aktiven Kühler wie z.B. einen Radiallüfter.

Nach Auswertung der Entscheidungsmatrix wird die 360° Kühlung in den Extruder eingebaut. Ihr Effekt auf die Ovalität lässt sich den unteren Abbildungen entnehmen.

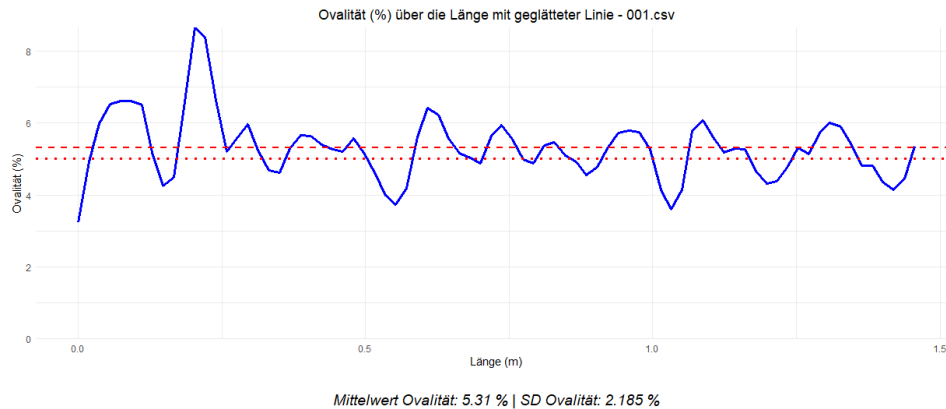


Abbildung 5.4: Ovalität von Spule 001 [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

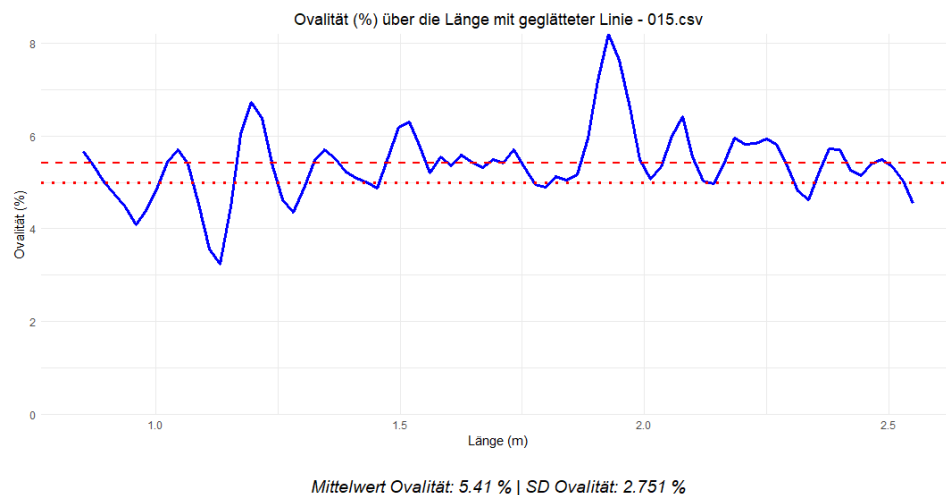


Abbildung 5.5: Ovalität von Spule 015 [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Durch die Verwendung der 360° Kühlung wurde keine Verbesserung der Ovalität erreicht. Diese ist mit dem Mittelwert von 5,41% weiterhin mit dem Mittelwert 5,31% der herkömmlichen Lüftung vergleichbar.

Als weitere Ursache für die Ovalität des Filaments wurden die Puller identifiziert. Diese ziehen am aufgeweichten Filament nach der Extrusion, um durch Streckung den eingestellten Durchmesser zu erreichen. Wenn das Filament allerdings zum Zeitpunkt des Kontaktes mit den Pullern noch nicht ausreichend ausgehärtet ist, kann es zu einer Verformung durch den Druck der Puller kommen. Eine mögliche Abstellmaßnahme hierfür wäre, den ersten Kontaktpunkt mit den Pullern weiter von der Düse zu entfernen. So würde man die Zeit bis zum Kontakt verlängern und das Filament könnte weiter aushärten. Ein solcher Umbau wäre mit einem großen Aufwand verbunden, welcher in Anbetracht des typischen Umfangs einer Studienarbeit nicht durchgeführt wurde.

5.2 Adapter Extruder-Trockner

Um die Zeit zwischen Trocknung und Extrusion des Mahlgutes so kurz wie möglich zu halten, wurde im Rahmen dieser Studienarbeit ein Adapter (siehe Abbildung 5.6) gefertigt. Dieser ermöglicht den Einsatz des Trocknungsgerätes direkt auf dem Extruder. So ist es möglich, das Mahlgut zu trocknen und durch Öffnen des Absperrschiebers das Mahlgut direkt in den Extruder fließen zu lassen. Dort wird es dann nach sehr kurzer Zeit extrudiert. Dadurch wird eine Feuchtigkeitsaufnahme durch die Umgebungsluft so gering wie möglich gehalten.

Dieser Adapter wurde in dem CAD⁷ Programm Creo 10 entworfen. Eine entsprechende STEP-Datei ist auf dem beiliegenden Speichermedium zu finden. Der Name der Datei ist: Adapter-Trockner-Extruder.STEP. Eine Technische Zeichnung mit den Hauptabmaßen befindet sich im Anhang (siehe Abbildung ??)

Da der gesamte Adapter sehr groß und schwer ist, wurde zunächst ein Designcheck⁸ gefertigt, um an diesem alle Maße zu kontrollieren. Im Anschluss wurden kleinere Geometrieoptimierungen am Modell vorgenommen. Um das Trocknergewicht von 9 kg tragen zu können, wurden im Slicer spezielle Einstellungen vorgenommen. Die Perimeter, also die Anzahl an äußeren Schichten, wurden auf 5 gesetzt. Die Schichtanzahl oben und unten wurde auf 8 gesetzt. Zudem wurde das Infillpattern Gyroid verwendet. Durch diese Einstellungen wird eine hohe Belastbarkeit des Adapters erreicht [Birosz2022]. Der so optimierte Adapter wurde schließlich auf einen Großraumdrucker (Prusa XL) gefertigt.



s

Abbildung 5.6: Adapter für Extruder-Trockner[Eigene Darstellung]

⁷Computer Aided Design

⁸Ein Designcheck ist die Überprüfung von CAD-Konstruktionen mittels Prototyp vor der vollständigen Fertigung, um die Einhaltung technischer Spezifikationen zu gewährleisten.

6 Verbesserungen der Einsatzmasse

Wie in Abbildung 5.4 und 5.5 auf Seite 26 zu erkennen, konnten durch die Hardware-optimierungen keine signifikanten Verbesserungen hinsichtlich Durchmessertoleranz und Ovalität erreicht werden. Außerdem konnten die extremen Ausreißer, im Folgenden Blobs genannt, nicht reduziert werden. Durch diese drei Problemfelder ist das Filament weiterhin nicht für den 3D-Druck geeignet, da die Durchmesserschwankungen in Kombination mit den Blobs eine Förderung des Filaments nicht zulassen. Der 3D-Drucker besitzt keine Erkennung für Durchmesserschwankungen im Filament und würde versuchen den Blob zu fördern. Dies führt zum Reißen des Filaments oder zur Verstopfung der Düse, da dieser den Blob nicht schnell genug aufschmelzen kann.

Als Ursachen für die genannten Problemfelder wurde zum einen die Heterogenität in Bezug auf Korngröße und Form des Mahlgutes identifiziert. Dadurch kann nicht sichergestellt werden, dass die einzelnen Körner ein vergleichbares Schmelzverhalten haben und alle Körner ausgeschmolzen werden. Zum anderen weist das Mahlgut mit einer Restfeuchte von 0,35% eine erhöhte Restfeuchte auf. Für eine umfangreichere Materialanalyse siehe Kapitel 3.1.4 auf Seite 14.

Um diese Problemursachen abzustellen wurde verschiedene Abstellmaßnahmen untersucht und umgesetzt. Als erste Maßnahme wird das Mahlgut daher gesiebt, um es in Gruppen ähnlicher Korngrößen zu unterteilen. Die zweite Maßnahme ist die Trocknung des Materials, um die Anforderungen an die Restfeuchte von $<0,2\%$ einzuhalten. Durch diese Maßnahmen sollen die Toleranz des Durchmessers, sowie die Blobs, reduziert werden. Eine genauere Auseinandersetzung mit diesen beiden Maßnahmen ist den beiden folgenden Unterkapiteln zu finden. Zudem wurde vor Extrusion das Mahlgut mit einem starken Magneten nach Metallsplittern abgesucht. Dadurch wird ein Verstopfen der Düse, sowie eine Beschädigung der Spindel vermieden. Es gab bei keiner Untersuchung mit dem Magneten den Fall, dass Metallsplitter gefunden wurden. Dennoch wird dieser Schritt bei jeder Materialcharge durchgeführt.

6.1 Sieben der Einsatzmasse

Zu Beginn der Arbeit wurde eine erste Materialcharge mittels Sieb in Gruppen mit unterschiedlichen Korngrößen unterteilt (siehe Tabelle 1 auf Seite 5). Für die Extrusionsversuche wurde die Korngröße 1-2mm gewählt. In Vorversuchen stellte sie sich als gut verarbeitbar dar und ähnelt in ihrer geometrischen Größe (Virginmaterial) Pallets von 3devo. Es wird zur Reinigung, aber auch zur eigenen Herstellung von Filament ohne Recyclingaspekt verwendet. Hergestellte Filamente aus diesem Granulat zeigen kaum bis keine Blobs und besitzen ein enges Durchmessertoleranzfeld. Auch in der industriellen Herstellung wird Mahlgut mit konstantem Durchmesser verwendet. Hier liegt die typische Korngröße bei 2,5-3,5mm [Gallace2024].

Körner, welche größer als 2mm sind werden dem Recyclingsprozess wieder hinzugefügt und erneut geschreddert. Dadurch wird ein hoher Recyclinggrad von über 90% des gesamten Materials gewährleistet.

Körner mit einem Durchmesser von <1 mm können im Extrusionsprozess nicht verwendet werden, da ihre Verwendung zu einer Instabilität des Prozesses führt. Dies resultiert aus der Tatsache, dass der Filamentdurchmesser durch die Verwendung dieser kleinen Körner stark schwankt und von der integrierten Regelung des 3devos nicht konstant gehalten werden kann.

Die Instabilität des Durchmessers ist vermutlich auf die Bildung eines Schmierfilms innerhalb des Extruders zurückzuführen. Dieser Effekt wird in Abbildung 6.1 veranschaulicht.

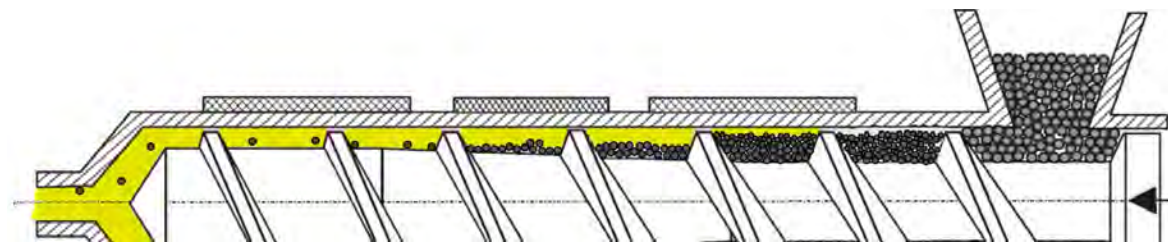


Abbildung 6.1: Bildung eines Schmierfilms bei der Verwendung von Körnern kleiner Korngröße [Eigene Darstellung].

Die Entstehung des Schmierfilms wird durch das Bewegungs- und Schmelzverhalten der kleinen Körner verursacht. Da diese kleinen Körner in den Randbereich der Extruderschnecke und somit in unmittelbare Nähe der Außenwand gelangen, unterliegen sie dort erhöhten Temperaturen. Die Heizkörper, die die Außenwand des Extruders erwärmen, erzeugen an dieser Stelle eine höhere Temperatur im Vergleich zur Schnecke selbst. Diese Temperaturdifferenz führt dazu, dass die kleinen Körner schneller schmelzen als größere Körner, da der Wärmetransport in kleineren Körnern effizienter ist. Dies lässt sich mit folgender Beziehung beschreiben:

$$\Delta T(t)_{\text{kleinesKorn}} < \Delta T(t)_{\text{grossesKorn}} - \text{mit : } \Delta T(t) = T_{\text{außen}} - T_{\text{Kornmitte}}$$

Die kleinen Körner sammeln sich entlang der Extruderwand, wo sie aufgrund ihrer geringen Größe und der höheren lokalen Temperatur schneller aufschmelzen. Dabei bildet sich eine Schmierschicht an der Außenwand des Extruders. Diese Schmierschicht reduziert die Reibung zwischen den Körnern und der Wand sowie innerhalb des Schmelzguts. Als Folge davon verlangsamt sich das Aufschmelzen der größeren Körner weiter, was den Prozess destabilisiert.

Die Auswirkungen der Verwendung von Körnern <1mm sind: kein kontinuierlicher Materialfluss, die Homogenität der Schmelze wird beeinträchtigt, und die Produktion eines konsistenten Filaments wird erschwert.

Da diese kleinen Körner jedoch ein potenzieller Rohstoff sind, werden diese aufbewahrt. Zukünftige Ansätze, wie diese Körner genutzt werden könnten, werden im Ausblick (Kapitel 9 auf Seite 54) behandelt.

Die Auswirkungen des Siebens sind in Abbildung 6.2 und 6.3 zu sehen.

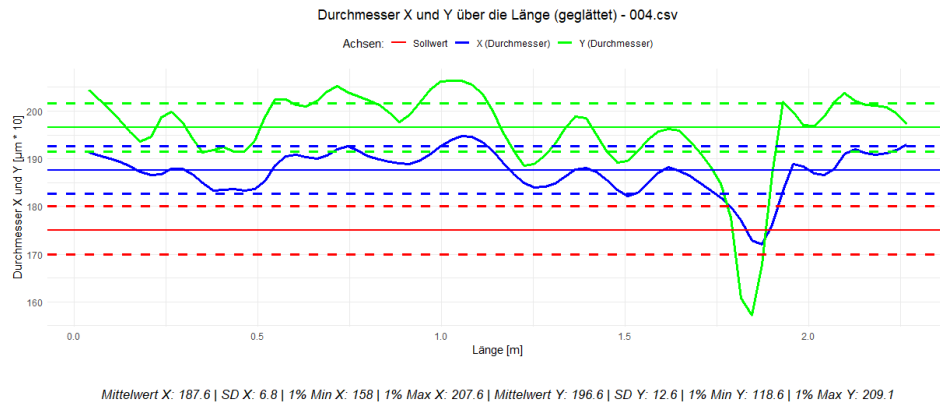


Abbildung 6.2: Durchmesser von Spule 004 [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

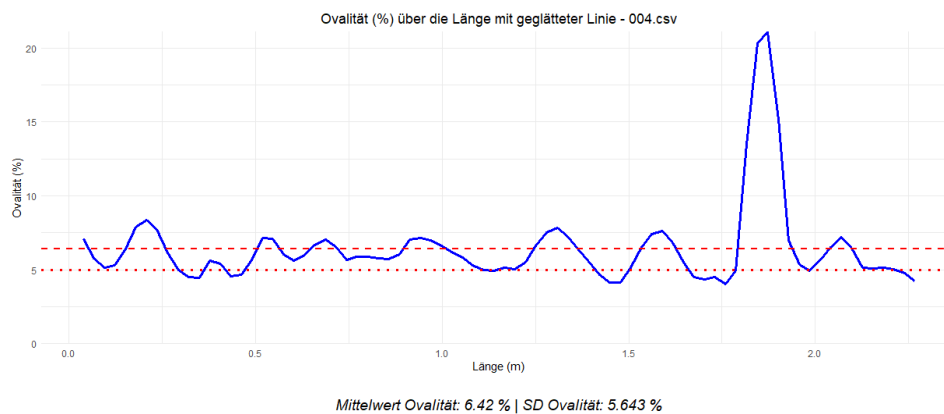


Abbildung 6.3: Ovalität von Spule 004 [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Abgebildet ist die Spule 004⁹. Das Mahlgut wurde hierfür gesiebt und die Korngröße 2-1mm gewählt. Extrudiert wurde ein über 2m langer Filamentstrang.

Durch das Sieben sind anhand dieser Graphen keine deutlichen Verbesserungen zu erkennen. Allerdings war bei Spule 001 im Vergleich zu Spule 004 der Durchmesser deutlich erhöht. Durch das Sieben konnte der Durchmesserversatz von Soll zu Ist also reduziert werden. Außerdem lässt sich eine geringere Schwankung in der Ovalität feststellen. Diese kleinen Verbesserungen lassen sich durch die einheitliche Korngröße der Einsatzmasse erklären. Diese ist nun vergleichbar mit der Korngröße, welche von 3devo für das verwendete Preset

⁹Der Aufbau der Graphen für den Durchmesser und für die Ovalität sind identisch mit den Graphen der Spule 001 (siehe Kapitel 2.1 auf Seite 5)

angedacht ist. Der Extruder bekommt durch das Sieben also die Korngröße auf welche seine Parameter angepasst sind.

Nicht direkt durch die Graphen erkennbar, aber dennoch erwähnenswert ist die leichte Reduktion der Blobs im Filament. Ein Großteil der vorher vorhandenen Blobs bei Spule 001 sind auch weiterhin bei Spule 004 zu erkennen. Es konnte aber dennoch eine leichte Reduktion festgestellt werden. Dies lässt sich ebenfalls durch die Verwendung einer einheitlichen Bzw. geringen Korngröße erklären. Für den Extruder ist es ab einer gewissen Korngröße nicht mehr möglich das Mahlgut vollständig aufzuschmelzen, da die Wärmeeinbringung über den kurzen Kontaktweg entlang der Spindel zu gering ist. Durch den Einsatz von Körnern $<2\text{mm}$ wird sichergestellt, dass alle Körner rechtzeitig aufgeschmolzen werden.

6.2 Trocknung von Einsatzmasse

Bei PLA handelt es sich um ein hygroskopisches Material. Es nimmt die Feuchtigkeit aus der Umgebung auf. Bedingt durch die teils sehr lange Lagerung (mehrere Monate) der aufzubereitenden 3D-Druck-Abfälle, hat das geschredderte Mahlgut einen Feuchtigkeitsgehalt von mindestens 0,35% [Eigene Messung mit MA100C]. Für eine Reduktion des Feuchtigkeitsgehalts wurde das Mahlgut nach dem Sieben und jeweils kurz vor der Extrusion getrocknet. Verwendet wurde dafür der Drucklufttrockner CARD 3G FIT der Firma Wittmann aus Nürnberg. Das Funktionsprinzip des Drucklufttrockners ist in Abbildung 6.4 übersichtlich dargestellt.

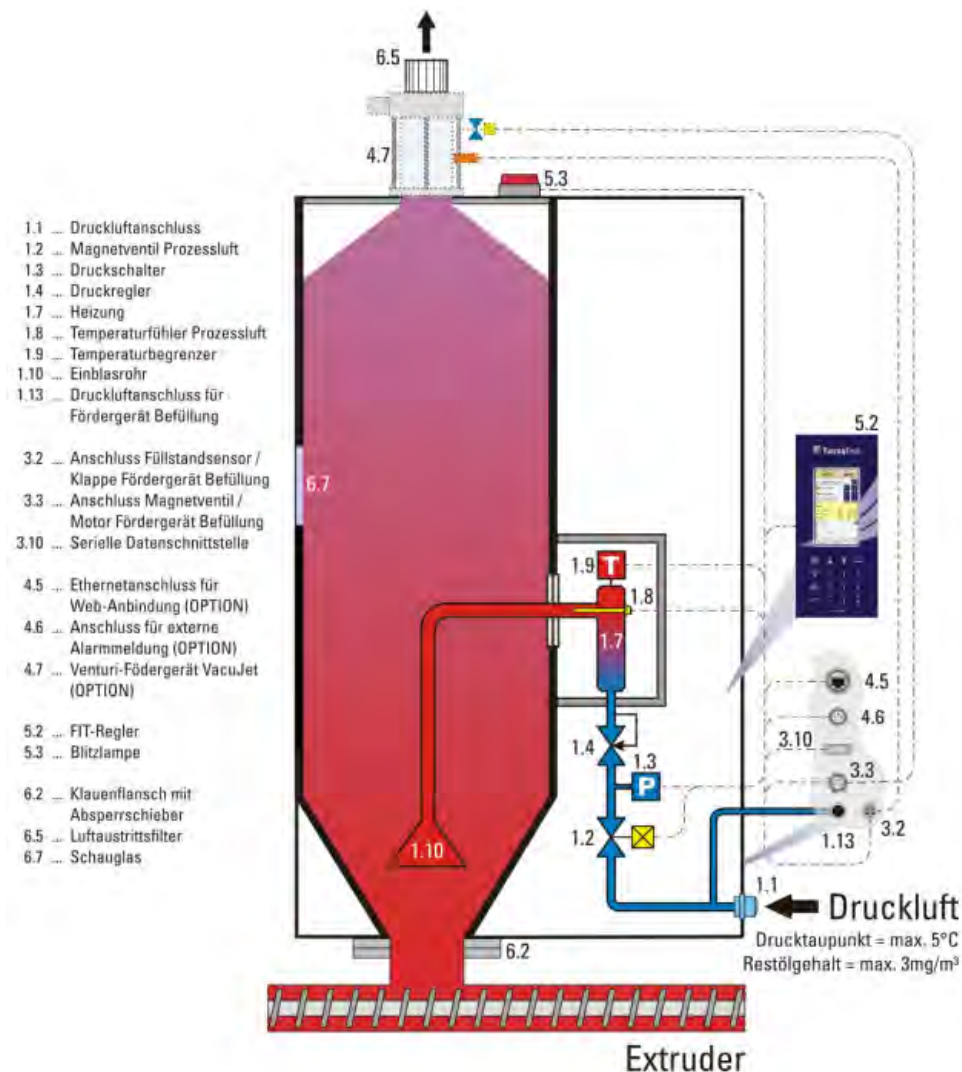


Abbildung 6.4: Funktionsprinzip Trockner Wittmann CARD 3G FIT

Durch einen Druckluftanschluss (1.1) wird dem Gerät trockene Druckluft zugeführt. Diese wird durch eine Heizung (1.7) im Gerät auf eine voreingestellte Temperatur erwärmt. Die Temperatur kann durch den Bediener über den FIT-Regler (5.2) manuell eingestellt werden. Alternativ kann auch ein Materialpreset ausgewählt werden. Hierdurch wird die

Prozesstemperatur und Prozessdauer je nach Material festgelegt. Die erwärmte Druckluft wird mittels Einblasrohr (1.10) in die Trockenkammer eingespeist. Die Feuchtigkeit im Mahlgut diffundiert an die Kornoberfläche und wird durch die trockene, heiße Luft verdampft. Die feuchte Luft wird kontinuierlich durch trockene Luft ausgetauscht und gelangt durch den Luftaustrittsfilter (6.5) nach Außen.

Der verwendete Drucklufttrockner hat kein Materialpreset für PLA in seiner Datenbank hinterlegt. Es war nötig passende Prozessparameter zu definieren. Hierfür wurden als Basis die Werte für PETG verwendet, da hierfür ein Materialpreset hinterlegt ist. Die Prozessparameter für PETG sind mit 4h als Prozessdauer und 90°C als Prozesstemperatur festgelegt. Die Temperatur von 90°C ist hierbei für PLA zu hoch, da es bei dieser Temperatur bereits anfängt aufzuweichen. Dadurch besteht die Gefahr des Verschmelzens der einzelnen Körner des Mahlgutes zu einem Block. Getestet wurden drei verschiedene Temperaturen, 60, 70 und 80°C, bei einer gleichbleibenden Dauer von 4 Stunden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 5 dargestellt. Der Verlauf der Restfeuchte in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur ist in Abbildung 6.5 zu sehen.

Trocknungstemperatur	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
60°C	0,17%	0,16%	0,16%	0,163%
70°C	0,16%	0,15%	0,15%	0,153%
80°C	0,15%	0,14%	0,15%	0,146%

Tabelle 5: Restfeuchtigkeit im Filament nach Trocknung mit versch. Temperaturen nach 4h [Eigene Messung] verwendetes Gerät: MA100C Moisture Analyzer. Messdauer: 5 Minuten

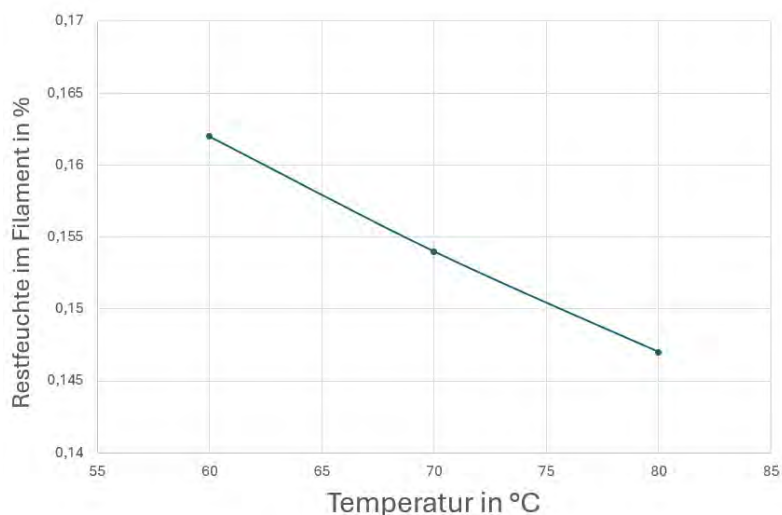


Abbildung 6.5: Verlauf der Restfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Trocknungstemperatur. Gleichbleibende Dauer von 4h. [Eigene Darstellung]

Es ist zu erkennen, dass sich die Restfeuchte antiproportional zu der Trocknungstemperatur verhält. Je höher die Trocknungstemperatur desto geringer ist die Restfeuchte. Obwohl der Mittelwert der Restfeuchte mit 0,146% bei einer Trocknungstemperatur von 80°C am geringsten war, wurden für weitere Trocknungen die Prozessparameter 70°C für 4h gewählt, da das Material bei höheren Temperaturen anfängt zu verklumpen.

Die 4 Stunden Trocknungstemperatur haben sich als ausreichend erweisen. Es handelt sich um eine übliche Dauer bei der Trocknung von Mahlgut in der Industrie [Kreyenborg2021]. Um eine Vergleichsbasis zu schaffen, wurden Filamente verschiedener Hersteller unter den gleichen Bedingungen¹⁰ bezüglich ihrer Feuchte untersucht. Hierfür wurden in Abbildung 6.6 neue, noch eingeschweißte, Filamente von Prusa, E-Sun und Das Filament untersucht und mit dem selbsterzeugten Filament verglichen. In Abbildung 6.8 wird das selbst hergestellte Filament mit Filamenten verglichen, welche einen Recyclinganteil haben. Ausgewählt wurden die Hersteller Prusa [Prusament_Recycled] und die [Recyclingfabrik] aus Braunschweig.

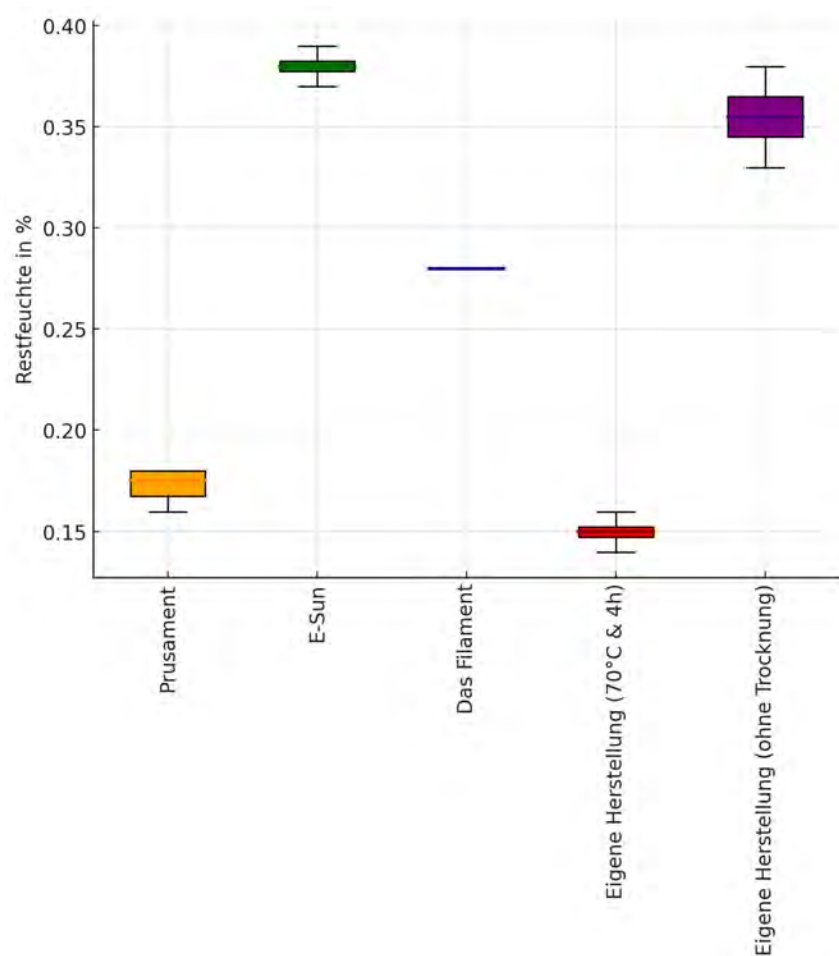


Abbildung 6.6: Filamentfeuchtigkeit von Neumaterial versch. Hersteller und aus eigener Herstellung [Eigene Darstellung]

¹⁰Gleiches Gerät (MA100C), gleiche Messdauer, sowie gleiche Umgebungsbedingungen.

Die vorliegende Untersuchung umfasst drei Messungen unter identischen Bedingungen. Die untersuchten Filamente sind von den Herstellern Prusa (orange, PLA Jetblack), E-Sun (grün, PLA Basic Cold White) und Das Filament (blau, PLA Schwarz), ergänzt durch zwei Varianten aus eigener Herstellung: getrocknet 4h bei 70°C (rot) und ungetrocknet (lila). Auf der x-Achse sind die einzelnen Messungen zu sehen. Auf der y-Achse ist die Restfeuchte im Filament abgebildet. Grundsätzlich lässt die Konstanz über die drei Messungen hinweg auf eine verlässliche Methode und ein reproduzierbares Ergebnis schließen.

Das Filament von Prusa weist mit 0,17% den geringsten Feuchtigkeitsgehalt der industriell hergestellten Filamente auf. Mit Werten von 0,38% und 0,28% sind die Filamente von E-Sun und Das Filament im Vergleich zu Prusa deutlich feuchter. Dies kann an einer längeren Aussetzung an der Umgebung liegen, obwohl die Messungen jeweils direkt nach dem Öffnen der Vakuumverpackung vorgenommen wurden sind. Dennoch könnte es sein, dass die Filamente bei E-Sun und Das Filament nach der Extrusion deutlich länger ohne Vakuumverpackung lagern. Eine Auskunft über die durchschnittliche Lagerdauer der Filamente ohne Vakuumverpackung konnte keiner der genannten Hersteller abgeben. Eine weitere Möglichkeit wäre es, dass die Materialien vor der Extrusion von den Herstellern nicht so stark getrocknet werden wie bei zum Beispiel Prusa. Auch hier gab es keine Aussage der Hersteller. Der Erfolg der Trocknung ist besonders im Vergleich der Mittel-

werte von dem getrockneten und ungetrockneten Filamenten aus eigener Herstellung zu erkennen. Mit einem Mittelwert von 0,36% ist das ungetrocknete deutlich feuchter als das getrocknete (0,153%). Das ungetrocknete Filament ist mit den Filamenten von E-Sun und Das Filament zu vergleichen. Die Notwendigkeit der Trocknung zeigt sich auch darin, dass es durch eine erhöhte Feuchtigkeit wie z.B. von E-Sun und Das Filament zu unerwünschten Druckergebnissen¹¹ kommt (siehe Abbildung 6.7).



Abbildung 6.7: Einfluss der Filamentfeuchtigkeit auf die Druckqualität bei E-Sun. Links: neues PLA, Mitte: getrocknetes PLA, Rechts: weiteres neues PLA. Quelle: [\[ESun_Feuchtigkeit\]](#)

Den insgesamt geringsten Feuchtigkeitsgehalt hat das getrocknete Filament aus eigener

¹¹Zum Beispiel Blasen- oder Fadenbildung (Stringing), sowie schlechter Druckbetthftung

Herstellung. Mit durchschnittlich 0,153% ist es nochmals etwas trockener als das Filament von Prusa. Dies lässt sich durch die intensive Trocknung, sowie durch die direkte luftdichte Verpackung nach der Extrusion erklären. Durch diese geringe Feuchte kann es also ausgeschlossen werden, dass die Probleme die Toleranzfelder - hinsichtlich Durchmesser und Ovalität, sowie die Blobs - auf einen zu hohen Feuchtigkeitsgehalt des Filaments zurückzuführen sind. Diese Annahme wird auch durch die Tatsache bestärkt, dass es bei den Filamenten von Prusa keine Auffälligkeiten hinsichtlich Feuchtigkeit gibt.

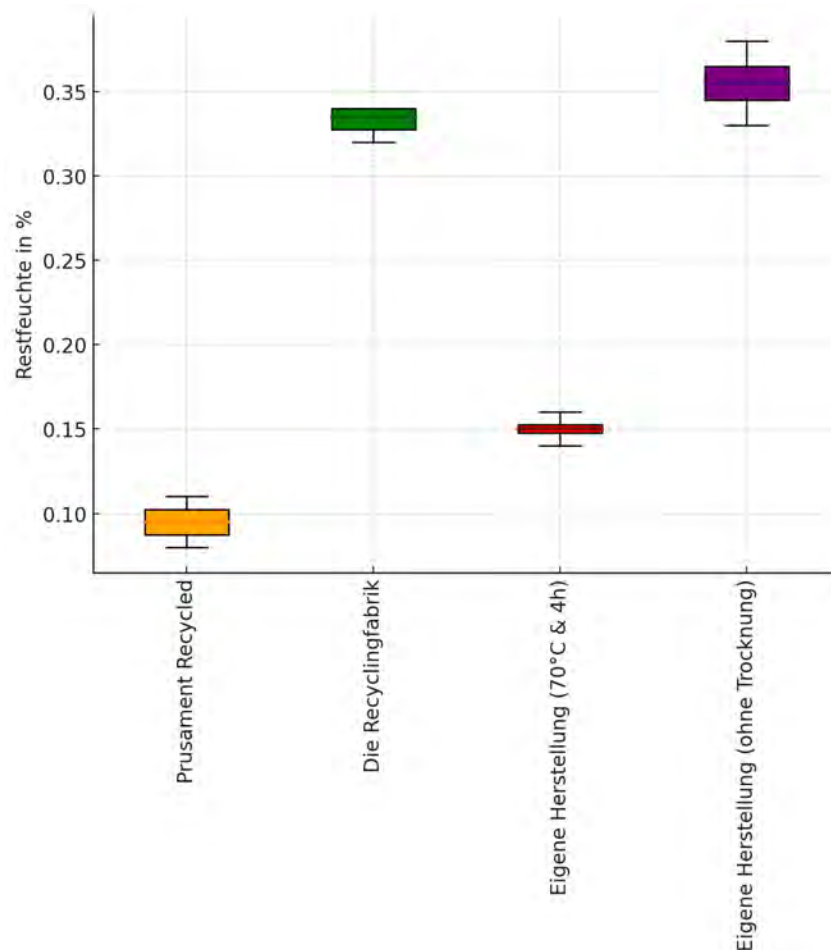


Abbildung 6.8: Filamentfeuchtigkeit von recyclingmaterial versch. Hersteller und aus eigener Herstellung [Eigene Darstellung]

Die vorliegende Untersuchung umfasst drei Messungen unter identischen Bedingungen. Die untersuchten Recycling-Filamente sind von den Herstellern Prusa(orange) und Die Recyclingfabrik (grün), ergänzt durch zwei Varianten aus eigener Herstellung: getrocknet 4h bei 70°C (rot) und ungetrocknet (lila). Auf der x-Achse sind die einzelnen Messungen zu sehen. Auf der y-Achse die Restfeuchte im Filament. Grundsätzlich lässt sich durch die hohe Konsistenz über die drei Messungen hinweg auf eine verlässliche Methode und ein reproduzierbares Ergebnis hinweisen.

Auffällig an diesem Ergebnis ist vor allem der Feuchtigkeitsgehalt von dem recycelten

Prusa Filament. Mit einem Mittelwert von 0,093% liegt dieser nochmal deutlich unter dem Mittelwert vom normalen Prusa Filament (0,173%). Erklären lässt sich dies durch eine weitere Trocknung des Mahlgutes nach der erneuten Einschleusung von Material aus dem Einlaufvorgang in den Herstellungsprozess (siehe Kapitel 3.1.1 auf Seite 11).

Der erhöhte Feuchtigkeitsgehalt von dem Filament der Recyclingfabrik mit einem Mittelwert von 0,333% ist ebenfalls auffällig. Dieser liegt in einem ähnlichen Bereich wie das ungetrocknete Filament aus eigener Herstellung. Es lässt sich also grundsätzlich darauf schließen, dass die Recyclingfabrik das Mahlgut nicht trocknet. Allerdings trocknet die Recyclingfabrik laut eigener Aussage [[GespÄdchsprotokoll_Recyclingfabrik](#)] das Mahlgut vor der Extrusion. Deshalb liegt hier wahrscheinlich eine unzureichende Trocknung vor.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Trocknen des Filaments mithilfe des Drucklufttrockners ein positives Ergebnis hervorbringt. Die ermittelten Trocknungsparameter führen zu einer deutlichen Feuchtigkeitsreduktion und die Trocknung lässt sich durch den benötigten Arbeitsumfang und die Arbeitsdauer sehr gut in den Gesamtprozess eingliedern. Ein Einfluss auf die Einhaltung der Toleranzen des Durchmessers und der Ovalität sind aus den Messergebnissen nicht direkt zu erkennen. Dennoch ist ein geringer Feuchtigkeitswert des Filaments sehr wichtig, da er zu einer geringen 3D-Druckqualität (siehe Abbildung 6.7), sowie zu unregelmäßigem Fluss und Dampfblasenbildung führen kann [[Soukup2021](#)]. Deshalb wird eine intensive Trocknung der Einsatzmasse weiterhin für notwendig erachtet und durchgeführt.

6.3 Homogenität der Einsatzmasse

Wie bereits im Kapitel 1.1 auf Seite 1 dieser Arbeit beschrieben, werden 3D-Druck Abfälle aus PLA und PETG an der Ostfalia Hochschule und in verschiedenen Schulen aus dem Umkreis Wolfenbüttel gesammelt und in eine zentrale Sammelstelle der Ostfalia in Wolfenbüttel gebracht.

Der ursprüngliche Ansatz verzichtete auf eine Sortierung des PLA. Die gesammelten Bauteile, Stützstrukturen und Fehldrucke bestanden aus PLA verschiedener Hersteller und Farben. Diese wurden vollständig zu Mahlgut verarbeitet, gesiebt, getrocknet und extrudiert. Da keine Sortierung notwendig war und die Maschinen weitgehend automatisiert arbeiteten war der Arbeitsaufwand gering.

Das resultierende Filament hatte eine dunkle graue Farbe. Eine gezielte Farbgebung wäre durch den Einsatz von Farbpigmenten möglich gewesen. Dennoch zeigte das Filament trotz Sieben und Trocknung weiterhin Blobs (siehe Abbildung 6.9).

Da keine der bisher durchgeführten Maßnahmen zu einer Verbesserung hinsichtlich Blobs führten, wurde mittels CT-Scan und Mikroskopuntersuchungen versucht, die Ursache ausfindig zu machen. Beide Untersuchungsmethoden zielten darauf ab, einen möglichen Lufteinschluss als Ursache auszuschließen. Dafür wurden die betroffenen Stellen aus dem

Filamentstrang herausgetrennt (Abbildung 6.9) und einzeln untersucht. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen zeigen auf, dass es sich nicht um Lufteinschlüsse im Filamentstrang handelt. Die Blobs bestehen aus festem Material. Die Untersuchungsergebnisse sind im Anhang (siehe Abbildung 2 und folgende auf Seite 15) zu finden.



Abbildung 6.9: Filamentstrang mit Blobs [Eigene Darstellung]

Da es sich offensichtlich nicht um Lufteinschlüsse handelte und keine der bisher ergriffenen Maßnahmen dieses Problem beheben konnten, wurde eine Eingrenzung auf spezifische Farben und Hersteller im Mahlgut vorgenommen. Eine Abhängigkeit zwischen Filamentqualität und Farbe als mögliche Ursache gilt als wahrscheinlich, da dies bereits das Ergebnis von verschiedenen Untersuchungen Dritter war [Soares2018].

Zunächst wurden alle 3D-Druck Abfälle grob nach Farben sortiert. Anschließend wurden diese feiner nach Farben sortiert um so gleichzeitig zu versuchenn nach Herstellern zu sortieren. So ist es gelungen eine Menge von 2,5kg königsblauen Filament des Herstellers Das Filament aus der Masse zu isolieren. Diese homogene Masse war die Basis für alle Versuche ab Spule 007 (siehe Abbildung 6.10 und 6.11).

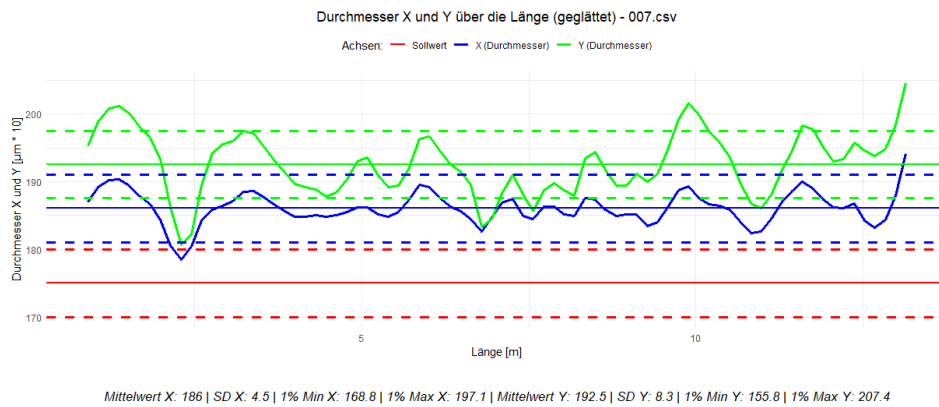


Abbildung 6.10: 007 Durchmesser [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

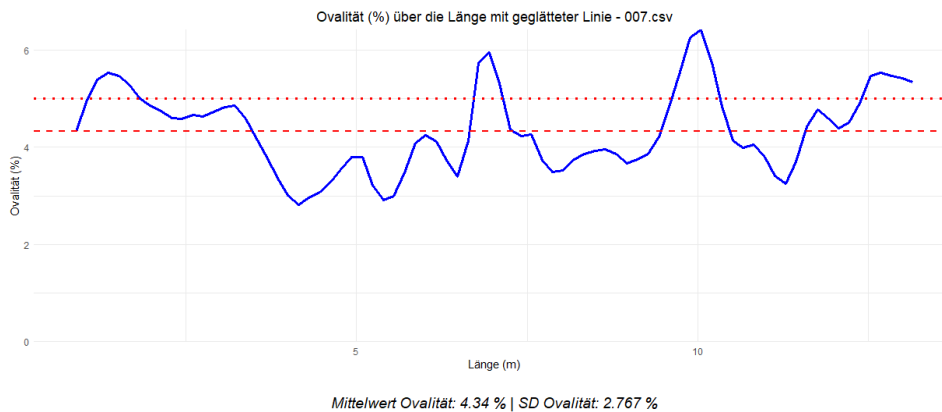


Abbildung 6.11: 007 Ovalität [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Abgebildet ist die Spule 007¹². Das Mahlgut besteht aus 1-2mm großen Körnern und beinhaltet ausschließlich das separierte Filament in königsblau von Das Filament. Extrudiert wurde ein über 10m langer Filamentstrang. Die deutlich längere Filamentstranglänge ist dadurch zu begründen, dass ab diesem Versuch grundsätzlich verwertbares Filament erstellt wurde und nicht bereits nach wenigen Metern klare Qualitätsmängel festgestellt wurden. Im Vergleich zu Spule 004 sind deutlich weniger Toleranzüberschreitungen zu erkennen. Über die gesamte Länge sind nur 3 nennenswerte Toleranzüberschreitungen in Y und nur eine in X aufgetreten. Eine weitere Verbesserung ist die erneute Annäherung an den Soll-Bereich hinsichtlich des Durchmessers. Mit den Mittelwerten $X = 186$ und $Y = 192,5$ ist es gelungen weiter an den Zielwert von 175 zu gelangen.

Außerdem ist eine deutlich geringere Ovalität vorhanden. Diese konnte durch die getroffenen Maßnahmen auf im Mittelwert 4,34% reduziert werden und liegt somit im geforderten Zielwert von $<5\%$.

¹²Der Aufbau der Graphen für den Durchmesser und für die Ovalität sind identisch mit den Graphen der Spule 001 (siehe Kapitel 2.1 auf Seite 5)

Ein erheblicher Unterschied ist bei der Anzahl der Blobs festzustellen. Das aus dieser Masse extrudierte Filament weist keine signifikanten Blobs mehr auf.

All diese Verbesserungen lassen sich auf die Trennung von Filamenten von verschiedenen Herstellern und Farben zurückführen. Durch diese Trennung ist die Einsatzmasse noch homogener. Die Verwendung von nur einem Hersteller und einer Farbe führt zu einem gleichen Verhalten aller Bestandteile des Mahlgutes hinsichtlich Schmelzpunkt und Viskosität. Dies führt zu einer deutlich verbesserten Qualität des extrudierten Filaments.

Eine Herstellung von Material im geforderten Toleranzbereich (siehe Tabelle 5 auf Seite 21) ist mit weiteren Anpassungen vermutlich möglich.

Die Eingrenzung des Mahlguts führt durch den gründlichen Sortiervorgang zu einem deutlich erhöhten Arbeitsaufwand im Recyclingprozess. Gleichzeitig wird es dadurch schwierig, eine Recyclingquote von über 90% zu erreichen. Eine mögliche Optimierungsmaßnahme besteht darin, den Neukauf von Filamenten an allen teilnehmenden Standorten auf einen einzigen Hersteller und wenige definierte Farben zu beschränken.

Als Alternative wurde versucht, die chemischen Bindungsverhältnisse der Filamente von verschiedenen Herstellern und Farben zu untersuchen. So wäre es möglich eine Kompatibilität gewisser Zusammensetzungen von Herstellern und Farben zu erkennen und gemeinsam zu extrudieren. Durch eine Dokumentation dieser Kombinationsmöglichkeiten wäre so in Zukunft weiterhin eine Recyclingquote von $>90\%$ möglich und es wären keine Einschränkungen in der Beschaffung von Filamenten notwendig.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Recycling der Ostfalia Hochschule wurden dafür mit der Fourierreihen Transformation Infrarot Spektroskopie (im Weiteren als FTIR-Spektroskopie bezeichnet) Untersuchungen durchgeführt. Durch diese Untersuchung ist es möglich den molekularen Fingerabdruck eines Materials zu messen [Bruker2024]. Dabei wird durch eine thermische Quelle ein infrarotes Licht erzeugt. Dieses Licht wird durch das Interferometer, die Probe (also das Filament) und als letztes auf einen Detektor geleitet. Das Ergebnis ist ein Interferogramm (Rohsignal). Dieses wird mittels Fourier Transformation in die übliche Infrarot-Darstellung (siehe Abbildung 6.12) transformiert [Guenzler2003]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 6.12 und 6.13) zu finden.

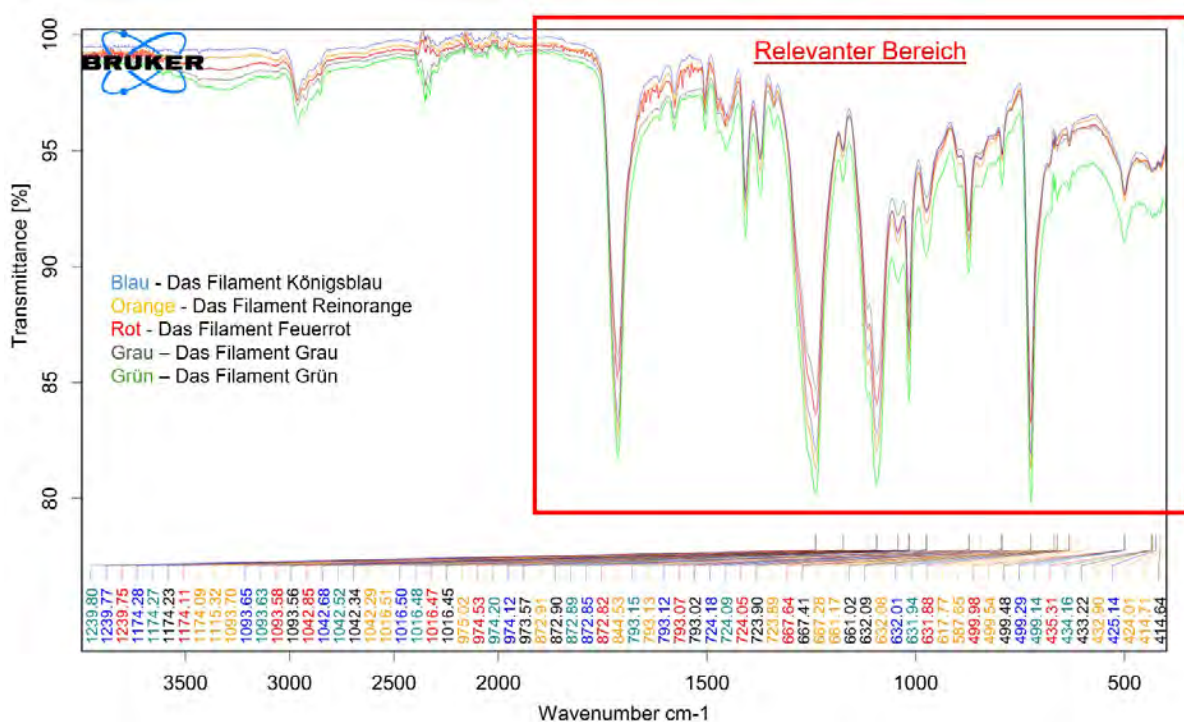


Abbildung 6.12: Ergebnisse FTIR-Spektroskopie verschiedener Farben von Das Filament [Eigene Darstellung] [Messung mit Bruker TENSOR II]

Zu sehen ist das Resultat der FTIR-Spektroskopie von Filamenten verschiedener Farben des Herstellers Das Filament. Untersucht wurden die Farben: Königsblau, Reinorange, Feuerrot, Grau und Grün. Diese wurden gewählt, da sie eine breite Auswahl abdecken und die gängigsten Farben sind. Auf der y-Achse ist die Durchlässigkeit des infraroten Lichtes in Prozenten angegeben. Je nach Wellenlänge wird mehr oder weniger Licht durch die Probe durchgelassen. Auf der x-Achse ist die Wellenzahl angegeben. Der abgebildete Bereich der Wellenzahl ist von 3500 cm^{-1} bis 500 cm^{-1} . Der für die chemischen Bindungsverhältnisse relevante Bereich der Wellenzahl von Filament ist durch einen roten Kasten gekennzeichnet.

Die Kurven der verschiedenen Filamente haben einen sehr ähnlichen Verlauf. Ein leichter Versatz auf der y-Achse der jeweiligen Kurven ist zu erkennen. Dieser wurde aber zur besseren Übersichtlichkeit nachträglich eingefügt und zeigt keinen Unterschied in der Zusammensetzung. Wenige kleine Unterschiede sind zu erkennen. Sie sind so gering, dass sie keine Schlussfolgerung auf einen Unterschied in der Zusammensetzung zulassen.

Deshalb lässt sich festhalten, dass durch diese Messmethode kein gravierender Unterschied in der chemischen Zusammensetzung von Filament des gleichen Herstellers mit unterschiedlichen Farben festgestellt werden kann.

In einer zweiten FTIR-Spektroskopie (siehe Abbildung 6.13) wurden die chemischen Gemeinsamkeiten von verschiedenen Herstellern bei gleicher Farbe untersucht. Hier wurden Weißtöne von Prusament (Signalweiß) und Das Filament (Weiß) verglichen. Der Aufbau des Graphen ist identisch mit dem Graphen aus 6.12.

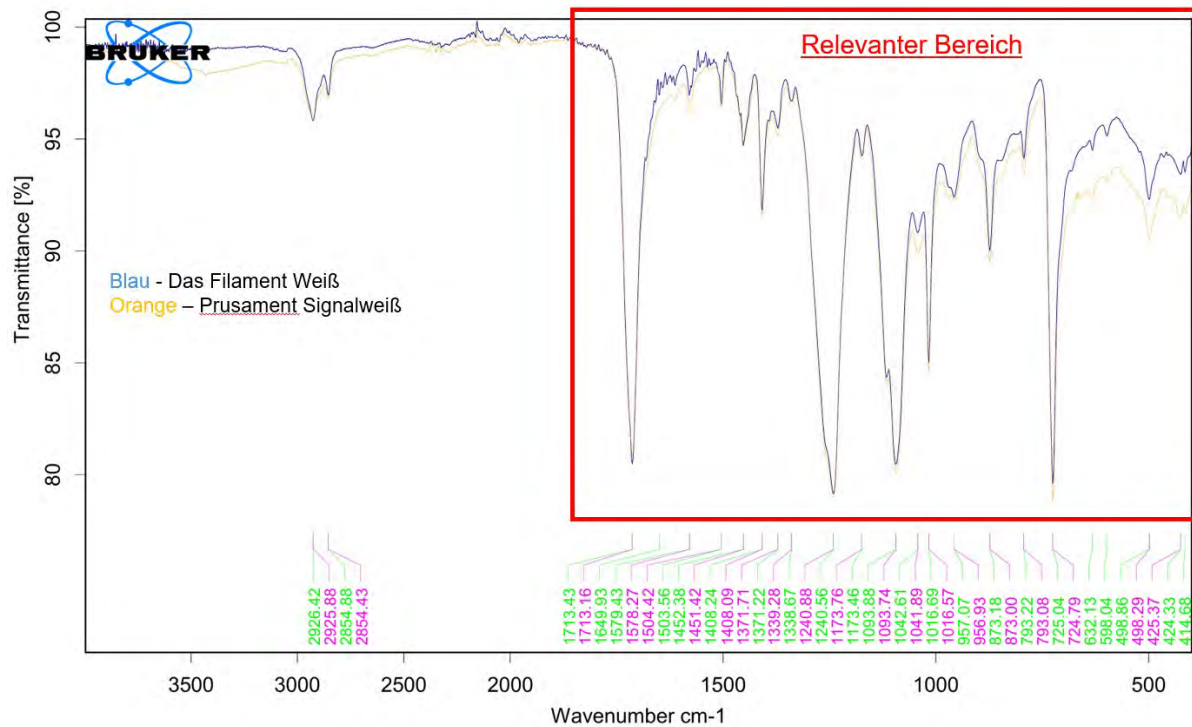


Abbildung 6.13: Ergebnisse FTIR-Spektroskopie verschiedener Hersteller von weißem Filament [Eigene Darstellung] [Messung mit Bruker TENSOR II]

Auch hier sind keine signifikanten Unterschiede durch die FTIR-Spektroskopie zu erkennen. Die Überlagerung der Kurven tritt hier sogar noch etwas deutlicher auf als bei der Untersuchung verschiedener Farben. Es wird vermutet, dass die Zusammensetzung von Prusa und Das Filament, sowie von vielen anderen Herstellern, sehr ähnlich ist. Es gibt nur kleine Veränderungen, welche mittels FTIR-Spektroskopie nicht zu ermitteln sind. Diese kleinen Veränderungen haben aber offensichtlich einen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften des Filaments, und damit auf die Extrusionsergebnisse.

Die FTIR-Spektroskopie eignet sich also nicht um die Vermutung zu belegen. Weitere Methoden zur Untersuchung von Unterschieden in der Zusammensetzung sind grundsätzlich möglich (siehe Kapitel 9 auf Seite 54), wurden aber auf Grund des Umfangs dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

6.4 Beimischung von Virginmaterial

Ein weiterer Prozess in der Verbesserungen der Einsatzmasse ist die Beimischung von sogenanntem Virginmaterial¹³. Durch die Beimischung soll der Prozess der Degradation verlangsamt werden. Die Degradation ist die Verkürzung von Polymerketten durch die Erhitzung des Materials [Hawkins1984]. Da das Material im Laufe des Recyclingsprozesses, sowie durch den Druckvorgang, immer wieder erhitzt wird ist die Degradation zwangsläufig. Durch die Degradation werden die Festigkeitskennwerte des Materials, also maximale Zug- und Druckkräfte, sowie der E-Modul negativ beeinflusst [Lee2022]. Diese Festigkeitskennwerte werden dabei bei 10 Erhitzungen um ca. 5-8% reduziert [Recyclingfabrik2024]. Ein weiterer erhoffter Effekt der Beimischung von Virginmaterial ist die grundsätzliche Reduktion der Durchmesserschwankungen und damit eine Verbesserung der Prozessstabilität.

Eine Herausforderung der Beimischung sind die unterschiedlichen Korngrößen und Kornformen von Virginmaterial und Mahlgut. Das Virginmaterial liegt in Form von industriell gefertigten Pellets vor. Das Mahlgut in geschredderten Flakes (siehe Abbildung 6.14). Durch diese Unterschiede drückt sich das Virginmaterial innerhalb des Trichters des Extruders nach oben und wird nicht von der Schnecke gefördert. Ohne gleichmäßige Verteilung des Virginmaterials über die gesamte Mahlgutmasse besteht die Gefahr, dass sich das Virginmaterial erst nach Aufbrauchen des geschredderten Mahlgutes von der Extruderschnecke fördern lässt. Die gewünschte Verbesserung wäre nicht möglich.



Abbildung 6.14: Vergleich von Kornform und Korngröße: Virginmaterial (unbearbeitet) und Mahlgut [Eigene Darstellung]

¹³Als Virginmaterial wird fabrikneues Material, welches für die Erstherstellung von Filament verwendet wird bezeichnet. Ein Synonym für Virginmaterial ist Neumaterial

Eine Lösungsmöglichkeit war das Schreddern und Sieben des Virginmaterials. So konnte sichergestellt werden, dass die Kornform und Korngröße des Virginmaterials mit der des Mahlgutes übereinstimmt (siehe Abbildung 6.15). Eine Trocknung des Virginmaterials war nicht nötig. Dieses hat laut eigener Messung einen Feuchtigkeitsgehalt von 0,12% und liegt damit im geforderten Bereich.

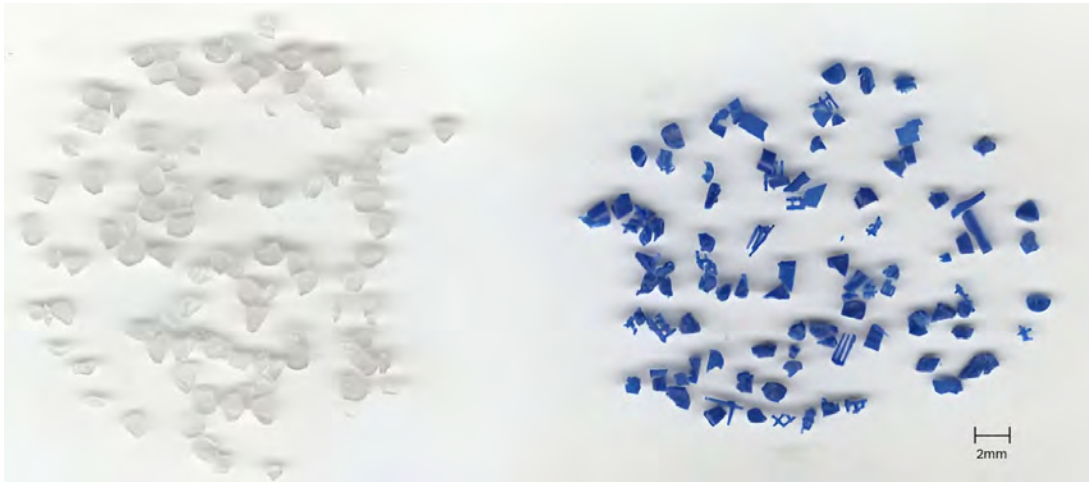


Abbildung 6.15: Vergleich von Kornform und Korngröße: Virginmaterial (geschreddert) und Mahlgut [Eigene Darstellung]

Wie in 6.15 zu sehen ist, sind die Kornform und Korngröße durch das Schreddern und Sieben vergleichbar. Die Zeitrafferaufnahme¹⁴ zeigt, dass eine gleichmäßige Verteilung des Virginmaterials im Mahlgut gewährleistet wird.

Zu Ermittlung eines prozentualen Wertes für die Beimischung von Virginmaterial wurden insgesamt fünf Extrusionsversuche mit jeweils unterschiedlichen Anteilen an Virginmaterial getätigt. Hierbei wurde der prozentuale Anteil von 10% bis 50% Beimischung in 10%-Schritten untersucht. Die Obergrenze von 50% ergab sich durch den Grundgedanken des Recyclings. Bei einer höheren Zumischung wäre dieser nicht mehr vertreten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den nachfolgenden Graphen zu sehen und werden für jede einzelne Untersuchung genauer erläutert.

Eine 10%ige Beimischung bedeutet bei 100g Gesamtgewicht ein Gewicht von 10g Virginmaterial und 90g recycelte Druchabfälle.

¹⁴Auf dem der Arbeit beiliegenden Speichermedium in Form eines USB-Sticks vorzufinden

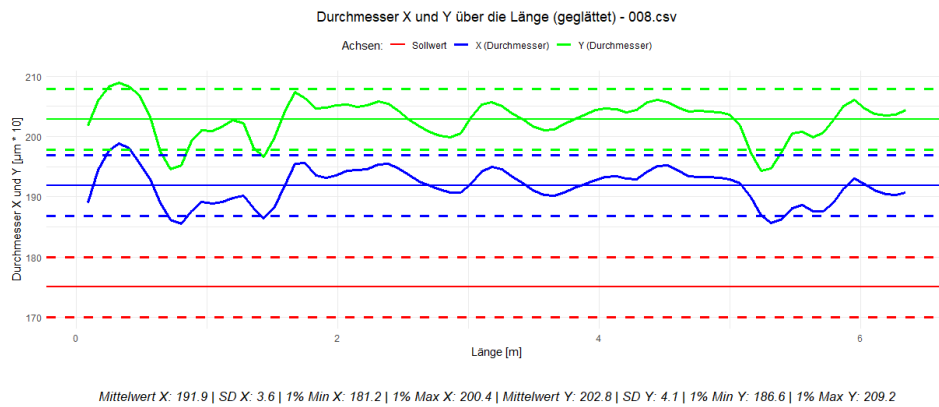


Abbildung 6.16: 008 Durchmesser Virginanteil:10% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

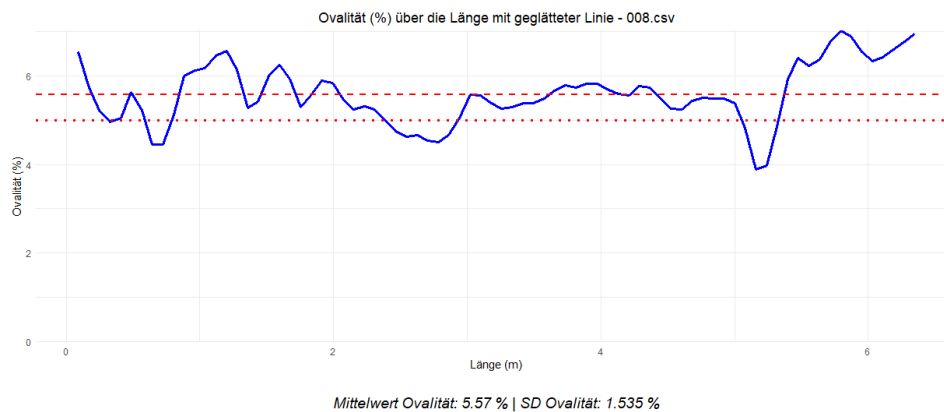


Abbildung 6.17: 008 Ovalität Virginanteil:10% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Abgebildet ist die Spule 008¹⁵. Das Mahlgut besteht aus 2-1mm großen Körnern aus königsblauen Filament von Das Filament und aus 10% geschreddertem Virginmaterial. Extrudiert wurde ein über 6m langer Filamentstrang.

Im Vergleich zu den extrudierten Filamenten ohne Virginanteil ist bereits bei 10% Virginanteil eine deutliche Verbesserung hinsichtlich Durchmesserstabilität zu erkennen. Dieser schwankt innerhalb des geforderten Toleranzfeldes in beiden Dimensionen.

Negativ auffällig ist die erhöhte Ovalität im Vergleich zur Spule 007. Sie steigt im Mittelwert um 1,23% auf 5,57% und liegt somit oberhalb der Toleranzgrenze. Zurückzuführen ist diese Erhöhung vermutlich auf eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit im Filament durch den Virginanteil. Dadurch reicht die eingestellte Kühlleistung des Lüfters nicht aus und der Filamentstrang wird durch die Puller oval geformt.

¹⁵Der Aufbau der Graphen für den Durchmesser und für die Ovalität sind identisch mit den Graphen der Spule 001 (siehe Kapitel 2.1 auf Seite 5)

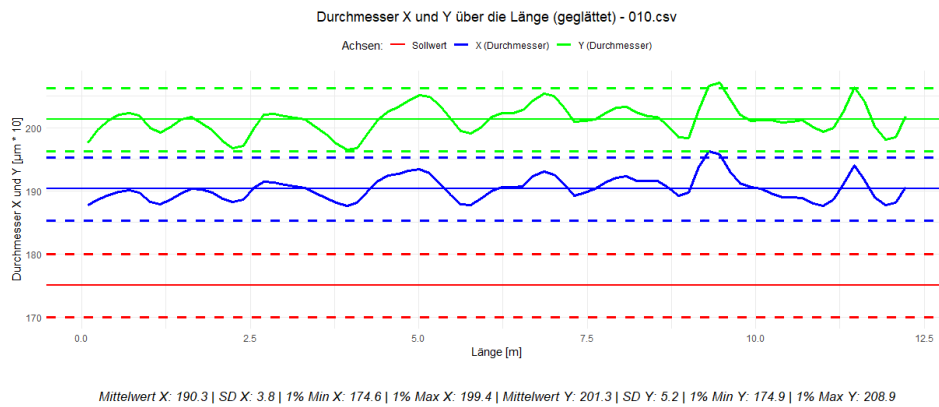


Abbildung 6.18: 010 Durchmesser Virginanteil:30% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

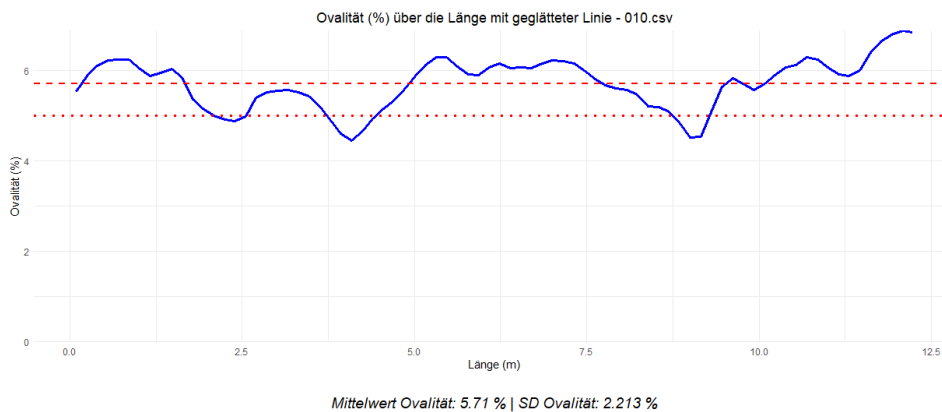


Abbildung 6.19: 010 Ovalität Virginanteil:30% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Abgebildet ist die Spule 010¹⁶. Das Mahlgut besteht aus 2-1mm großen Körnern aus königsblauen Filament von Das Filament und aus 30% geschreddertem Virginmaterial. Extrudiert wurde ein über 12m langer Filamentstrang.

Durch einen Virginanteil von 30% ist eine noch deutlichere Verbesserung der Durchmesserstabilität zu erkennen. Das Filament bewegt sich nun über die gesamten 12,5m im geforderten Toleranzfeld und hat keine Ausreißer und Blobs mehr. Ein Versatz ist sowohl in X, also auch in Y-Richtung zu erkennen. Der Durchmesser liegt mit dem Mittelwert in X = 190 und in Y = 201 deutlich über den geforderten Durchmesser von 175.

Außerdem ist erneut eine erhöhte Ovalität zu erkennen. Eine mögliche Abstellmaßnahme hierfür ist die Erhöhung der Lüfterintensität um so eine schnellere Erstarrung des extrudierten Filaments zu erreichen und eine ovale Form zu verhindern.

optische Kontrolle haptisches Verhalten -> nicht mehr so spröde

¹⁶Der Aufbau der Graphen für den Durchmesser und für die Ovalität sind identisch mit den Graphen der Spule 001 (siehe Kapitel 2.1 auf Seite 5)

Generell hinterlässt das Filament mit 30% Virginanteil einen positiven Eindruck. Es ist weniger spröde im Vergleich zu Filament aus 100% recyceltem Material. Sowohl die optische Kontrolle als auch das haptische Verhalten zeigen klare Verbesserungen. Auch Blobs sind durch die Verwendung von gleichen Mahlgut nicht mehr vorhanden. Grundsätzlich ist es mit diesem Extrusionsergebnis möglich ein qualitativ ausreichendes Druckergebnis zu erzielen.

Die Verwendung von 30% Virginmaterial liegt im selbstgesteckten Ziel von maximal 50% Neumaterial. So wird sichergestellt, dass der Gesamtprozess weiterhin dem Grundgedanken des Recyclings entspricht das Einsatzmaterial hauptsächlich aus 3D-Druck Abfällen besteht.

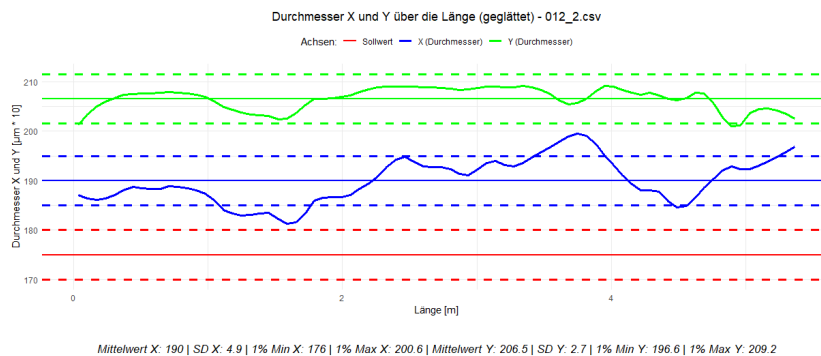


Abbildung 6.20: 012 Durchmesser Virginanteil:50% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

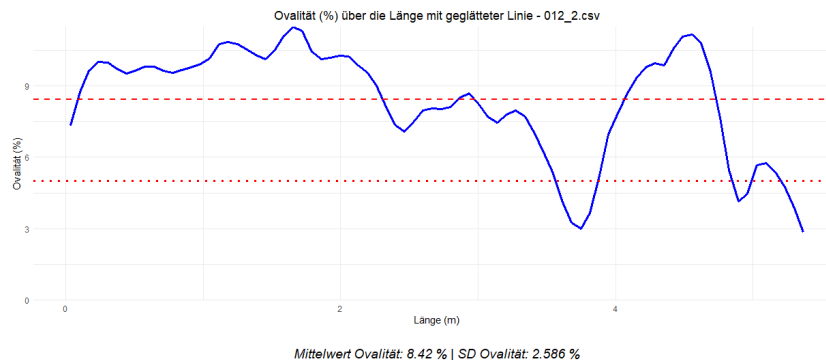


Abbildung 6.21: 012 Ovalität Virginanteil:50% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Abgebildet ist die Spule 012¹⁷. Das Mahlgut besteht aus 1-2mm großen Körnern aus königsblauen Filament von Das Filament und aus 50% geschreddertem Virginmaterial. Extrudiert wurde ein über 5m langer Filamentstrang.

Die Ergebnisse der Spule 012 zeigen einige Probleme. Der Durchmesser weist im Vergleich zu Spule 010 eine verringerte Stabilität auf. Auch die Ovalität ist im Vergleich deutlich

¹⁷Der Aufbau der Graphen für den Durchmesser und für die Ovalität sind identisch mit den Graphen der Spule 001 (siehe Kapitel 2.1 auf Seite 5)

erhöht. Genauere Untersuchungen der Ursachen für das verschlechterte Ergebnis wurden nicht angestellt, da das Ergebnis der Spule 010 mit 30% Virginanteil sehr vielversprechend war.

7 Weitere Verbesserungen und Ergebnis

Durch die Ergebnisse der Spule 010 (siehe Abbildung 6.20 und 6.21 auf Seite 47) wird aufgezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist mit dem Composer 450 Filament in den geforderten Toleranzfeldern zu extrudieren. Allerdings sind auch trotz der Verbesserungen hinsichtlich Extruder und Einsatzmasse weiterhin Problemfelder identifiziert worden. Das relevanteste ist hierbei der erhöhte Durchmesser von ca. 1,95mm anstelle der typischen 1,75mm.

Eine mögliche Ursache für dieses Problem ist eine Abweichung in der verwendeten Messmittels des Composer 450 (siehe Kapitel 4.1 auf Seite 21). Durch den Durchmesserversatz ist es wahrscheinlich, dass das Messmittel ebenfalls einen Versatz von 0,2mm hat. Bei eingestellten 1,75mm Filamentdurchmesser wird durch das Messmittel des Composer 450 auch 1,75mm gemessen. Der tatsächliche Filamentdurchmesser liegt aber 0,2mm höher, also bei 1,95mm. Durch diese Ungenauigkeit ist die verwendete Regelung mit den gewählten Presets nicht fähig das Filament im geforderten Durchmesser herzustellen.

Dieser Versatz zieht sich konstant durch alle Messungen und ist somit durch eine kleine Einstellung am Composer 450 beheben. Der eingestellbare Filamentdurchmesser wurde am Composer 450 um 0,2mm, auf 1,55mm, reduziert. Eine weitere Spule wurde mit dieser veränderten Einstellung extrudiert. Alle anderen softwareseitigen Einstellungen am Extruder sind gleich geblieben. Die Ergebnisse der Spule 017 sind in Abbildung 7.1 und 7.2 zu sehen.

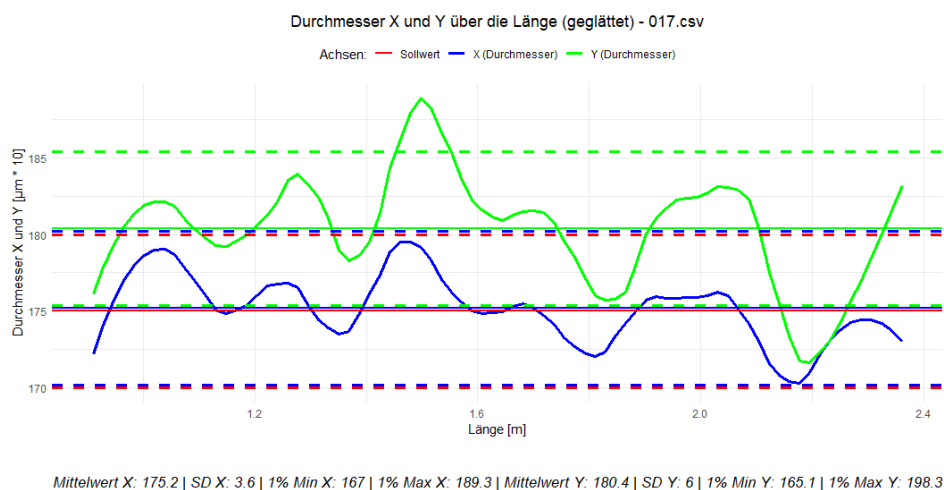


Abbildung 7.1: 017 Durchmesser [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

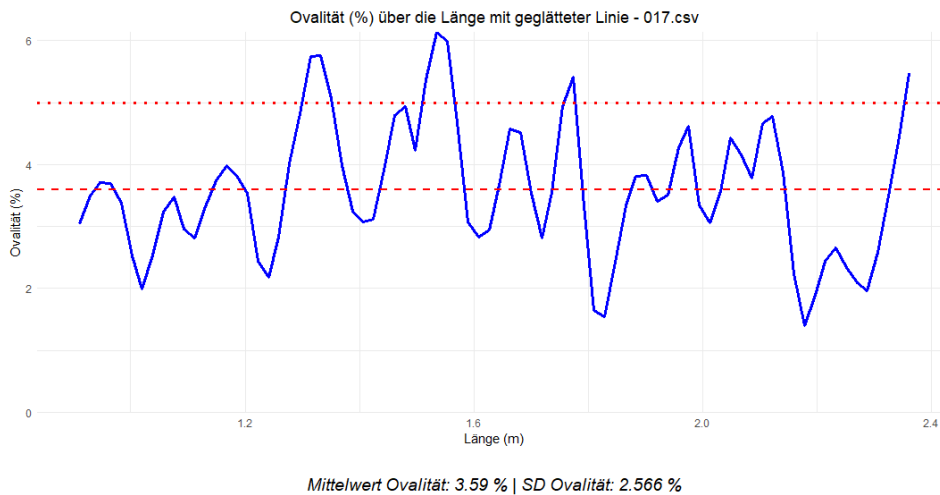


Abbildung 7.2: 017 Ovalität [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Abgebildet ist die Spule 017¹⁸. Das Mahlgut besteht aus 1-2mm großen Körnern aus königsblauen Filament von Das Filament und aus 30% geschreddertem Virginmaterial. Des weiteren wurde softwareseitig der Filamentdurchmesser auf 1,55mm eingestellt um so den Versatz des Messmittels auszugleichen. Extrudiert wurde ein über 2,5m langer Filamentstrang.

Durch die veränderten Einstellung war es möglich den Mittelwert des Durchmesser deutlich näher an den geforderten Durchmesser von 1,75mm heranzubringen. Auf der X-Achse liegt dieser nun mit 175,2 sehr nahe an den geforderten 175. Auf der Y-Achse ist der Durchmesser mit 180,4 noch etwas weiter entfernt als die 175, aber dennoch ist eine Verbesserung auch hier erkennbar. Bis auf zwei kleinere Ausbrüche befindet sich der Durchmesser durchgehend im Toleranzfeld von $\pm 0,05$ mm. Blobs sind nicht zu erkennen. Die Ovalität liegt mit dem Mittelwert von 3,60% deutlich unter den gefordertem Grenzwert von 5%.

Ein Vergleich von Spule 017 zu den geforderten Toleranzen ist Tabelle 6 zu entnehmen

	Durchmessertoleranz	Ovalität	Feuchtigkeit
SOLL	$\pm 0,05$ mm	<5%	<0,2%
IST	$\pm 0,05$ mm*	3,6%	<0,15%
Differenz	± 0 mm	-1,4%	-0,05%

Tabelle 6: SOLL/IST Vergleich von Anforderungen zu Ergebnis der Spule 017

*Bis auf wenige *Überschwingungen über mehrere Extrusionen hinweg. Diese liegen in einem Bereich, welcher keinen Druckabbruch zufolge hätte.

¹⁸Der Aufbau der Graphen für den Durchmesser und für die Ovalität sind identisch mit den Graphen der Spule 001 (siehe Kapitel 2.1 auf Seite 5)

Fazit: Mit den vorgenommenen Verbesserungen an Einsatzmasse und Hardware, sowie geringfügigen modifizierten Einstellungen ist es möglich Filament mit den geforderten Spezifikationen hinsichtlich Durchmesser ($1,75 \pm 0,05\text{mm}$), Ovalität ($<5\%$) und Feuchtigkeit ($<0,2\%$) aus 3D-Druck Abfällen mit dem Composer 450 von 3devo herzustellen.

8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden nach einer vorangegangenen Analyse der Industriestandards Anforderungen zur Herstellung von Filament aus recycelten 3D-Druckabfällen definiert und dementsprechend Verbesserungen am Extruder und der Einsatzmasse vorgenommen. Diese Verbesserungen wurden mit Messungen hinsichtlich Durchmesser, Ovalität und Feuchtigkeit begutachtet.

Eine IST-Analyse zeigte die Schwachstellen von Einsatzmasse und Extruder auf. Hierfür wurde ohne jegliche Verbesserung eine Extrusion vollzogen und das Ergebnis hinsichtlich Durchmesser und Ovalität gemessen. Eine grundsätzliche Eignung zum Erstellen von Filament in den geforderten Toleranzfeldern des Composer 450 war erkennbar.

Die Anforderungen an die Toleranzfelder Durchmesser, Ovalität und Feuchtigkeit wurde durch (teils selbst ermittelte) Werte von Prusament, Das Filament, ESun, Prusament Recycled und Filament von der Recyclingfabrik definiert. Hierfür wurden die genannten Filamente untersucht und vermessen. Eine daraus resultierende Anforderungsliste ist in Kapitel 2 auf Seite 15 zu finden.

Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Versuche zu gewährleisten wurden genauere Anforderungen für die Messungen und die Extrusionen genannt. Betrachtet wurden hierbei die vorliegenden Messmittel, die Umgebungsbedingungen und die Prozessparameter wie z.B. Mahlgutmenge und Einstellungen des Composer 450.

Zwei Verbesserungen wurden in Kapitel 5 dieser Arbeit begutachtet. Zum einen wurde es ersichtlich, dass aufgrund der gemessenen Ovalität im Filament eine Verbesserung der Kühlung des Filamentstranges nötig ist. Hierfür wurden bereits vorhandene Lösungen mittels Entscheidungsmatrix verglichen und die ausgewählte Variante verbaut und das Ergebnis untersucht. Um den Gesamtprozess der Extrusion zu vereinfachen wurde ein Adapter konstruiert und gefertigt. Hiermit ist es möglich den Filamenttrockner direkt auf den Extruder zu setzen und so die Zeit, und damit die Aussetzung zur feuchten Umgebungsluft, von Trocknung zu Extrusion zu verringern.

Ein sehr umfangreicher Teil dieser Arbeit war die Verbesserung der Einsatzmasse. Anhand der vorherigen Ergebnisse wurden weitere Verbesserungsmöglichkeiten ermittelt. Als erste Maßnahme wurde das Mahlgut gesiebt um so eine vergleichbare Korngröße des Mahlgutes zu gewährleisten. Hierfür wurde die Korngröße 2-1mm gewählt. Eine weitere Maßnahme war die Trocknung des Materials. Bereits zu Beginn wurde klar, dass das Mahlgut durch die Lagerung eine erhöhte Feuchtigkeit ausweist. Mittels Drucklufttrockner wurde diese Feuchtigkeit auf 0,15% reduziert und liegt somit unter dem geforderten Grenzwert von 0,2%. Eine ausschlaggebende Verbesserung des Ergebnisses wurde durch eine Homogenität der Einsatzmasse erreicht. Damit ist die Verwendung von nur einem Filamenthersteller in der gleichen Farbe gemeint. Während in vorangegangenen Versuchen das Mahlgut aus Filamentteilchen verschiedenster Hersteller und Farben bestand, wurde nun nur noch das königsblaue Filament von Das Filament verwendet. Dadurch war es möglich die Durchmesserschwankungen zu reduzieren und die Entstehung von Blobs zu verhindern. Als letztes wurde dem Mahlgut Virginmaterial hinzugefügt um so die Durchmesserschwankungen noch weiter zu reduzieren und vor allem den Effekt der Degradation entgegenzuwirken.

Ein weiterhin bestehendes Problemfeld war der Durchmesserversatz von 0,2mm auf 1,95mm. Da dieser Versatz aber konstant über alle Filamentspulen war wurde von einer Fehlfunktion des Composer 450 ausgegangen und der einstellbare Durchmesser um 0,2mm reduziert. Nach der Einstellung auf 1,55mm wurde durch den Composer 450 ein Filament mit einem Durchmesser von 1,75mm extrudiert.

Mit der Spule 016 wurden nochmals alle erfolgreichen Maßnahmen zusammen angewandt und so ein Filament hergestellt, welches sehr nah an den definierten Anforderungen herankommt. Ein Vergleich der erreichten Werte und der Anforderungen ist der Tabelle 6 auf Seite 50 zu entnehmen.

9 Ausblick

Das Ergebnis dieser Arbeit spiegelt ein proof of concept wieder. Es ist mit dem Composer 450 möglich eigenes Filament herzustellen, welches hinsichtlich Durchmessertoleranz, Ovalität und Feuchtigkeit vergleichbar mit industriell hergestellten Filament ist. Aufgrund des reduzierten Umfangs der Studienarbeit wurden einige Untersuchungen nicht weiter verfolgt. Mögliche weiterführende Untersuchungen für weitere Arbeiten werden im folgenden genannt.

Die Verwendung von nur einem Hersteller und nur einer Farbe bedeutet, dass stand Abschluss dieser Arbeit nicht alle 3D-Druckabfälle recycelt werden. Mittels IFTR-Spektroskopie war es nicht möglich zu erkennen, welche Filamente kombinierbar sind. Es wäre möglich durch eine Reihe an Extrusionen Kombinationsmöglichkeiten von Herstellern und Farben zu erarbeiten und so eine höhere Recyclingroute zu erreichen.

Außerdem wurde im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich PLA verwendet. In der Ostfalia und den umliegenden Schulen fällt aber auch 3D-Druckabfall in Form von PETG, ABS und weiteren Kunststoffen an. Ein Ausblick ist diese unterschiedlichen Filamente getrennt voneinander zu sammeln und Prozessparameter für diese zu ermitteln.

Körner mit einer Größe von $<1\text{mm}$ werden im aktuellen Recyclingprozess nicht berücksichtigt und enden im Abfall. Möglich wäre es aber eine Untersuchung hinsichtlich der Verwendung von solch kleinen Körnern vorzunehmen. Mit angepassten Parametern wäre es wohl möglich realistisch einen Extrusionsprozess mit ausschließlich Körnern $<1\text{mm}$ zu betreiben und so Filament herzustellen.

Durch eine Kombination all der genannten Untersuchungen wäre es möglich eine Recyclingquote von 100% zu erreichen und so einen geschlossenen Kreislauf echten Recyclings zu erreichen.

Eine mögliche Maßnahme zur Reduzierung der Ovalität des Filaments wäre eine Verlagerung des ersten Kontaktpunkts mit den Pullern weiter von der Düse entfernt. Dadurch würde sich die Zeit bis zum Kontakt verlängern, sodass das Filament weiter aushärten kann. Zukünftige Arbeiten könnten sich mit der praktischen Umsetzung und den Auswirkungen einer solchen Modifikation befassen, um deren Effektivität und mögliche Optimierungspotenziale zu untersuchen.

Eine letzte Verbesserungsmaßnahme, welche aufgrund des typischen Umfangs einer Studienarbeit nicht vorgenommen wurde, ist das Recycling des extrudierten Filaments während der Reinigungsvorgänge und Einlaufvorgänge. Dieses landet aktuell im Abfall. Durch einen Palletizer wäre es möglich dieses Filament direkt wieder in den Prozess hinzuzufügen und so die tatsächliche Recyclingquote bei 100% zu halten.

Literatur

- (o. D.). In: ().
- 3ddevo (2024). *What is the Feeder*. Zuletzt besucht am 07.12.2024. URL: <https://support.3devo.com/what-is-the-feeder>.
- Artme3d (2024a). *Original Desktop Filament Extruder MK3 (DIY KIT)*. Zuletzt besucht am 21.09.2024. URL: <https://artme-3d.shop/products/original-desktop-filament-extruder-mk3-diy-kit>.
- (2024b). *Original Desktop Filament Extruder MK3 Produktbeschreibung*. Zuletzt besucht am 21.09.2024. URL: <https://www.artme-3d.de/produkte/desktop-filament-extruder-mk3/produktbeschreibung-mk3/>.
- Bruker (2024). *FT-IR Spektroskopie Grundlagen*. Zuletzt besucht am 02.12.2024. URL: <https://www.bruker.com/de/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy.html>.
- Bruno Gallace Adrian Huwer, Michael Blug (2024). “Nachhaltigkeit in der industriellen Fertigung Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft durch den Einsatz eines Pellet 3D Druckers”. In: *Hochschule Trier Umwelt-Campus Birkenfeld*.
- Cardona, C., A. H. Curdes und A. J. Isaacs (2016). “Effects of Filament Diameter Tolerances in Fused Filament Fabrication”. In: *INDIANA UNIVERSITY JOURNAL OF UNDERGRADUATE RESEARCH*.
- Claus P. Keferstein, Michael Marxer und Carlo Bach (2018). *Fertigungsmesstechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Das Filament (2024). *Homepage Das Filament*. Zuletzt besucht am 08.12.2024. URL: <https://www.dasfilament.de>.
- Dongguan Songhu Plastic Machinery Co., Ltd (2024). *3D-Druck-Filament-Extruder-Maschine*. Zuletzt besucht am 07.12.2024. URL: <https://de.songhu3dprint.com/products/3d-printing-filament-extruder-machine.html>.
- Dongoh Lee, Younghun Lee, Inwhan Kim, Kyungjun Hwang, Namsu Kim (2022). “Thermal and Mechanical Degradation of Recycled Polylactic Acid Filaments for Three-Dimensional Printing Applications”. In: *Department of Mechanical Engineering, Konkuk University*.
- ESun (2024). *Homepage ESun*. Zuletzt besucht am 08.12.2024. URL: <https://esun3dstoreeu.com>.
- Fragestellung im Forum Stack Exchange von Swiss Gnome (2023). *Black eSUN PLA+ has moisture damage straight out of the box. Is this normal?* Zuletzt besucht am 02.12.2024. URL: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/20596/black-esun-pla-has-moisture-damage-straight-out-of-the-box-is-this-normal>.
- GrandResearchReport (2024). “Industry analysis: 3D printing filament market”. In: *GrandResearchReport*.

- Hamrol, Adam u. a. (2023). “The Natural Moisture of ABS Filament and Its Influence on the Quality of FFF Products”. In: *Faculty of Mechanical Engineering, Poznan University of Technology*.
- Hawkins, W. Lincoln (1984). *Polymer Degradation and Stabilization*. Springer Berlin, Heidelberg.
- Juliana Breda Soares Fabio Pinto Silva, Liane Roldo (2018). “Analysis of the influence of polylactic acid (PLA) colour on FDM 3D printing temperature and part finishing”. In: *Rapid Prototyping Journal*.
- Kočí, Jakub (2021). *Introducing Prusament PLA Recycled!* Zuletzt besucht am 26.11.2024. URL: https://blog.prusa3d.com/introducing-prusament-pla-recycled_59116/.
- Kreyenborg (2021). *Schnelle PLA-Kristallisation und -Trocknung*. Zuletzt besucht am 02.12.2024. URL: <https://www.k-aktuell.de/technologie/kreyenborg-schnelle-pla-kristallisation-und-trocknung-220503/>.
- Maker3D (2024). *3devo Composer 450 Filament Maker*. Zuletzt besucht am 21.08.2024. URL: <https://www.3d-tulostus.fi/3devo-Composer-450-filament-maker>.
- Márton Tamás Birosz Dániel Ledenyák, Mátyás Andó (2022). “Effect of FDM infill patterns on mechanical properties”. In: *ELTE Eötvös Loránd University, Savaria Institute of Technology*.
- Maschinenbau-Wissen (2024). *Extruder Aufbau und Funktionsweise - Einzel- und Doppelschnecken-Extruder*. Zuletzt besucht am 21.08.2024. URL: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/393-extruder>.
- Nottrodt, Frederik Anton Paul (2023). “Untersuchung der Eignung von Messmitteln zur Regelung von Filamentextrudern”. Studienarbeit Fakultät Maschinenbau; Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften.
- NyxNK (2023). *3devo filament extruder cooling device mod*. Zuletzt besucht am 26.11.2024. URL: <https://www.printables.com/model/496661-3devo-filament-extruder-cooling-device-mod>.
- Ostfalia Lern- und Innovationsfabrik (2024). *Projekt Rec@School*. Wolfenbüttel: Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften.
- Plastic Maschinen Handelsgesellschaft (2024). *Homepage PMH*. Zuletzt besucht am 07.12.2024. URL: <https://www.pmh-extruder.de/startseite/>.
- Prof. Dr. Helmut Günzler, Dr. Hans-Ulrich Gremlich (2003). *IR-Spektroskopie: Eine Einführung*. Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA.
- Prusament (2024a). *Homepage Prusament*. Zuletzt besucht am 26.11.2024. URL: <https://prusament.com/>.
- (2024b). *How to use Prusament refill*. Zuletzt besucht am 08.12.2024. URL: https://help.prusa3d.com/article/how-to-use-prusament-refill_394630.

- Prusament (2024c). *Prusament PC Blend Filament*. Zuletzt besucht am 07.12.2024. URL: <https://de.songhu3dprint.com/products/3d-printing-filament-extruder-machine.html>.
- (2024d). *Spool Sample*. Zuletzt besucht am 28.01.2025. URL: <https://prusament.com/de/spool/sample/>.
- Recyclingfabrik (2024a). *Homepage Recyclingfabrik*. Zuletzt besucht am 02.12.2024. URL: https://www.recyclingfabrik.com/?srsltid=AfmB0ormHrM8J7czmkmdZA_rTZM9ANB6qKreejGgYA
- (2024b). *Was ist eigentlich mit der Degradation?* Zuletzt besucht am 05.12.2024. URL: <https://www.recyclingfabrik.com/pages/avada-faqs?srsltid=AfmB0orQK0Ld0W5d5vvX5-CDDVheASAz1bQJhDpNq3ZZomlbSBcigJrp>.
- Soukup, Max (2021). “Entwicklung eines Vortocknungsgeräts für hygroskopisch technische Kunststoffe wie Polyamid in Filamentform”. Masterarbeit an der Campus02 Fachhochschule der Wirtschaft; Fachhochschul Masterstudiengang Automatisierungstechnik / Automatisierungstechnik-Wirtschaft.
- Veit, Dieter (2023). *Fasern*. Springer Vieweg Berlin.
- whatthefilament (2021). *3Devo Cooler*. Zuletzt besucht am 26.11.2024. URL: <https://www.printables.com/model/70848-3devo-cooler>.
- Wohlers Report (2022). *Wohlers Report 2022: 3D Printing and Additive Manufacturing; Global State of the Industry*. Wohlers Associates.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Rec@School Banner, Quelle: [OLIF2024]	1
1.2	Funktionsweise Einzelschneckenextruder, Quelle: [Maschinenbau-Wissen2024]	2
1.3	Einfluss des Durchmessers auf den Querschnitt. [Eigene Darstellung]	3
2.1	Marktanteil verschiedener Filamente, Quelle: [GrandResearchReport2024] .	4
2.2	Durchmesser Verlauf Spule 001. Messung auf zwei Achsen: X = Blau, Y = Grün. Angestrebter Toleranzbereich in Rot. [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	5
2.3	Ovalitätsverlauf (Blau) Spule 001. Gepunktet: Grenzwert von 5%. Gestrichelt: Erreichte Ovalität in %. [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	6
2.4	Antrieb und Steuerung vom Composer 450. [Eigene Darstellung]	9
2.5	Seitenansicht vom Composer 450. [Eigene Darstellung]	9
2.6	Kühl-, Mess- und Abzugsvorrichtung Composer 450. [Eigene Darstellung] .	9
2.7	Heizelemente, Isolierung und Filamentumlenkung Composer 450. [Eigene Darstellung]	9
3.1	Marktentwicklung 3D-Drucker, Quelle: [Wohler2024]	10
3.2	Extrusionslinie der Firma PMH, Quelle: [PMH]	11
3.3	desktop filament extruder mk3 von ARTME 3D, Quelle: [ARTME3D]	12
3.4	Funktionsweise mk3 von ARTME 3D, Quelle: [ARTME3D2]	13
3.5	Aufwicklung von ESun. Etwas ungeordnet, einzelne Stränge verlaufen ein wenig schräg. [Eigene Darstellung]	15
3.6	Aufwicklung von Das Filament. Sehr geordnet und gerade Wicklung. [Eigene Darstellung]	15
3.7	Aufwicklung von Prusament. Sehr geordnete und gerade Wicklung. [Eigene Darstellung]	16
3.8	Aufwicklung von Prusament Recycled. Eher ungeordnet, aber dennoch gerade Filamentstränge. [Eigene Darstellung]	16
3.9	Aufwicklung von Recyclingfabrik. Sehr unsauber und häufig schräge Stränge. [Eigene Darstellung]	16
3.10	Aufwicklung von Filament aus eigener Herstellung. Sehr unsauber und häufig schräge Stränge. [Eigene Darstellung]	16
3.11	Verpackung von ESun. Eingeschweißt, vakuumiert, Spule aus Karton, Silicagel in Einwegtüte. [Eigene Darstellung]	17
3.12	Verpackung von Das Filament. Eingeschweißt, vakuumiert, Spule aus Kunststoff, Silicagel in Einwegtüte. [Eigene Darstellung]	17
3.13	Verpackung von Prusament. Eingeschweißt, vakuumiert, wiederverwendbare Spule aus Kunststoff, Silicagel in Einwegtüte. [Eigene Darstellung]	18

3.14	Verpackung von Prusament Recycled. Eingeschweißt, vakuumiert, wiederverwendbare Spule aus Kunststoff, Silicagel in Einwegtüte. [Eigene Darstellung]	18
3.15	Verpackung von Recyclingfabrik. Eingeschweißt, vakuumiert, Spule aus Kunststoff, Silicagel in Behälter, sodass es gewechselt werden kann. [Eigene Darstellung]	18
3.16	Verpackung von Filament aus eigener Herstellung. Wiederverwendbare Box mit kleiner Öffnung zur Filamententnahme, Spulenhalter, Silicagel in Behälter, sodass es gewechselt werden kann. [Eigene Darstellung]	18
4.1	Ishikawa Diagramm der Einflussgrößen auf das Filament [Eigene Darstellung]	20
4.2	Infrarot-Durchmessersensor der Firma 3devo [3devo_Sensor]	22
4.3	Sensor Plasmics [Eigene Darstellung]	22
4.4	Messaufbau Sensor Plasmics. Leistung aus der Studienarbeit von Laurenz Rubba [Eigene Darstellung]	22
4.5	Vibrationsspinne [Eigene Darstellung]	23
5.1	Auslieferungszustand Filamentkühlung mittels Radiallüfter 3devo	24
5.2	Möglichkeit 1: 360° Kühlung [Kuehlung_Moeglichkeit1]	25
5.3	Möglichkeit 2: Verlängerung der Kühlstrecke [Kuehlung_Moeglichkeit2]	25
5.4	Ovalität von Spule 001 [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	26
5.5	Ovalität von Spule 015 [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	26
5.6	Adapter für Extruder-Trockner[Eigene Darstellung]	27
6.1	Bildung eines Schmierfilms bei der Verwendung von Körnern kleiner Korngröße [Eigene Darstellung].	29
6.2	Durchmesser von Spule 004 [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	30
6.3	Ovalität von Spule 004 [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	30
6.4	Funktionsprinzip Trockner Wittmann CARD 3G FIT	32
6.5	Verlauf der Restfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Trocknungstemperatur. Gleichbleibende Dauer von 4h. [Eigene Darstellung]	33
6.6	Filamentfeuchtigkeit von Neumaterial versch. Hersteller und aus eigener Herstellung [Eigene Darstellung]	34
6.7	Einfluss der Filamentfeuchtigkeit auf die Druckqualität bei E-Sun. Links: neues PLA, Mitte: getrocknetes PLA, Rechts: weiteres neues PLA. Quelle: [ESun_Feuchtigkeit]	35
6.8	Filamentfeuchtigkeit von recyclingmaterial versch. Hersteller und aus eigener Herstellung [Eigene Darstellung]	36
6.9	Filamentstrang mit Blobs [Eigene Darstellung]	38
6.10	007 Durchmesser [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	39
6.11	007 Ovalität [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	39
6.12	Ergebnisse FTIR-Spektroskopie verschiedener Farben von Das Filament [Eigene Darstellung] [Messung mit Bruker TENSOR II]	41

6.13	Ergebnisse FTIR-Spektroskopie verschiedener Hersteller von weißem Filament [Eigene Darstellung] [Messung mit Bruker TENSOR II]	42
6.14	Vergleich von Kornform und Korngröße: Virginmaterial (unbearbeitet) und Mahlgut [Eigene Darstellung]	43
6.15	Vergleich von Kornform und Korngröße: Virginmaterial (geschreddert) und Mahlgut [Eigene Darstellung]	44
6.16	008 Durchmesser Virginanteil:10% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	45
6.17	008 Ovalität Virginanteil:10% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	45
6.18	010 Durchmesser Virginanteil:30% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	46
6.19	010 Ovalität Virginanteil:30% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	46
6.20	012 Durchmesser Virginanteil:50% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	47
6.21	012 Ovalität Virginanteil:50% [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	47
7.1	017 Durchmesser [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	49
7.2	017 Ovalität [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	50
9.1	Temperaturverlauf über Zeitraum der Studienarbeit [Eigene Darstellung]	77
9.2	Luftfeuchtigkeitsverlauf über Zeitraum der Studienarbeit [Eigene Darstellung]	77
9.3	Excelliste zur Übersicht aller Versuche [Eigene Darstellung]	78
9.4	Technische Zeichnung Adapter Extruder-Trockner[Eigene Darstellung]	79
9.5	Schnitt durch Blob. Aufgetrennt mit Microm HM355.	80
9.6	Schnitt durch Blob. Aufgetrennt mit Microm HM355. Nahaufnahme.	80
9.7	Schnitt durch Blob. Aufgetrennt mit Schleifgerät (2500er Körnung).	80
9.8	Schnitt durch Blob. Aufgetrennt mit Schleifgerät (2500er Körnung). Nahaufnahme.	80
9.9	Schnitt durch Blob. Aufgetrennt mit Rasierklinge.	80
9.10	Schnitt durch Blob. Aufgetrennt mit Rasierklinge. Nahaufnahme.	80
9.11	Mahlgut mit 10% Virginanteil [Eigene Darstellung]	81
9.12	Mahlgut mit 30% Virginanteil [Eigene Darstellung]	81
9.13	Mahlgut mit 50% Virginanteil [Eigene Darstellung]	81
9.14	Durchmesser von Prusament [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	82
9.15	Ovalität von Prusament [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	82
9.16	Durchmesser von Das Filament [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	83

9.17	Ovalität von Das Filament [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	83
9.18	Durchmesser von ESun [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	84
9.19	Ovalität von ESun [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor] . . .	84
9.20	Durchmesser von Prusament Recycled [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	85
9.21	Ovalität von Prusament Recycled [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	85
9.22	Durchmesser von Recyclingfabrik [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	86
9.23	Ovalität von Recyclingfabrik [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]	86

Tabellenverzeichnis

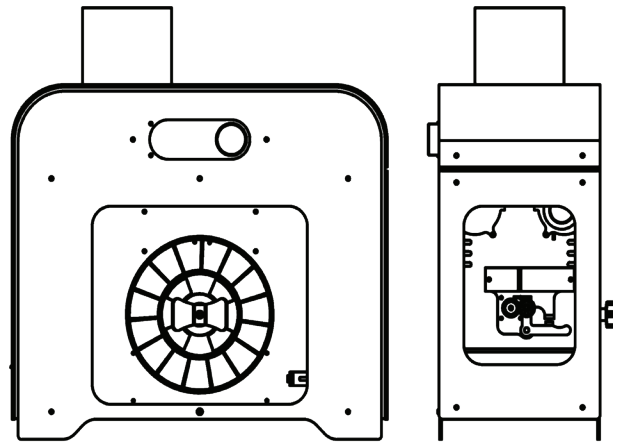
1	Masseverteilung nach Korngröße	5
2	Übersicht aller Toleranzfelder der untersuchten Filamente	15
3	Vergleich der Sensoren von 3devo und Plasmics	21
4	Entscheidungsmatrix Filamentkühlung	25
5	Restfeuchtigkeit im Filament nach Trocknung mit versch. Temperaturen . .	33
6	SOLL/IST Vergleich von Anforderungen zu Ergebnis der Spule 017	50

Inhaltsverzeichnis - Anhang

1. Datenblatt: COMPOSER 450 3devo
2. Datenblatt: MA100C Moisture Analyzer
3. Datenblatt: Bruker Skyscan 2214
4. Datenblatt: Bruker Tensor II
5. Datenblatt: Keyence VHX-600D
6. Datenblatt: Wittmann CARD 3G FIT
7. Datenblatt: Wanner C17.26 Highstand
8. Datenblatt: DHT22
9. Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverlauf
10. Excelliste - Übersicht der Versuche/Extrusionen
11. Technische Zeichnung Adapter Trockner-Extruder
12. Blobuntersuchung - Mikroskopaufnahmen
13. Abbildung Virginanteile
14. Durchmesser- und Ovalitätsgraphen zu Prusa
15. Durchmesser- und Ovalitätsgraphe zu E-Sun
16. Durchmesser- und Ovalitätsgraphe zu Das Filament
17. Durchmesser- und Ovalitätsgraphe zu Prusament Recycled
18. Durchmesser- und Ovalitätsgraphe zu Recyclingfabrik

COMPOSER 450

FILAMENT MAKER



COMPOSER 450

Product Specifications



Filament Maker Overview	Temperature max.	Max temperature of 450 °C
	Band heater	Ceramic
	Heating zones	4
	Purpose	For mixing, compounding & experimentation
	Compatible materials	PLA, ABS, PC, PS, PETG, TPU, TPE, PPS, PVA, Bio PE, NEW PET, PA (6,12, 66), PEEK, PC, PS, PEKK, PAEK, PEI, PSU, PES, PTFE, PVD+, and many more
	Independent controls	Yes
Output	RPM range	2- 15 RPM
	Filament diameter range	0.5- 3 mm (0.02- 0.12 inches)
	Optical sensor accuracy	43 microns (1.69 mils)
	Nozzle extruder	Diameter 4 mm (0.16 inches)- Replaceable
Extruder System	Screw/Barrel alloy	High chromium and molybdenum steel alloy
	Hardening treatment	Nitrided
	Compression	3 stage
	Extruder design	Swappable
	Extrusion screw type	Mixing screw
Energy	Consumption average	300- 400 W
	Consumption max.	1300 W
	Voltage	110- 230 V
	Frequency	50- 60 Hz
Capacity	Hopper volume	2 liters
	Spool holder	1
	Spool size	Diameter 240 mm (9.4 inches) Width 120 mm (4.7 inches)
Size & Weight	Dimensions	506 x 216 x 448 mm 19.2 x 8.5 x 17.6 inches
	Weight	Extruder (Without box) 24.5 kg (54 lbs) Extruder + box 27 kg (59.5 lbs)
Connection	Firmware updates	Regular updates
	Extrusion data analysis	DevoVision application

For more info on the **Composer 450 Filament Maker** or questions about our extrusion ecosystem contact sales at: sales@3devo.com



MA100C Moisture Analyzer

Fully Automatic Infrared Moisture Analyzer with Ceramic Heating Element

Moisture Analyzer



- Time-saving and convenient alternative to a drying oven
- Comprehensive range of options for flexible adaptation to various drying tasks
- Ideally suited for ambitious measuring tasks in the fields of quality control or research
- Utmost safety due to self-calibrating system and full GMP suitability
- Particularly well suited for samples with demanding drying behaviour and very dry samples

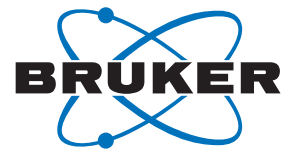
Max. weighing capacity	100 g
Repeatability, typical	Starting at an initial sample weight of approx. 1 g: $\pm 0.1\%$ starting at an initial sample weight of approx. 5 g: $\pm 0.02\%$
Readability	1 mg, 0.01% 0.1 mg, 0.001%
Typical sample quantity	5 – 15 g
Reading display	% moisture content (optionally available with conversion factor) % dry weight RATIO value mg weight loss g residue g/kg residue g/l residue
Temperature range and settings	30°C–180°C, stand-by temperature selectable from 30–100°C in increments of 1 degree
Sample heating	Infrared heating using a round ceramic heating element
Heating programs	Standard, quick, gentle and phase drying
Shutoff criteria	Optional: <ul style="list-style-type: none"> - Fully automatic - SPRM mode (optimization to a reference system) - Semi-automatic (1–50 mg/5–300 sec.) - Semi-automatic (0.1–5.0%/5–300 sec.) - Timer setting (3x 0.1–999 min.) - Timer setting + fully/semi-automatic (2x 0.1–999 min. + automatic) - Manual
Access to sample chamber	Motorized cover
Measuring program	30 programs saved in a non-volatile memory (freely selectable parameters)
Data storage	Result statistics for the last 9999 measurements/program
Operator guidance features	Menu-driven, alphanumeric dialogue text (5 languages selectable)
Parameter data entry	<ul style="list-style-type: none"> - Optimized text entry via softkeys - Numeric entry via keypad - Optional data entry via barcode scanner
Report printout	<ul style="list-style-type: none"> - Printout using the optional, internal printer YDP01MA - Configurable GLP-report for measuring results calibration adjustment (5 languages selectable)



Easy to clean



With optional printer YDP01MA



SKYSCAN 2214

- High-Resolution Multiscale Nanotomograph

Innovation with Integrity

Microtomography

Technical Data

X-ray Source	Open (pumped) type with diamond window 20-160 kV, 13 W max.
X-ray Detector(s)	6 Mp active pixel flat-panel 11 Mp large format cooled CCD 11 Mp mid format cooled CCD 8 Mp hi-res cooled CCD
Image Formats	Up to 8000 x 8000 x 2300 pixels after a single scan
Spatial Resolution	60 nm smallest pixel size, <500 nm low-contrast resolution (10% MTF)
Positioning Accuracy	<50 nm for rotation, anti-vibration granite platform with pneumatic leveling
Maximum Object Size	300 mm in diameter (140 mm scanning size), 400 mm in length, maximum object weight 25 kg
Radiation Safety	<1 μ Sv/h at any place of the instrument surface

System Dimensions



Bruker microCT is continually improving its products and reserves the right to change specifications without notice.
Order No. DOC-B76-EXS012 © 2018 Bruker AXS.

Bruker microCT
info.bmct@bruker.com

Worldwide offices
bruker.com/mct-offices

Online information
bruker.com/skyscan2214

www.bruker.com





● **Tensor II** FT-IR Spectrometer

Specifications

Spectral range:	8,000 to 340 cm^{-1} , with standard KBr beamsplitter 11,000 to 350 cm^{-1} , optional, with broadband KBr beamsplitter 5,000 to 200 cm^{-1} , optional with CsI optics 6,000 to 500 cm^{-1} , optional with „High Humidity“ ZnSe optics
Resolution:	better than 0.4 cm^{-1}
Wavenumber accuracy:	better than 0.01 cm^{-1} @ 2,000 cm^{-1}
Photometric accuracy:	better than 0.1% T
Signal-to-Noise:	5 Sec: >6,000:1 (= <7.2 $\times 10^{-5}$ AU noise) peak-to-peak, 4 cm^{-1} resolution
Signal-to-Noise (achievable):	5 Sec: >8,000:1 (= <5.4 $\times 10^{-5}$ AU noise) peak-to-peak, 4 cm^{-1} resolution 1 Min: >45,000:1 (= <9.7 $\times 10^{-6}$ AU noise) peak-to-peak, 4 cm^{-1} resolution
Interferometer:	RockSolid™, permanent aligned, high stability
Optics:	Gold coated mirrors
Laser:	Diode laser with long life time
IR-source:	Globar, electronically stabilized for long life time
Detector:	DigiTect™ detector system, high sensitivity room temperature DLATGS, optional LN ₂ cooled or cryocooled MCT detectors (photo conductive and photovoltaic, permanently evacuated PermaVac-option), NIR detectors; easy exchange

Scan speed:	5 velocities, 1.4 - 51 mm/sec opd
Spectra rate:	optionally up to max. 25 spectra per second @ 16 cm ⁻¹ optical resolution
A/D converter:	True 24-bit dynamic range for all scan velocities; Dual channel data acquisition
Validation:	IVU internal validation unit, fully automated OQ/PQ test and protocols
Aperture wheel:	11 positions, fixed diameters, ranging from 250 µm to 6 mm
Spectrometer size:	66.5(W) x 45.5(D) x 28.7(H) cm
Sample compartment size:	25.5(W) x 27(D) x 16(H) cm
Weight:	37 kg
Spectrometer power:	100 - 240 VAC, 50 - 60 Hz, 70 W
Computer interface:	Ethernet connection
Spectroscopy software:	OPUS: easy-to-use, full GLP compliant, full 21 CFR part 11 compliant

Spectrometer Options

- Switch mirror for output port
- Beam bender port multiplexer, for up to four different output ports
- Dual channel acquisition

MIR Accessories for the Sample Compartment

- Comprehensive selection of accessories for ATR, transmission, diffuse & specular reflectance
 - Liquid cells, demountable and fixed
 - Liquid cells for proteins and aqueous solutions
 - Liquid autosampler
 - Gas cells, variable and fixed pathlength
 - Diffuse reflectance accessories
 - Specular reflectance accessories
 - Variable angle specular reflectance
 - Micro-ATR, single bounce
 - Diamond ATR
 - ATR-cell for temperature ramps on proteins
 - Horizontal ATR, multiple bounce
 - Photoacoustic cell
 - Beam condensers
- and more...

External MIR Accessories

- HYPERION series, FT-IR microscopy and imaging
- Micro- and macro-FT-IR imaging and FPA technology
- HTS-XT, FT-IR microplate reader
- TG-FT-IR coupling
- PMA 50, Polarization Modulation Accessory for VCD and PM-IRRAS
- GC-FT-IR coupling
- Flexible external sample compartment

Spectra libraries

Comprehensive selection of spectra libraries measured in ATR and transmission

Technologies used are protected by one or more of the following patents:
US 7034944; US 5923422; DE 19704598

Software

OPUS, OPTics User Software, consists of a suite of software packages for all standard and specialized applications. Includes intuitive analysis wizard functionality guiding the user through the analysis procedure, from measurement via data treatment and evaluation to the final documentation.

Optional OPUS packages:

- OPUS/SEARCH, software package for unlimited user library set-up and expanded library search capabilities including mixture analysis, information search, peak search.
- OPUS/STRUCTURE, software package for the drawing and search of chemical structures
- OPUS/IDENT, software package for the identification of raw materials
- OPUS/QUANT, software package for the quantification of ingredients
- OPUS/CHROM, software package for TG- and GC-FTIR coupling
- OPUS/MAP, software package for measurements with a mapping stage
- OPUS/VIDEO, software package for video supported measurements
- OPUS/3D, software package for the evaluation of 3D-data
- OPUS/LAB, software package for QA/QC
- OPUS/VAL, validation for OPUS, including 21 CFR part 11 functionality

Service

- Remote diagnostics
- Services contracts
- Validation packages and services

Bruker Optics
is ISO 9001 certified.

Laser class

www.bruker.com/optics ● **Bruker Optics Inc.**

Billerica, MA · USA
Phone +1 (978) 439-9899
Fax +1 (978) 663-9177
info@brukeroptics.com

Bruker Optik GmbH

Ettlingen · Germany
Phone +49 (7243) 504-2000
Fax +49 (7243) 504-2050
info@brukeroptics.de

Bruker Hong Kong Ltd.

Hong Kong
Phone +852 2796-6100
Fax +852 2796-6109
hk@brukeroptics.com.hk

Bruker Optics is continually improving its products and reserves the right to change specifications without notice.
© 2014 Bruker Optics BOPT-4000665-01

A.4 Spezifikationen

■ Spezifikationen (Grundfunktionen)

Modell		VHX-600D	VHX-600D (5M)	VHX-600D (10M)	
Kamera	Bildaufnahmeelement	1/1.8-Zoll, 2,11 Millionen Pixel CCD Bildsensor			
		Gesamtpixel: 1688 (h) x 1248 (v)			
		Effektive Pixel: 1628 (h) x 1236 (v)			
		Ausführbare Pixel: 1600 (h) x 1200 (v)			
	Abtastverfahren		Schnittstelle		
	Bildfrequenz		15 Bilder/Sek. oder 28 Bilder/Sek. (wählbar)		
	Auflösung	2 Millionen Pixel	1600 (h) x 1200 (v) ca. 1000 TV Zeilen oder mehr		
		4 Millionen Pixel entsprechend	1600 (h) x 1200 (v) ca. 1200 TV Zeilen oder mehr		
		6 Millionen Pixel	1600 (h) x 1200 (v) ca. 1200 TV Zeilen (mit exzellenter Farbreproduzierbarkeit)		
		8 Millionen Pixel	3200 (h) x 2400 (v) ca. 1600 TV Zeilen oder mehr		
		18 Millionen Pixel	4800 (h) x 3600 (v) ca. 2000 TV Zeilen oder mehr		
		54 Millionen Pixel	4800 (h) x 3600 (v) ca. 2000 TV Zeilen (mit exzellenter Farbreproduzierbarkeit)		
	Gain (Verstärkung)		AUTO, NORMAL, MANUELL		
Elektronische Verschlussblende		AUTO, MANU, AUS, 1/15, 1/30, 1/60, 1/120, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/5000			
Supercharge-Blende		0,2 Sek. bis 17 Sek. Kann in Schritten von 0,1 Sek. verändert werden.			
Weißabgleich		Auto, Manuell, Ein-Tasten-Einstellung, Eingestellt (2700K, 3200K, 5600K, 9000K)			
Fokusrückstellung		Nicht erforderlich			
LCD Monitor* ⁴ (Händleroption)	Größe	Farb-LCD (TFT) 15"			
	Bedienfeldgröße	304,5 (h) x 228,4 (v) mm			
	Pixelabstand	0,1905 (h) x 0,1905 (v) mm			
	Pixelanzahl	1600 (h) x 1200 (v) (UXGA)			
	Display-Farbe	ca. 16.770.000 Farben* ³			
	Lichtintensität	200 cd/m ² (typisch)			
	Kontrastverhältnis	500: 1 (typisch)			
	Sichtwinkel	±85° (typisch, horizontal), ±85° (typisch, vertikal)			
CD-RW Laufwerk	Geschwindigkeit	24x Schreiben, 10x Überschreiben, 24x Lesen			
	Verwendete Platte	CD-R/CD-RW			
	Speicherkapazität	700 MB, ca. 3500 Bilder (bei komprimierten 2 Mill. Pixel-Bildern) bis ca. 117 Bilder (bei nicht komprimierten 2 Mill. Pixel-Bildern)			
Festplatte	Speicherkapazität	160 GB (45 GB Bereich intern reserviert) Ca. 575.000 Bilder (wenn Bilder mit 2 Millionen Pixeln komprimiert werden) bis 19.000 Bilder (wenn Bilder mit 2 Millionen Pixeln nicht komprimiert werden)			
Bildformat		JPEG (mit Komprimierung), TIFF (ohne Komprimierung)			
Lichtquelle	Lampe	12 V, 100 W, Halogenlampe			
	Lebensdauer der Lampe	1000 Stunden (durchschnittlich)			
	Farbtemperatur	3100K (bei maximaler Lichtintensität)			
Ausgang	Videoausgang		Analog RGB (1600 x 1200 Pixel)		
	Abtastfrequenz	Spezieller LCD-Monitor	75 kHz (h), 60 Hz (v)		
		Externer Monitor	75 kHz (h), 60 Hz (v)		
Eingang	Mauseingang		MINI-DIN 6-poliger Steckverbinder (DOS/V-kompatible PS/2-Maus)		
	Tastatureingang		6-poliger MINI-DIN Stecker (DOS/V PS/2)		
	Externer Remote-Eingang		Spannungsloser Eingang (Kontakt/Festkörper)		
Schnittstelle	LAN		RJ-45 (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T)		
	USB 2,0 Serie A		4 Typen: Spezielle Druckerschnittstelle x 1, VHX-S15 Anschlusschnittstelle x 1, externe Speicheranschluss-Schnittstelle x 1		
Netzteil	Versorgungsspannung		100 bis 240 VAC ±10%, 50/60 Hz		
	Stromaufnahme		310 VA		

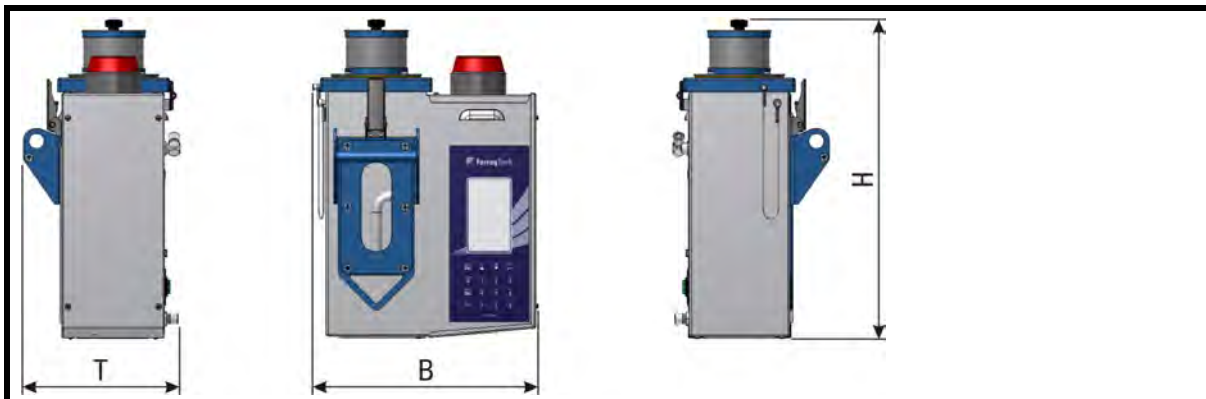
Modell		VHX-600D	VHX-600D (5M)	VHX-600D (10M)
Umgebungs- beständigkeit	Umgebungstemperatur	+5 bis 40°C (41 an 104°F)		
	Relative Feuchtigkeit	35 bis 80%, nicht kondensierend		
Gewicht	Regler	ca. 12,6 kg		
	Kameraeinheit	ca. 950 g	ca. 1700 g	ca. 2900 g
	Konsole	ca. 250 g		
Abmessungen (ohne überstehende Flächen)		382 (B) x 425 (H) x 162 (T) mm		

*1 2 Millionen Pixel x 3CCD-Modus

*2 18 Millionen Pixel x 3CCD-Modus

*3 Etwa 16,77 Millionen Pixel werden mit der Ditheringverarbeitung der Displaysteuerung erzielt.

*4 Der LCD-Monitor, der auf dem VHX-600D befestigt ist, wird mit Hilfe außerordentlich Techniken hergestellt. Nicht beleuchtete Punkte (schwarze Punkte) oder immer beleuchtete Punkte (helle Punkte) können existieren, bedeuten jedoch keine Fehlfunktion.



	CARD 3G FIT	CARD 6G FIT
BEHÄLTERVOLUMEN [l]	3	6
MAX. LEISTUNGS-AUFNAHME [W]	200W	200W
SPANNUNG [V]	1N~230	1N~230
FREQUENZ [Hz]	50/60	50/60
EXTERNE ABSICHERUNG [A]	10	10
ANSCHLUSSQUERSCHNITT [mm ²]	1,0	1,0
DRUCKLUFTANSCHLUSS [mm]	8	8
LUFTVERBRAUCH [Nm ³ /h]	2,0 ³	3,0 ¹
DRUCKBEREICH [bar]	6 ... 10	6 ... 10
MAX. TAUPUNKT DER DRUCKLUFT BEI 7BAR [°C]	5	5
MAX. RESTÖLGEHALT IN DRUCKLUFT [mg/m ³]	3	3
UMGEBUNGSTEMPERATUR [°C]	+20 ... +70	+20 ... +70
MAX. ZULÄSSIGE UMGEBUNGSFEUCHTE [%]	80 (ohne Kondensation!)	80 (ohne Kondensation!)
HÖHE H [mm]	410	498
BREITE B [mm]	285	310
TIEFE T [mm]	205	230
GEWICHT [kg]	9	11

Eingesetztes Gerät

³ Konstanter Druckluftverbrauch



Advantages



- > Can be used universally for a wide variety of applications and materials
- > A wealth of options such as various hoppers, trolley stands and control unit types facilitate optimal adaptation to your unique needs
- > Very compact construction made possible by a robust gear drive taking up very little space
- > Low rotor rotation speed and construction designed to minimize structure-borne noise make it very quiet
- > Easy and simple to open and clean in seconds. Good accessibility allows for fast material changes and easy servicing
- > The cutting geometry yields high-quality ground material and is suitable for all plastics, from soft to hard and reinforced or not reinforced
- > Low energy consumption – innovative energy-saving control unit **Green Line** or **IQ** optionally available
- > Maximum performance for your money

Technical Data



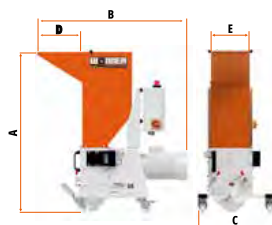
	C 13.20	C 17.26	C 17.31
Cutting chamber opening	130 x 200 mm ²	170 x 260 mm ²	170 x 320 mm ²
Rotor diameter	140 mm	170 mm	220 mm
Rotor knives	9	12	12
Stator knives	2	2	2
Motor power	2,2 kW	3 kW / 4 kW	4 kW
Weight	125 kg	155 kg	165 kg

**GREEN
LINE**



< The Green-Line control and the IQ control are in all models of C series available

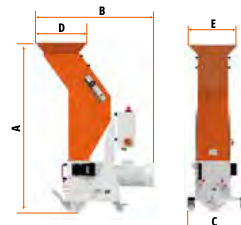
Standard



Dimensions

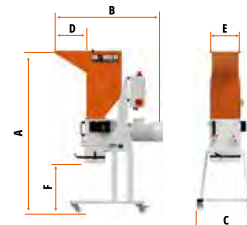
	C 13.20	C 17.26	C 17.31
A	890	1090	1170
B	755	1020	980
C	415	520	520
D	245	290	290
E	205	255	305

Robot infeed hopper



	C 13.20	C 17.26	C 17.31
A	1390	1430	1475
B	895	990	990
C	415	520	520
D	415	430	430
E	375	415	445

High stand



	C 13.20	C 17.26	C 17.31
A	1380	1560	1640
B	800	1020	980
C	560	560	660
D	245	290	290
E	205	255	305
F	490	485	485

(All dimensions in mm, rounded, subject to technical modifications)

1 - 2 - 3 - Open!



First pull out the suction box to the front to open the granulator.



Open the cutting chamber unlocking the quick release clamp and push open toward the front. Supported by a massive hinge, the grinding chamber and in-feed hopper can be swivelled all the way to the side.



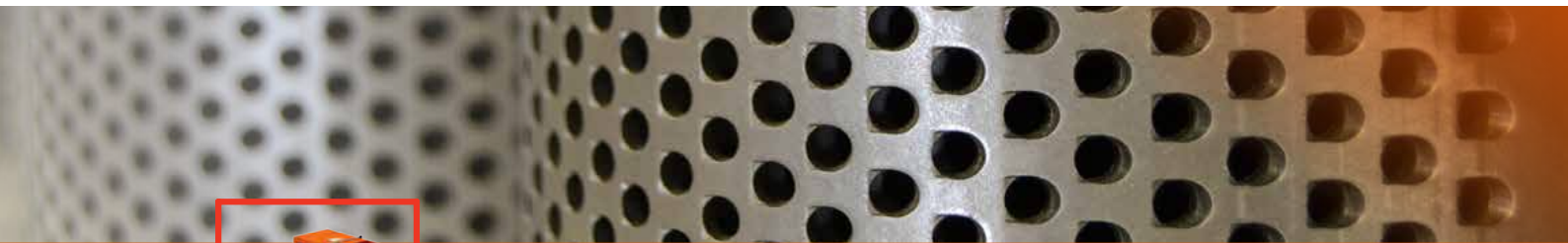
Rotor and screen cradle are fully accessible and freely visible. The screen can be removed easily with one hand. Undercuts, where material has the potential to collect, are kept to a minimum. Cleaning the granulator is quick and easy.



C 17.26 Standard

The C-series granulators are ideal beside-the-machine granulators. Easy handling, easy cleaning, small footprint, and great design variety guarantee that you will find the optimal solution for every application. The model shown here with a small standard hopper is especially well-suited to conveyor belt feeding. A suction pipe for hose ND40 comes standard with all C-series granulators.

▲ Der C-Serien Baukasten bietet viele Optionen



C 17.26 Robot feed hopper

The models of the C Series with robot feed hopper are ideal for feeding with sprue picker or robot. A large infeed opening and extra sprue collecting funnel ensure that freefalling sprues are fed into the grinding chamber reliably. Sandwich sheets used for all hoppers offer outstanding noise reduction. The hopper can be installed on the granulator rotated 180°.



C 17.26 Highstand

We also have solutions well-suited for applications where the regrind material is not automatically fed back into the injection process. With granulators mounted on high stand, the ground stock can simply be collected in a sack under the granulator that can later be removed and tied off. The gear drive and cutting chamber are designed to be tough and are capable of handling larger quantities fed in all at once.



C 17.26 Integrated dedusting unit

If the regrind material needs to be virtually free of dust, our model with integrated dedusting system is the perfect fit. Especially when it comes to the granulating of very brittle glass-filled materials, it is often nearly impossible to achieve ground stock without a certain amount of fine dust. The dust extraction box integrated below the granulator reliably takes out these fine particles and separates them out into another bin. High-quality ground stock remains, ready to be processed further right away.



C 17.26 With auger chute

Our solution for 3-plate tools when the sprue falls out of the tool directly into the auger chute. The large dimensions of the infeed auger ensure that large sprues are processed reliably. For safety, the granulator is delivered with an additional limit switch that must be mounted on the safety door of the injection moulding machine or with an interface to be connected to the control unit circuit of the injection moulding machine.





C 13.20 Special chute for separation devices

Our solution for separation applications, during which small parts are collected below the separation drum while the parts are conveyed through the drum to the granulator. Also good for use: The granulator is positioned under the separation drum and the parts are collected at the drum output (no image). Individualised customer solutions are our strength.



C 17.26 Special hopper for Arburg injection moulding machines

For most standard injection moulding machine types with integral sprue pickers, we have a solution that ensures the sprue removed can be fed reliably to our granulators. This image shows an example of a solution for a feed-hopper suitable for an Arburg injection moulding machine. Identical solutions are available for Engel and Sumitomo Demag injection moulding machines as well. Solutions that are sure to work.

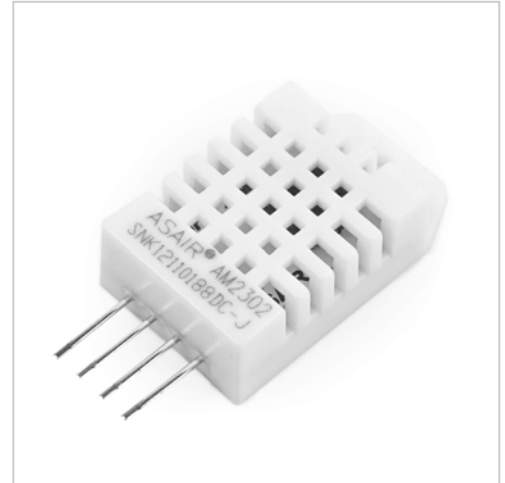
Green-Line  or IQ-Line  energy-saving controls are available for all C-Series models

DHT22 - Digitaler Temperatur und Luftfeuchtesensor

Der DHT22 ist ein einfacher, kostengünstiger digitaler Temperatur- und Feuchtigkeitssensor. Er verwendet einen kapazitiven Feuc...

Product number DHT22

Weight 0.01kg



Product description

Der DHT22 ist ein einfacher, kostengünstiger digitaler Temperatur- und Feuchtigkeitssensor. Er verwendet einen kapazitiven Feuchtigkeitssensor und einen Thermistor zur Messung der Umgebungsluft und gibt ein digitales Signal auf den Datenpins aus (keine analogen Eingangspins erforderlich). Er ist relativ einfach in der Anwendung, erfordert jedoch ein sorgfältiges Timing, um Daten zu erfassen. Der einzige wirkliche Nachteil dieses Sensors ist, dass man von ihm nur alle 2 Sekunden neue Daten erhalten kann, so dass die Sensormesswerte bis zu 2 Sekunden alt sein können.

Technische Daten

- Betriebsspannung: 3 - 5V
- 2,5mA maximaler Stromverbrauch während der Datenanforderung
- Messbereiche:
 - Luftfeuchtigkeit: 0-100%, $\pm 2-5\%$ Genauigkeit
 - Temperatur: $-40 - +80^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ Genauigkeit
- 0,5 Hz Samplingrate (einmal alle 2 Sekunden)
- Abmessungen ca. 27 x 59 x 13,5 mm

Product properties

Zolltarifnummer	84715000
Gewicht Brutto (in kg)	0.010
Herkunftsland	China
Artikelnummer	DHT22
Hersteller Produktnummer	DHT22
Hersteller	Asair
EAN	4251266703914

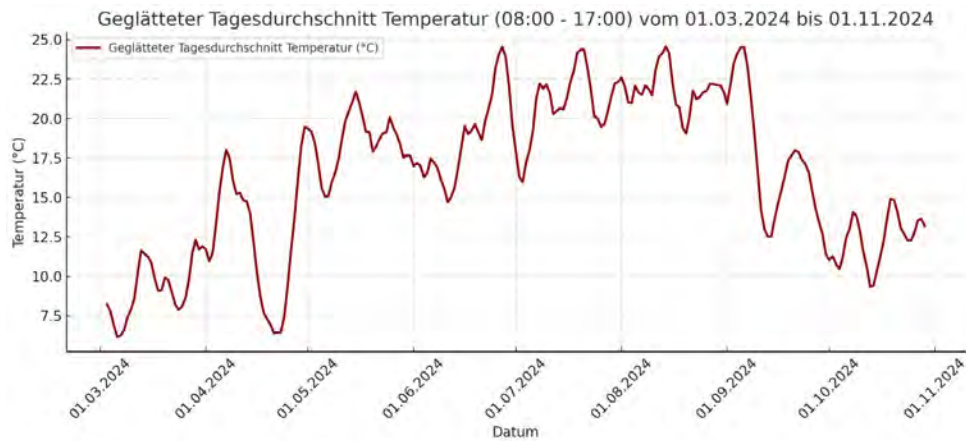


Abbildung 9.1: Temperaturverlauf über Zeitraum der Studienarbeit [Eigene Darstellung]

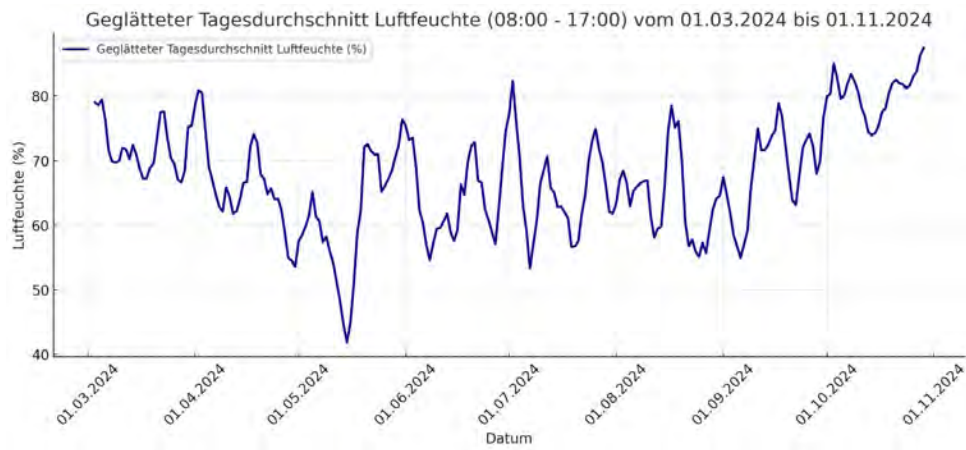


Abbildung 9.2: Luftfeuchtigkeitsverlauf über Zeitraum der Studienarbeit [Eigene Darstellung]

Spule	Material	Gesiebt?	Korngröße	Getrocknet?	Trocknungsparameter	Datum Trocknung	Datum der Extrusion	Luftfeuchtigkeit und Temperatur*
001	PLA	Nein		Nein		19.04.2024	19.04.2024	82% und 7°C
002	PLA	Ja	2-3mm	Ja	5h bei 53°C	22.04.2024	22.04.2024	56% und 6°C
003	PLA	Ja	2-3mm	Ja	5h bei 53°C	22.04.2024	22.04.2024	56% und 6°C
004	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 60°C	30.07.2024	30.07.2024	52% und 24°C
005	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 70°C	30.07.2024	30.07.2024	52% und 24°C
006	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 80°C	30.07.2024	30.07.2024	52% und 24°C
007	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 70°C	10.08.2024	10.08.2024	69% und 22°C
008	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 70°C	06.09.2024	06.09.2024	44% und 24°C
009	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 70°C	06.09.2024	06.09.2024	44% und 24°C
010	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 70°C	06.09.2024	06.09.2024	44% und 24°C
011	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 70°C	06.09.2024	06.09.2024	44% und 24°C
012	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 70°C	06.09.2024	06.09.2024	44% und 24°C
013	PLA	Ja	1-3mm	Ja	4h bei 70°C	08.10.2024	08.10.2024	87% und 17°C
014	PLA	Ja	0,5-3mm	Ja	4h bei 70°C	08.10.2024	08.10.2024	87% und 17°C
015	PLA	Nein		Nein			09.12.2025	/
016	PLA	Nein		Nein			09.12.2025	/
017	PLA	Ja	2-3mm	Ja	4h bei 70°C	09.12.2024	29.01.2025	/
018								
019								
020								

Abbildung 9.3: Excelliste zur Übersicht aller Versuche [Eigene Darstellung]

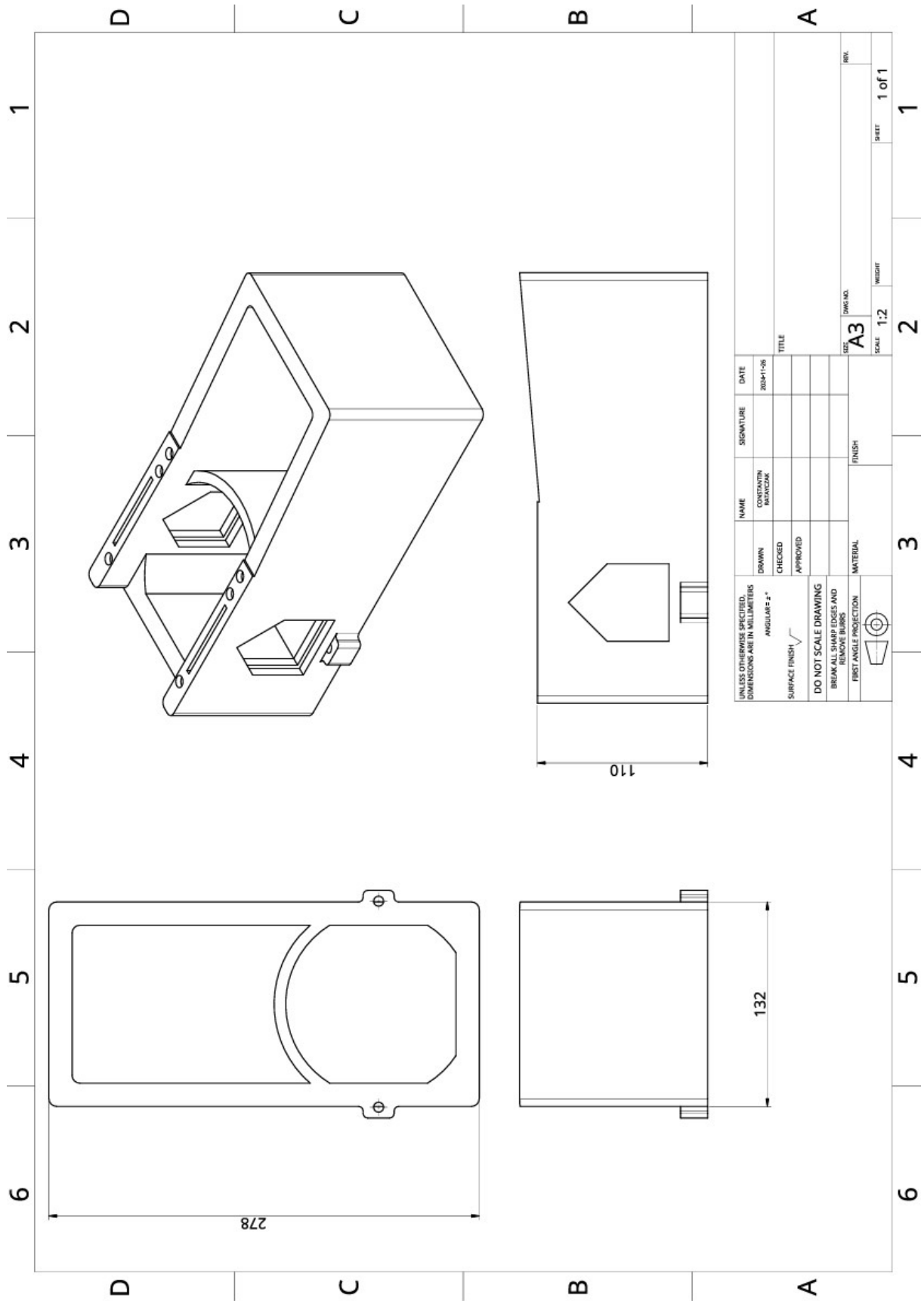


Abbildung 9.4: Technische Zeichnung Adapter Extruder-Trockner [Eigene Darstellung]

Blobuntersuchungen - Mikroskopaufnahmen

Eigene Aufnahmen. Erstellt mit Keyence VHX-600D

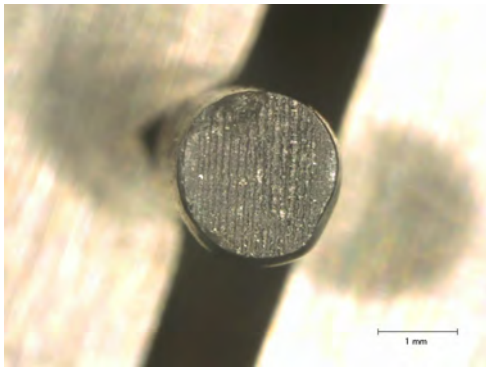


Abbildung 9.5: Schnitt durch Blob.
Aufgetrennt mit Microm HM355.

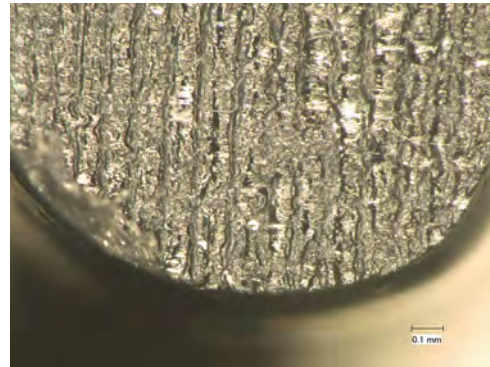


Abbildung 9.6: Schnitt durch Blob.
Aufgetrennt mit Microm HM355.
Nahaufnahme.

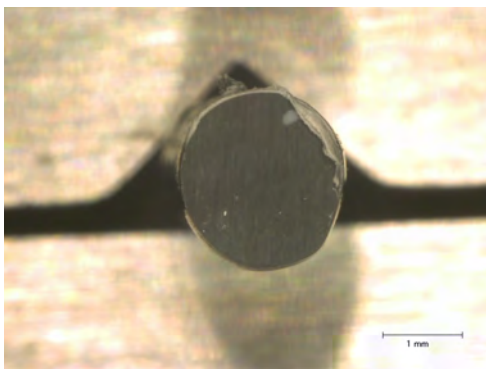


Abbildung 9.7: Schnitt durch Blob.
Aufgetrennt mit Schleifgerät
(2500er Körnung).

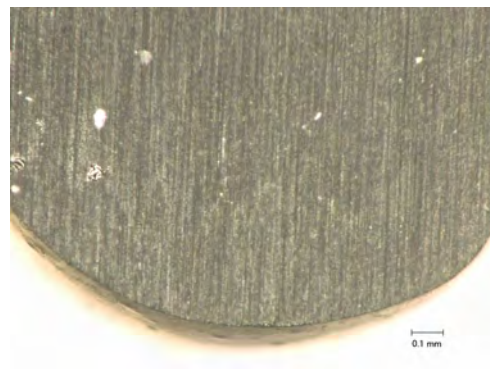


Abbildung 9.8: Schnitt durch Blob.
Aufgetrennt mit Schleifgerät
(2500er Körnung). Nahaufnahme.

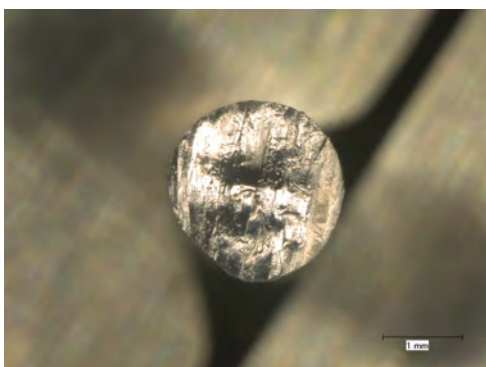


Abbildung 9.9: Schnitt durch Blob.
Aufgetrennt mit Rasierklinge.



Abbildung 9.10: Schnitt durch Blob.
Aufgetrennt mit Rasierklinge. Nahaufnahme.

Zumischung Virginmaterial zu Mahlgut mit versch. prozentualen Anteilen



Abbildung 9.11: Mahlgut mit 10% Virginanteil [Eigene Darstellung]



Abbildung 9.12: Mahlgut mit 30% Virginanteil [Eigene Darstellung]



Abbildung 9.13: Mahlgut mit 50% Virginanteil [Eigene Darstellung]

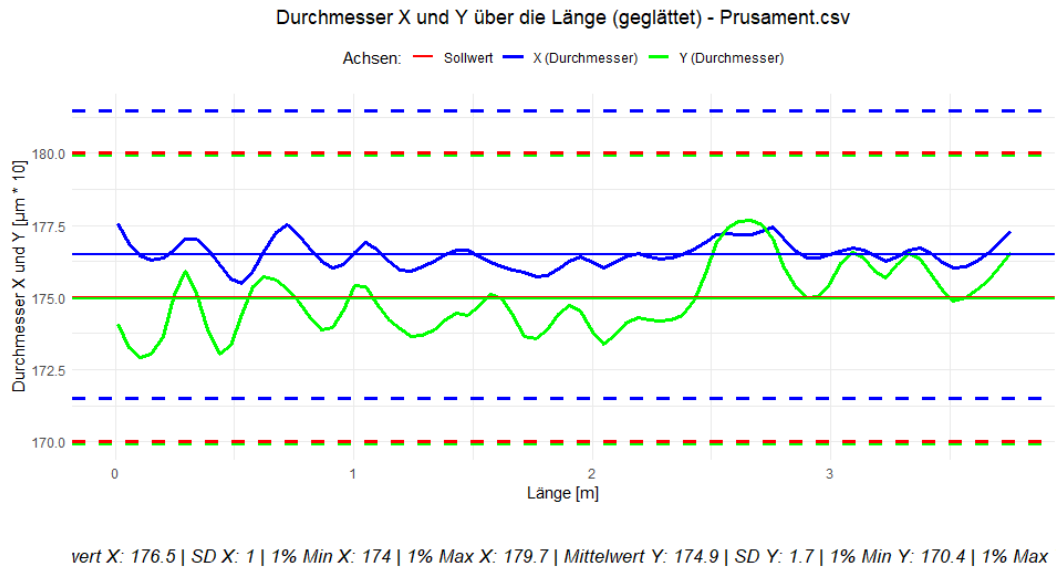


Abbildung 9.14: Durchmesser von Prusament [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

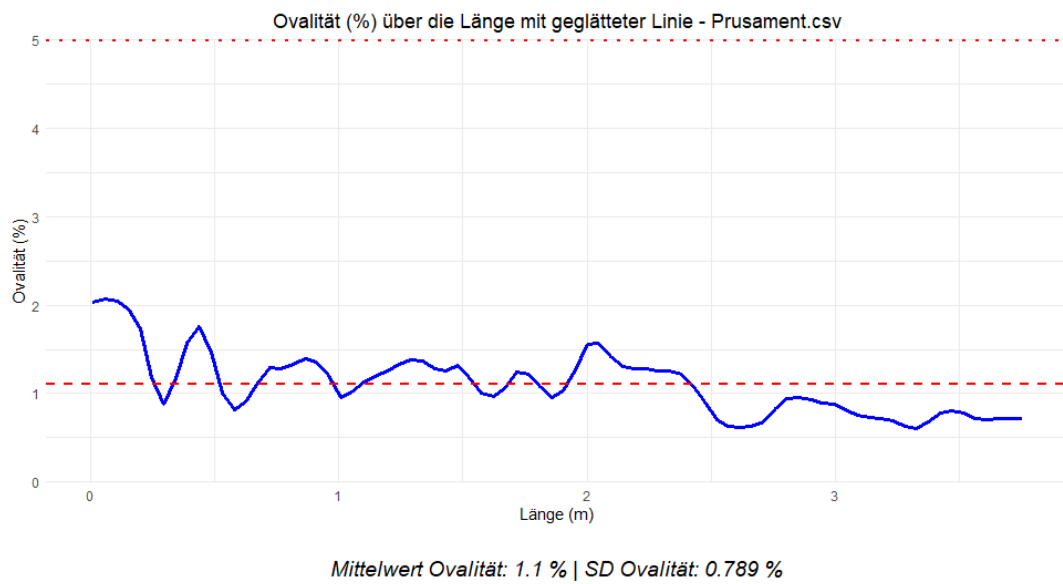


Abbildung 9.15: Ovalität von Prusament [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

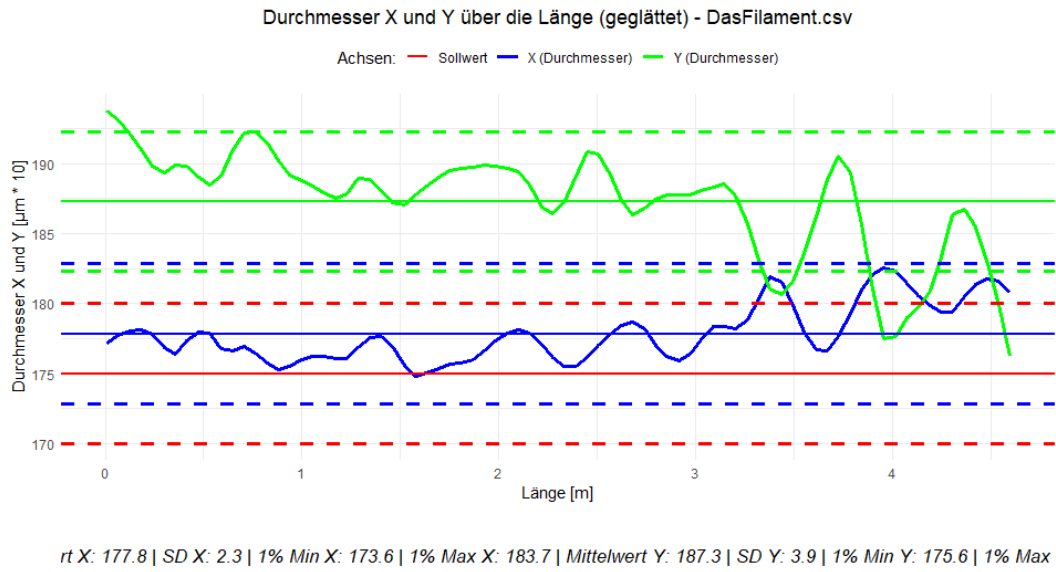


Abbildung 9.16: Durchmesser von Das Filament [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

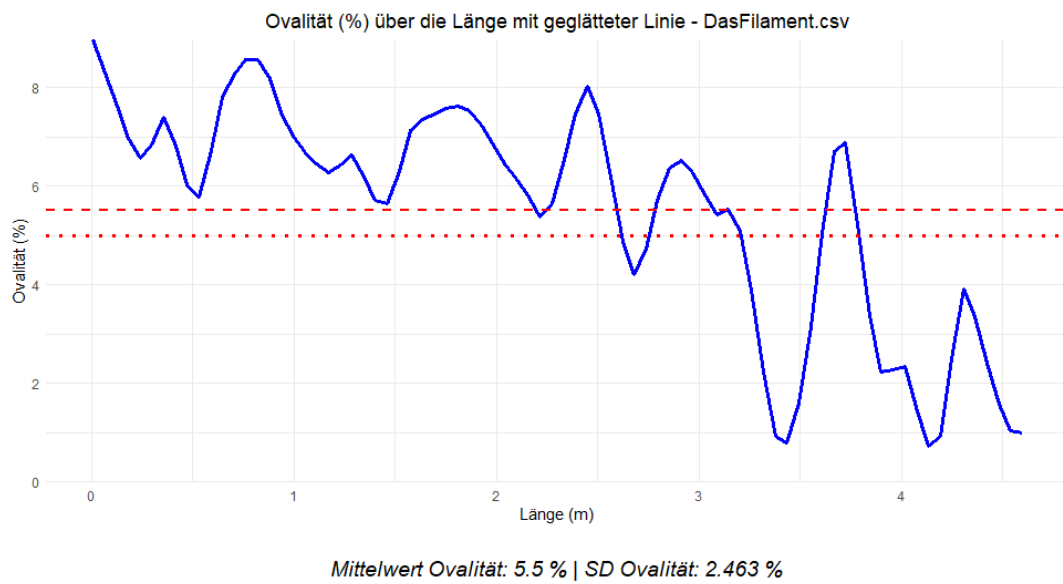


Abbildung 9.17: Ovalität von Das Filament [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

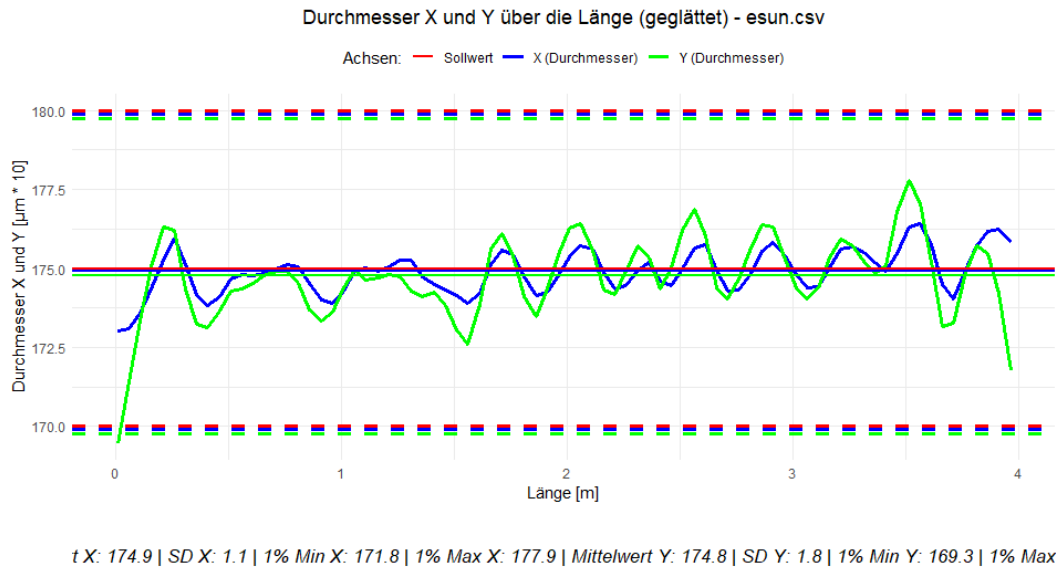


Abbildung 9.18: Durchmesser von ESun [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

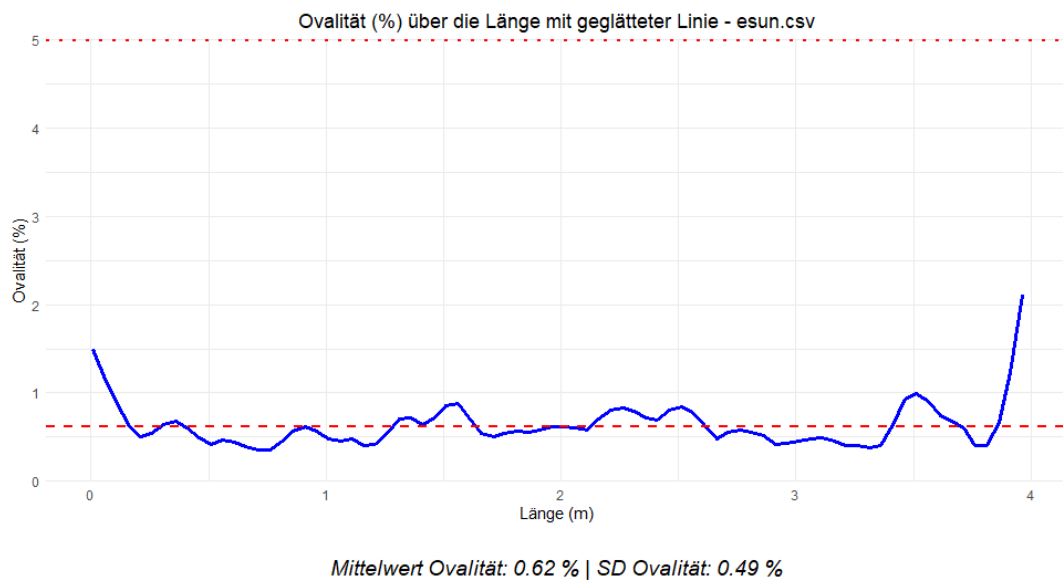


Abbildung 9.19: Ovalität von ESun [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

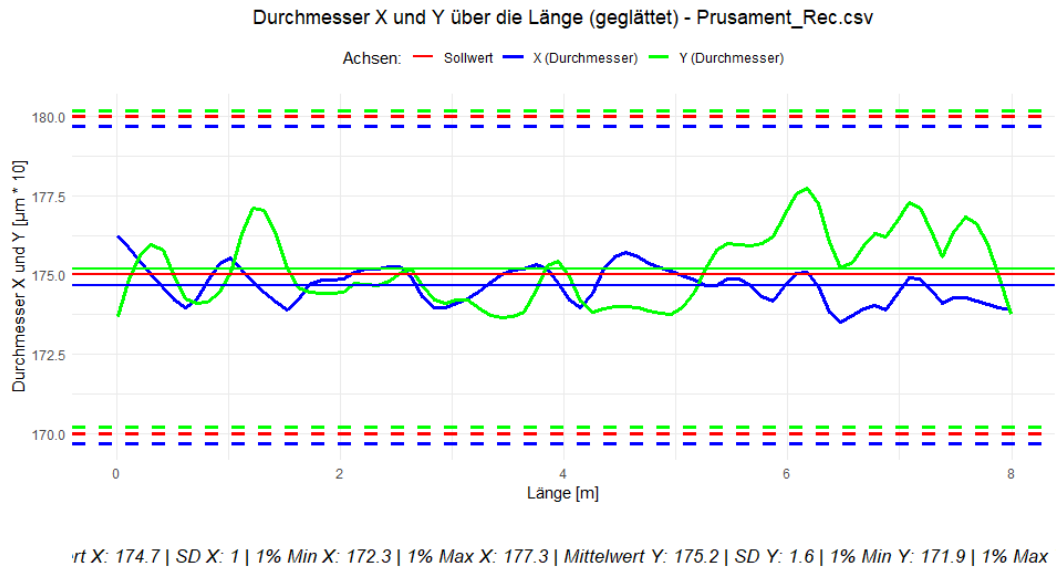


Abbildung 9.20: Durchmesser von Prusament Recycled [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

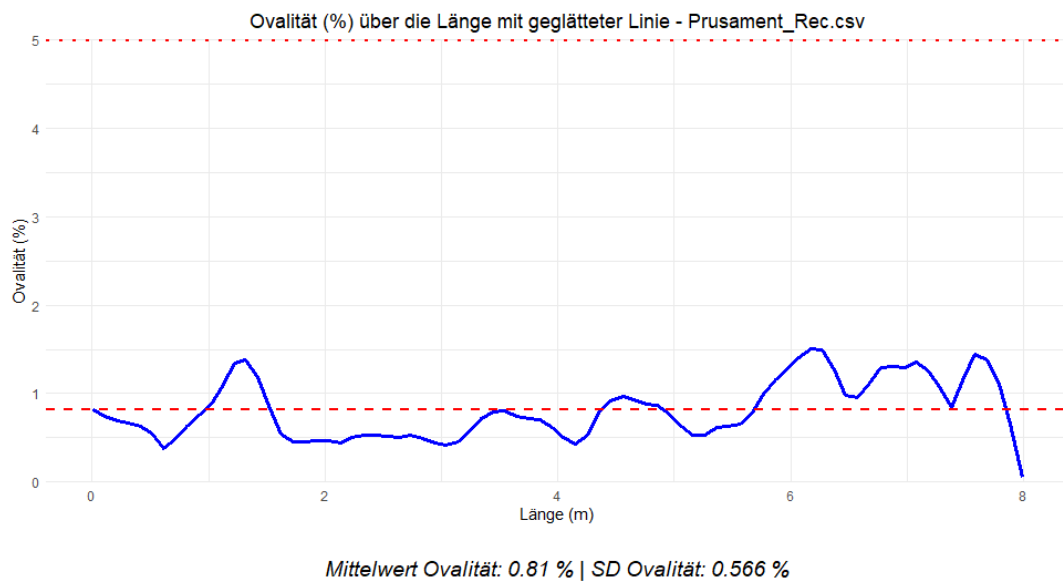


Abbildung 9.21: Ovalität von Prusament Recycled [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

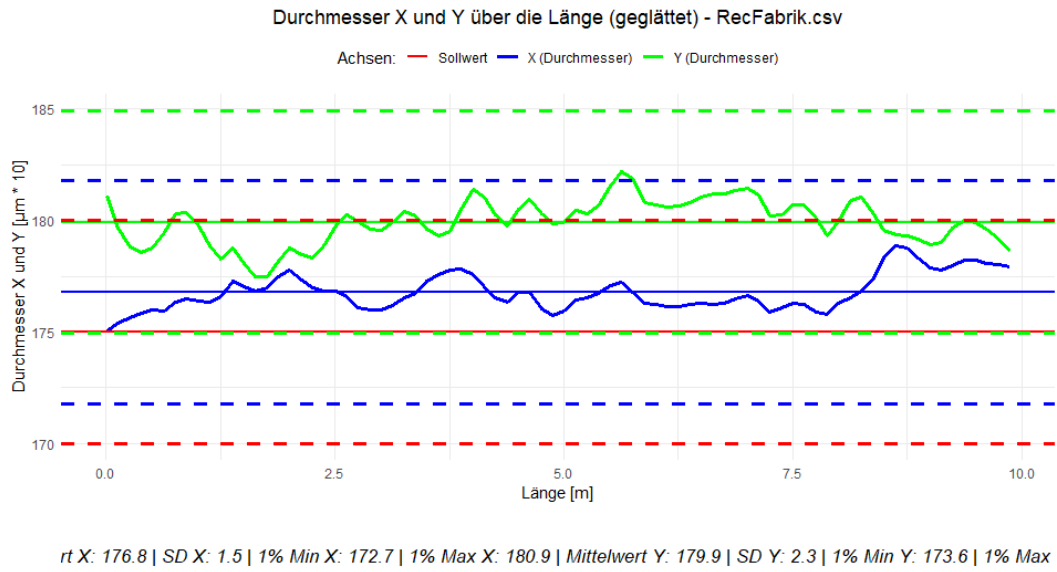


Abbildung 9.22: Durchmesser von Recyclingfabrik [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

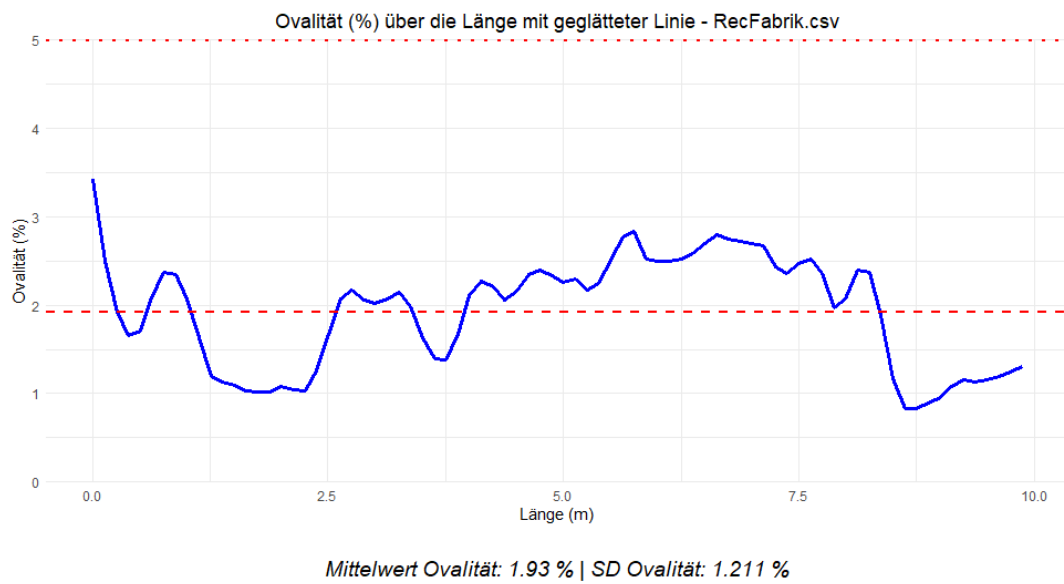


Abbildung 9.23: Ovalität von Recyclingfabrik [Eigene Darstellung] Messmittel: [Plasmics Sensor]

Inhalt - USB-Stick

1. Zeitraffervideo - Verhalten von geschreddertem Virginmaterial im Trichter des Extruders
2. STEP-Datei Adapter
3. PLATZHALTER FÜR MESSSCHRIEBE CSV Dateien