



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Anna Solod

Konstruktion und Modifikation eines FFF-Druckers für die Verarbeitung metallgefüllter Feedstockmaterialien

Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion

Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management

Anna Solod

**Konstruktion und Modifikation eines FFF-Druckers für
die Verarbeitung metallgefüllter Feedstockmaterialien**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Jens Telgkamp
Zweitprüfer: Fatih Gözükcük

Abgabedatum: 12.02.2024

Zusammenfassung

Anna Solod

Thema der Bachelorthesis

Konstruktion und Modifikation eines FFF-Druckers für die Verarbeitung metallgefüllter Feedstockmaterialien

Stichworte

Additive Fertigung, FFF, metallischer 3D-Druck, sinterbasierte Prozessroute, statistische Versuchsplanung, Grünteil

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Planung und Durchführung von Modifikationen an dem Desktop 3D-Drucker „Ender 3“. Ziel ist es, in einem stabilen Metall - FFF-Druckprozess Grünteile zu erzeugen. Die statistische Versuchsplanung dient als Werkzeug für die Untersuchung von relevanten Prozessparametern auf die Zielgrößen Dichte, Oberflächenrauheit und Maßhaltigkeit. Weiteres Ziel der Arbeit ist die Erzeugung optimierter Druckparametersätze für konkrete Anwendungsfälle.

Summary

Anna Solod

Title of the paper

Design and modification of an FFF printer for processing metal-filled feedstock materials

Keywords

Additive manufacturing, FFF, Metal 3D printing, sinter-based process route, DoE, green part

Abstract

This thesis deals with the planning and realisation of modifications to the desktop 3D printer “Ender “. The aim is to produce green parts in a stable metal FFF printing process. The statistical design of experiments serves as a tool for the investigation of relevant process parameters for the target variables density, surface roughness and dimensional accuracy. A further aim of the work is to generate optimised printing parameter sets for specific applications.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Telgkamp für die Betreuung meiner Bachelorarbeit, die hilfreichen Anregungen sowie die Möglichkeit, die Räume des 3D Space während der gesamten Bearbeitungszeit nutzen zu dürfen.

Bei Fatih Gözükcük bedanke ich mich für die Begutachtung dieser Arbeit als Zweitprüfer, seine fachliche Unterstützung und seine Hilfsbereitschaft.

Den Tutoren des 3D Space danke ich für den hilfreichen Austausch während dieser Zeit.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für die mentale Unterstützung und das Interesse an meiner Bachelorarbeit.

Aufgabenstellung

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
DEPARTMENT MASCHINENBAU UND PRODUKTION



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

Aufgabenstellung für Bachelorarbeit

Studierende: Anna Solod (Matrikel-Nr.: [REDACTED])

Erstprüfer: Prof. Dr. Jens Telgkamp

Zweitprüfer: Fatih Gözükcük

Thema: Konstruktion und Modifikation eines FFF-Druckers für die Verarbeitung metallgefüllter Feedstockmaterialien

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird ein FFF-Drucker modifiziert, um eine leichtere Materialzuführung zu schaffen im Hinblick auf die Verarbeitung von Feedstockmaterialien für sinterbasierte Prozessrouten.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sind daher folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Literaturrecherche zum Mechanismus und Modifikation von FFF-Druckern
- Anforderungskatalog erstellen
- Konzepterstellung, methodisches Konstruieren (Anpassung Gehäuse, Integration Filamenttrocknung, Reibungsarme Führung der Filamentspule, Ausgleich von Kräften bei dynamischer Belastung, Modifikation am Extruder, Modifikation am Hot End)
- Detailkonstruktionen für Extrudermotor und Materialzuführung
- Fertigung einer ersten Version
- Inbetriebnahme und ggf. Verbesserungen
- Durchführung von Versuchen zur Ermittlung eines ersten Satzes von geeigneten FFF Prozessparametern für geeignete Stahlfilamente
- Kritische Reflexion und Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Diese Abschlussarbeit wird im Institut für Produktionstechnik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften durchgeführt.

Hamburg, den 27.09.2023

Unterschrift der Studentin

[REDACTED]

Unterschrift des Erstprüfers

[REDACTED]

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	viii
Glossar und Abkürzungsverzeichnis	viii
1 Einleitung und Problemstellung.....	1
2 Stand der Technik und Grundlagen.....	2
2.1 Prinzip von Fused Filament Fabrication	2
2.2 Feedstock-Herstellung für Metall- FFF und sinterbasierte Prozesskette	3
2.3 Verwendeter Drucker	4
2.4 Ausstattung industrieller FFF-Metalldrucker anhand eines Beispiels	8
2.5 Ermittlung der Einflussgrößen mithilfe statistischer Versuchsplanung	9
3 Vorgehensweise	12
3.1 Vorbereitung für die Modifikation des Druckers	12
3.1.1 Einhausung	12
3.1.2 Herabsetzen der Mindestextrusionstemperatur	16
3.1.3 Vorversuche	17
3.2 Prozessparameter und Optimierung	23
3.2.1 Auswahl der Faktoren	23
3.2.2 Anwendung der Versuchsplanung (DoE)	25
3.2.3 Herstellung der Proben	27
3.2.4 Messung der Dichte, Maßhaltigkeit und Oberflächenrauheit	28
3.2.5 Optimierung	30
4 Ergebnisse.....	31
4.1 Hardwaremodifikation	31
4.2 Ergebnisse der statistischen Versuchplanung.....	35
4.2.1 Abhängigkeiten der Einflussfaktoren auf die Antwortgrößen	36
4.2.2 Optimierung	40
5 Diskussion	42
5.1 Hardwaremodifikation	42
5.2 Betriebsfehler	44
5.3 Statistische Versuchsplanung	45
6 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	46
7 Ausblick	49
Literaturverzeichnis.....	53
A Stand der Technik	55
B Vorgehensweise	58
C Ergebnisse.....	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Prinzip von FFF (Mwema, 2020)	2
Abbildung 2 Feedstock-Herstellung und sinterbasierte Prozesskette (Dave, 2022).....	3
Abbildung 3 "Ender 3 V1"-3D-Drucker (Creality, 2023).....	4
Abbildung 4 Extruder mit Direktantrieb von Micro Swiss (3DJake, 2023)	6
Abbildung 5 Hot-end	6
Abbildung 6 Beispiel-Kurvendiagramm in Software Minitab (Minitab Inc, 2024)	11
Abbildung 7 use-case-Diagramm Einhausung	14
Abbildung 8 Marktanalyse Einhausungen	15
Abbildung 9 Versuchsaufbau Vorversuche	17
Abbildung 10 Fehlen von Formzusammenhalt aufgrund starker Unterextrusion.....	19
Abbildung 11 Unterextrusion	19
Abbildung 12 Warping und regelmäßige Linienstruktur	20
Abbildung 13 Überextrusion	20
Abbildung 14 starke Überextrusion	21
Abbildung 15 EM-Kalibrierungswürfel	22
Abbildung 16 Würfel 1-4 exemplarisch, ganz rechts: Narbenbildung.....	27
Abbildung 17 Versuchsaufbau Grünteildichtemessung	28
Abbildung 18 Versuchsaufbau Messen	29
Abbildung 19 Arithmetischer Mittelwert Ra	30
Abbildung 20 Versuchsaufbau OFR-Messung.....	30
Abbildung 21 Eckelement innen und außen (Printables, 20223)	32
Abbildung 22 Rahmenseitiges Scharnier	33
Abbildung 23 Eingebautes Eckverbindungsstücks	33
Abbildung 24 Befestigung der Bodenplatte bzw. Deckenplatte.....	33
Abbildung 25 Modifizierter 3D-Drucker Zwischenzustand	34
Abbildung 26 CAD - Modell der Einhausung Endzustand.....	34
Abbildung 27 Haupteffektdiagramm für Mittelwerte Dichte	36
Abbildung 28 Pareto-Diagramm Dichte	36
Abbildung 29 Haupteffektdiagramm für Mittelwerte OFR.....	37
Abbildung 30 Pareto-Diagramm OFR.....	37
Abbildung 31 Haupteffektdiagramm für Mittelwerte Druckzeit	38
Abbildung 32 Pareto-Diagramm Druckzeit	38
Abbildung 33 Haupteffektdiagramm für Mittelwerte Maßhaltigkeit	39
Abbildung 34 Pareto-Diagramm Maßhaltigkeit	39
Abbildung 35 Alle Ausgangsgrößen gleich gewichtet	40

Abbildung 36 Wirtschaftlichkeit	41
Abbildung 37 Qualität.....	41
Abbildung 38 Linienmuster	43
Abbildung 39 abgeschliffene Einspannhalterung.....	43
Abbildung 40 Filamentbruch	44
Abbildung 41 Vorschlag einer Filamenthalterung gelagert	49
Abbildung 42 Zugprobe Versuch Machbarkeit.....	51
Abbildung 43 gesinterter Probewürfel (20x20x20 mm).....	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Technische Daten "Ender 3 V1"	5
Tabelle 2 Zusammensetzung Metallpulver 316L	7
Tabelle 3 Technische Daten "Raise3D Metalfuse Forge"	8
Tabelle 4 Anforderungskatalog Einhausung	13
Tabelle 5 Parameter und Beobachtungen Vorversuche.....	18
Tabelle 6 Parameter für EM-Kalibrierung	22
Tabelle 7 Kalibrierung EM über die Schichthöhe	22
Tabelle 8 Kalibrierung EM über Wanddicke.....	22
Tabelle 9 Kalibrierung Betttemperatur	23
Tabelle 10 Versuchsplanbezeichnung	26
Tabelle 11 Gewählte Faktorstufen	26
Tabelle 12 Generierter Taguchi-Versuchsplan	27
Tabelle 13 Versuchsplan mit Ausgangsgrößen.....	30
Tabelle 14 Gewichtungen der Ausgangsgrößen	31
Tabelle 15 optimierte Druckparameter.....	46
Tabelle 16 ANOVA Tabelle Dichte.....	69
Tabelle 17 Tabelle 12 ANOVA Tabelle OFR	69
Tabelle 18 Tabelle 12 ANOVA Tabelle Druckzeit.....	70

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

EM – Extrusionsmultiplikator (auch Extrusionsflow)

Ra – arithmetischer Mittenrauwert

OFR – Oberflächenrauheit

DoE – Design of Experiments, wird synonym für statistische Versuchsplanung verwendet

1 Einleitung und Problemstellung

Die additive Fertigung, auch bekannt als 3D-Druck, hat sich in den letzten Jahrzehnten in verschiedenen Bereichen als Fertigungsverfahren etabliert. Es wird unter anderem für den Prototypenbau, die Fertigung von maßgeschneiderten Produkten und die Herstellung komplexer Bauteile in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt. Dabei kommen verschiedene Verfahren und Materialien zum Einsatz, wobei Kunststoffe und Metalle am häufigsten verwendet werden. Für die Herstellung von Metallbauteilen sind die wichtigsten Verfahren Metall - Fused Filament Fabrication (Metall-FFF), Binder Jetting, Pulverbettbasierte Methoden wie Selective Laser Melting (SLM) und Directed Laser Deposition (DED). Jedes Verfahren hat spezifische Vor- und Nachteile. Obwohl SLM feinere Mikrostrukturen formen kann, sind die Anschaffungskosten für die Anlagen sehr hoch und der Umgang mit feinem Metallpulver ist unter Gewährleistung der Arbeitssicherheit kompliziert. Beim Metall-FFF werden, ähnlich wie beim Binder Jetting, Grünteile produziert, die durch das Entbindern und Sintern zu Endprodukten weiterverarbeitet werden. Für die sinterbasierte Prozesskette ist die Anschaffung eines Sinterofens oder das Auslagern des Prozessschritts notwendig. Die Grünteilherstellung im Metall-FFF erfolgt durch die Verwendung von metallgefülltem Feedstock in unterschiedlichen Formen. Das Feedstock kann, wie beim Kunststoff-FFF, in Form von Filament in Druckern verwendet werden. Die Vorteile von FFF sind Platzersparnis, Flexibilität bei der Herstellung von komplexen Geometrien und Hohlstrukturen sowie eine einfachere und sicherere Bedienung der Anlagen.

Bei kunststoffbasierten FFF sind Desktop 3D-Drucker schon seit vielen Jahren etabliert. Im Gegensatz dazu gibt es bisher bei Metall – FFF nur industrielle Drucker auf dem Markt, dessen Kauf mit hohen Kosten verbunden ist. Ein Desktop 3D-Drucker für die Anwendung von metallgefülltem Filament würde das Verfahren einem breiteren Anwenderkreis zugänglich machen.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, einen konventionellen, kunststoffbasierten Desktop 3D-Drucker auf die Verwendung eines metallgefüllten Filaments umzurüsten. Hierfür sind sowohl konstruktive als auch softwareseitige Anpassungen erforderlich. Es soll ein stabiler und zuverlässiger Druckvorgang etabliert werden. Die Kenntnis der wichtigen Prozessparameter für ein gutes Druckergebnis ist dabei von großer Bedeutung. Daher ist ein weiteres Ziel dieser Arbeit, Einflussfaktoren auf die Oberflächengüte und Grünteildichte anhand von Probekörpern zu untersuchen. Dabei dienen die Erkenntnisse aus dem Kunststoff- und Metall-FFF als Grundlage. Mithilfe der statistischen Versuchsplanung sollen optimierte Druckparameter ermittelt werden. Die Prozessschritte Entbindern und Sintern sind nicht Teil dieser Arbeit.

2 Stand der Technik und Grundlagen

Das nachfolgende Kapitel behandelt die Grundlagen des Fused Filament Fabrication (FFF) und zeigt dessen Integration in die sinterbasierte Prozesskette sowie die Anwendung statistischer Versuchsplanung auf. Es wird das verwendete Setup erläutert und ein industrieller Metall-FFF Drucker als Beispiel vorgestellt.

2.1 Prinzip von Fused Filament Fabrication

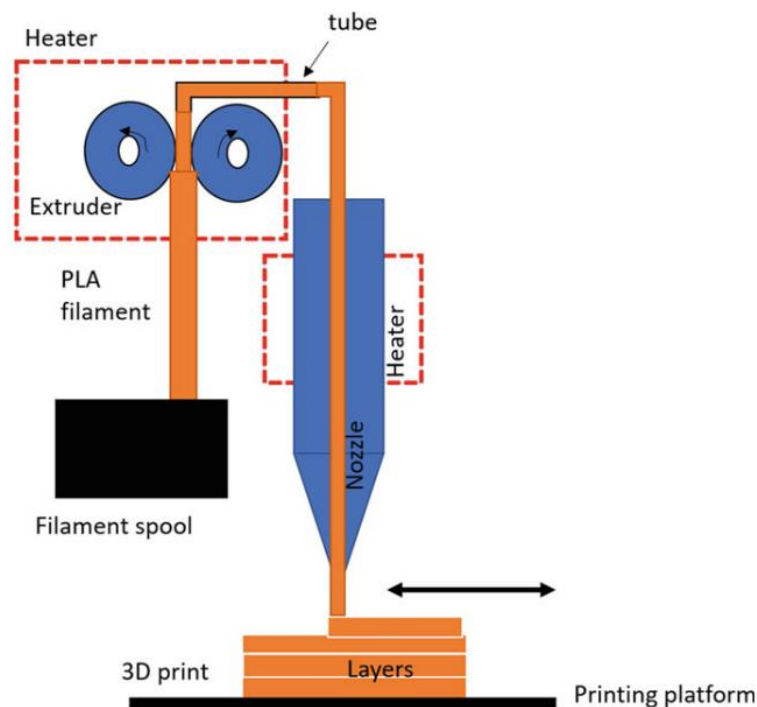


Abbildung 1 Prinzip von FFF (Mwema, 2020)

Beim FFF-Verfahren wird das Filament kontinuierlich durch den Extruder und die Düse der Maschine über zwei gegenläufig rotierende Walzen geführt. Schicht für Schicht wird das Material auf die Bauplattform aufgetragen, bis die gewünschte Form und Größe des Produkts erreicht ist. Während dieses Prozesses bewegt sich die Düse des Druckers gemäß den Raumkoordinaten eines ursprünglichen Computer Aided Design (CAD) - Modells. Das CAD-Modell wird dafür vorher in der CAD-Software in ein STL-Format (Surface für Tessellation Language) überführt oder als STEP exportiert. Bei STL wird die Oberfläche des Körpers durch ein Netz aus Dreiecken beschrieben. In einer Slicer-Software werden die Daten in Schichtdaten zerlegt und es wird ein Maschinencode generiert. Der erstellte G-Code beinhaltet sowohl die Verfahrenswege als auch die durch den Benutzer vorgegebenen Druckparameter.

2.2 Feedstock-Herstellung für Metall- FFF und sinterbasierte Prozesskette

Die Prozesskette zur Herstellung von metallischen Bauteilen sowie die Zusammensetzung des verwendeten Materials bei Metall - FFF ist dieselbe wie bei dem Metallpulverspritzgießverfahren (metal injection moulding, MIM) und soll daher als Abgrenzung dazu dargestellt werden. Bei MIM handelt es sich um ein Urformverfahren zur Herstellung von metallischen Bauteilen, was seinen Ursprung in der Kunststoff-Spritzgusstechnologie hat. Das eingesetzte Rohmaterial, das Feedstock, besteht aus Metallpulver vermischt mit einem Kunststoffbinder und liegt in Granulatform vor. Bei Metall-FFF wird neben dem Granulat auch das zu einem langen Draht geformte Filament und in Stangen gepresstes Rohmaterial dazu (siehe Abb. 5, a)).

Nach dem Spritzguss, b) bzw. nach Beendigung des Druckvorgangs, c) wird ein Grünling erzeugt. Anschließend wird der Kunststoffbinder in einem Lösemittelbad herausgelöst, d). Alternativ geht auch eine thermischen Entbinderung bei niedrigen Temperaturen, die Wahl der Methode wird durch die Zusammensetzung des Binders bestimmt. Bei der Entbinderung wird nur ein Teil des Kunststoffs rausgelöst, sodass die Form zwar schwächer gebunden ist, der Formzusammenhalt aber noch besteht. Im nächsten Schritt entweicht der Rest des Binders in der thermischen Entbinderung bei einer höheren Temperatur aus dem Halbzeug. Es entsteht das Braunteil. Abschließend wird das Braunteil bei über 1000°C gesintert und erhält danach seine metallischen Werkstoffeigenschaften, e).

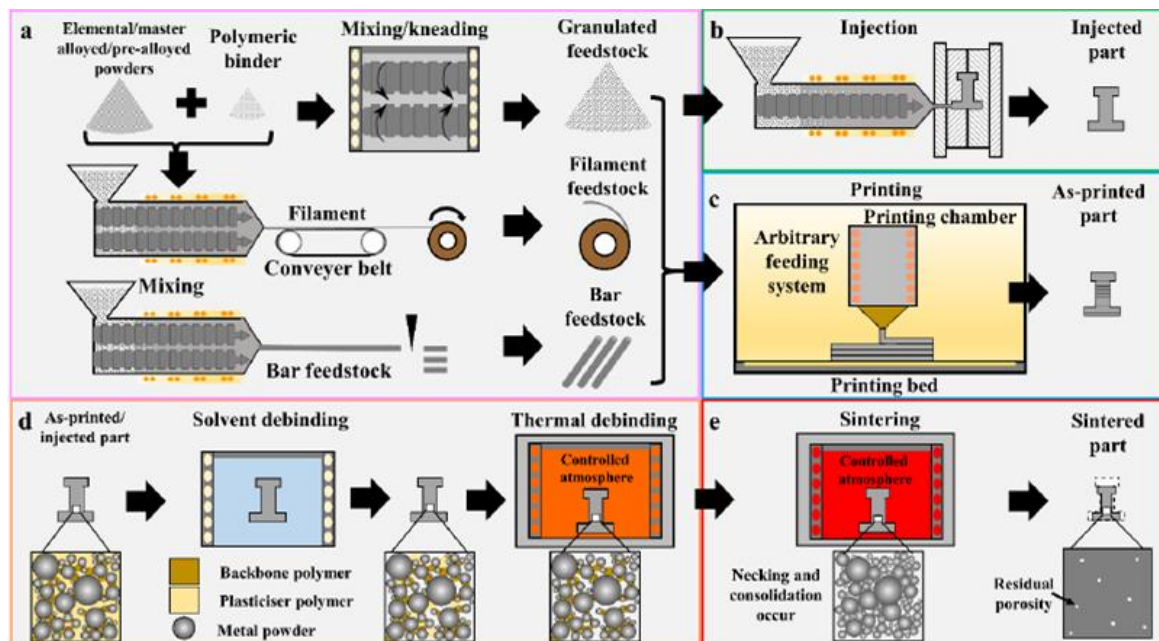


Abbildung 2 Feedstock-Herstellung und sinterbasierte Prozesskette (Dave, 2022)

2.3 Verwendeter Drucker

Nachdem die technologischen Grundlagen gelegt worden sind, soll auf das verwendete Setup eingegangen werden. Die Ausstattung des Druckers und die Funktionen der einzelnen Komponenten des Extruders werden detaillierter erläutert, wobei die Terminologie aus Kapitel 2.1 aufgegriffen wird. Für einige Komponenten haben sich englische Begriffe etabliert und werden daher zusätzlich genannt.

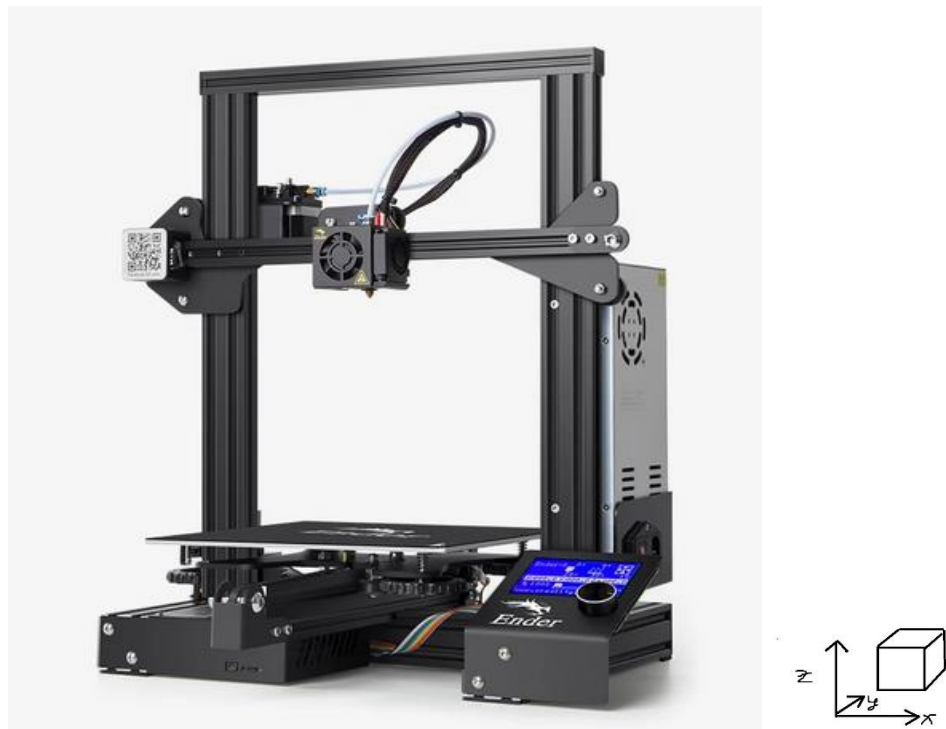


Abbildung 3 "Ender 3 V1"-3D-Drucker (Creality, 2023)

Als Grundlage dieser Arbeit wird der 3D-Drucker „Ender 3 V1“ des Herstellers Creality verwendet (s. Abb. 3). Ender Drucker gelten als Einstiegsmodell für 3D Drucker. Der „Ender 3 V1“ ist die erste Entwicklung in der Ender-Serie. Bei der Ender-Reihe handelt es sich um Open-Source 3D-Drucker, die Hard-, Soft- und Firmware ist offen zugänglich und kann je nach Anforderung modifiziert und aktualisiert werden. Anders als seine Nachfolger verfügt er über keine Sensorik, die den Filamentaustritt aus der Düse detektiert. Die Druckbettnivellierung ist eine notwendige Kalibrierung vor dem ersten Druck und erfolgt bei diesem Drucker manuell. Die physische Modifizierbarkeit wird durch das schlichte Design des Druckers unterstützt. Die Filamenthalterung befindet sich auf der Druckertraverse und ist für eine Filamentspulengröße von 20 cm Außendurchmesser vorgesehen.

Je ein Schrittmotor bewegt den Extruder, das Druckbett in Y-Richtung sowie den Druckkopf in XZ-Richtung. Die eingebaute Messingdüse hat einen 0,4 mm-Durchmesser.

Der Drucker ist als Bausatz erhältlich und war vor Beginn der Arbeit von Mitarbeitern des 3D-Space zusammengebaut worden. Das 3D-Space ist eine studentisch geleitete Gruppe und ist

Teil der Lehre an der HAW Hamburg. Das 3D Space ermöglicht es Studierenden, ihre 3D Druck Ideen zu verwirklichen und die Technologie zu erlernen.

Der ursprüngliche Bowden-Extruder, auch indirekter Antrieb genannt, wurde durch einen Extruder mit Direktantrieb der Firma Micro Swiss LLC ersetzt, da dieser von dem Filamenthersteller empfohlen wird (s. Datenblatt im Anhang). Bei Bowden-Extrudern befindet sich der Extruder-Motor nicht direkt über dem Druckkopf wie beim Direktantrieb, sondern an einer entfernten Position, oft am Druckergestell. Nach einem Extruderwechsel ist es notwendig, die Extrusionsschritte des Motors anzupassen, damit die richtige Filamentmenge gefördert wird. Nach dem Einbau des neuen Extruders wurde der Extruder mittels E-Step-Kalibrierung konfiguriert. In diesem Zustand ist der Drucker übernommen worden.

Erscheinungsjahr	2018
Antriebsart	Bowden-Antrieb
Bauvolumen	220x220x250 mm
Maximale Düsentemperatur	240°C
Mainboard und Firmware	V4.2.2 und Marlin
Rahmendimensionen	440x410x465 mm
Gewicht	8,6 kg
Maximale Druckbetttemeperatur	60°C
Preis	Unter 200 €

Tabelle 1 Technische Daten "Ender 3 V1"

Funktionsweise Extruder

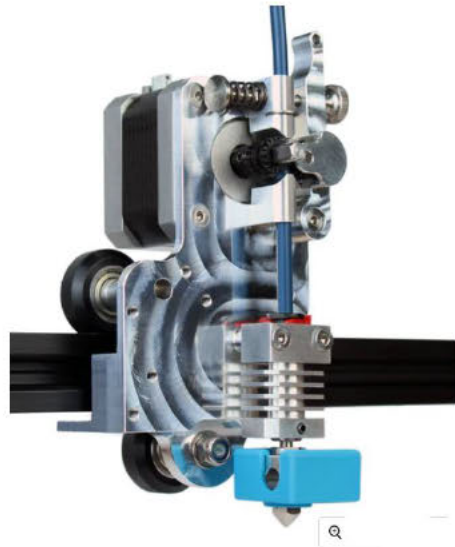


Abbildung 4 Extruder mit Direktantrieb von Micro Swiss (3DJake, 2023)

Der gesamte Verbund aus Komponenten, der für die Förderung, das Aufschmelzen des Filaments und für das Ablegen des Filamentstrangs verantwortlich ist, wird als Extruder bezeichnet (s. Abb. 4). Das Filament wird von oben zwischen den beiden Zahnradwalzen eingefasst und zur Schmelzeinheit, dem Hot-end geführt. Hier wird das Filament erwärmt und weiter zur Düse geführt, wo das Filament durch die Düse auf der Bauplatzform abgelegt wird.

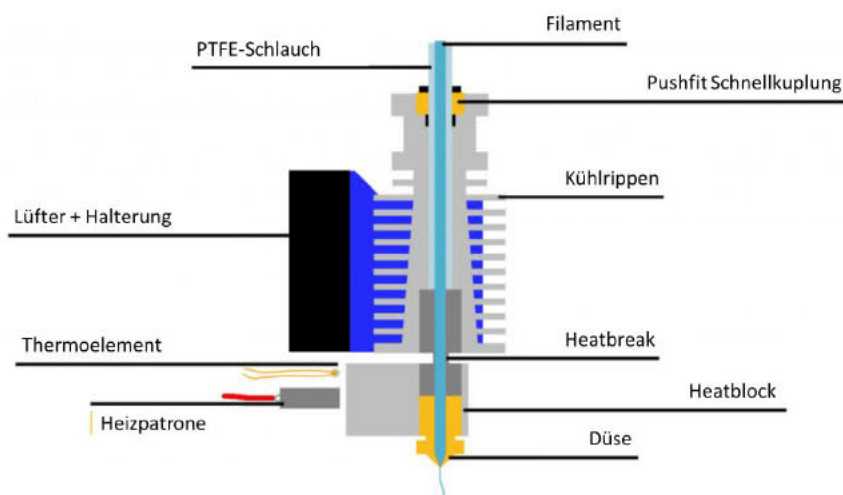


Abbildung 5 Hot-end

Die Heizpatrone gibt die Wärme über den Aluminium-Heizblock (heat- block) an die Düse weiter, das Thermoelement misst und sendet ein Temperatursignal an den Regelkreis, die Düse legt das Filament in flüssiger Form auf der Bauplatzform ab. Die Titan-Thermobarriere

(heat-break) ist zwischen heat-block und Kühlrippen gekoppelt und verhindert, dass ein großer Teil der Wärme abgeführt wird, bevor sie in den Filamentgang gelangt. Das Abführen der Wärme ist wichtig, damit das Filament zum Zeitpunkt der Zufuhr nicht schon anfängt weich zu werden und den Filamentgang zu verstopfen. In der Zeichnung nicht zu sehen ist der Teflonschlauch im Inneren des heat-break. Der niedrige Reibkoeffizienten sorgt dafür, dass das Filament bei der Wärmeausdehnung nicht hängen bleibt.

Verwendetes metallgefülltes Filament 316L

Das verwendete Feedstockmaterial der Firma PT+A GmbH basiert auf rostfreien Edelstahl 316L. Es ist in zwei Spulengrößen erhältlich, 1 kg Material auf Spulen mit 20 cm oder 2 kg Material mit 30 cm Außendurchmesser. Es handelt sich um ein Metallpulver-Bindergemisch, welches zu einem Filament weiterverarbeitet wurde. Welche Zusammensetzung der Binder hat wird von dem Hersteller nicht angegeben, es wird aber angenommen, dass der Hauptbestandteil ein Thermoplast ist. Die Polymerketten von Thermoplasten sind aufgrund ihrer Bindungsform in der Lage, bei Erwärmung aneinander abzugleiten, was in der Verformung des Kunststoffs resultiert. Die Entbinderung des Feedstocks erfolgt chemisch in Aceton, was für den Verlauf des Prozesses von Vorteil ist. Andere Rohmaterialien für den Metall-3D-Druck werden thermisch entbindert, was einen höheren Energieaufwand bedeutet. Der Anteil des Metallpulvers im Binder beträgt 93% in wt% und 58,4% in vol%. (Gözüküçük, 2022). Laut Herstellerangabe ist das Material aufgrund seines hohen Pulveranteils spröde. Die Zusammensetzung des Metallpulvers im Filament ist:

Tabelle 2 Zusammensetzung Metallpulver 316L

Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	C
Bal.	16,3	10,5	2,2	1,38	0,79	0,01	0,004	0,018

Laut dem technischen Datenblatt soll die Prozesstemperatur bei mindestens 22°C - 25°C liegen und eine Trocknung bei 35°C-40°C erfolgen. Die empfohlene Extrusionstemperatur ist mit 120°C- 150°C angegeben.

Verwendetes Slicer-Programm

Die verwendete Slicer-Software ist Prusa Slicer-2.5.2 der Firma Prusa Research a.s.. Die Software ist kostenlos, quelloffen und wird von dem Hersteller laufend weiterentwickelt. In der Software gibt es bereits als Presets hinterlegte Parametersätze, die auf die Drucker der Firma Prusa, auf das verwendete Filament und auf die gewünschte Druckqualität zugeschnitten sind.

Es ist aber auch möglich, eigene Parametersätze zu erstellen und die Einstellungen für die verwendeten Materialien und Drucker anzupassen.

2.4 Ausstattung industrieller FFF-Metalldrucker anhand eines Beispiels

Für das Verständnis für mögliche Modifikationsmaßnahmen soll anhand eines Beispiels ein industrieller Metall-FFF Drucker und seine Ausstattung untersucht werden.

Der Drucker „Raise3D Metalfuse Forge“ - 3D-Drucker des Herstellers „3dimensionals“ verfügt als heutige Standardcharakteristika bei den 3D Druckern über eine beheizbare Bauplattform, eine Auto-Nivellierung der Bauplattform und einen Filament Runout-Sensor. Der Antrieb ist direkt. Es gibt einen HEPA-Luftfilter mit Aktivkohle, einen WLAN Konnektivität und einen USB-Anschluss im Boardcomputer. Die Filamentlagerung ist mit in den Bauraum integriert und wird nicht zusätzlich beheizt.

Tabelle 3 Technische Daten "Raise3D Metalfuse Forge"

Bauraum	300 × 300 × 300 mm
Antrieb	Direct Drive
Maximale Düsentemperatur:	300°C
Druckbett Temperatur	120°C
Nivellierung der Bauplatte	Auto-Nivellierung
Geräteabmessung	620 mm x 626 mm x 1390 mm, 80,55 kg
Preis	11.895,00 €

Eine Einhausung hat folgende Vorteile:

- Sorgt für eine konstante Drucktemperatur und Luftfeuchtigkeit damit für stabile Druckbedingen und wirkt sich positiv auf das Druckergebnis aus.
- Gewährleistung eines sicheren Betriebs durch Minimierung äußerer Störungen
- Fertigungsprozessbedingt werden aus dem metallgefüllten Filament Lösemittel frei, die sich beim Aufschmelzen des gebundenen Thermoplasts aus dem Filament lösen und die Umwelt potenziell belasten können. Darüber hinaus stellen die sich ggf. gelösten, feinen Metallpartikel des Filaments eine Belastung der Atemluft dar
- Die Einhausung minimiert die Geräuschemission, die während des Druckens eine Belastung darstellen kann

- Einige Drucker werden im Innenraum zusätzlich beheizt, da sich die Wärme positiv auf das metallgefüllte Filament auswirkt.



Abbildung 1 FFF-Metalldrucker von 3dimensionals (3dimensionals, 2023)

2.5 Ermittlung der Einflussgrößen mithilfe statistischer Versuchsplanung

Die Versuchsplanung, auch Design of Experiment (DoE) dient der Prozess- und Produktoptimierung und ist bei der Untersuchung der Einflüsse von Prozessparametern ein nützliches statistisches Werkzeug. Bei den zahlreichen Druckparametern, die für jeden Druck zur Verfügung stehen, ist das Wissen um die Einflüsse der Parameter auf das Druckergebnis wichtig. Nach Ermittlung der wichtigen Parameter ist eine Optimierung dieser zur Erzielung maßgeschneiderter Eigenschaften mit den Werkzeugen der DoE möglich.

Der statistische Ansatz hilft bei der Analyse der Einzel- und Interaktionseffekte von Einflussgrößen auf die Ausgangsgrößen und kommt im Gegensatz zu einem Vollversuchsplan mit einer geringeren Anzahl an Experimenten aus. Daraus kann sich ein besseres

Prozessverständnis in kürzerer Zeit und kürzere Entwicklungszyklen in der Fertigung ergeben, was kostensenkend und ressourcenschonend ist. Die Durchführung der statistischen Analyse verläuft meist softwaregestützt.

Das Vorgehen beim DoE umfasst in der Regel die folgenden Schritte (Kleppmann, 2020):

- Eingangsgrößen als Einflussgrößen definieren. Die Einflussgrößen sind Größen, die Zielgrößen beeinflussen. Sie werden auch Einflussfaktoren genannt. Im Fall dieser Arbeit sind das die Prozessparameter.
- Einflussfaktoren in Steuer- und Störgrößen unterteilen
- Die Steuergrößen in Stufen untergliedern
- Ausgangsgrößen als Zielgrößen definieren. Zielgrößen beschreiben das Ergebnis eines Versuchs und können beispielsweise Messwerte sein.

Der weitere Verlauf ist abhängig von der Methode, die gewählt wird. Sie sind unterschiedlich aufwendig und die Entscheidung hängt von vorhandenen Ressourcen und der Zielsetzung ab. Bei Versuchsplänen wie dem Central Composite Design muss mit zunehmender Anzahl der Prozessparameter eine große Anzahl von Versuchen durchgeführt werden. Bei einer vollfaktoriellen DoE werden alle möglichen Einstellungen der Faktoren miteinander kombiniert und man kommt auf $p = \text{Anzahl der Faktoren}$ und je zwei Einstellungen auf $n = 2^p$ Versuche, was bei beispielsweise vier Faktoren mit vier Zielgrößen $4^4 = 256$ Versuche wären. Die Taguchi-Methode schlägt zur Lösung des Problems einen Versuchsplan in Form eines orthogonalen Arrays vor, der verschiedene Kombinationen von Parametern und deren Niveaus für jedes Experiment beinhaltet. Mit dieser Methode wird der gesamte Parameterraum mit einer minimalen Anzahl an Versuchen untersucht (Auffray et al, 2021).

Die Regressionsanalyse ist ein wichtiges Werkzeug der DoE. Mithilfe der Regressionsgleichung und der Varianzanalyse (Analysis of Variance, ANOVA) werden die statistischen Beziehungen zwischen mehreren Einflussgrößen auf eine Zielgröße beschrieben und auf Basis der gegebenen Werte prognostiziert.

Das Pareto-Diagramm basiert auf dem Pareto-Prinzip, das besagt, dass die meisten Auswirkungen eines Problems (80 %) oft auf nur wenige Ursachen (20 %) zurückzuführen sind. Es ist ein Säulendiagramm, das die Problemursachen nach ihrer Bedeutung ordnet. Das Pareto-Diagramm zeigt die absoluten Werte der standardisierten Effekte des untersuchten Zielwertes vom größten bis zum kleinsten Effekt. (Auffray et al, 2021)

Auch Wechselwirkungen der Faktoren können mithilfe von Kurvendiagrammen in 2D oder 3D dargestellt und ausgewertet werden.

Bei der Zielgrößenoptimierung kann die Kombination von Einstellungen der Einflussgrößen bestimmt werden, mit denen eine oder eine Gruppe von Zielgrößen optimiert wird. Das soll anhand eines Beispiels aus der Statistik-Software „Minitab“ des Entwicklers Minitab Inc veranschaulicht werden:

Minitab berechnet eine optimale Lösung für einen konkreten Fall. Dafür kann man Ausgangsgrößen Gewichtungen vergeben. Das von Minitab erstellte Diagramm (s. Abb 6). zeigt den Einfluss jedes Faktors auf die Zielgröße in den Spalten oder die zusammengesetzte Erwünschtheit (composite desirability) in den Zeilen, mit $d=1$ als maximale Erwünschtheit. Für „Ziel“ (target) ist vorher entweder ein Wert, minimal oder maximal einzugeben. Die roten vertikalen Linien zeigen die aktuellen Einstellungen der Faktoren mit den dazugehörigen Werten in Rot an. Die horizontalen blauen Linien geben die aktuellen Werte der Ausgangsgröße als Prognose an. Je steiler die Kurve, desto stärker ist der Einflussfaktor. Die optimale Lösung dient als Ausgangspunkt für das Diagramm und die Einstellungen können interaktiv verändert werden.

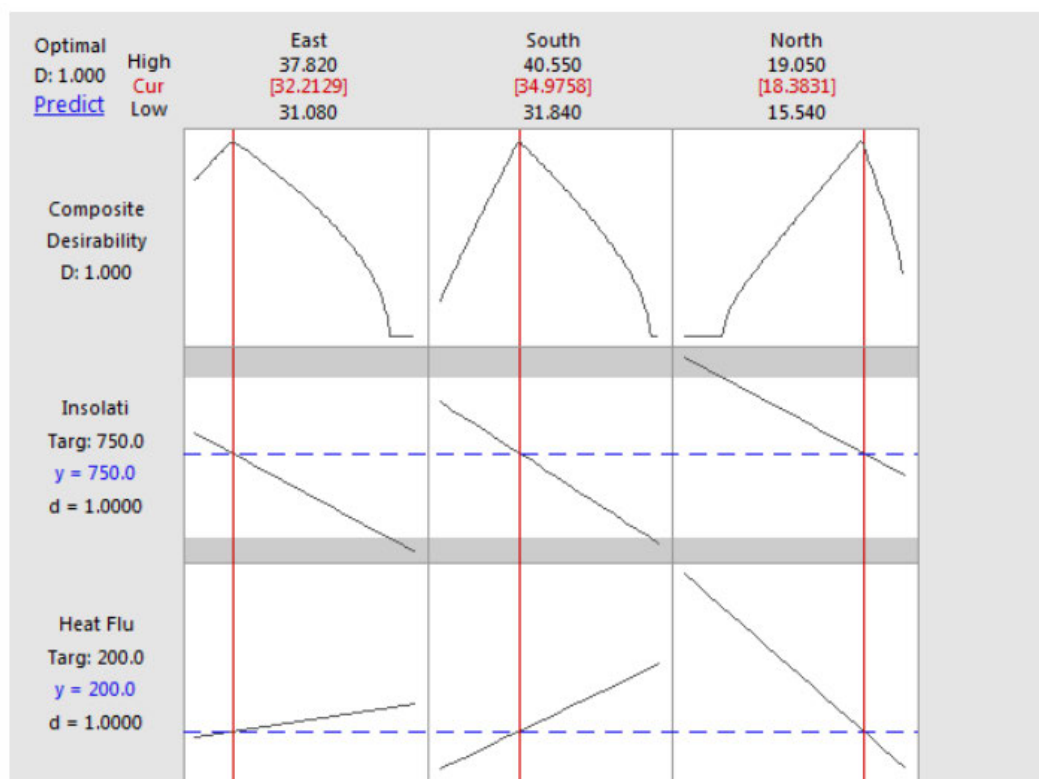


Abbildung 6 Beispiel-Kurvendiagramm in Software Minitab (Minitab Inc, 2024)

3 Vorgehensweise

Damit der 3D-Drucker sicher in Betrieb genommen werden kann sind sowohl Software- als auch Hardwaremodifikationen notwendig. Die Planung der Umbauvorhaben sowie der Prozessparameterfindung werden hier dargestellt.

3.1 Vorbereitung für die Modifikation des Druckers

Für die Verwendung des 3D-Druckers ist der Bau einer Einhausung notwendig, um ein möglichst konstante Bedingungen in der Baukammer zu halten und äußere Einflüsse zu minimieren. Damit mithilfe der statistischen Versuchsplanung das Drucken von Probebauteilen am Ender 3 erfolgen kann, werden diese Modifikationen als erstes durchgeführt.

3.1.1 Einhausung

Die Dimensionen von Desktop Druckern unterscheiden sich von industriellen Druckern. Industrielle Drucker haben mehr Platz für eine separate Filamentlagerung für mehrere Spulen, zusätzlich ist das Druckvolumen größer. Die Einhausung soll von den Dimensionen mehr den Desktopdruckern entsprechen. Ausgangspunkt für die Planung der Einhausung ist die Erstellung eines Anforderungskatalogs (s. Tabelle 1).

Tabelle 4 Anforderungskatalog Einhausung

Nr.	Anforderung	Forderung/ Wunsch	Kommentar
1. Funktionale Anforderungen			
	skalierbar für andere Drucker sein	F	
	Lüftung der Baukammer ermöglichen	W	
	Kraft am Filament messen	W	
	Schutz vor schädlichen Dämpfen bieten	F	
	Sensor Luft- und Temperaturmessung	W	
2. Prozessanforderungen			
	Schutz vor Windstößen bieten	F	
	Schutz vor hoher Luftfeuchtigkeit bieten	F	
	Schutz vor Erschütterungen bieten	F	
	Filament bruchfrei fördern	F	
	warme Temperaturen halten	F	> 22 °C - 25 °C
	trockene Luft halten	F	< 40 % rH
3. Haltbarkeit			
	temperaturbeständig	F	
	wasserabweisend	F	
	korrosionsbeständig	F	
	druckbeständig	W	
	feuerbeständig	F	
4. Geometrie			
	Mindestinnenmaße	F	500x550x720 mm
	Maximale Innenmaße	F	600x580x860 mm
5. Sonstiges			
	Kosten Stückpreis	W	<300 €
	kollisionssicher	W	
	demontierbar	F	
	sicherer Transport des Gehäuses mit und ohne Drucker	F	
6. Nachhaltigkeit			
	Wiederverwendung von Materialien - Nachhaltiger Konsum und Produktion	F	SDG 12

Die Einflüsse der Umweltfaktoren (unter 1. Funktionale Anforderungen) wirken sich auf die Prozesssicherheit des Druckers aus und sind zu minimieren. Die Prozessanforderungen sind vor allem materialbedingte Anforderungen, die auf das hygroskopische Verhalten des Filaments zurückzuführen sind. Durch die Verarbeitung des metallgefüllten Filaments können Gefahrstoffe austreten, sodass eine Abschirmung des Druckraums die Arbeitssicherheit gewährleistet. Die Materialien sind ressourcenschonend zu wählen, vorhandenes Material im

3D Space soll eingesetzt werden. Aufgrund der Wärmentwicklung durch die Düse und das Druckbett muss das Material temperatur-, feuchtigkeits- und feuerbeständig sein. Die Maße orientieren sich an dem Drucker Ender 3, wobei darauf geachtet werden soll, den Innenraum aufgrund von Energieeffizienz und Materialersparnis so klein wie möglich zu halten. Die Dimension der Prusa-Drucker aus dem 3D Space wurden ebenfalls mitberücksichtigt, sodass die Einhausung auch für sie benutzt werden kann (Skalierbarkeit). Die Einhausung soll insgesamt robust, lager- und transportierbar sein. Die Materialförderung soll in die Einhausung integriert werden, sodass das Filament bruchfrei am Drucker ankommt.

Im use-case-Diagramm (s. Abb. 7) werden alle Szenarien zusammengefasst, die mit der Nutzung der Einhausung in Verbindung stehen. Es wird nur auf die Szenarien eingegangen, bei dem die/der BenutzerIn mit der Einhausung in Berührung kommt. Die Funktionalität des Druckers selbst spielt hierbei keine Rolle.

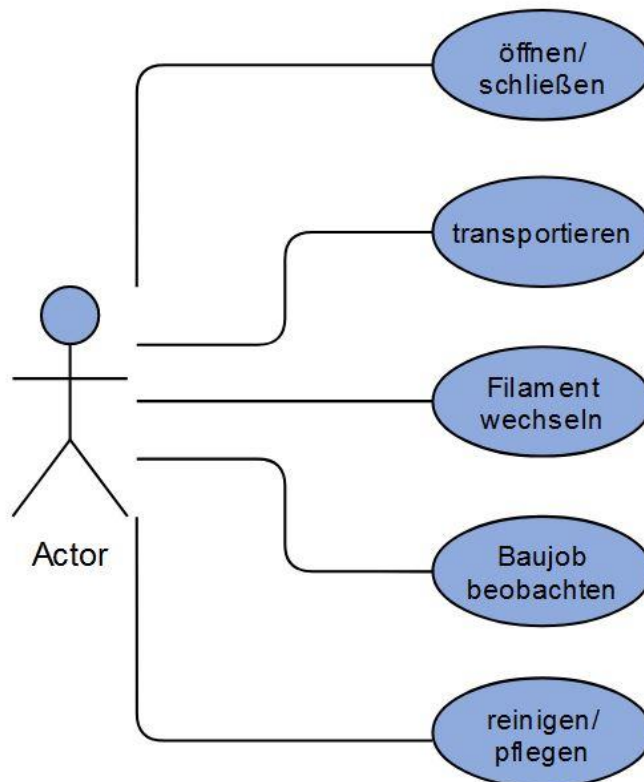


Abbildung 7 use-case-Diagramm Einhausung


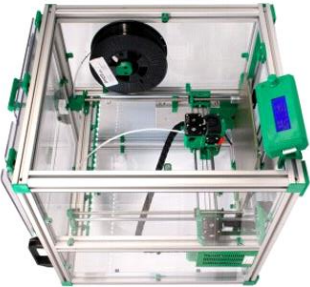
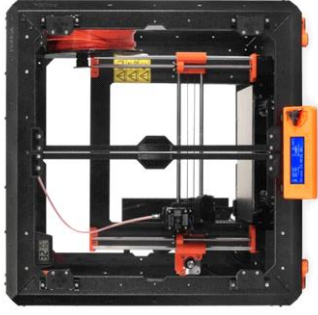
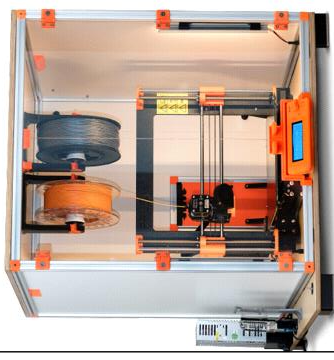
	TLX White - 3D Drucker Gehäuse/Vitrine für Prusa i3 MK3/MK4 mit MMU	PYOT One Professional - Show Case	Original Prusa-Gehäuse - Gehäuse für 3D-Drucker	The „HomeCube“ modular printer housing – printing and assembly
				
Filter	HEPA und Aktivkohlefilter, Rückseite	nein	ja	nein
Lüftung	optional, Rückseite	nein	nein	nein
Materialien	5 mm extrudiertes Plexiglas (XT) und 18 mm beschichtete Spanplatten	Alu-Profil, Plexiglas	Metall, PETG, Plexiglas	Alu-Profil, Spanholzplatten, Plexiglas
Preis [€]	239	4150	899	
Filamenthalterung	außen Deckenplatte, variabel, auf Achse hängend oder auf Rollen stehend	Seitliche Wand, hängend, mit Führung oberhalb des Druckers	Seitliche Wand, hängend, mit Führung oberhalb des Druckers	innen, Deckenplatte
Lüftungsschacht für die Stromversorgung	Seitlich Öffnungen in Wand, Webenmuster	Seitlich Öffnung in Wand	Stromanschluss außen	Stromanschluss außen
Öffnung für USB-Anschlüsse	ja, seitlich, mit Abdeckung	nein	nein	seitliche Wand, geführt
Link	https://www.tukkari.de/prtx-white-3d-drucker-gehaeuse-vitrine-fur-prusa-i3-mk2-mk3	https://shop.pyot.de/3d-drucker-kaufen-show	https://botland.de/abdeckungen-gehaeuse-und-rahmen/23185-original-prusa-gehaeuse-gehaeuse-fur-3d-drucker.html	https://www.printables.com/de/model/99050-the-homecube-main-page-a-smarter-printer-enclosure

Abbildung 8 Marktanalyse Einhausungen

Als Inspiration für verwendete Materialien, Ausstattung und Spulenhalterungen werden auf dem Markt erhältliche Einhausungen und build-your-own-Varianten herangezogen, siehe Abbildung 8.

Die Übereinstimmung in den Materialien findet sich in Plexiglas für die Wände, Aluminiumprofile als Käfig und beschichtete Spanplatten oder Metallplatten als Decken- und Bodenplatte. Bei der Ausstattung sind Lüfter und Aktivkohlefilter vorstellbar. Die Filtersysteme sind meist mit einem Lüfter integriert installiert. Bei metallischem 3D-Druck ist eine etwas wärmere Umgebung als Raumtemperatur gewünscht, da das metallgefüllte Filament weniger elastisch ist und zu Brüchen neigt, sobald es auskühlt. Ein Lüfter sorgt für die Kühlung des Prozessraums und für Ventilation der Luft, sodass Hitzekonzentrationen vermieden werden und ein gleichmäßiges Klima in der Kammer herrscht. Bei einigen Einhausungen sind zusätzlich Lüftungslöcher angebracht, damit warme Luft entweichen kann.

Die Halterung der Filamentrolle kann sich gemäß der integrierten Bauweise innerhalb der Einhausung an der Decke, an den Seitenwänden oder auf dem Druckergestell (Ist-Zustand) befinden. Die Befestigung der Spule auf der Traverse des Druckers ist eine kompakte Bauweise. Der Krümmungsradius des Filaments wäre durch den geringen Abstand von Spule zum Extruder aber recht klein, was eher zu Filamentbruch führen würde.

Bei der Befestigung im Innenraum kann die Spule mit dem maximalen Radius durch eine Plastikschauchführung verbaut werden, wie beim Pyot (s. Abb. 8), oder mit einem kurzen Weg wie beim Home Cube direkt und ohne Führung.

Ein Vorteil der modularen Bauweise von auf der Einhausung verbauten Spule wie bei TLX white ist, dass die Einhausung selbst kleiner und energiesparender ist, da sie weniger Zeit braucht, um sich auf die Prozesstemperatur aufzuwärmen. In diesem Fall könnte das Filament in einer Trockenbox gelagert und weiter zum Drucker geführt werden.

Öffnungen für USB-Anschlüsse werden in der Einhausung mitbedacht, um Sensoren für Luft- und Temperaturmessungen an einem RaspberryPi anzuschließen zu können.

3.1.2 Herabsetzen der Mindestextrusionstemperatur

Der Ender 3 ist auf die Mindestextrusionstemperatur von 180°C programmiert. Das Filament hat eine empfohlene Düsentemperatur von 120°C bis 150°C. Um die Temperatur herabzusetzen, wurde die Temperatur in der Firmware herabgesetzt. Die verwendete Vorgehensweise hierzu befindet sich im Anhang.

3.1.3 Vorversuche

Um die Funktionalität des Druckers mit dem neuen Filament zu testen, wurden Vorversuche durchgeführt. Neben dem Herabsetzen der Mindestextrusionstemperatur wurde die eingebaute Messingdüse durch eine gehärtete Stahldüse ersetzt. Es wird angenommen, dass das Metallpulver des Filaments die Messingdüse stärker angreift und die Düse nach kurzer Zeit Materialabration zeigen wird.

Die eingebaute Halterung des Enders 3 wurde aufgrund des größeren Spulenaußendurchmessers des verwendeten Filaments mit einer modifizierten Halterung ersetzt.

Vor dem ersten Druck wurde das Druckbett mit der Blattmethode nivelliert. Alle Druckversuche erfolgten ohne Einhausung.

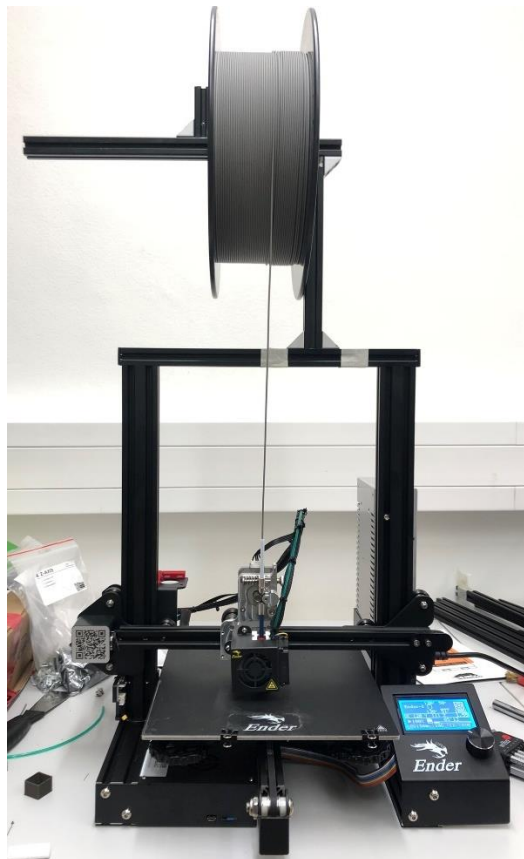


Abbildung 9 Versuchsaufbau Vorversuche

Die Parameter Extrusionsmultiplikator (EM), die Düsentemperatur, die Druckgeschwindigkeit und die Schichthöhe wurden auf Basis von (Gözükcük, 2022) modifiziert. Eine nähere Erläuterung der Bedeutung der Druckparameter erfolgt in Kapitel 3.2.1.

Tabelle 5 Parameter und Beobachtungen Vorversuche

	EM [-]	Betttemperatur [°C]	Düsentemperatur [°C]	Druckgeschwindigkeit [mm/s]	Schichthöhe [mm]	Kommentare
Versuch 0	1	30	130	35	0,2	kein Formzusammenhalt, s. Abb. 10
Versuch 1	1,1	30	130	35	0,2	starke Unterextrusion,
Versuch 2	1,3	30	130	35	0,2	Unterextrusion, s. Abb. 11
Versuch 3	1,6	30	130	35	0,2	leichte Überextrusion, s. Abb.12, regelmäßige Linien und warping, s. Abb. 13
Versuch 4	1,6	20	120	35	0,2	warping, Überextrusion, starkes Treppmuster, s. Abb.14

Die Formen der Testdruckkörper wurden so ausgewählt, dass die Druckbarkeit an sowohl runden Geometrien mit Überhängen (s. Abb. 13) sowie an eckigen Geometrien (s. Abb. 11) untersucht werden kann. Die Temperatur und Luftfeuchtigkeit betrugen 20,1°C und 56,7% rH. Eine EM-Kalibrierung erfolgte erst im späteren Verlauf der Untersuchungen. Zur Einstellung der Form des abgelegten Strangs wurde der Abstand zwischen Düse und Druckbett mithilfe der „Babysteps“ am Drucker variiert.

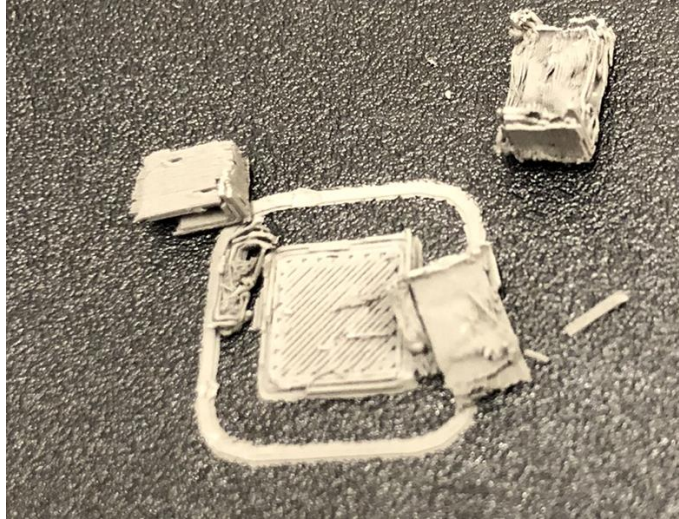


Abbildung 10 Fehlen von Formzusammenhalt aufgrund starker Unterextrusion

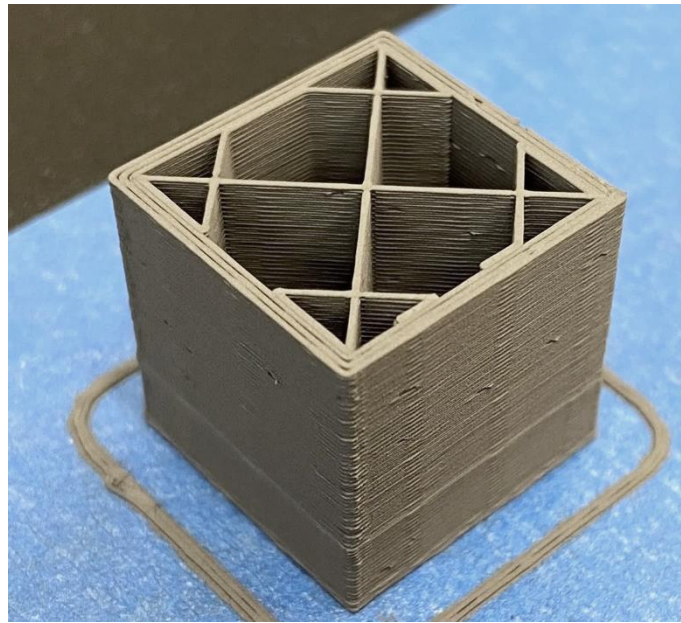


Abbildung 11 Unterextrusion

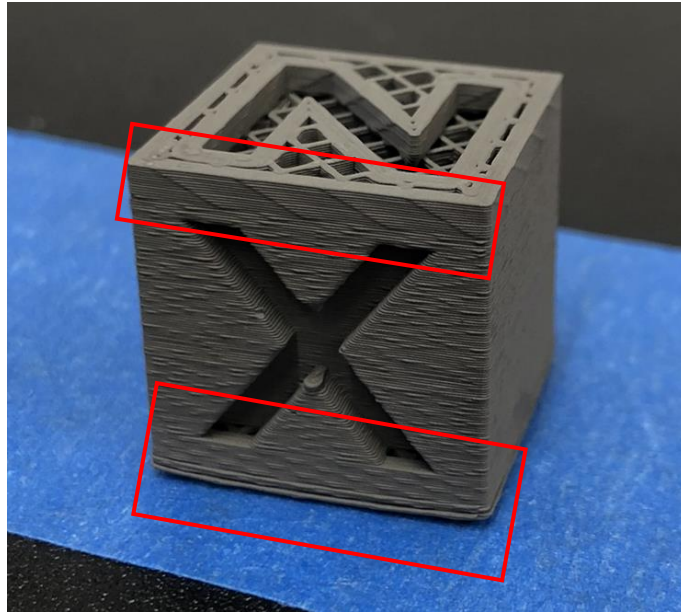


Abbildung 12 Warping und regelmäßige Linienstruktur

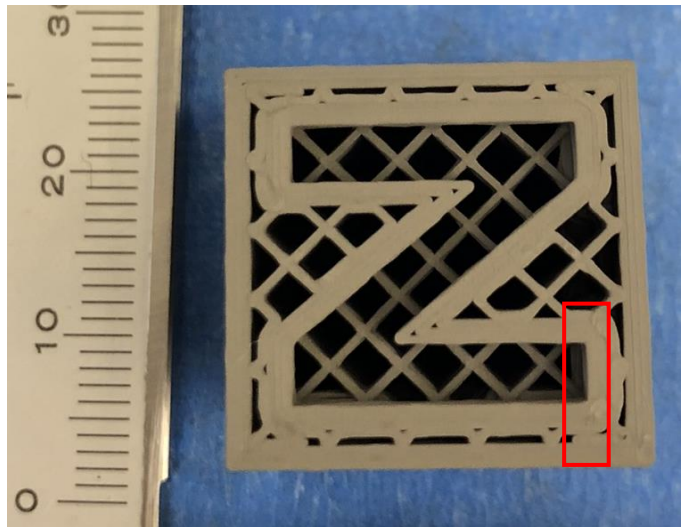


Abbildung 13 Überextrusion

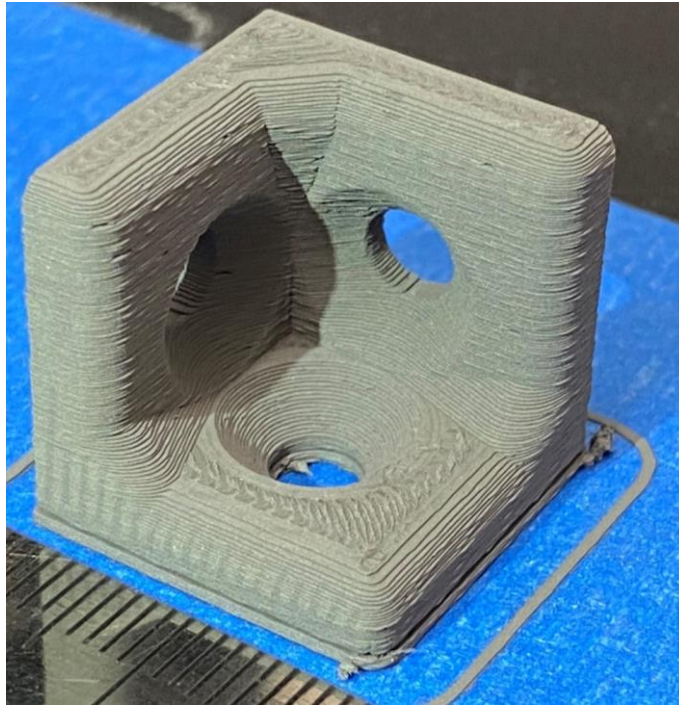


Abbildung 14 starke Überextrusion

Beobachtungen

Die Probekörper lassen sich auch mit niedrigen Extrusionstemperaturen gut drucken. Das kann an den warmen Außentemperaturen zum Zeitpunkt der Versuche liegen. Aufgrund der geringen Betttemperaturen tritt warping auf. Die EM-Rate sollte eher erhöht als herabgesetzt werden, um Unterextrusion zu vermeiden. Auffällig ist die regelmäßige Linienstruktur (s. Abb. 12). Ein Gleichgewicht aus Unter- und Überextrusion konnte bisher nicht ermittelt werden.

Kalibrierung des Extrusionsmultiplikators und der Betttemperatur

Vor der Herstellung der Probekörper für die Untersuchung der Prozessparameter wird der Extrusionsmultiplikator und die Betttemperatur kalibriert. Die gewählten Parameter dafür sind in Tabelle 3 zu sehen.

Die empfohlene Methode der Extrusionsmultiplikatorkalibrierung von Prusa Research verwendet einen dünnwandigen Probekörper mit definierter Wandstärke (Prusa Research, 2023). Um Zeit zu sparen, wird die Schichthöhe der ersten Schicht gemessen, um darüber einen ersten Anhaltspunkt zum EM zu bekommen, (s. Tab. 4).

Tabelle 6 Parameter für EM-Kalibrierung

Gewählte Parameter für Extrusion multipler - Kalibrierung						
Legierung	Schichthöhe [mm]	Schichtbreite [mm]	Überlappung [%]	Düsentemperatur [°C]	Betttemperatur [°C]	Geschwindigkeit [mm/s]
316L	0,1	0,45	23	120	50	40

Tabelle 7 Kalibrierung EM über die Schichthöhe

Kalibrierung Extrusion multipler über Schichthöhe, Datum: 6.12.2023 (Raum rel. Feuchte = 44,4 %, Raum Temperatur = 20°)											
Notizen	File name	Probe	Mess 01 [mm]	Mess 02 [mm]	Mess 03 [mm]	Mittelwert [mm]	Standartabw. [mm]	Soll [mm]	Aktueller Fluss [%]	Neuer Fluss [%]	Flow Change [%]
E-Steps neu eingestellt von 93 auf 385 steps/mm !	calibration_cube_V3_EM_1.3_28m_0.10mm_120C	1	0,225	0,235	0,280	0,247	0,0293	0,2	130,0	105,4	-24,59
	calibration_cube_V3_EM_1.054_28m_0.10mm_120C	2	0,202	0,208	0,175	0,195	0,0176	0,2	105,4	108,1	2,70
	calibration_cube_V3_EM_1.081_28m_0.10mm_120C	3	0,210	0,200	0,198	0,203	0,0064	0,2	108,1	106,7	-1,42

Davon ausgehend wurde der EM über Messung der Wanddicke vorgenommen (s. Tab. 5). Dafür wurden Probewürfel mit den Maßen 20x20x10 erstellt und im Prusa-Slicer ohne Infill und ohne obere Deckschicht ausgeführt. Die im Slicer eingestellten Werte für die Wanddicken werden nach dem Druck miteinander abgeglichen. Es wurde mit einer Bügelmessschraube gemessen. Das Vorgehen ist iterativ (s. Tab. 5).

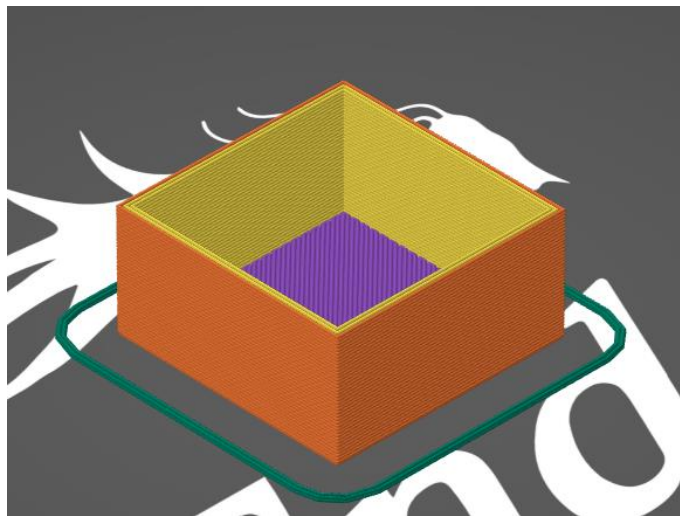


Abbildung 15 EM-Kalibrierungswürfel

Tabelle 8 Kalibrierung EM über Wanddicke

Kalibrierung Extrusion multipler über Wanddicke													
Datum	File name	Probe	Mess 01 [mm]	Mess 02 [mm]	Mess 03 [mm]	Mittelwert [mm]	Standartabw. [mm]	Soll [mm]	Aktueller Fluss [%]	Neuer Fluss [%]	Flow Change [%]	Raum RH [%]	Raum Temp [°C]
08.12.2023	calibration_cube_V3_EM_1.081_28m_0.10mm_120C	1	1,430	1,420	1,425	1,425	0,005	1,35	1,081	1,024	-0,057	51	19,3
	calibration_cube_V3_EM_1.024_28m_0.10mm_120C	2	1,415	1,420	1,395	1,410	0,013	1,35	1,024	0,980	-0,044		
		3	1,330	1,370	1,385	1,362	0,028	1,35	0,980	0,972	-0,008		
09.12.2023		4	1,360	1,350	1,395	1,368	0,024	1,35	0,972	0,959	-0,013	53,4	18,7
		5	1,390	1,385	1,400	1,392	0,008	1,35	0,959	0,930	-0,029		
		6	1,330	1,380	1,330	1,347	0,029	1,35	0,930	0,932	0,002		

Die Kalibrierung der Betttemperatur wurden mithilfe des warping-Effekts durchgeführt. Dafür wurden schmale Probekörper gedruckt und die Hochbiegung an den Ecken gemessen.

Tabelle 9 Kalibrierung Betttemperatur

Kalibrierung Betttemperatur, Raum RH 48,5%, Raum Temperatur 20,6°C										
Slicer	Legierung	3D-Druck Parameter								
Geometrie: X: 80mm, Y: 30mm, Z: 2mm		Schichthöhe [mm]	Schichtbreite [mm]	Düsentemperatur [°C]	Betttemperatur [°C]	Flussrate [mm/s]	Geschwindigkeit [mm/s]	Cooling	Düsendurchmesser [mm]	Maximale Warpingm [m]
Filament splittet am Extruder ab	316L	0,1	0,45	120	20	100	40	100	0,4	0,050
	316L	0,1	0,45	120	40	100	40	100	0,4	-0,033
Filament splittet nicht	316L	0,1	0,45	120	60	100	40	100	0,4	

3.2 Prozessparameter und Optimierung

Anhand von Probekörpern sollen die Einflussfaktoren für die Zielgrößen Dichte, Oberflächenrauheit, Maßhaltigkeit und Druckzeit untersucht werden. Dafür werden bereits untersuchte Faktoren und dessen Auswirkungen auf die Zielgrößen bei Kunststoff- und Metall-FFF recherchiert und daraus bedeutende Faktoren für die Untersuchung ausgewählt.

3.2.1 Auswahl der Faktoren

Einige Einflussgrößen und ihre Auswirkungen werden hier dargestellt. Im Anschluss daran wird die Wahl auf die in der DoE verwendeten Faktoren getroffen.

Schichthöhe

Die Schichthöhe ist die Höhe der einzelnen aufgetragenen Schichten. Er beeinflusst als Faktor die Druckzeit und die vertikale Auflösung des späteren Bauteils. Je geringer die Schichthöhe, desto feiner die Auflösung und desto besser können geometrisch komplizierte Strukturen gedruckt werden. Geringe Schichthöhe führt aber zu höherer Druckzeit und höheren Kosten. Sie kann auch zu einer schlechten Umformqualität des abgelegten Stranges und folglich zu einem schlechten Zusammenhalt der einzelnen Schichten führen, die Düse drückt den Strang in dem Fall nicht ausreichend auf das Druckbett. Eine zu hohe Schichthöhe kann das Herabsinken der vorhergehenden Schicht auslösen (Ramazani et al, 2021), was zu einer schlechten Oberfläche führt. Prusa-Slicer gibt es die Einstellungen für Kunststoffe schon als Pre-set, sodass die Bedeutung für die Optik des gedruckten Bauteils damit klar ist. Laut Prusa sollte die Schichthöhe unter 80% des Düsendurchmessers liegen (Rahmatabadi, 2021), im vorliegenden Fall bei einem Düsendurchmesser von 0,4 mm bei unter 0,32 mm liegen. Bei dem Eintragen eines höheren Werts gibt es eine Fehlermeldung (Prusa Konturen, 2023).

Schichtbreite (Extrusionsbreite)

Schichtbreite, auch *raster width*, findet sich in den erweiterten Einstellungen im Prusa Slicer, ist also eine nicht so offensichtliche Größe, bei der man die Auswirkung direkt kennt. Je nachdem, welche Schichtbreite gewählt wird, kommt es zu einer unterschiedlichen Überlappung der abgelegten Stränge. Die Schichtbreite ist abhängig vom Düsendurchmesser, der Flussrate und der Druckgeschwindigkeit. Kleinere Schichtbreiten führen zu höherer Zugfestigkeit (Dave et al, 2021). Bei der Installation einer neuen Düse ist dieser Faktor maßgeblich für das Druckergebnis. Es wird vorgeschlagen, eine Extrusionsbreite auf 110% des Düsendurchmessers einzustellen, (Prusa2, 2023). Bei einer 0,4 mm-Düse sind das 0,44 mm Schichtbreite.

Extrusionsmultiplikator

Es handelt sich um eine Extrusionsdurchflussrate. Wählt man ihn zu klein, kommt es zu Unterextrusion, entsprechend bei zu großem Wert zu Überextrusion. Bei einer Unterextrusion sind die einzelnen abgelegten Stränge zu weit voneinander entfernt und es kommt zu Delamination. Die Einstellung der Durchflussrate in der Firmware ist auch möglich, wird in dieser Arbeit jedoch nicht behandelt. Eine Erhöhung des EM-Faktors ist anzuraten, da eine leichte Überextrusion die Spalten zwischen den Extrusionsbahnen schließen und die Dichte des Grünteils erhöhen würde (Tosto et al, 2022).

Druckgeschwindigkeit

Die Druckgeschwindigkeit ist die Vorschubgeschwindigkeit des Druckkopfs während der Filamentextrusion und wird in mm/s angegeben. Sie lässt sich unter den erweiterten Einstellungen im Prusa Slicer verändern. Eine zu hohe Geschwindigkeit kann dazu führen, dass sich die Extrusionsbahnen nicht miteinander verschmelzen, das Filament unsauber abgelegt wird und es zu Artefakten kommt und das Filament evtl. reißt. Durch Erhöhung der Druckgeschwindigkeit verringert sich die Abkühlrate, die darauffolgende Schicht wird in kürzerer Zeit aufgedruckt, was sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken kann (Rahmatabadi, 2021). Bei höherer Geschwindigkeit erhöht sich die dynamische Auswirkung des Antriebs auf das Bauteil, daher ist eine niedrige Druckgeschwindigkeit für eine hohe Präzision der Oberfläche zu empfehlen (Dave et al, 2021). Höhere Geschwindigkeit führt zu höherer Porosität (Ramazani et al, 2021).

Düsentemperatur

Die Düsentemperatur ist gleichbedeutend mit der Extrusionstemperatur. Diese wird von dem Filamenthersteller vorgeschlagen, bei dem verwendeten Metallfilament liegt der Bereich zwischen 120°C und 150°C. Durch Erhöhung der Düsentemperatur wird das Filament fließfähiger und kann sich innerhalb der Schichten besser in die Poren legen. Eine gut gewählte Düsentemperatur ist verantwortlich für eine hohe relative Dichte. Bei einer zu hohen Temperatur kann es zu unvollständiger Verschmelzung zwischen den Schichten kommen. Bei

einer zu hohen Temperatur kann warping stärker auftreten. Zu *warping* kommt es, wenn sich der untere Bereich des Bauteils durch die thermische Kontraktion der darüberliegenden Schichten nach oben gebogen wird. Dies kommt durch die unterschiedlichen Abkühlraten zwischen den verschiedenen Schichten des Drucks (Dave et al, 2021).

Betttemperatur

Die Betttemperatur ist abhängig von dem verwendeten Filament. Um Verzug und warping vorzubeugen wird die Betttemperatur, je nach verwendetem Material auf zwischen 50°C bis über 100°C bei Kunststoffen erhöht. Bei metallgefüllten Filamenten ist eine so hohe Temperatur nicht notwendig.

Infillstrategie

Um Zeit zu verkürzen oder Material zu sparen werden die Teile nicht massiv gedruckt. Infill bezeichnet das Füllmuster und den Füllgrad des Teils. Es gibt zwei- oder dreidimensionale Infillgeometrien und mit steigender Infilldichte steigt auch die Materialdichte und -festigkeit (Dave et al, 2021).

Für die weitergehende Versuchsplanung werden die Parameter

- Schichthöhe,
- Schichtbreite,
- Extrusionsmultiplikator und
- Düsentemperatur

Gewählt, da sie nach der Literaturrecherche als wichtige Faktoren für die Zielgrößen Oberflächenrauheit und Dichte gelten. Die Zielgröße Maßhaltigkeit ergibt sich aus der Oberflächenrauheit und einem kalibrierten EM.

3.2.2 Anwendung der Versuchsplanung (DoE)

Die Statistik-Software „Minitab“ unterstützt die wichtigsten Standardversuchspläne und Auswertungsverfahren zur statistischen Datenauswertung, siehe Kapitel 2.5. Bei dem gewählten Taguchi-Versuchsplan ist die Versuchsanzahl geringer als bei den anderen Versuchsplanungsmethoden. Um die Versuchskosten gering zu halten, fällt die Wahl auf diese Methode. Wichtiges Ziel der Taguchi-Methode ist die Minimierung des Streuverhaltens, also dem Abweichen vom Zielwert. Als Maß dafür dient das Signal-Rausch-Verhältnis. (S/N-Verhältnis). Es werden dafür in der Regel ein inneres Feld mit den Steuergrößen und ein äußeres Feld mit den Störgrößen untersucht. Störgrößen sind Umgebungsfaktoren, die man

nicht beeinflussen kann. In dieser Arbeit werden die Störgrößen, wie z.B. das Verwenden von unterschiedlichen Filamentchargen oder Temperatur, nicht berücksichtigt. Es soll sich auf die Untersuchung des Einflusses der Steuergößen auf die Zielgrößen wird fokussiert werden.

Tabelle 10 Versuchsplanbezeichnung

Design Summary	
Taguchi Array	L16[4 ⁴]
Factors	4
Runs	16

Da es vier Faktoren (Schichthöhe, Extrusionsflow, Schichtbreite und Düsentemperatur) und vier Zielgrößen (Dichte, Oberflächenrauigkeit, Druckzeit und Maßhaltigkeit) gibt, wurde ein L16 4⁴ - Versuchsplan ausgewählt. Im Taguchi-Plan sind dafür 16 Versuchsdurchläufe erforderlich.

In Abhängigkeit der Materialherstellervorgaben und auf Basis von den Literaturrecherchen in Kapitel 3.2.1 sowie den Vorversuchen in Kapitel 3.1.3 wurden folgende Stufen gewählt:

Tabelle 11 Gewählte Faktorstufen

Faktor	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
Schichthöhe [mm]	0,1	0,15	0,2	0,25
Extrusionflow [-]	0,9	1	1,1	1,2
Schichtbreite [mm]	0,36	0,4	0,44	0,48
Düsentemperatur [°C]	120	130	140	150

Minitab erstellt nach einem mathematischen, randomisierten Prinzip den Taguchi-Versuchsplan:

Tabelle 12 Generierter Taguchi-Versuchsplan

Probe	Schichthöhe	Extrusionflow	Schichtbreite	Düsentemperatur
1	0,1	0,9	0,36	120
2	0,1	1	0,4	130
3	0,1	1,1	0,44	140
4	0,1	1,2	0,48	150
5	0,15	0,9	0,4	140
6	0,15	1	0,36	150
7	0,15	1,1	0,48	120
8	0,15	1,2	0,44	130
9	0,2	0,9	0,44	150
10	0,2	1	0,48	140
11	0,2	1,1	0,36	130
12	0,2	1,2	0,4	120
13	0,25	0,9	0,48	130
14	0,25	1	0,44	120
15	0,25	1,1	0,4	150
16	0,25	1,2	0,36	140

3.2.3 Herstellung der Proben

Jeder Würfel wurde nacheinander gedruckt. Auf eine sequentielle Druckweise wurde bewusst verzichtet, um Beschädigungen der Probekörper untereinander zu vermeiden, die durch eine Überextrusion und das Mitschleppen von aufgeschmolzenem Filament an der Düse auftreten könnten. Der Würfel 4 wurde neu gedruckt, nachdem sich zuviel Filament an der Düse ansammelte und der Baujob abgebrochen werden musste.



Abbildung 16 Würfel 1-4 exemplarisch, ganz rechts: Narbenbildung

Es gab Lücken zwischen den Schichtlinien oder am Umfang, die auf Unterextrusion zurückzuführen sind. Hoch rausstehende Schichtlinien, zu viel Material an der Ecke, wo der Druck beendet wurde und Narbenbildung in den unteren Schichten sprechen für eine Überextrusion.

3.2.4 Messung der Dichte, Maßhaltigkeit und Oberflächenrauheit

Für die Durchführung der statistischen Versuchsplanung müssen die Faktoren Grünteildichte, Oberflächenrauheit und Maßhaltigkeit zunächst bestimmt werden.

Grünteildichte

Die Auswertung der Grünteildichte erfolgt mittels Auftriebsverfahren nach Archimedes (Universität Leipzig, 2023) mithilfe der elektronischen Präzisionswaage der Firma „Kern PCB“. Es wird auf die 3. Nachkommastelle mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,001 \text{ g}$ gewogen. Dafür wird zunächst die Masse des Würfels an der Luft mit einer Waage gemessen. Anschließend wird das mit destilliertem Wasser gefüllte Becherglas auf die Waage gestellt. Dann wird die Waage genullt und der Würfel in das Becherglas gehängt (siehe Abb.16). Es wird darauf geachtet, sodass der Würfel die Wände des Becherglases nicht berührt. Die Masse des Würfels ist gleich der Masse der verdrängten Flüssigkeit.

$$m = \rho_{Fl} \cdot V_{Fl} \quad (3.1)$$

$$\rho_K = \frac{m_K}{V_K} = \left(\frac{m_K}{m_A} \right) \cdot \rho_{Fl} \quad (3.2)$$



Abbildung 17 Versuchsaufbau Grünteildichtemessung

Maßhaltigkeit

Die Maßhaltigkeit wurde mithilfe einer Bügelmessschraube bis zur 2. Nachkommastelle mit einer Ablesegenauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mm}$ ermittelt. Dafür werden je Würfelseite in x, y und z - Richtung drei Messungen vorgenommen. Der Faktor für die Maßvarianz ist der Mittelwert aus den jeweiligen Standardabweichungen jeder Würfelseite x, y und z (siehe vollständige Messtabelle im Anhang).



Abbildung 18 Versuchsaufbau Messen

Oberflächenrauheit

Gemessen wurde mit einem Rauheitsmessgerät der Firma Mitutoyo SurfTest 301. Es handelt sich um die profilbasierte Rauheitsmessung nach DIN EN ISO 4287. Die Parameter werden mit Hilfe von Tastschnittverfahren aufgenommen. Das Profil wird orthogonal zur Bearbeitungsrichtung mithilfe des Tastkopfs mit Diamantspitze aufgezeichnet und mit einer Gauß-Filterung mit vorgeschriebener Cut-off-Wellenlänge verrechnet. Aus dem resultierenden Profil werden die Oberflächenparameter R_a und R_z aufgenommen. Von Interesse ist für diese Arbeit der arithmetische Mittelwert R_a (siehe Abb. 18). Es handelt sich um den rechnerischen Mittelwert aller Abweichungen des Rauheitsprofils von der mittleren Linie entlang der gemessenen Strecke (Bezugsstrecke). Es wurde jeweils die vordere Würfelseite ausgewertet. Die Seitenwände sind geeignet für die Rauheitsmessung, da genau dort die Schichthöhen eine Rolle spielen. Die Oberseite ist ungeeignet, weil dort die Schichthöhen nicht zu sehen sind.

$$Ra, Pa, Wa = \frac{1}{\ell_r} \int_0^{\ell_r} |Z(x)| dx$$

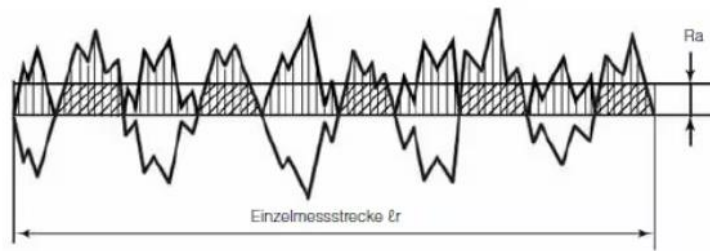


Abbildung 19 Arithmetischer Mittelwert Ra

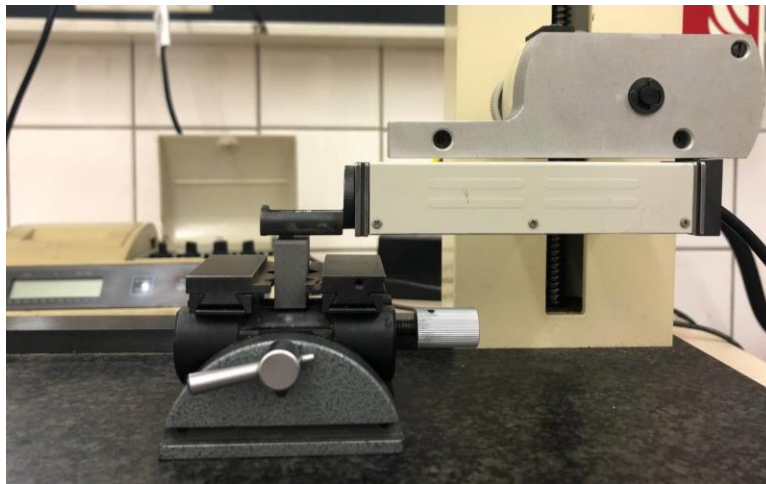


Abbildung 20 Versuchsaufbau OFR-Messung

3.2.5 Optimierung

Für die Optimierung können die in 3.2.3 gemessenen Messwerte mit ausgewertet werden.

Tabelle 13 Versuchsplan mit Ausgangsgrößen

Probe	Schichthöhe [mm]	Extrusionsflow [$\frac{g}{mm^3}$]	Schichtbreite[mm]	Düsen- temperatur [$^{\circ}C$]	Dichte [g/mm^3]	Oberflächen- rauigkeit [μm]	Druckzeit [min]	Varianz
1	0,1	0,837	0,36	120	4,62	8,19	59	-0,030
2	0,1	0,930	0,40	130	4,80	6,23	53	0,029
3	0,1	1,023	0,44	140	5,06	11,54	50	0,156
4	0,1	1,116	0,48	150	5,05	6,39	46	0,354
5	0,15	0,837	0,40	140	4,40	17,61	37	-0,087
6	0,15	0,930	0,36	150	4,85	11,23	41	0,046
7	0,15	1,023	0,48	120	4,99	16,26	32	0,013
8	0,15	1,116	0,44	130	4,99	15,00	34	0,207
9	0,2	0,837	0,44	150	4,45	14,37	27	-0,143
10	0,2	0,930	0,48	140	4,87	18,76	25	-0,039
11	0,2	1,023	0,36	130	4,99	21,83	33	0,127
12	0,2	1,116	0,40	120	5,00	17,09	29	0,142
13	0,25	0,837	0,48	130	4,50	18,16	21	-0,150
14	0,25	0,930	0,44	120	4,75	17,99	22	-0,092
15	0,25	1,023	0,40	150	5,04	23,37	24	0,418
16	0,25	1,116	0,36	140	4,92	17,78	27	0,439

Anm.: Die Extrusionsflow-Werte beziehen sich auf den kalibrierten Wert EM=0,93, s. Tab 5, und sind daher kleiner als in dem generierten Plan, s. Tab.9 (0,837=0,9; 0,93=1; 1,023=1,1; 1,116=1,2)

Ziel der Optimierung ist es, optimierte Parametersätze erstellen zu lassen. Dafür werden Gewichtungen für die Ausgangsgrößen Druckzeit, Grünteldichte, Maßhaltigkeit und Oberflächenrauheit in einer Spanne von 1 bis 10 nach verschiedenen Kriterien vergeben. Minitab erstellt auf Basis der Messdaten interaktive Kurvendiagramme mit prognostizierten Werten für die Zielgrößen.

Tabelle 14 Gewichtungen der Ausgangsgrößen

	Dichte	OFR	Druckzeit	Maß- Varianz
Fall 1) Alle gleich	1	1	1	1
Fall 2) Wirtschaftlichkeit	10	1	10	1
Fall 3) Qualität	10	10	1	1

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modifikationen am „Ender 3“- 3D-Druckers sollen hier vorgestellt werden. In 4.1 werden die Hardwaremodifikationen beschrieben. 4.2 widmet sich den Ergebnissen aus der statistischen Versuchsplanung.

4.1 Hardwaremodifikation

Die Bauweise der Einhausung ist kompakt und ist so konzipiert, dass weitere Modifikationen einfach vorgenommen werden können. Für den Bau Gestells fiel die Wahl auf Aluminiumprofile wegen des geringen Gewichts, der hohen Steifigkeit und der hohen Gestaltungs- und Montagefreiheit, in Kombination mit Nutzensteinen und Winkeln. Als Boden- und Deckenplatte dienen zwei Stahlplatten. Anders als Holz oder Spanmaterial ist Metall weniger anfällig für Brand und Feuchtigkeit. Das hohe Materialgewicht trägt zur robusten Bauweise der Einhausung bei und die schwere Bodenplatte kann Vibrationen, die während des Druckerbetriebs durch die Motoren oder durch die Bewegung des Druckkopfs entstehen, gemindert.

Der Filamentspulenhalter ist im Innenraum an der Decke der Einhausung befestigt. Vom Hersteller wird eine Trocknung vor der Nutzung empfohlen, daher wird angenommen, dass das Filament von der Wärme im Bauraum profitieren kann. Weitere Vorteile dieser Befestigung gegenüber der Befestigung außen ist der freie Platz auf der Deckenplatte für beispielsweise einen weiteren Drucker oder einer Filamenttrocknungsbox. Die Lösung ist ein aus ITEM-Profilen gefertigter Halter. Für ein besseres Gleiten wurde das Profil mit einem Kapton-Klebeband abgeklebt.

Als Rückenabdeckung der Einhausung wurde eine Aluminiumplatte verwendet, um Gewicht zu sparen und um eine einfache Weiterbearbeitung zu ermöglichen. Die Öffnung bietet ausreichend Platz für geführte Stromkabel. Die vier Bohrungen sind für den Anbau eines RaspberryPi gedacht, falls weitere Sensorik für Temperatur- oder Feuchtigkeitsmessung angebracht werden soll.

Es wird auf den Einbau einer zusätzlichen Heizplatte und eines Lüfters verzichtet, da die Druckversuche aus Kapitel 3.1.3 in Bezug auf bruchanfälliges Filament keine Notwendigkeit für eine Klimaregelung zeigten. Das Filament sollte weder zu stark erwärmt oder getrocknet werden noch zu stark ausgekühlt werden, da es ansonsten spröde wird. Die Erwärmung des Bauraums durch die Bauplattform wird für den jetzigen Stand als ausreichende Klimaregelung angesehen. Sollte der Wunsch bestehen, einen Lüfter und eines Filters einzubauen, ist die Rückenabdeckung dafür ein geeigneter Ort.

Als Seitenwände und Türen dienen Plexiglasplatten, die mit 3D-gedruckten Scharnieren an dem Aluminiumprofil festgeschraubt sind.

Die 3D-gedruckten Eckelemente sind zweiteilig und bestehen aus einem Verbindungsstück und einer Abdeckung.

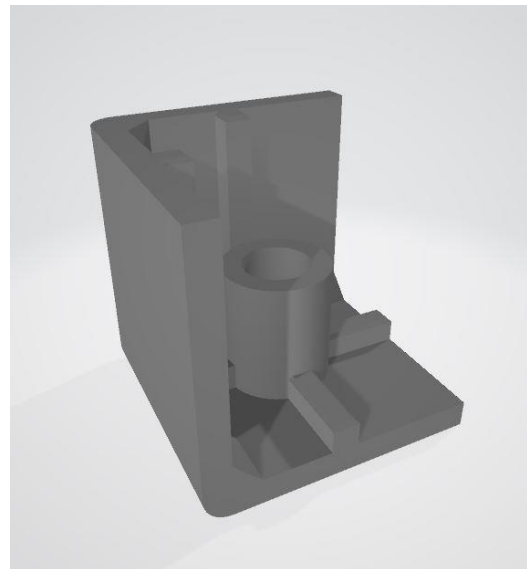
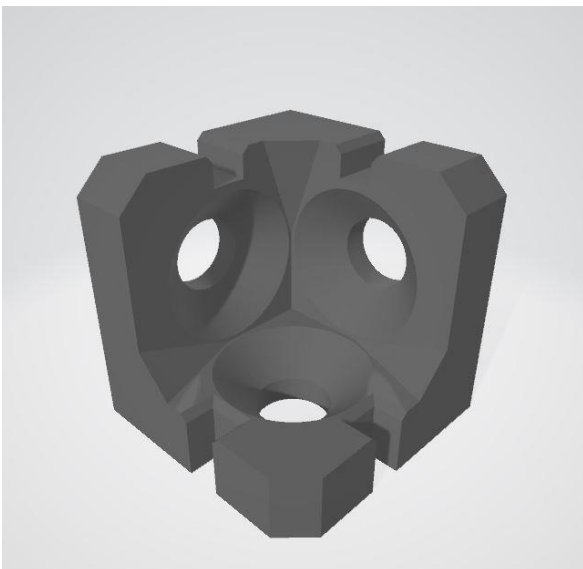


Abbildung 21 Eckelement innen und außen (Printables, 20223)

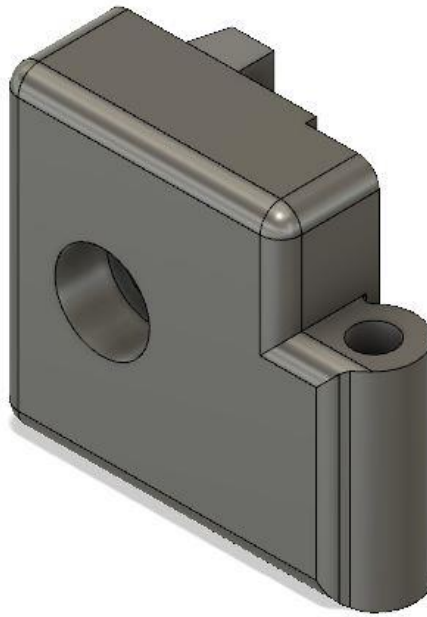


Abbildung 22 Rahmenseitiges Scharnier

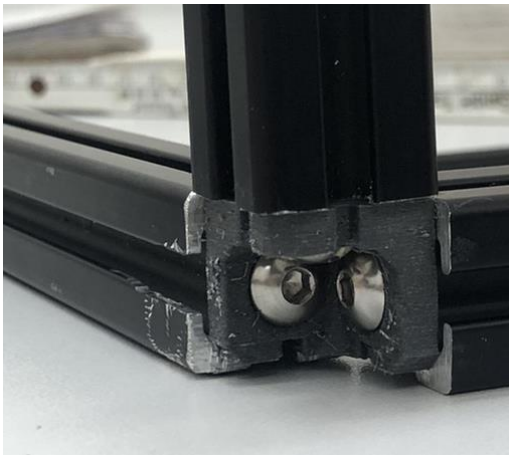


Abbildung 23 Eingebautes Eckverbindungsstück

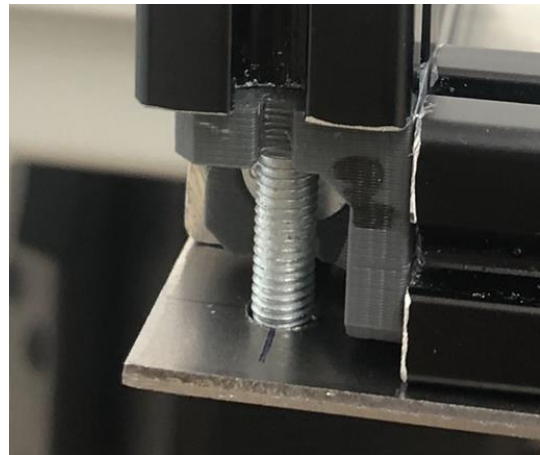


Abbildung 24 Befestigung der Bodenplatte bzw. Deckenplatte

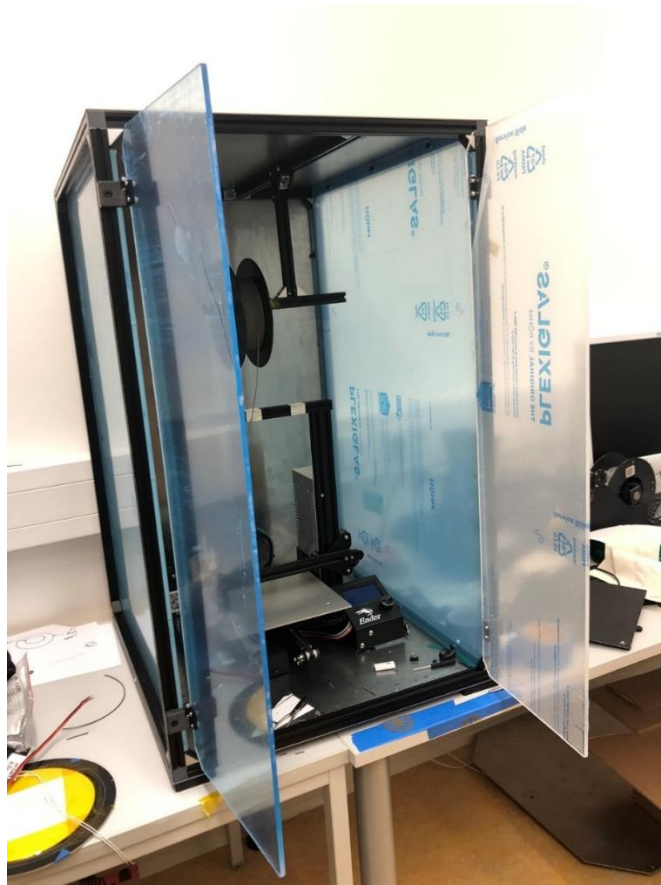


Abbildung 25 Modifizierter 3D-Drucker Zwischenzustand

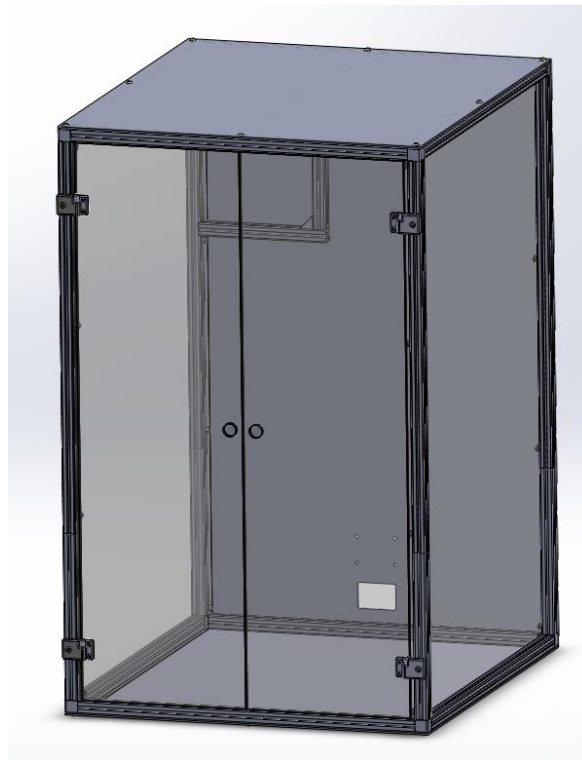


Abbildung 26 CAD - Modell der Einhausung Endzustand

4.2 Ergebnisse der statistischen Versuchplanung

Die in Kapitel 2.5 vorgestellten statistischen Auswertungsmethoden werden angewandt und hier dargestellt.

Wie stark eine Antwortgröße von den jeweiligen Faktoren abhängig ist, sieht man anhand der Steigungen der Kurven des Haupteffektdiagramms. Die Ordinate zeigt die Mittelwerte der Antwortgrößen, die Abszisse ist unterteilt und zeigt die jeweiligen Faktorstufen. Dargestellt werden die Mittelwerte eines Einflussfaktors gegenüber jeweils einer Antwortgröße.

Der p-Wert in der ANOVA Tabelle sagt etwas über die Signifikanz eines Faktors aus. Er gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Effekt zufällig auftritt. Somit ist ein Wert gegen 0 besonders aussagekräftig und eindeutig für die Auswertung eines Einflussfaktors. Der p-Wert unter 0,05 wird aus der Analyse ausgeschlossen. Aussagekräftige Werte sind Rot markiert (s. Anhang C).

Die Regressionsgleichung gibt an, wie der Einflussfaktor berechnet wird.

Das Pareto-Diagramm zeigt den Effekt des jeweiligen Faktors auf die Ausgangsgröße an. Man kann den Rang der einzelnen Faktoren ablesen. Aufgrund der besseren Lesbarkeit sind die ANOVA Tabelle und die Regressionsgleichung in Anhang C zu finden.

4.2.1 Abhängigkeiten der Einflussfaktoren auf die Antwortgrößen

Dichte

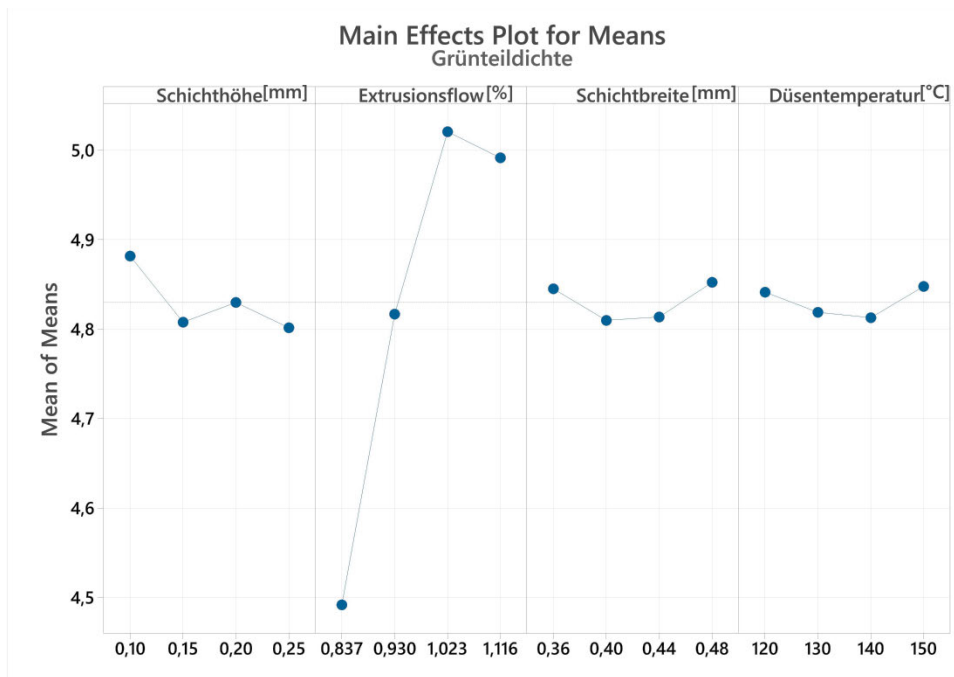


Abbildung 27 Haupteffektdiagramm für Mittelwerte Dichte

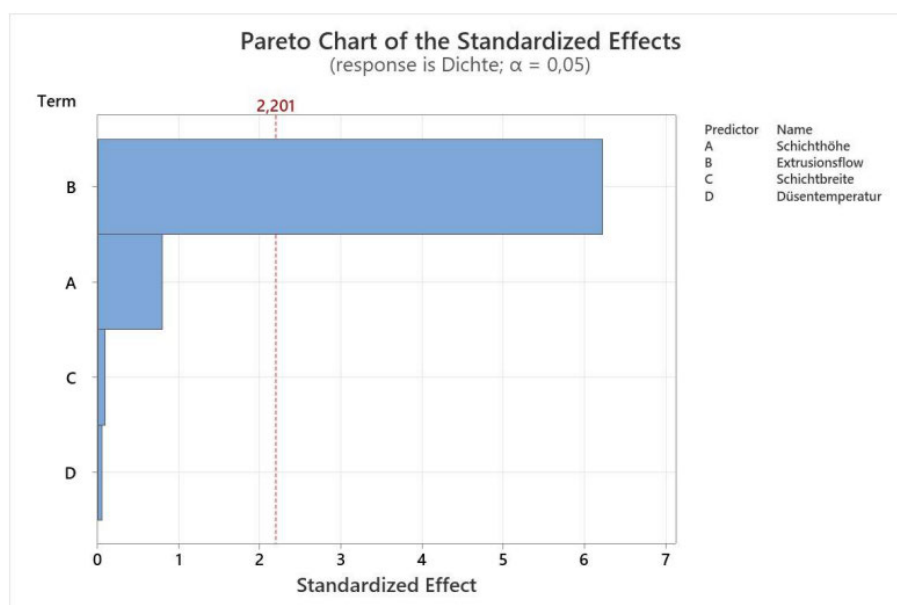


Abbildung 28 Pareto-Diagramm Dichte

Oberflächenrauheit

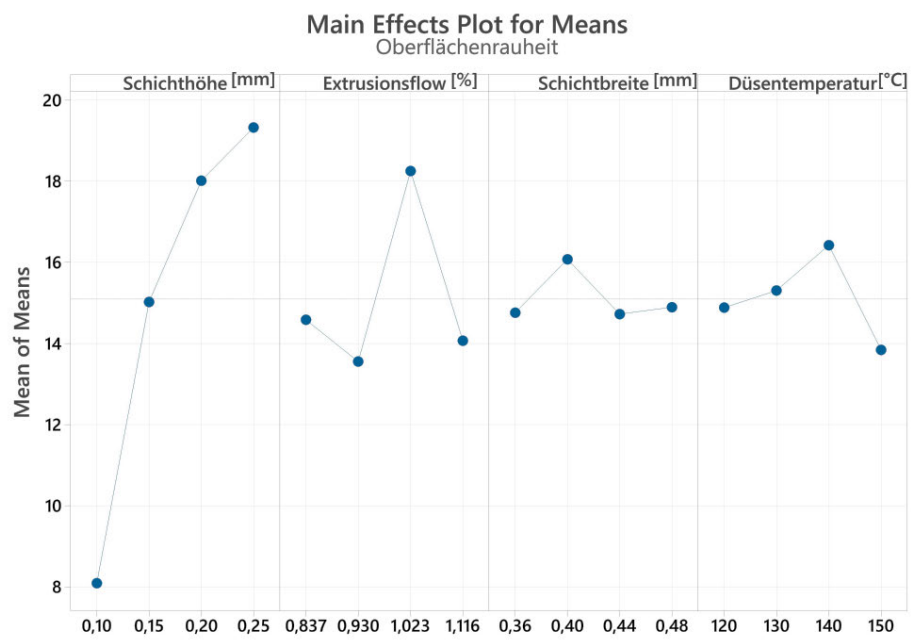


Abbildung 29 Haupteffektdiagramm für Mittelwerte OFR

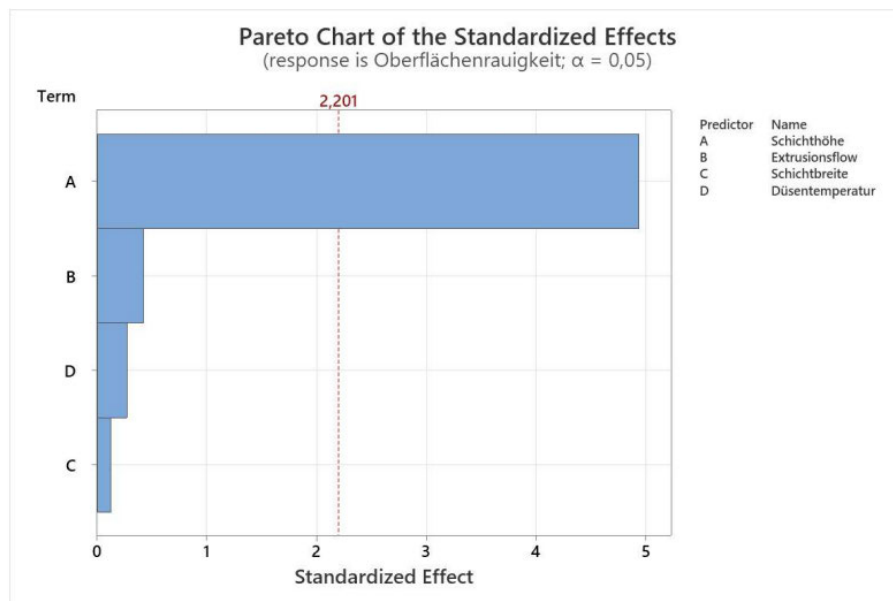


Abbildung 30 Pareto-Diagramm OFR

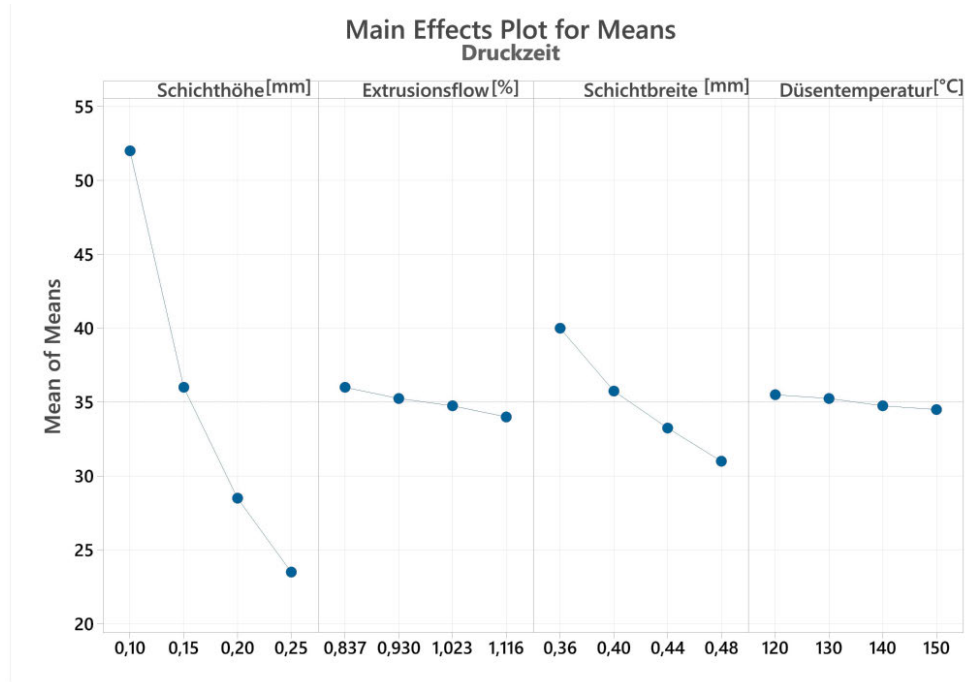
Druckzeit

Abbildung 31 Haupteffektdiagramm für Mittelwerte Druckzeit

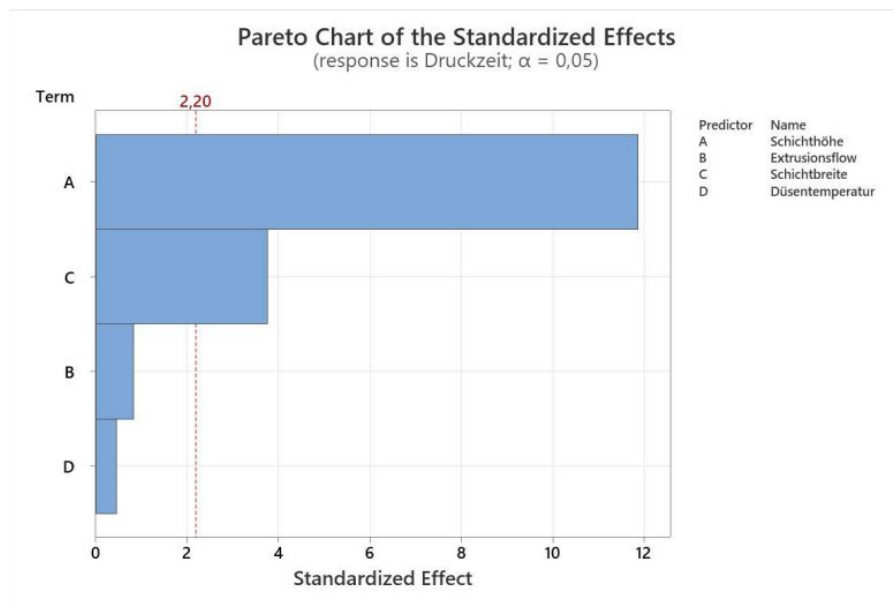


Abbildung 32 Pareto-Diagramm Druckzeit

Maßhaltigkeit

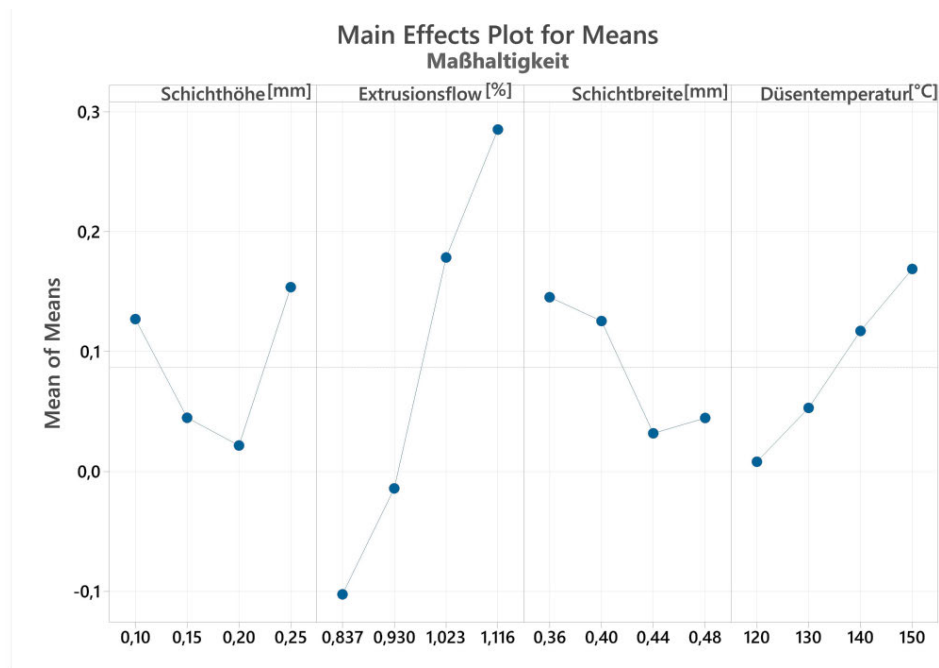


Abbildung 33 Haupteffektdiagramm für Mittelwerte Maßhaltigkeit

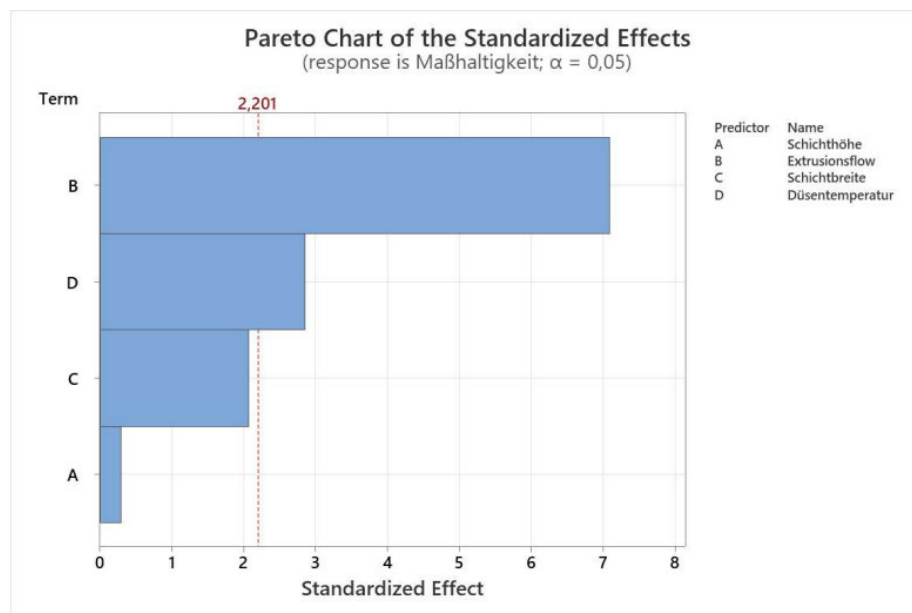


Abbildung 34 Pareto-Diagramm Maßhaltigkeit

4.2.2 Optimierung

Minitab entwirft mit der Einstellung „optimal“ Kurvendiagramme mit den in Kapitel 3.2.3 eingestellten Gewichtungen der Ausgangsfaktoren.

Das Diagramm ist interaktiv. In dem man die rote senkrechte Linie nach links oder nach rechts bewegt, können je Faktor spaltenweise alle sich ergebenden Veränderungen an den Ausgangsgrößen gleichzeitig angezeigt werden.

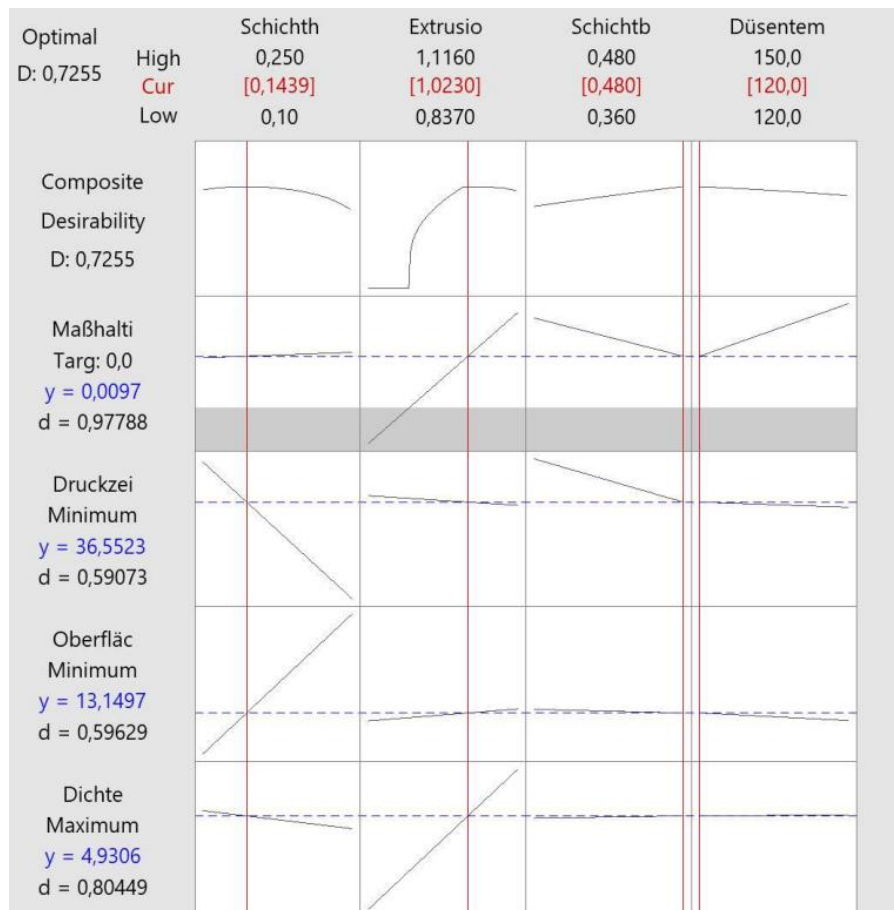


Abbildung 35 Alle Ausgangsgrößen gleich gewichtet

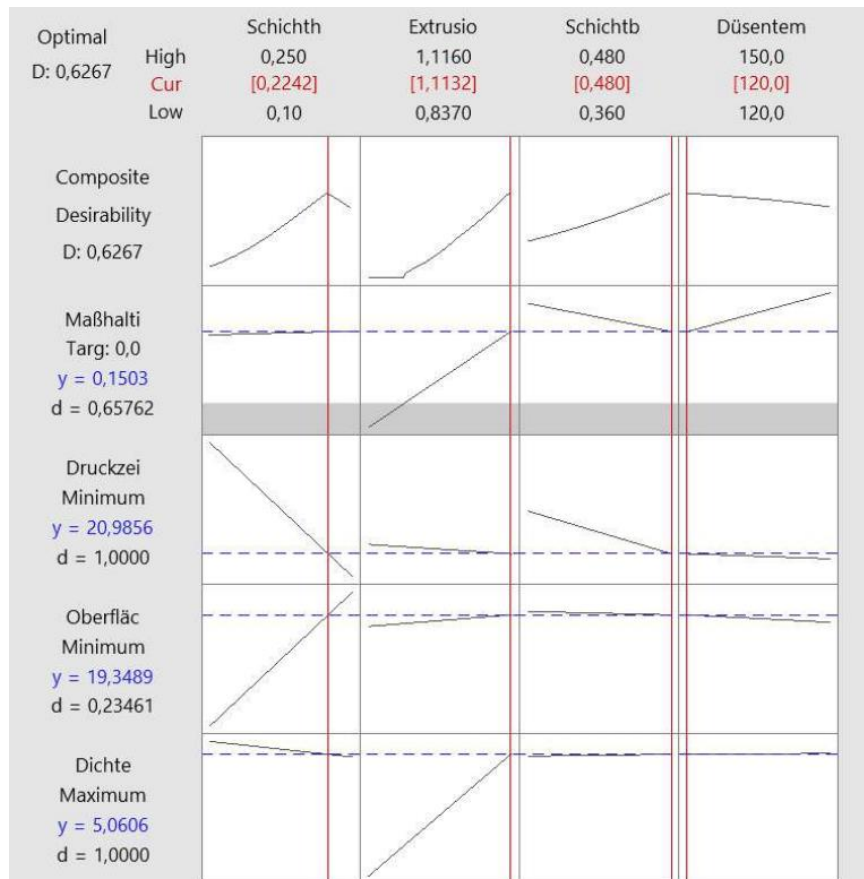


Abbildung 36 Wirtschaftlichkeit

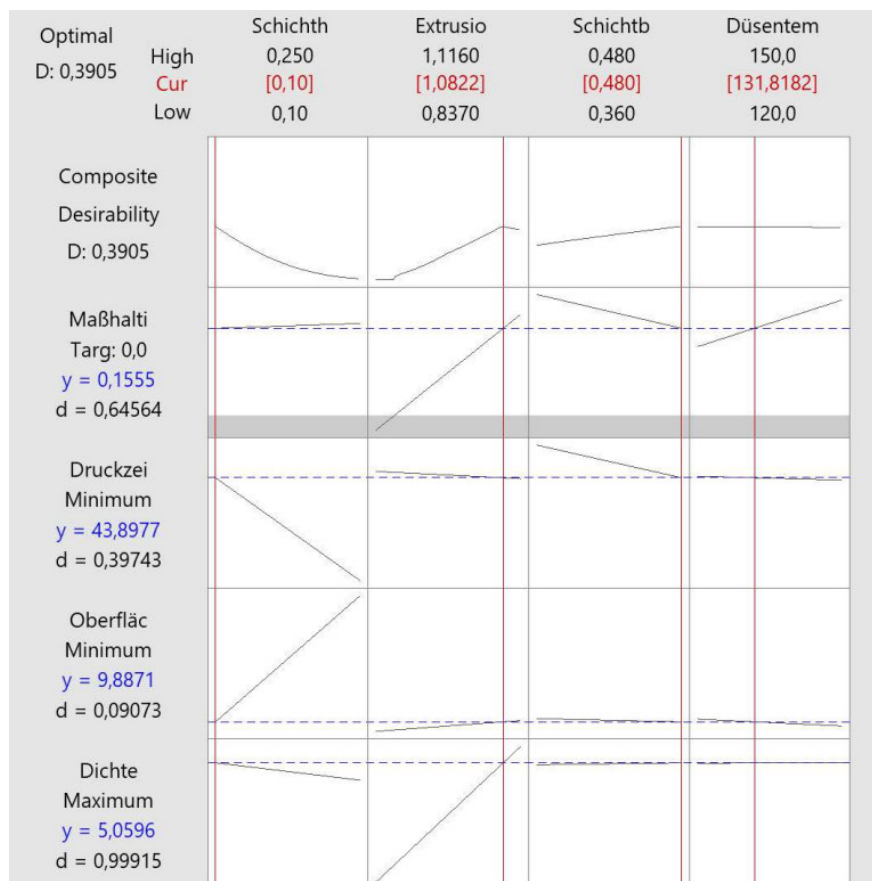


Abbildung 37 Qualität

5 Diskussion

5.1 Hardwaremodifikation

Einhausung

In der aktuellen Einhausung sind Metallplatten aus Stahl verbaut. Da sie nicht feuchtigkeitsresistent sind, kann es zu Korrosion kommen. Es wird erwogen, die Platten zu lackieren, um diesem Problem entgegenzuwirken, oder die Stahlplatten durch Aluminium zu ersetzen. Desweiteren war es ursprünglich geplant, die Wanhao-Box auf die Einhausung zu stellen. So könnte der Bauraum weiter verkleinert werden, was die Regulierung und Überwachung signifikant vereinfachen würde. Die Option wurde aber verworfen, da die Box nicht rechtzeitig geliefert wurde. In weiteren Druckversuchen mit einer Trockenbox könnte der Klimafaktor ausgeschlossen werden.

Halterung

Das Abrollen des Filaments hat einwandfrei funktioniert. Die Stabilität der Halterung ist ausreichend, sie senkt sich aber leicht ab. Der Wechsel der Spule ist seitlich möglich und die Befestigung erfolgt durch ein Alu-Eckelement. Eine Stabilität durch ein weiteres Item-Profil wäre denkbar.

Klima

Das Halten einer konstanten Temperatur ist nicht sicher belegt. Es wurde davon ausgegangen, dass die Bauplattformtemperatur ausreichte, um die vom Filamenthersteller empfohlene Temperatur zu halten. Das müsste aber durch Messungen während des laufenden Druckjobs noch belegt werden.

Das Halten einer kontinuierlich geringen Luftfeuchtigkeit wurde ebenfalls nicht weiterverfolgt, da es zum Zeitpunkt der Versuche (Oktober bis Dezember) keine Auffälligkeiten in Bezug auf das Druckergebnis oder Prozessstörungen gab. Dies könnte aber einer der Gründe sein, warum es zu Filamentbruch kam und müsste weiter untersucht werden.

Fehleranalyse der Drucke: Linienmuster auf der Oberfläche

Es wurden beim Drucken regelmäßige Linien beobachtet, die die Oberflächenqualität negativ beeinträchtigen (s Abb. 38). Zunächst wurde angenommen, dass es sich um ein Muster handelte, was durch unregelmäßige Extrusion zustandekommt. Es wurde beobachtet, dass die Madenschraube periodisch bei jeder Umdrehung gegen die Einspannvorrichtung drückt. Die

Einspannvorrichtung wurde ein dem Berührungspunkt mit der Madenschraube abgeschliffen (s. Abb 39). Das anschließende Druckergebnis wies dennoch das Linienmuster auf.

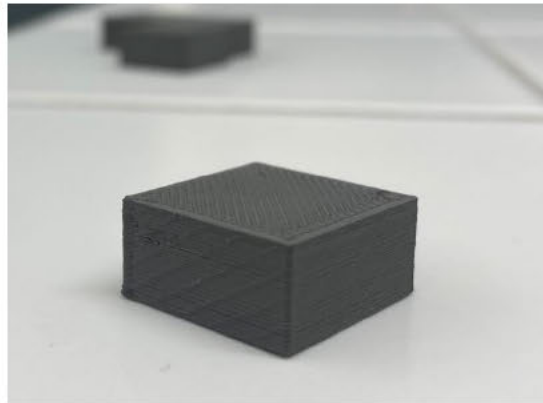


Abbildung 38 Linienmuster

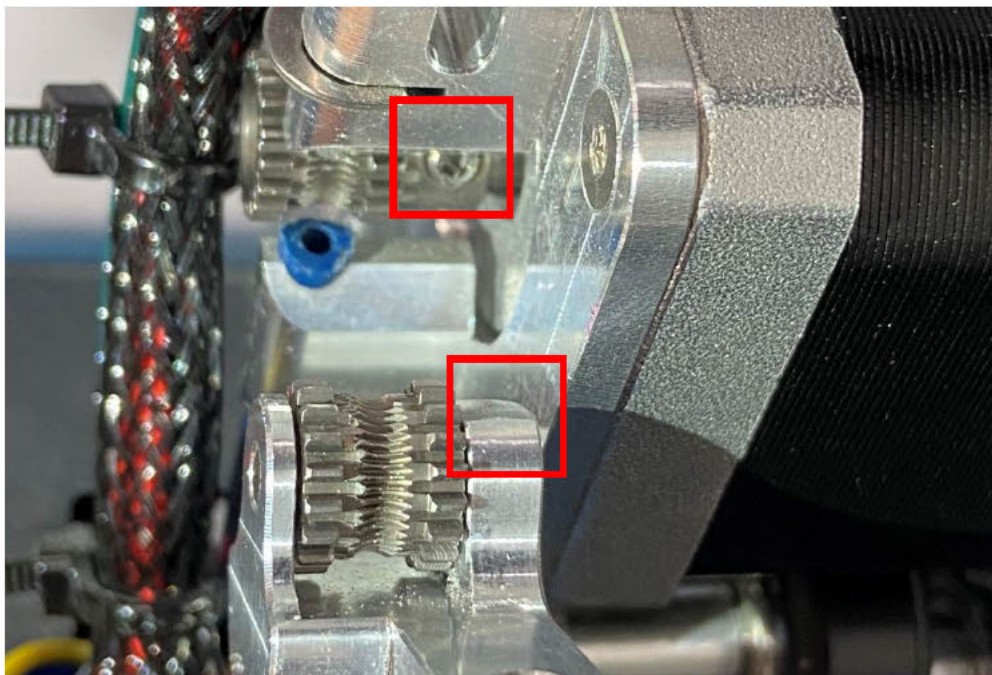


Abbildung 39 abgeschliffene Einspannhalterung

Die Ursache des Linienmusters bleibt zu untersuchen. Eine weitere Annahme ist die Einwirkung von der Eigenfrequenz des Extrudermotors auf das Druckergebnis. Die Regelmäßigkeit des Musters kann auf periodische Schwingungen hindeuten.

Desweiteren schlägt Prusa Research das Linearitätskorrektur-Kalibrierverfahren bei den sogenannten Moiré-Linien vor (Prusa Research, 2024). Es ist zu untersuchen, ob der Ender 3 über einen Trinamic-Schrittreiber verfügt und ob sich eine Aufrüstung lohnen könnte.

5.2 Betriebsfehler

Betriebsfehler seitliches Wegdrücken des nicht aufgeschmolzenen Filaments

Rohr

Der Bruch des Filaments passierte im PTFE-Rohr und führte zum Hochschieben des Filaments aus dem Rohr. Dies passierte in kurzer Zeit mehrmals nacheinander. Es wird eine Abnutzung des Rohres vermutet. Durch einen Tausch des Rohrs konnte das Problem behoben werden. Es kann an eine haltbarere Lösung gedacht werden, zum Beispiel das Ersetzen des Rohrs aus einem stabileren Material. Dass das PTFE-Röhrchen öfters verstopfte kann ein Hinweis auf eine nicht stabile Wärmeverteilung innerhalb des Extruders sein.

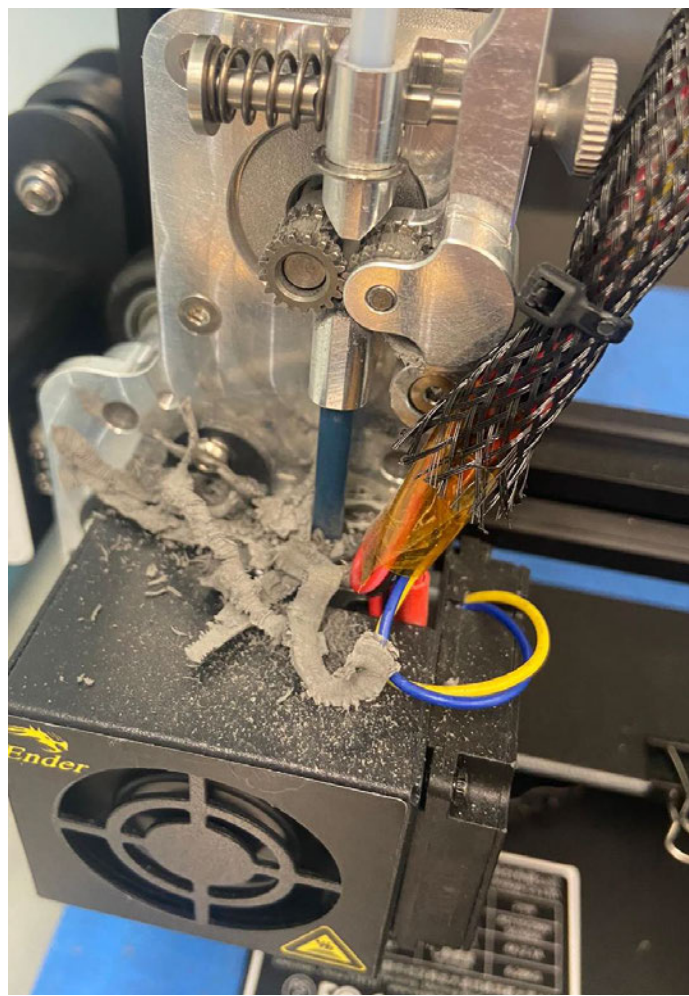


Abbildung 40 Filamentbruch

Klima

Denkbar wäre auch, dass das Filament feucht war und sich während des Druckvorgangs unterschiedlich ausdehnte. Im Januar wurde mit einer neuen Filamentcharge gearbeitet und das Klima im Vergleich zu den ersten Versuchen im Oktober hat sich auch verändert. Es ist also nicht klar, womit die Erscheinungen zusammenhängen.

Filament

Die Herstellerangaben haben sich auch geändert. Die Düsentemperatur war früher mit 120-150°C angegeben, nun sind es 125-145°C. Es besteht die Annahme, dass sich die Zusammensetzung des Filaments verändert hat. Es ist zu untersuchen, ob der Drucker bei gleicher Filamentart, aber unterschiedlichen Filamentchargen mit denselben Parametern vergleichbare Ergebnisse erzielt.

Grundsätzlich hat eine Einhausung viele Vorteile: Sie bietet Arbeitssicherheit, Geräuschminimierung, Prozesssicherheit und Schutz vor äußeren Einwirkungen. Daraus resultiert, dass auf lange Sicht Kosten reduziert werden können. Allerdings werden für die Bewegung der Einhausung zwei Personen benötigt, was die Flexibilität einschränkt.

5.3 Statistische Versuchsplanung

Wie an dem Pareto-Diagramm abzulesen ist, ist der wichtigste Parameter für die Dichte des Bauteils der Extrusionsmultiplikator (s. Abb 29). Ein steigender EM führt zu einer höheren Dichte. Das deckt sich auch mit den Aussagen von (Tosto et al, 2022), der dazu rät, eine leichte Überextrusion für eine gute Grünteildichte zu erzeugen. Die höchste Dichte mit knapp über $5 \frac{g}{cm^3}$ lässt sich mit einem EM von 1,023 erreichen. Die Dichte fällt bei einem EM von 1,116 wieder leicht, es ist nicht ganz klar, ob es sich hierbei um einen Ausreißer handelt.

Die Rauheit der Oberfläche ist laut Pareto-Diagramm allein von dem Faktor Schichthöhe abhängig, wie in Abb. 31 zu sehen ist. Bei einer Schichthöhe von 0,1 mm liegt die Oberflächenrauheit bei 8 µm. (s. Abb. 30) Der Ausschlag der Dichte im Effektdiagramm bei dem Faktor EM in Abb. 30 bei dem Wert 1,023 % ist vermutlich ein Ausreißer. Der Faktor EM wird daher nicht als Einflussfaktor berücksichtigt. Der Ausreißer könnte mit den an manchen Stellen erhabenen Linien zusammenhängen, die abweichende Rauheiten erzeugen. Wie in Kapitel 3.2.1 erläutert, ist die niedrige Schichthöhe ein wichtiger Faktor für die hohe Auflösung des Bauteils und deckt sich somit mit den eigenen Untersuchungsergebnissen.

Erwartungsgemäß ist die Schichthöhe der am stärksten beeinflussende Faktor für die Druckzeit, gefolgt von der Schichtbreite (s. Abb. 33). Je größer die Schichthöhe, desto kürzer

die Druckzeit (s. Abb. 32). Die Druckzeit liegt bei einer Schichthöhe von 0,1 mm bei 52 min, und bei einer Schichthöhe von 0,25mm bei 24 min. Auch bei steigender Schichtbreite ist eine Abnahme der Druckzeit zu erkennen, bei einer Schichtbreite von 0,48mm liegt sie bei 31 min, und bei einer Schichtbreite von 0,36 mm bei 40 min.

Eine gute Maßhaltigkeit ist erreicht, wenn der Wert gegen null geht (s. Abb 34). Der steigende Wert des EM wirkt sich negativ auf die Maßhaltigkeit aus. Eine steigende Düsentemperatur wirkt sich ebenfalls negativ auf die Maßhaltigkeit aus, aber zu einem etwa 2,5-fach geringeren Maß als der EM.

Das Taguchi-Verfahren bietet eine effektive Methode zur Quantifizierung der Einflussgrößen. Durch die geringe Versuchszahl wäre es möglich noch mehr Faktoren zu untersuchen. Vor allem mehr Stufen würden einen höheren Erkenntnisgewinn erbringen, da bei nur vier Stufen Ausreißer schwieriger zu identifizieren sind. Wechselwirkungsdiagramme zur Analyse von Faktoren untereinander konnten nicht erstellt werden. Es besteht die Annahme, dass die Relevanz der Faktoren innerhalb der Analyse einer Zielgröße zu gering war und daher keine Wechselwirkung von Faktoren aufgezeigt werden konnte.

Für die Optimierung können sich folgende Parametersätze ableiten:

Tabelle 15 optimierte Druckparameter

Parametersatz	Schichthöhe [mm]	EM [-]	Schichtbreite [mm]	Düsentemperatur [°C]	erwartete Dichte [g/cm ²]
alle gleich	0,145	1,023	0,48	120	4,9
Wirtschaftlichkeit	0,22	1,113	0,48	120	5,06
Qualität	0,1	1,08	0,48	132	5,06

Im Rahmen dieser Arbeit konnten die optimierten Parameter nicht an Probedrucken getestet werden. Auffällig ist die hohe Schichtbreite in allen und die niedrigen Düsentemperaturen in Parametersatz „alle gleich“ und „Wirtschaftlichkeit“. Der Faktor Düsentemperatur könnte in weiteren Optimierungsgängen tiefer untersucht werden, da das der Parameter ist, der am stärksten von Feedstockabhängig ist.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Drucker funktioniert ordnungsgemäß und druckte die gewünschten Probekörper. Die Halterung des Druckers erfüllt ihre Funktion und hält die Filamentspule stabil. Eine Einhausung wurde konstruiert, was zu einer Verbesserung der Arbeitssicherheit, der Prozesssicherheit und zur Verringerung der Betriebsgeräusche führte.

Der Ender 3 eignet sich für die Modifikation zu einem Metall-FFF Desktop 3 D-Drucker für das Drucken von kleinen Bauteilen. Es kann aber immer noch mit leichten Komplikationen gerechnet werden. Die Druckbettauflage sollte ausgetauscht werden, da sie sich leicht verbiegt. Um das Druckergebnis zu verbessern, sollte auf einer nicht zu dünnen Druckplatte gedruckt werden, da diese sich sonst durchbiegt. Ein Auto-Levelling würde Unebenheiten ausgleichen.

Anfängliche angenommene Probleme sind nicht oder erst spät eingetreten: das Filament konnte gut mit dem vorhandenen Extrudersystem gefördert werden. Das Filament ist nicht unterhalb der Spule gebrochen und ist ausreichend elastisch. Die Oberflächenqualität ist akzeptabel. Das Drucken der Probekörper nach Versuchsplan konnte durchgeführt werden und die gewählten Einflussfaktoren auf die Ausgangsgrößen mithilfe der statistischen Versuchsauswertung untersucht werden.

Ergebnisse Hardware:

Die Anforderungen aus Kapitel 3.1.1 werden hier aufgegriffen.

Funktion und Prozess:

- Bietet ersten Schutz vor schädlichen Dämpfen
- Mindert Geräuschkulisse von Lüfter und Motor
- Ist Skalierbar
- Die Einhausung bietet Schutz vor Windstößen und vor Erschütterungen
- Das Filament kann bruchfrei gefördert werden
- Warme Temperatur bedingt halten (es muss über eine längere Zeit gemessen werden, ob Bauplattentemperatur ausreicht)
- Das Konstanthalten der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit wurden nicht weiter untersucht

Haltbarkeit:

- Nicht temperaturbeständig
- Wasserabweisend
- Korrosionsbeständig bedingt, Korrosion auf Decke
- Feuer nicht getestet, Plexiglas würde schmelzen, Rauchbelastung, rest beständig

Geometrie:

- Maße wurden eingehalten

Sonstiges:

- Kosten Stückpreis etwas über 300 €, senkbar durch Kauf den Bau von mehreren Einhausungen
- Kollisionssicher
- Sicherer Transport
- Demontierbar

Ergebnisse DoE:

Die Maßhaltigkeit verschlechtert sich bei:

- steigender Düsentemperatur
- steigendem EM

Die Druckzeit erhöht sich durch:

- fallende Schichthöhe
- fallende Schichtbreite

Die Oberflächenrauheit verbessert sich durch:

- fallende Schichthöhe

Die Dichte erhöht sich durch:

- steigenden EM

7 Ausblick

Es werden folgende Maßnahmen zur Verbesserung des 3D-Druckprozesses vorgeschlagen und in Betracht gezogen.

Arbeitssicherheit:

- Einbau eines HEPA-Filters
- Abdichten der Kabine mit Gummi

Komfort:

- Düsenreinigung Düsenreinigungsfunktion, um die Druckqualität bei längeren Drucken zu erhalten oder bei sequenziellem Drucken
- Einbau eines BL-Touch-Sensors zur automatischen Nivellierung des Druckbetts bei größeren Bauteilen
- Erwägung einer gelagerten Halterung für die Filamentspule, um Aluwinkel als Stopper nicht benutzen zu müssen (s. Abb. 42)
- filament break sensor
- Druckbett aus Glas

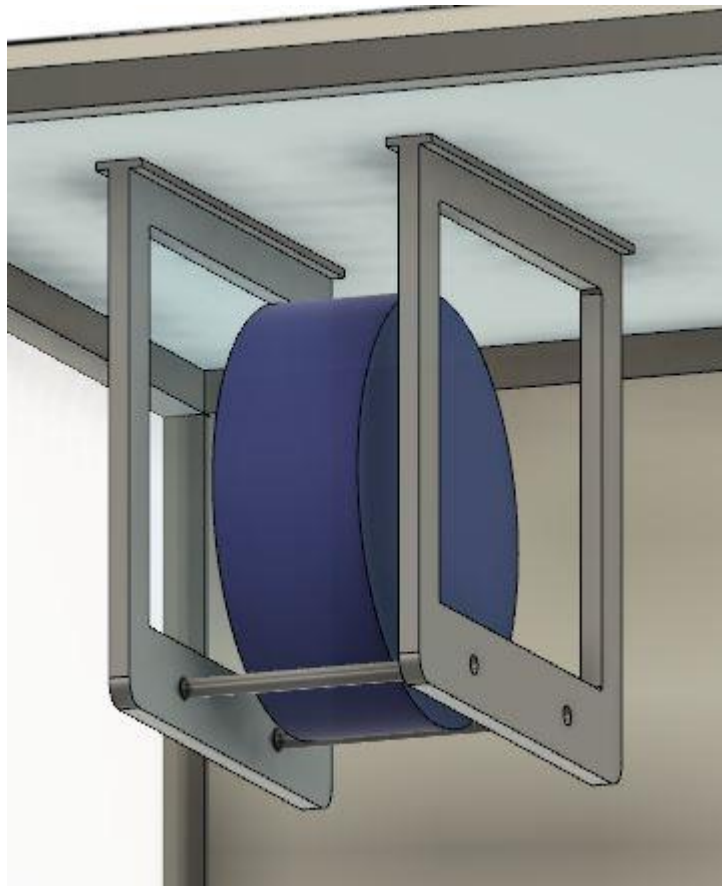


Abbildung 41 Vorschlag einer Filamenthalterung gelagert

Klima:

- Installation eines beheizten Raumlufthsystems, gefolgt von einer Untersuchung der Auswirkungen auf den Druckprozess und das Raumklima. Würfel drucken, Unterschiede feststellbar?

Oberfläche:

- Trinemic drivers gegen den Moiré-Effekt
- Eigenfrequenzen untersuchen
- Riemenspannung untersuchen

Mit den optimierten Parametern aus dem DoE können Probekörper gedruckt werden. Es ist zu untersuchen, ob die prognostizierten Werte in Dichte, Maßhaltigkeit, Oberflächenrauheit erreicht werden können.

Die mechanischen Eigenschaften der Grünteile können durch Zugversuche unter Verwendung der optimierten Parameter getestet werden. Die Einspannung bei schmalen und fragilen Grünlingen ist eine Herausforderung. Die Machbarkeit wurde anhand einer Probe an der Zugprüfmaschine der Firma TesT GmbH geprüft und fiel positiv aus (s. Abb 42). Es wird jedoch empfohlen, sich bei der Zugprobenform an die Kunststoffe-Probekörper zu orientieren und das Prüfverfahren für Kunststoffe zu verwenden. Empfohlen wird die Form DIN EN ISO 527 1B.

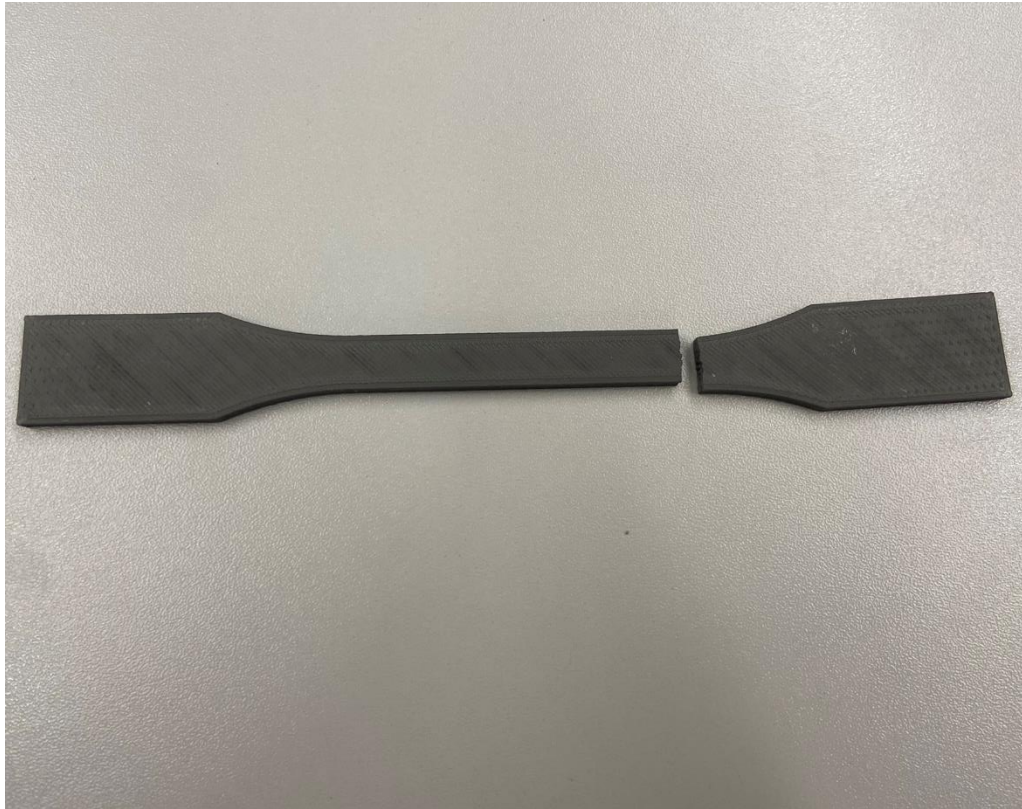


Abbildung 42 Zugprobe Versuch Machbarkeit

Der aus Kapitel 3.1.3 gedruckte Würfel wurde von einer anderen studentischen Gruppe entbindert und gesintert (s. Abb 43). Weitere Entbinderungs- und Sinterversuche können unter Verwendung der optimierten Parameter erfolgen. Es kann untersucht werden, welche Oberflächeneffekte nach dem Sintern erhalten bleiben, und ob die gesinterten Bauteile Enddichten von 95-99 % erreichen können. Vor dem Sintern ist vor allem bei komplizierteren Geometrien eine Berechnung der Schrumpfungen mit einer Simulationssoftware durchzuführen.

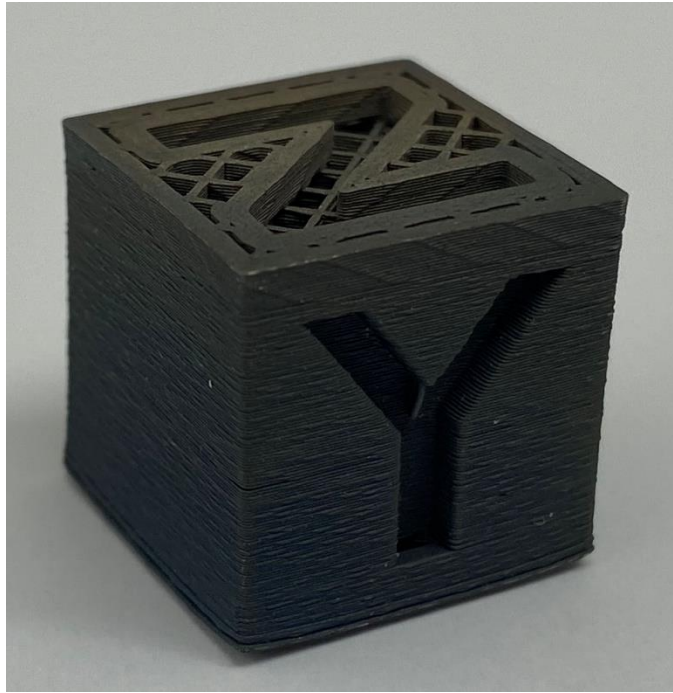


Abbildung 43 gesinterter Probewürfel (20x20x20 mm)

Literaturverzeichnis

- 3DJake. (2.. 12 2023). *3DJake*. Von https://www.3djake.de/micro-swiss/direct-drive-extruder-fuer-creality-cr-10-ender-3?sai=7682&gclid=EAlaIqObChMI9oaun-yRhAMVSDUGAB1EUQBIEAQYAiABEgIZLfD_BwE abgerufen
- 3dimensionals. (10. November 2023). *3dimensionals Raise3D Metalfuse Forge1 3D Drucker*. Von https://www.3dimensionals.de/raise3d-metalfuse-forge1-3d-drucker-3441?gad_source=1&gclid=EAlaIqObChMIutCgofuFhAMVJaaDBx0ILgg4EAQYAyABEgLv9vD_BwE#attr=25837,25821,25823,25820,25839,25826,25822,25838 abgerufen
- Auffray et al, L. (2021). Design of experiment analysis on tensile properties of PLA samples produced by fused filament fabrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Crealify. (29.. Oktober 2023). Von https://store.crealify.com/de/products/ender-3-3d-printer?spm=..collection_2518709d-3c4e-4f11-b63e-05f305ff1820.albums_1.1 abgerufen
- Crgraph 1. (28.. Januar 2024). *Visual-XSel*. Von https://crgraph.de/downloads/docs/versuchsmethoden/Multiple_Regression.pdf abgerufen
- Crgraph. (15.. Januar 2024). Von <https://crgraph.de/downloads/docs/versuchsmethoden/Versuchsplanung.pdf> abgerufen
- Dave et al, H. K. (2021). Introduction to Fused Deposition Modeling Based 3D Printing Process. In *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Berlin: Springer.
- Dave, P. (2022). *A Review on Material Extrusion*. Pathumthani.
- Fuselab. (10. November 2023). Von <https://fuselab3d.com/> abgerufen
- Gözüküçük. (2022). *Sintersimulation und Validierung der Validierung der FFF Prozessroute*. Hamburg: HAW Hamburg.
- Kleppmann, W. (2020). *Versuchsplanung*. München: Carls Hanser.
- Minitab Inc. (29.. Januar 2024). *Was ist ein Optimierungsdiagramm?* Von <https://support.minitab.com/de-de/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/using-fitted-models/supporting-topics/response-optimization/what-is-an-optimization-plot/> abgerufen
- Mwema, F. M. (2020). *Fused Deposition Modeling*. Cham: Springer.
- Printables. (2.. November 20223). *The HomeCube (main page) - a smarter printer enclosure for the Prusa I3 Mk4/Mk3 and other printers*. Von <https://www.printables.com/de/model/99050-the-homecube-main-page-a-smarter-printer-enclosure> abgerufen

- Prusa 2. (24.. Oktober 2023). Von https://help.prusa3d.com/de/article/kalibrierung-des-extrusionsmultiplikators_2257 abgerufen
- Prusa Konturen. (12.. Dezember 2023). *Prusa*. Von https://help.prusa3d.com/de/article/schichten-und-konturen_1748 abgerufen
- Prusa Research. (21.. November 2023). *Kalibrierung des Extrusionsmultiplikators*. Von https://help.prusa3d.com/de/article/kalibrierung-des-extrusionsmultiplikators_2257 abgerufen
- Prusa Research. (9.. Februar 2024). *Kalibrierung der Extruder-Linearitätskorrektur*. Von https://help.prusa3d.com/de/article/kalibrierung-der-extruder-linearitatskorrektur_2254 abgerufen
- Prusa2. (12.. Dezember 2023). *Prusa*. Von https://help.prusa3d.com/de/article/erstellen-von-profilen-fur-verschiedene-dusen_127540 abgerufen
- Rahmatabadi, D. (2021). Mechanical Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printed Parts. In *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Berlin: Springer.
- Ramazani et al, H. (2021). Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: a review. *Progress in Additive Manufacturing*.
- Threedom 3D Druck. (05.. Januar 2024). *3D Drucker Hotend – Die Übersicht*. Von <https://threedom.de/3d-drucker-hotend> abgerufen
- Tosto et al, C. (2022). Fused Deposition Modeling Parameter Optimization for Cost-Effective Metal Part Printing. *Polymers* 2022.
- Universität Leipzig. (20.. Dezember 2023). *Universität Leipzig Fakultät für Physik und Geowissenschaften*. Von <https://home.uni-leipzig.de/prakphys/pdf/VersucheIPSP/Mechanics/M-05E-AUF.pdf> abgerufen

A Stand der Technik

Technisches Datenblatt Fil-316L-F

Data Sheet

18.03.2022



PT+A

POWDER TECHNOLOGIES AND ADDITIVES

Product	Fil-316L-F												
Batch No.	Fil-316L-F-200222-09												
Product description	Filament for 3D Printing												
Type	alloying powder												
Material	316L												
USA	316L												
Germany	1.4404												
Sizing	standard(S)			fine(F)			extra fine(XF)						
				x									
Composition of starting powder	amounts in weight %												
	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	C	N	rest		
	bal.	16,3	10,5	2,2	1,38	0,79	0,01	0,004	0,018				
Composition DIN 17440	amounts in weight %												
	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	C	N	rest		
min	bal.	16,00	10,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
max		18,00	14,00	3,00	2,00	1,00	0,04	0,03	0,03				
Debinding													
solvent	acetone												
debinding time	depending on wall thickness of regarding part, default around 12h at 42 - 45°C												
weight loss	%	4,6500	min	5,3475	max								
Sintering													
temperature	1340 - 1380°C												
atmosphere	Hydrogen												
schedule	thermal debinding within the sintering between 280°C - 650°C												
	the applicable time and temperature schedule depends on the mass of the part; furnace and furnace loading												
	and are liable to the customer responsibility												
density (sintered)	g/ccm	~7,9											
Properties													
general				UTS		Yield strength		Elongation		Hardness			
				[MPa]		[MPa]		[%] at 20°C		[HB/HRC]			
	as sintered			510		220		45		75			
	heat treated												
Heat treatment													
Oversize	98,0%	1,1786											
	96,0%	1,1705											
	99,0%	1,1825											
Nozzle size	≥0,4 mm (recommended)												
Print temperature	120 - 150°C		(recommended)										
Printing speed	30 - 80mm/s		(recommended)										
Comments	a printer with direct drive is recommended.												
	please note that the filament has a high content of metal powder which leads to brittleness.												
	the ambient temperature for processing should be at least 22 - 25°C												
	you may preheat the filament to around 35-40°C for spooling.												
	keep in a dry place.												

Vorgehen zum Herabsetzen der Mindestextrusionstemperatur

- 1) Um an die Versionsnummer des Motherboards zu kommen, schraubt man die Abdeckung unterhalb des Enders ab, die Nummer ist darauf zu sehen, es handelt sich um Creality V4.2.2.
- 2) Auf github.com gibt es die Marlin-Firmware als .zip (es gibt neuere Versionen) und eine weitere Konfigurationsdatei als .zip. Beide Ordner extrahieren, wichtig, in einem Ordner. Den Unterordner „Marlin“ öffnen und hierin aus dem .config-Ordner aus dem Ordner „examples“ den Ender 3 V2 raussuchen, Dateien kopieren. Configuration überschreiben lassen. Die Software Visual Studio Code installieren, zwei extensions hinzufügen, und zwar Auto Build Marlin und Platform IO. Neues Projekt erstellen und den Ordner Marlin 2.0.x öffnen. Dann auf Platform IO gehen, und unter platform.ini

```
#elif MB(CREALITY_V422)
#include "stm32f1/pins_CREALITY_V422.h" // STM32F1
```

unter default_envr (Zeile 21) hinter = ersetzen mit unter Marlin pins.h das, was unter V.422 in dieser Zeile steht

- 3) und zwar diesen Teil:

```
env:STM32F103RE_creativity
```

- 4)

```
16 default_envs = STM32F103RE_creativity
```

- 5) Dann unter configuration.h unter define Extrude_mintemp die Extrusionstemperatur von 170°C auf z.B. 100°C setzen.

```
789 #define PREVENT_COLD_EXTRUSION
790 #define EXTRUDE_MINTEMP 100
791
```

- 6) Die richtige Version auch hier ändern in V22

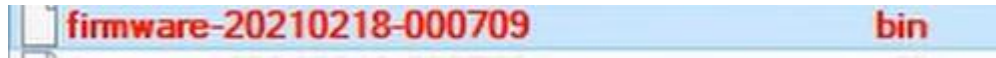
```
92 #define MOTHERBOARD BOARD_CREALITY_V422
```

- 7) Nun kompilieren im unteren Bereich das Häkchen anklicken



8) Nach einigen Minuten bekommt man die.bin unter

C:\Users\[REDACTED]\Marlin-
2.0.x\pio\build\STM32F103RE_creality



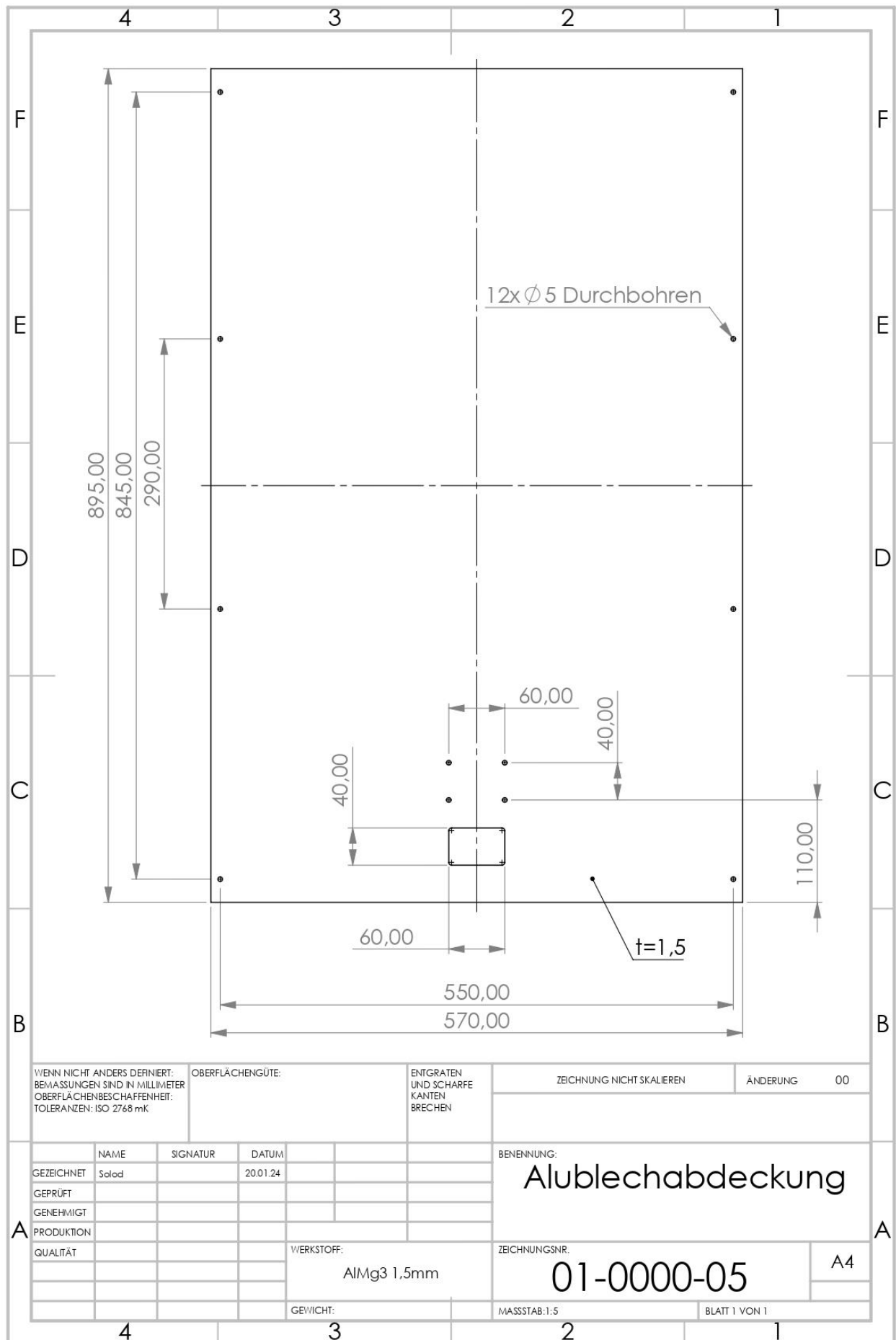
9) Die .bin auf die SD-Karte ziehen, mit dem Einstecken in den Ender sollte die Firmware direkt auf dem Drucker aktualisiert werden. Dass die neue Firmware aktiv ist, erkennt man daran, dass nach dem Einschalten des Druckers die neue Firmware-Version 2.0.7.2 eingeblendet ist.¹

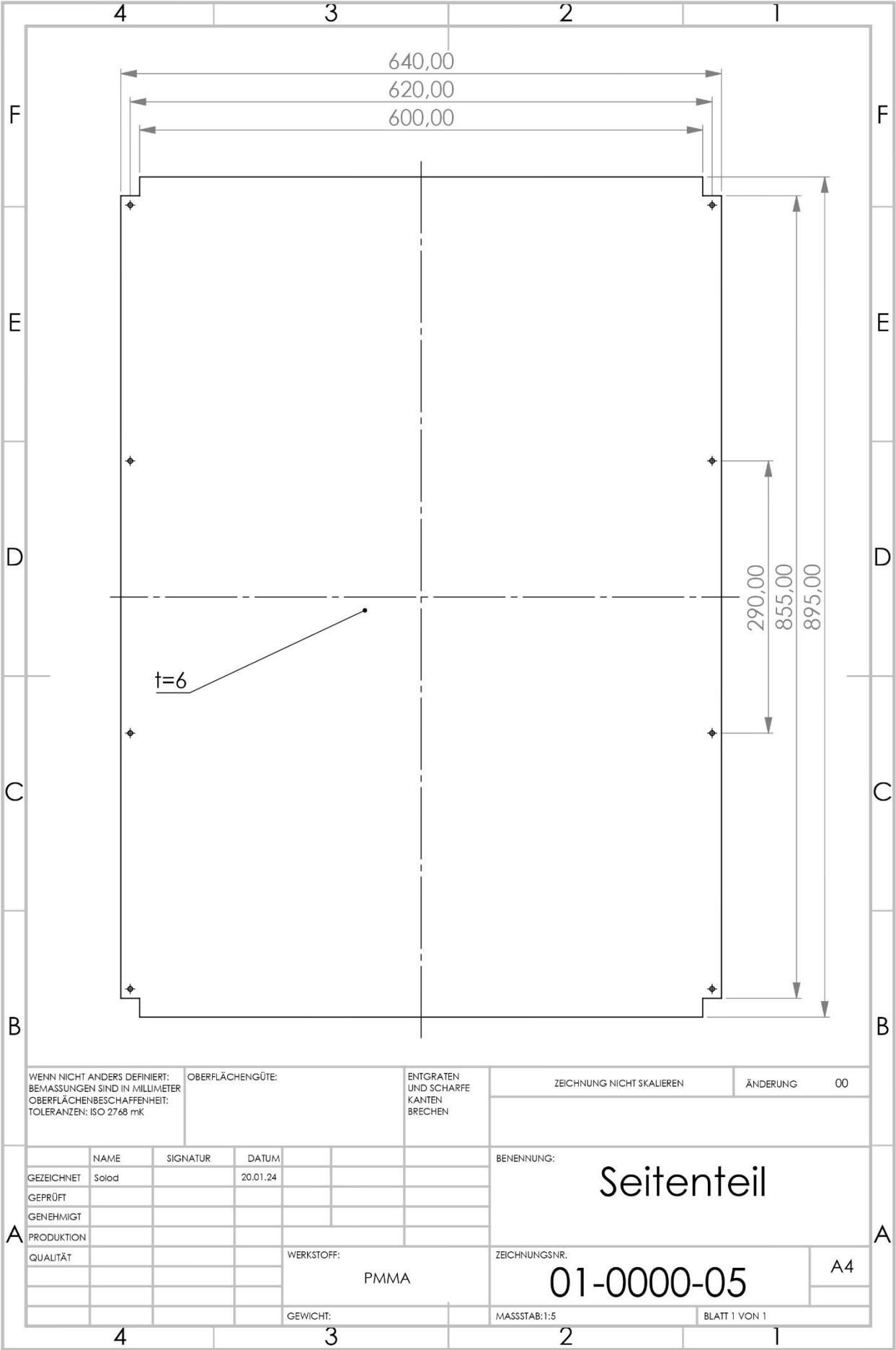
¹Anleitung unter bspw. <https://www.youtube.com/watch?v=ZfVN0yX5kJc>

B Vorgehensweise

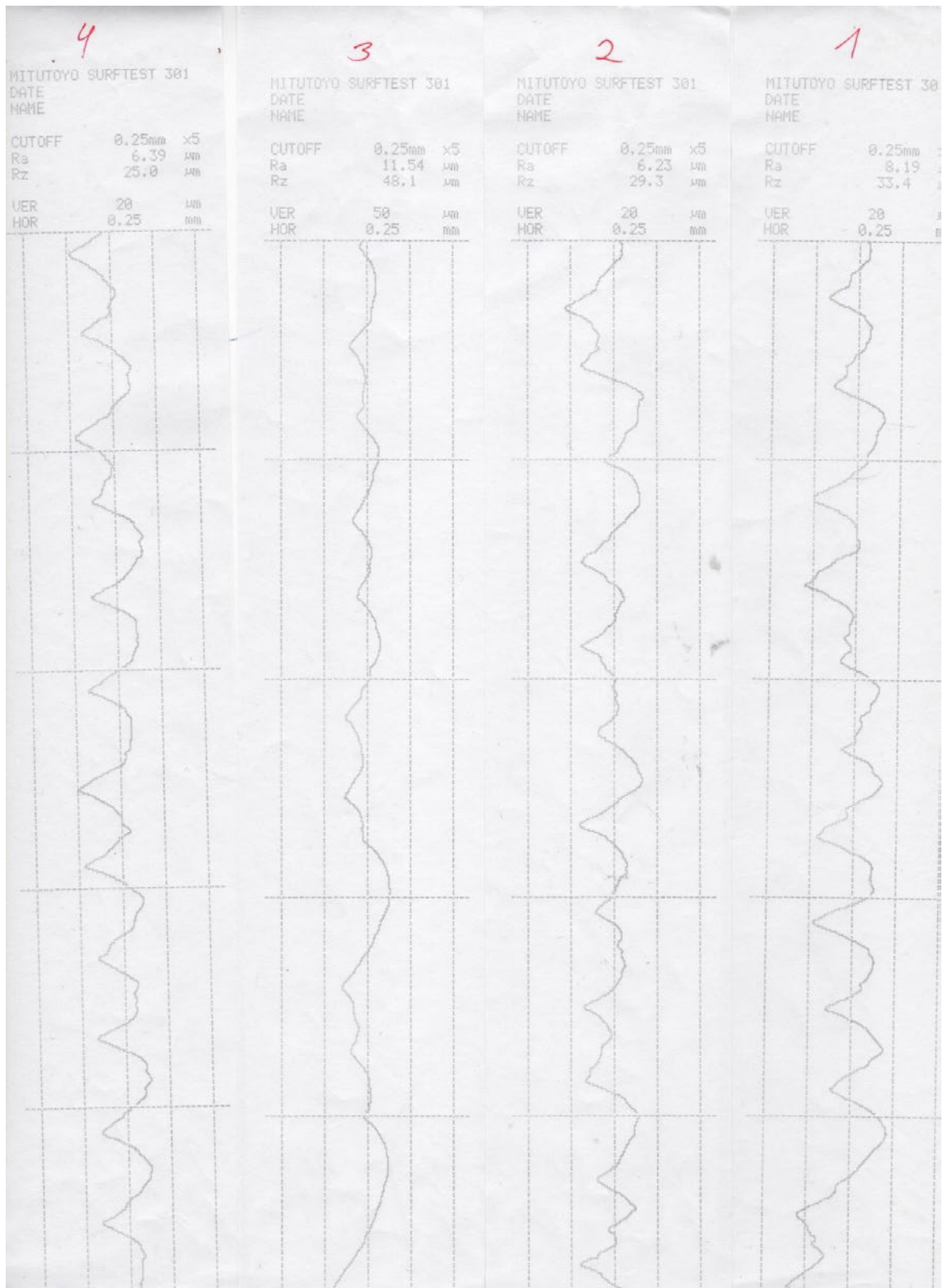
Bestellliste

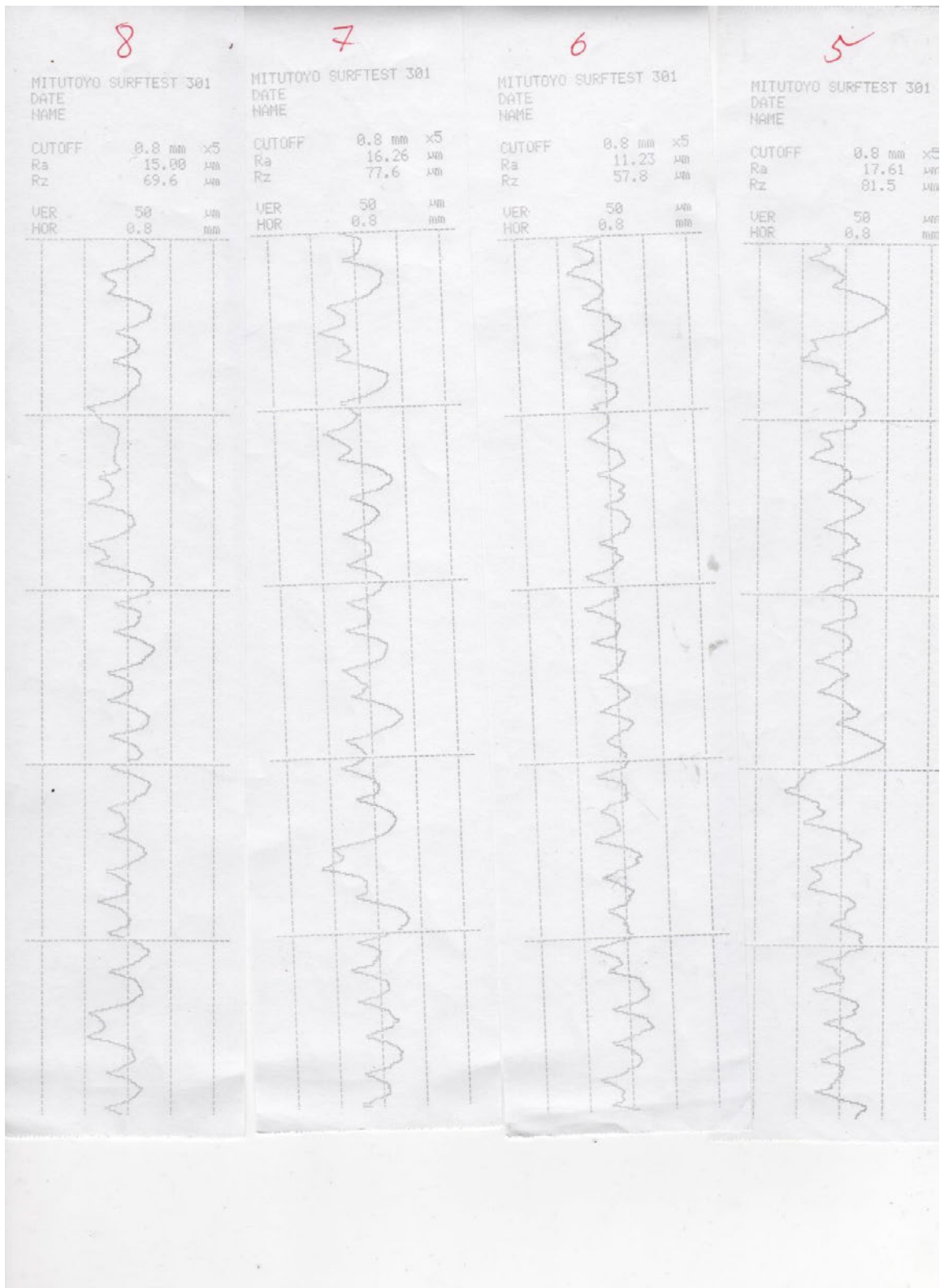
Produkt	Menge	Preis	Link	Stand
Stahlfilament 316L	1 kg	333,2	http://www.pt-a.de/filament%20de.htm	geliefert
Mk8 Düse Stahl gehärtet 0,4mm	2 Stück	43,98	https://www.3djake.de/brozl/mk8-duese-stahl-gehaertet	geliefert
Spannhebel für Direct Drive Extruder	1 Stück	12,99	https://www.3djake.de/micro-swiss/spannhebel-fuer-direct-drive-extruder	geliefert
Motorgetriebe für Direct Drive Extruder	1 Stück	7,99	https://www.3djake.de/micro-swiss/motorgetriebe-fuer-direct-drive-extruder	geliefert
Item-Profile Nut 5 I-Typ	20x20 mm, Länge 1800 mm, 3 Stück	63,9	https://www.myaluprofil.de/shopping_cart.php	geliefert
Stahlblech	640 mm x 620 mm 2 Stück	64,44	https://www.metallparadies.de/shopping_cart.php	geliefert
Alublech Gehäuse innen	640 mm x 940 mm 1 Stück	46,08		geliefert
Alublech Gehäuse außen	840 mm x 1140 mm 1 Stück	68,96		geliefert
Rollenlager 8mm Innendurchmesser	4 Stück	5,96		geliefert
Trockner Wanhao box 2 200mm Durchmesser	1 Stück	202,3	https://schichtwerkstatt.de/3d-druck/fdm-drucker/229/wanhao-box-2	nicht geliefert
Gesamtpreis		314,3		
Nicht verwendet:				
Alublech Gehäuse außen	840 mm x 1140 mm 1 Stück	68,96		
Rollenlager 8mm Innendurchmesser	4 Stück	5,96		

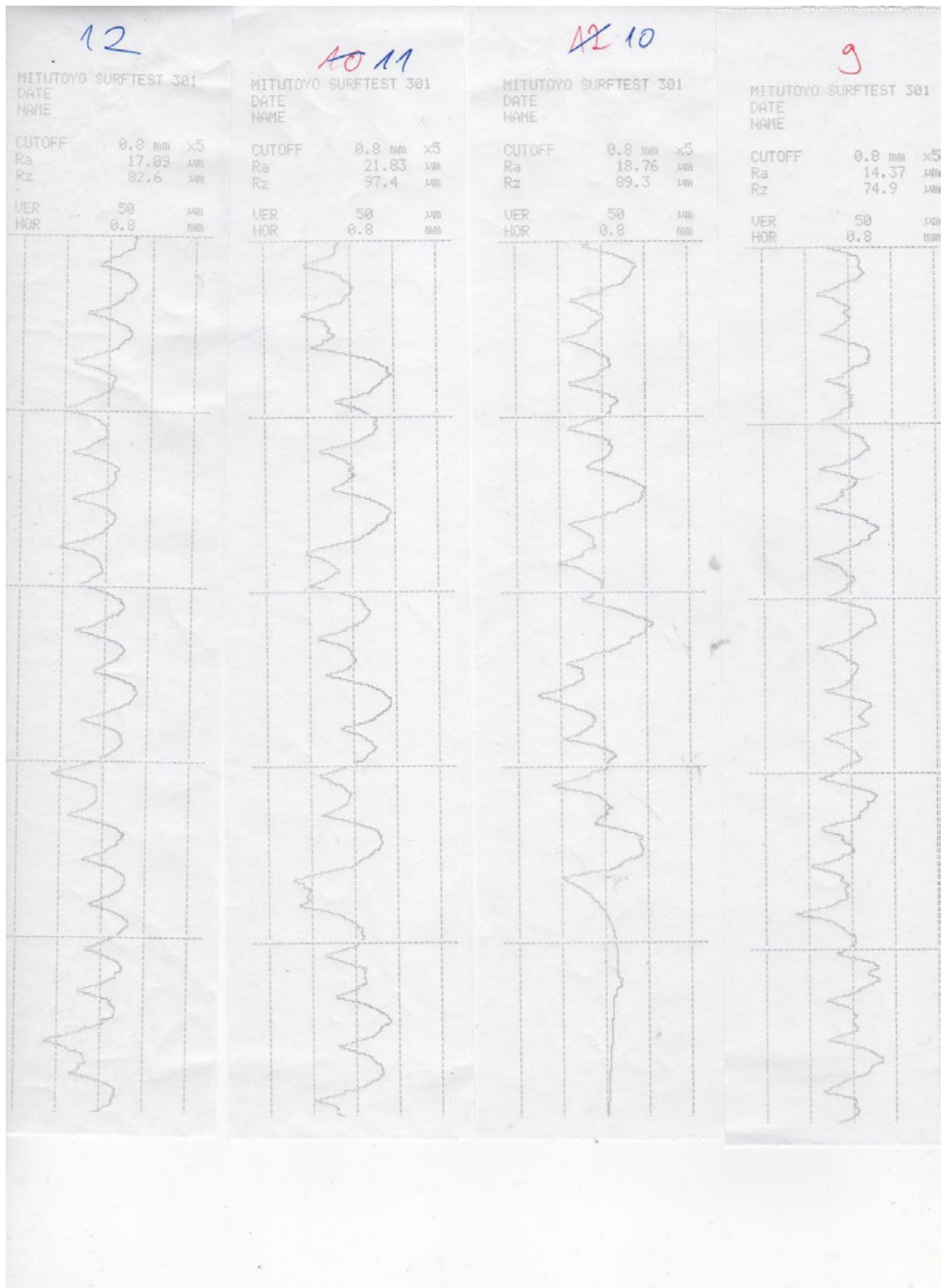


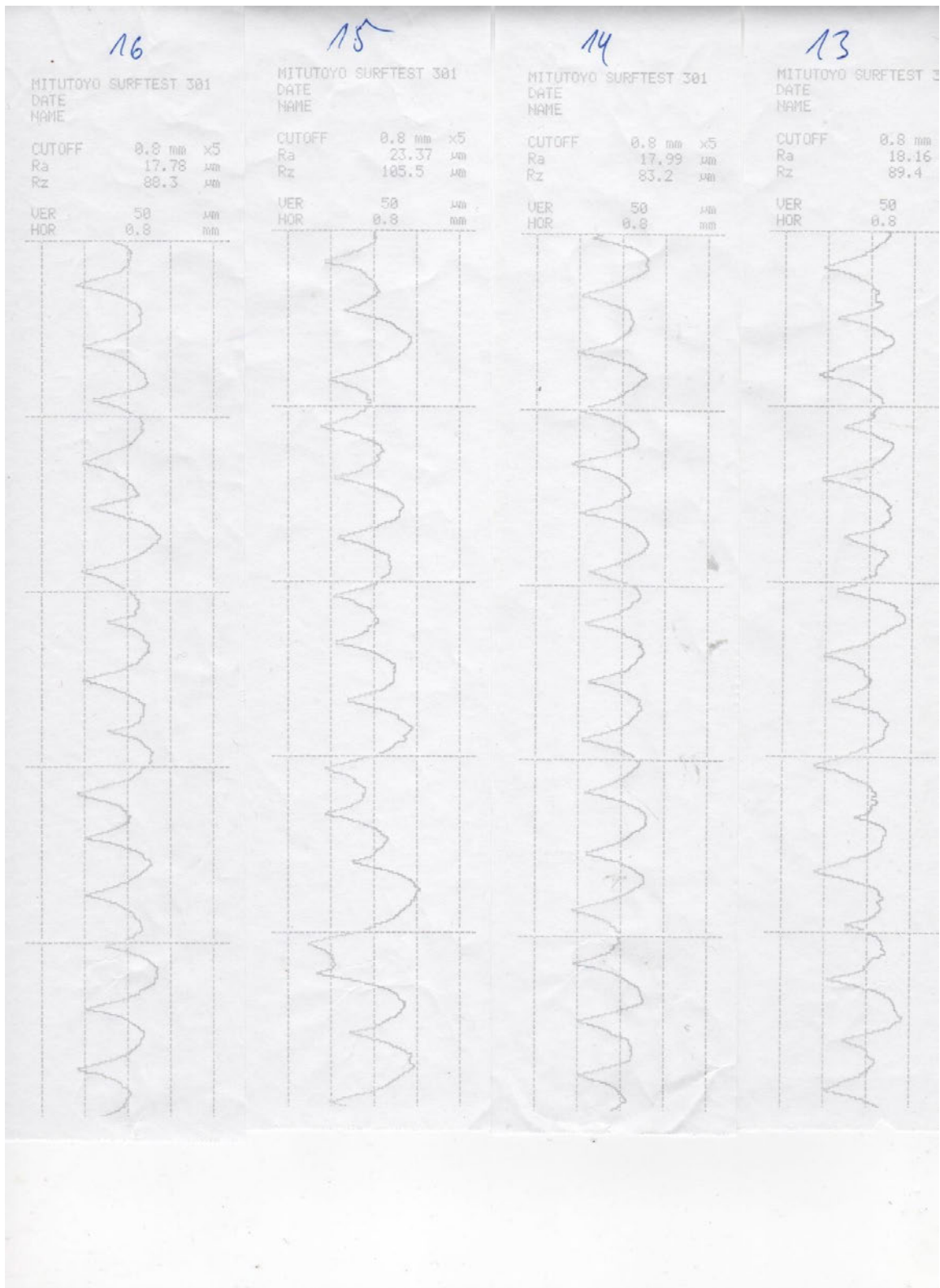


Oberflächenrauheitenmessschriebe









C Ergebnisse

DoE

Die Reggressionsgleichung für die Dichte lautet:

$$\text{Dichte} = 3,075 - 0,436 \text{ Schichthöhe} + 1,830 \text{ Extrusionsflow} + 0,063 \text{ Schichtbreite} + 0,00013 \text{ Düsentemperatur} \quad (4.2)$$

Tabelle 16 ANOVA Tabelle Dichte

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	0,588975	0,147244	9,84	0,001
Schichthöhe	1	0,009525	0,009525	0,64	0,442
Extrusionsflow	1	0,579288	0,579288	38,70	0,000
Schichtbreite	1	0,000127	0,000127	0,01	0,928
Düsentemperatur	1	0,000036	0,000036	0,00	0,962
Error	11	0,164657	0,014969		
Total	15	0,753632			

Die Reggressionsgleichung für die OFR lautet:

$$\text{Oberflächenrauigkeit} = 2,7 + 73,4 \text{ Schichthöhe} + 3,38 \text{ Extrusionsflow} - 2,4 \text{ Schichtbreite} - 0,0201 \text{ Düsentemperatur}$$

Tabelle 17 Tabelle 12 ANOVA Tabelle OFR

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	272,343	68,086	6,15	0,008
Schichthöhe	1	269,378	269,378	24,34	0,000
Extrusionsflow	1	1,978	1,978	0,18	0,681
Schichtbreite	1	0,179	0,179	0,02	0,901
Düsentemperatur	1	0,808	0,808	0,07	0,792
Error	11	121,722	11,066		
Total	15	394,065			

Die Reggressionsgleichung für die Druckzeit lautet:

$$\text{Druckzeit} = 110,1 - 186,0 \text{ Schichthöhe} - 6,99 \text{ Extrusionsflow} - 73,8 \text{ Schichtbreite} - 0,0350 \text{ Düsentemperatur}$$

Tabelle 18 Tabelle 12 ANOVA Tabelle Druckzeit

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	1914,75	478,69	38,93	0,000
Schichthöhe	1	1729,8	1729,8	140,69	0,000
Extrusionsflow	1	8,45	8,45	0,69	0,425
Schichtbreite	1	174,05	174,05	14,16	0,003
Düsentemperatur	1	2,45	2,45	0,20	0,664
Error	11	135,25	12,3		
Total	15	2050			

Die Reggressionsgleichung für die Druckzeit lautet:

$$\text{Maßhaltigkeit} = -1,678 + 0,114 \text{ Schichthöhe} + 1,457 \text{ Extrusionsflow} + 0,991 \text{ Schichtbreite} + 0,00546 \text{ Düsentemperatur}$$

ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	0,459157	0,114789	15,68	0,000
Schichthöhe	1	0,000645	0,000645	0,09	0,772
Extrusionsflow	1	0,367431	0,367431	50,19	0,000
Schichtbreite	1	0,031403	0,031403	4,29	0,063
Düsentemperatur	1	0,059678	0,059678	8,15	0,016
Error	11	0,080522	0,007320		
Total	15	0,539679			



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Solod

Vorname: Anna

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ☒ bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Konstruktion und Modifikation eines FFF-Druckers für die Verarbeitung metallgefüllter Feedstockmaterialien

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

12.02.2024

Datum



Unterschrift im Original