



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Pit Zabel

Modifizierung eines FFF-Druckers für die Verarbeitung metallgefüllter Feedstockmaterialien und Parameteroptimierung

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

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

Pit Zabel

**Modifizierung eines FFF-Druckers für die
Verarbeitung metallgefüllter
Feedstockmaterialien und
Parameteroptimierung**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jens Telgkamp
Zweitprüfer: M.Sc. Fatih Gözükcük

Abgabedatum: 21.05.2025

Zusammenfassung

Pit Zabel

Thema der Bachelorthesis

Modifizierung eines FFF-Druckers für die Verarbeitung metallgefüllter Feedstockmaterialien und Parameteroptimierung

Stichworte

Additive Fertigung, Extrusion, Feedstock, Fused-Filament-Fabrication, Hardwaremodifikation, statistische Versuchsplanung, Grünteil, 3D-Druck

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Desktop 3D-Drucker hinsichtlich der Verarbeitbarkeit metallgefüllter Feedstockmaterialien modifiziert. Anschließend werden optimale Prozessparameter für die Grünteilfertigung unter der Verwendung eines Ti6Al4V Feedstocks ermittelt. Dazu wird die statistische Versuchsplanung herangezogen und mittels Versuchen ein mathematisches Modell aufgestellt. Auf Basis dessen werden optimale Parametersätze mit unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen ermittelt. Mit den ermittelten Parametersätzen werden Grünteile angefertigt und mit Grünteilen eines industriellen Druckers verglichen.

Pit Zabel

Title of the paper

Modification of an FFF-3D-Printer for processing metal-filled feedstock materials and parameter optimization.

Keywords

additive manufacturing, extrusion, feedstock, fused filament fabrication, hardwaremodification, design of experiment, greenpart, 3D-printing

Abstract

In this work, a desktop 3D-printer is modified with regard to the processability of metal-filled feedstock materials. Subsequently, optimal process parameters for green part production using a Ti6Al4V feedstock are determined. Statistical experimental design is used for this purpose, and a mathematical model is developed through experiments. Based on this, optimal parameter sets with different emphases are determined. Green parts are produced using the determined parameter sets and compared with green parts from an industrial printer.

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich dafür bedanken, dass ich diese Arbeit am Institut für Produktionstechnik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft durchführen konnte.

Dafür bedanke ich mich in erster Linie bei dem Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Jens Telgkamp für das entgegengebrachte Vertrauen sowie für das Ermöglichen und Betreuen dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich auch dem Zweitprüfer M.Sc. Fatih Gözükcük besonders für die große Hilfsbereitschaft und fachliche Unterstützung bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen	2
2.1 Metall-FFF	2
2.1.1 Sinterbasierte Prozessroute	2
2.1.2 FFF	3
2.2 Setup	4
2.2.1 Verwendeter FFF-Drucker.....	4
2.2.2 Verwendetes Feedstock.....	6
2.2.3 Verwendeter Preprozessor.....	6
2.3 Statistische Versuchsplanung	7
2.3.1 Statistische Grundlagen	7
2.3.2 Versuchspläne	8
2.3.3 Auswertung	10
3 Systemanalyse und Modifikationen	11
3.1 Untersuchung des Ausgangszustandes	11
3.2 Ableitung von Verbesserungen	15
3.2.1 Drucker Mainboard.....	15
3.2.2 Spulenhalter	20
3.3 Extruder	22
4 Ermittlung eines Parametersatzes	31
4.1 System Analyse	31
4.2 Wahl von Faktoren und Grenzen	32
4.3 Überprüfung der Messmittel und Wiederholbarkeit.....	32
4.3.1 Dichtemessung	33
4.3.2 Reproduzierbarkeit der Grünteildichte	36
4.4 Festlegung der Probenform.....	36
4.5 Aufstellung des Versuchsplans	37
4.6 Durchführung	39
4.7 Auswertung.....	40

4.7.1	Analyse der Daten.....	40
4.7.2	Validierung der Parametersätze	45
4.7.3	Vergleich zu einem Industriellen Drucker	46
5	Fazit und Ausblick.....	47
6	Literaturverzeichnis	48
A	Grundlagen	50
A.1	Datenblatt Ti6Al4V	50
A.2	Datenblatt Fil-316L-F	51
B	Ermittlung eines Parametersatzes	52
B.1	Dichtemessunguntersuchung.....	52
B.2	Versuchsplan	53
B.3	Messwerte Zielgrößen.....	54
B.4	Messprotokoll.....	55
B.5	Drucker und Filament Profil.....	56

Abkürzungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Ablauf der sinterbasierte Prozessroute [3]	2
Abbildung 2.2: Schematische Darstellung FFF [4]	3
Abbildung 2.3: Querschnitt FFF Bauteile mit unterschiedlichen Schichthöhen [5]	4
Abbildung 2.4: Creality Ender-3 (in Anlehnung an [6])	5
Abbildung 2.5: Micro Swiss Direct Drive Extruder (a) und Drucker-Einhausung (b)	5
Abbildung 2.6: Vergleich verschiedener Versuchspläne [8]	9
Abbildung 3.1: Abgeriebenes Filament im Extruder (a) und abgeriebenes Filament (b) ...	13
Abbildung 3.2: Geknicktes Filament	14
Abbildung 3.3: Micro Swiss Extruder (in Anlehnung an [12])	14
Abbildung 3.4: Grünteileprobe "Wirtschaftlichkeit" (a) und Grünteileprobe "Qualität" (b) ..	15
Abbildung 3.5: BTT SKR mini E3 V3.0 [13]	16
Abbildung 3.6: Versuchsaufbau Schwingungsanalyse	17
Abbildung 3.7: Mainboard Vergleich Schwingungsanalyse	18
Abbildung 3.8: Aufbau der Kinematik der Y-Achse	18
Abbildung 3.9: Grünteilprobe "Wirtschaftlichkeit" mit SKR MINI Mainboard	19
Abbildung 3.10: Ender-3 Ausgangszustand	20
Abbildung 3.11: Neu konstruierter Spulenhalter mit Umlenkrolle	21
Abbildung 3.12: Extruderräder Durchmesser Vergleich	23
Abbildung 3.13: Neu konstruierter Extruder	24
Abbildung 3.14: Halterplatte	25
Abbildung 3.15: Montierter Extruder	25
Abbildung 3.16: Extruder-Testvorrichtung CAD-Modell (a) und tatsächlich aufgebaut (b) ..	26
Abbildung 3.17: Extruder-Testvorrichtung Bauteile und deren Zusammenhang	27
Abbildung 3.18: Extruder-Testvorrichtung Extrusionskraft	28
Abbildung 3.19: Extruder Eingriffstiefe Vergleich, (a) Micro Swiss, (b) neuer Extruder	29
Abbildung 3.20: Grünteileprobe "Qualität" mit neuem Mainboard und Extruder	30

Abbildung 4.1: Ishikawa-Diagramm FFF.....	31
Abbildung 4.2: Dichtemessung Versuchsaufbau	33
Abbildung 4.3: Dichtemessung Verteilungstest.....	34
Abbildung 4.4: Grünteileprobe mit Anhaftungen an Seitenwand.....	40
Abbildung 4.5: Kurvendiagramm Dichte	41
Abbildung 4.6: Kurvendiagramm Versuchspanauswertung.....	42
Abbildung 4.7: Wechselwirkungsdiagramm	43
Abbildung 4.8: Oberfläche mit Unterextrusion (a) und mit normaler Extrusion (b).....	43
Abbildung 4.9: Probe mit Anhaftungen und Luftblasen	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kosten des benutzten Setups	6
Tabelle 2 Mechanische Eigenschaften Ti6Al4V (vgl. Anhang A.1).....	6
Tabelle 3: Parametersätze Fil-316L-F [1].....	11
Tabelle 4: Druckversuche "alle gleich"	12
Tabelle 5: Druckversuche "Wirtschaftlichkeit"	12
Tabelle 6: Druckversuche "Qualität"	12
Tabelle 7: Mainboard-Vergleich Schwingungsanalyse Mittelwerte.....	19
Tabelle 8: Möglichkeiten für eine besser Krafteinleitung (in Anlehnung an [16] [17])	22
Tabelle 9: Micro Swiss Extruder Extrusionskraft.....	29
Tabelle 10: Neu konstruierter Extruder Extrusionskraft.....	29
Tabelle 11: Gewählte Faktoren und Faktorstufen	32
Tabelle 12: Vorversuch Parameter	32
Tabelle 13: Parameter für Reproduzierbarkeitsuntersuchung.....	36
Tabelle 14: Messergebnisse Reproduzierbarkeitsuntersuchung.....	36
Tabelle 15: Ressourcenbedarf für Versuchsplan	39
Tabelle 16: Zielsetzung für Parametersätze	44
Tabelle 17: optimierte Parametersätze	44
Tabelle 18: Erwartete Werte der Zielgrößen	45
Tabelle 19: Überprüfung der Parametersätze.....	45
Tabelle 20: Dichte Grünteilproben FuseLab-Drucker	46

Abkürzungsverzeichnis

DoE
EM
FDM
FFF
MEX
MIM

Design of Experiment
Extrusionsmultiplikator
Fused Deposition Modeling
Fused Filament Fabrication
Material Extrusion
Metal Injection Molding

1 Einleitung

Die additive Fertigung gewinnt immer mehr an Bedeutung und bietet eine große Gestaltungsfreiheit und Flexibilität. Es können hoch komplexe Bauteile gefertigt werden, die mit traditionellen Fertigungsverfahren undenkbar gewesen wären und das ohne den Bedarf spezieller Werkzeuge.

Neben der Verarbeitung von Kunststoffen gibt es mittlerweile auch Verfahren zur Herstellung metallischer Bauteile. Neben dem Auftragsschweißen, mit welchem sich nur grobe Strukturen fertigen lassen, basieren metallische Druckverfahren zu einem Großteil auf Pulverbett gestützten Verfahren. Jedoch bringen diese Verfahren einige Nachteile mit sich, so stellen die Betriebsmittel ohne richtige Handhabung ein Sicherheitsrisiko für Mensch und Maschine da. Des Weiteren sind die Maschinen oft mit hohen Kosten und Platzbedarf verbunden.

Als alternatives additives Fertigungsverfahren für metallische Bauteile steht diesen Pulverbett Verfahren Metal Fused-Filament-Fabrication (FFF) entgegen. Dieses Verfahren basiert auf einer sinterbasierten Prozessroute. Wobei das Ausgangsmodell in einem Strangablegeverfahren gefertigt wird. Dieser formgebende Prozess läuft analog zu herkömmlichem FFF-Verfahren, wie es auch schon im nicht industriellen Hobbybereich weitreichend verbreitet ist. Jedoch werden anstelle alltagsüblicher thermoplastischer Kunststoffe sogenannte Feedstocks verarbeitet. Diese beinhalten einen großen Anteil an metallischem Pulver. Mit Hilfe des FFF-Druckprozesses wird aus dem Feedstockmaterial ein so genanntes Grünteil gefertigt. Anschließend kann durch chemische und thermische Prozesse ein Großteil des Kunststoffanteils aus dem Grünteil entfernt werden. Anschließend wird das Bauteil gesintert. Diese Arbeit beschäftigt sich dabei ausschließlich mit der Fertigung der Grünteile.

Unter anderem durch den hohen Anteil an metallischem Pulver in dem Feedstock hat das Material im Vergleich zu herkömmlichen thermoplastischen Kunststofffilamenten deutlich schlechtere mechanische Eigenschaften. Dies erschwert die Handhabung des Materials und besonders die Verarbeitbarkeit mit dem FFF-Druckprozess. Diese Arbeit beschäftigt sich damit, einen herkömmlichen Hobby FFF-3D-Drucker so zu modifizieren, um die Verarbeitbarkeit solcher Feedstockmaterialien zu erhöhen. Dabei baut diese Arbeit auf einer vorhergehenden Bachelorthesis auf [1].

Um eine höhere Prozesssicherheit zu erlangen, wird dazu zunächst das vorhandene Equipment untersucht. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung werden anschließend Maßnahmen und Modifikationen zur Verbesserung abgeleitet. Anschließend werden diese Modifikationen getestet. Des Weiteren wird ein erster Parametersatz für ein Titan-Feedstock mittels statistischer Versuchsplanung, mit dem Ziel Grünteile mit einer hohen Dichte fertigen zu können, ermittelt. Grundlagen

2 Grundlagen

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über das verwendete Fertigungsverfahren, das verwendete Equipment und allgemeine dieser Arbeit zugrunde liegende Informationen.

2.1 Metall-FFF

Im Folgenden werden die Grundlagen zum Metall-FFF Verfahren und der sinterbasierten Prozessroute dargestellt.

2.1.1 Sinterbasierte Prozessroute

Die Prozessroute des FFF-Metall Fertigungsverfahrens läuft analog zu der des Metallpulverspritzgusses, beziehungsweise des Metal Injection Molding (MIM) ab. Dabei wird metallisches Pulver mit einem Bindermaterial versetzt. Diese Binder basieren meist auf Thermoplasten. Der Anteil zwischen Metallpulver und Binder ist meist, bezogen auf das Volumen, in der Größenordnung 40 zu 60 %. Das bei dieser Mischung entstehende Material wird als Feedstock bezeichnet. Das Feedstock wird anschließend in Form des gewünschten Bauteils gebracht. Das in Form gebrachte Bauteil wird als Grünteil bezeichnet. Anschließend wird der Binder aus dem Grünteil entfernt. Dazu kommen abhängig von dem vorliegenden Binder thermische Verfahren, Lösungsmittelextraktion und katalytische Verfahren zum Einsatz. Das Entbinden kann dabei auch mehrstufig ablaufen. Nachdem das Grünteil entbindet wurde, bezeichnet man es als Braunteil. Das Braunteil wird anschließend gesintert, dabei entsteht das fertige metallische Bauteil. Dabei muss beachtet werden, dass das Bauteil beim Sintern schrumpft [2].

Der beschriebene Prozess ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

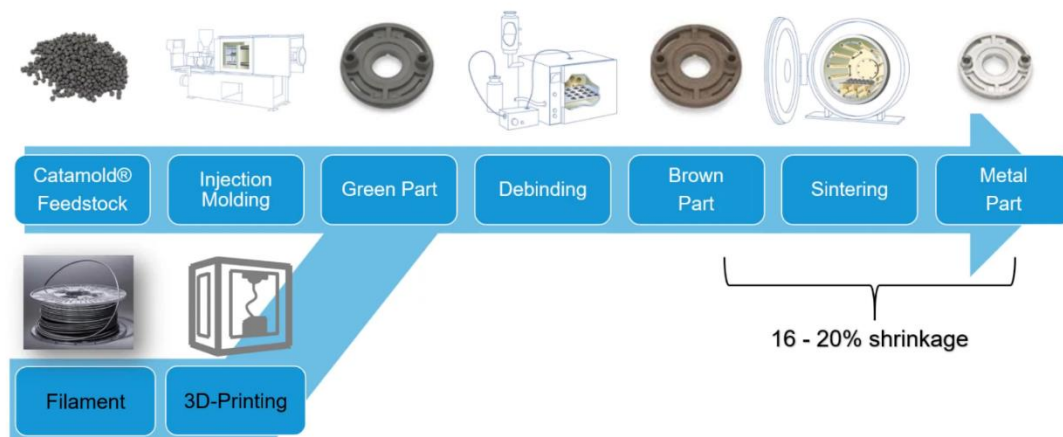


Abbildung 2.1: Ablauf der sinterbasierte Prozessroute [3]

MIM unterscheidet sich dabei in der Fertigung der Grünteile. Es wird das Fertigungsverfahren FFF für die Fertigung des Grünteils verwendet. Im Gegensatz zu MIM muss nicht erst eine Spritzgussform angefertigt werden, es bleiben somit die Vorteile des additiven Fertigungsverfahrens.

2.1.2 FFF

Bei Fused-Filament-Fabrication handelt es sich um ein Strangablegeverfahren. FFF ist auch unter Material Extrusion (MEX) oder unter der Firmenbezeichnung Fused Deposition Modeling (FDM) bekannt. Der schematische Verfahrensaufbau ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

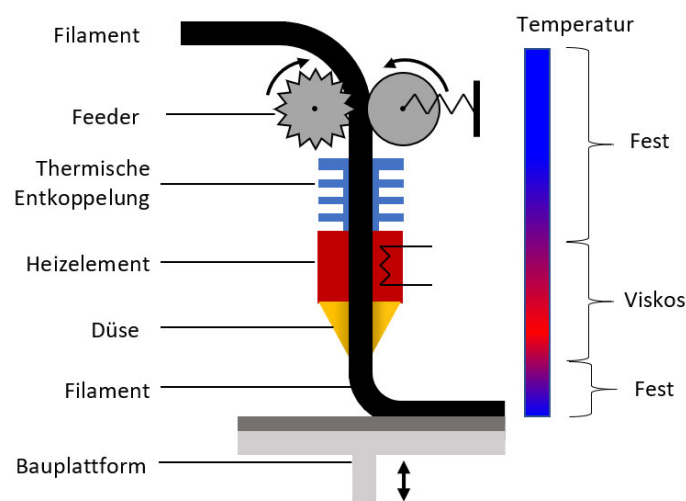


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung FFF [4]

Das Rohmaterial liegt in Form von Filament mit üblicherweise einem Durchmesser von 2,85 mm oder 1,75 mm vor. Dabei werden thermoplastische Kunststoffe verwendet. Durch eine Fördereinheit wird das Filament kontinuierlich während des Druckes in ein sogenanntes Hotend gedrückt. Das Hotend besteht aus dem Heizelement auch als Heatblock bezeichnet, in diesem ist eine Düse eingesetzt. Dem Heatblock ist in der Regel ein Wärmetauscher vorgesetzt, welcher durch eine sogenannte Heatbreak thermisch weitestgehend entkoppelt ist. So wird die Schmelzzone definiert und klein gehalten. Um das gewünschte Bauteil zu fertigen, wird das Filament aus der Düse extrudiert. Durch Relativbewegung, normal zur Extrusionsrichtung zwischen Bauplatte und Düse wird das zu fertigende Bauteil schichtweise aufgebaut.

Bedingt durch das Ablegen einzelner Bahnen entstehen zwischen diesen in der Regel kleine Hohlräume (s. Abb. 2.3).

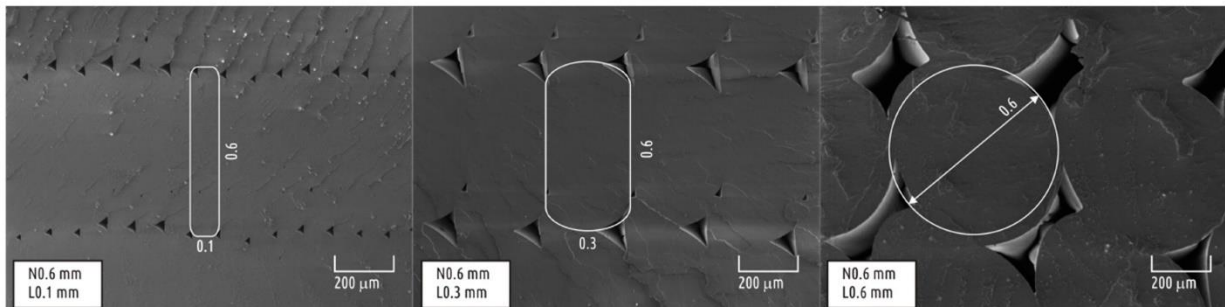


Abbildung 2.3: Querschnitt FFF Bauteile mit unterschiedlichen Schichthöhen [5]

Diese können durch das Anpassen der Prozessparameter verringert werden.

Die für Metall FFF verwendeten Feedstockmaterialien weisen durch ihre Zusammensetzung und dem hohen Anteil an Metallpulver deutlich schlechtere mechanische Eigenschaften als herkömmliche thermoplastische Kunststoffe auf. Dies kann die Verarbeitbarkeit erschweren. Des Weiteren unterscheiden sich Feedstocks auch in Bezug auf die erforderliche Drucktemperatur von den meisten herkömmlichen Thermoplasten. So ist teilweise nur eine Drucktemperatur von teilweise 120°C bis 180°C erforderlich (vgl. Anhang A1).

2.2 Setup

In diesem Kapitel wird der vorhandene FFF-Drucker und die Fertigungsumgebung sowie der verwendete Preprozessor und das Feedstock vorgestellt.

2.2.1 Verwendeter FFF-Drucker

Für diese Arbeit wird ein Ender-3 FFF-Drucker der Firma Creality verwendet.

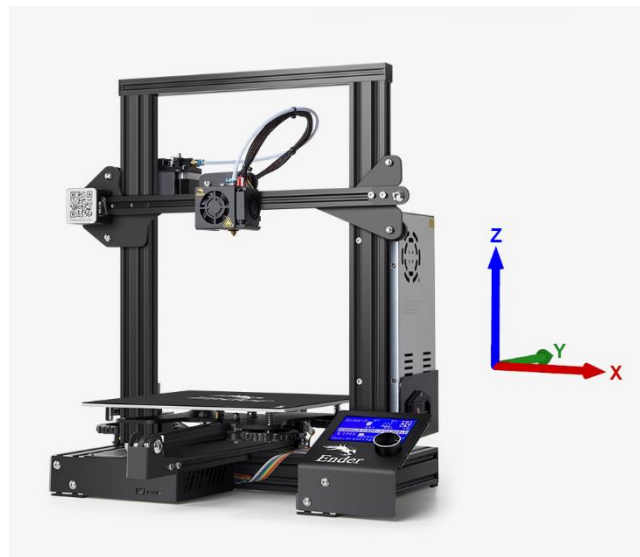
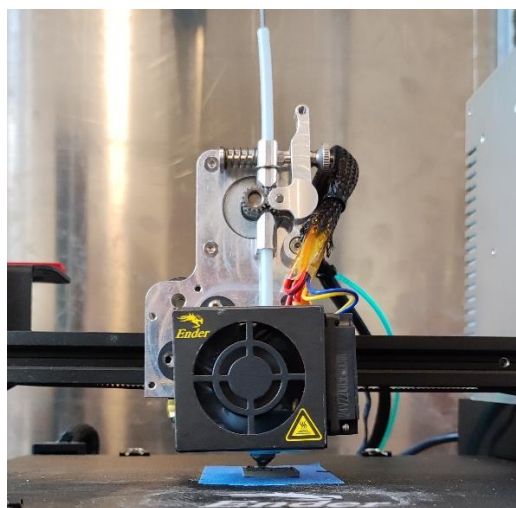


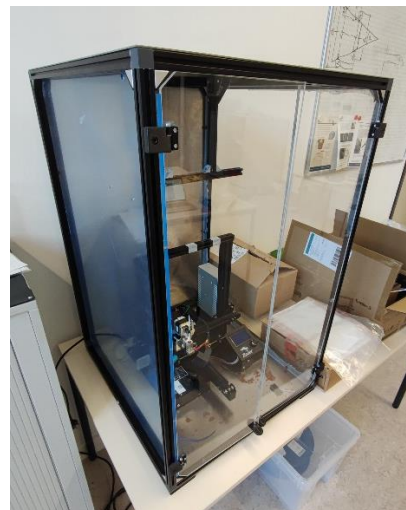
Abbildung 2.4: Creality Ender-3 (in Anlehnung an [6])

Bei diesem Drucker handelt es sich um ein Einstiegsmodell für den Hobbybereich.

Der standardmäßig verbaute Bowden-Extruder wurde im Zuge einer dieser Arbeit vorausgehenden Bachelorarbeit auf einen Direct Drive Extruder der Firma Micro Swiss umgerüstet (s. Abb. 2.5 (a)). Der Extruder arbeitet, wie der Originale weiterhin mit einem Filament Durchmesser von 1,75 mm. Aus der genannten Arbeit ist ebenfalls eine Einhausung hervorgegangen, in welche der Drucker gestellt wird, um äußere Einflüsse zu minimieren (s. Abb. 2.5 (b)).



(a)



(b)

Abbildung 2.5: Micro Swiss Direct Drive Extruder (a) und Drucker-Einhausung (b)

Die Einhausung hat einen Filamenthalter bestehend aus einem Aluminium-Profil verbaut, auf dem die Filamentspulen aufgehängt werden.

Preislich sind für das verwendete Setup im Ausgangszustand die in Tabelle 1 aufgelisteten Preise erforderlich.

Komponente	Preis
Creality Ender-3	198,00 €
Micro Swiss Direct Drive Extruder	108,95 €
Einhausung	~180,00 €
Summe: 486,95 €	

Tabelle 1: Kosten des benutzten Setups

Die Gesamtkosten des verwendeten Aufbaus belaufen sich auf weniger als 500 €.

2.2.2 Verwendetes Feedstock

Es werden unterschiedliche Feedstocks verwendet. Der Fokus liegt jedoch bei dem Ti6Al4V Feedstock der Firma Element22. Für dieses Feedstockmaterial wird in Kapitel 4 eine Optimierung der Druckparameter durchgeführt. Entsprechend des Druckers wird Filament mit einem Durchmesser von 1,75 mm verwendet.

Die in dem Feedstock enthaltene Titan-Legierung verspricht sehr gute mechanische Eigenschaften (vgl. Tab. 2).

	Typische Werte
Zugfestigkeit Rm / MPa	1005
Streckgrenze Rp0,2 / MPa	920
Dehnung A / %	14%

Tabelle 2 Mechanische Eigenschaften Ti6Al4V (vgl. Anhang A.1)

Neben diesem Titan-Feedstock wird Fil-316L-F von PT+A verwendet. Das entsprechende Datenblatt ist dem Anhang A.2 zu entnehmen.

2.2.3 Verwendeter Preprozessor

Der Preprozessor hat die Aufgabe das zu druckende CAD-Modell in konkrete Maschinenbefehle für den Drucker umzuwandeln, die nötig sind, das Bauteil zu fertigen. Diese Befehle beinhalten unter anderem die einzelnen abzufahrenden Koordinaten, Temperaturen, Geschwindigkeiten. Die Befehle werden im Gcode-Format gespeichert. Der Preprozessor hat somit Einfluss auf alle einstellbaren Prozessparameter des Druckvorganges. Da der Preprozessor das CAD-Modell in die einzelnen zu druckenden Schichten aufteilt, wird er auch Slicer genannt.

Für diese Arbeit wird ein Opencource-Slicer namens OrcaSlicer verwendet. Der OrcaSlicer verfügt über viele unterschiedliche einstellbare Parameter und bietet eingebaute Kalibrierfunktionen. Des Weiteren überzeugt der OrcaSlicer mit einer übersichtlichen und benutzerfreundlichen Benutzeroberfläche.

2.3 Statistische Versuchsplanung

Mit der statistischen Versuchsplanung, im englischen Sprachgebrauch Design of Experiment (DoE), lässt sich der Einfluss mehrerer Parameter auf eine zu untersuchende Zielgröße bestimmen. In der DoE werden Versuche so geplant, dass der Effekt und vorhandene Wechselwirkungen der untersuchten Einflussfaktoren erkennbar werden. Basierend auf den durchgeführten Versuchen lässt sich ein Modell des betrachteten Systems aufstellen. Mit Hilfe dieses Modells lassen sich optimale Einstellungen der Einflussparameter für die untersuchten Zielgrößen ermitteln.

2.3.1 Statistische Grundlagen

Wenn bei einem streuenden Wert eine Normalverteilung vorliegt, kann berechnet werden, wie viele Stichproben genommen werden müssen, um eine statisch valide Aussage über die Grundgesamtheit treffen zu können. Dazu sind einige Gleichungen notwendig.

Mittelwert

Der Mittelwert \bar{y} von Messwerten lässt sich nach Gleichung 2.1 bestimmen [7].

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.1)$$

Dabei ist n die Anzahl der Messwerte und y_i der jeweilige Messwert.

Standardabweichung

Aus den Stichproben lässt sich die Standardabweichung mit Gleichung 2.2 bestimmen.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.2)$$

Dies ist nur die Standardabweichung der Stichproben und darf nicht mit der Standardabweichung der Grundgesamtheit verwechselt werden. Mit der Standardabweichung der Stichproben lässt sich die Standardabweichung des Mittelwertes schätzen (s. Gleichung 2.3) [7].

$$s_{\bar{y}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

Vertrauensbereiche

Um den Vertrauensbereich eines Mittelwerts, der anhand von Stichproben ermittelt wurde, aufzustellen, kann Ausdruck 2.4 verwendet werden [7].

$$\bar{y} - t \cdot s_{\bar{y}} \leq \mu \leq \bar{y} + t \cdot s_{\bar{y}} \quad (2.4)$$

Dabei ist \bar{y} der Mittelwert der Stichprobe und $s_{\bar{y}}$ der Standardfehler. Der t-Wert ist von dem gewünschten Vertrauensniveau abhängig und kann entsprechender Literatur entnommen werden.

Aus Gleichung 2.4 kann abgeleitet werden, wie viele Stichproben mindestens notwendig sind, um einen bestimmten Vertrauensbereich zu erhalten.

$$n \geq \left(\frac{t \cdot s}{E} \right)^2 \quad (2.5)$$

Dabei ist E die gewünschte Fehlerspanne.

Wenn man bestimmen möchte, wie viele Wiederholungen eines Versuchsplans notwendig sind, um bestimmte Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchen mit statistischer Relevanz erkennen zu können, kann dies mit Gleichung 2.6 abgeschätzt werden.

$$n_w \approx \frac{60}{n_{plan}} \cdot \left(\frac{s}{\Delta} \right)^2 - 1 \quad (2.6)$$

Die Anzahl der nötigen Wiederholungen n_w ist von der in dem Versuchsplan vorhandenen Anzahl an Versuchen n_{plan} , der Standardabweichung und des zuerkennenden Δ abhängig. Der Wert für n_w ist ganzzahlig aufzurunden. Die Gleichung gilt für ein Signifikanzniveau von 0,05 und einer Teststärke von 0,9 [8].

2.3.2 Versuchspläne

Je nach genauer Zielsetzung und dem zu betrachtenden System gibt es unterschiedliche Arten von Versuchsplänen.

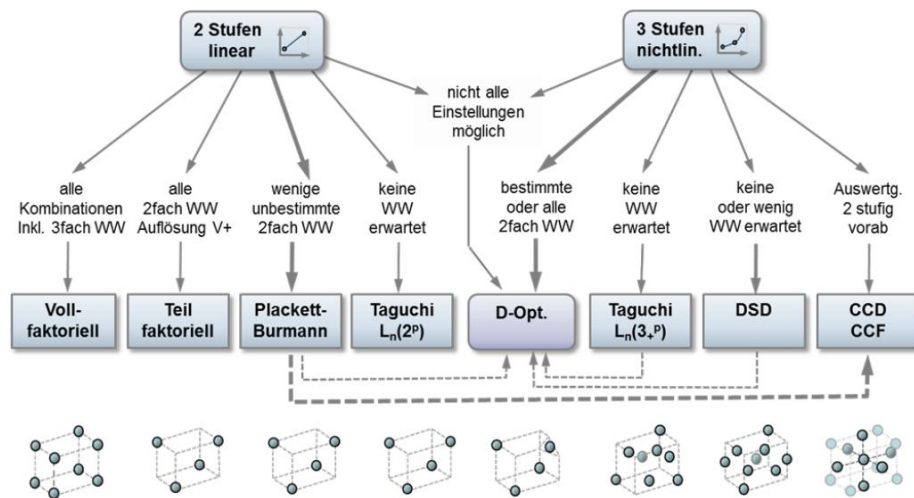


Abbildung 2.6: Vergleich verschiedener Versuchspläne [8]

In dieser Arbeit wird ein D-Optimaler Versuchsplan verwendet. Mit diesem können zweifache Wechselwirkungen zwischen den Faktoren ermittelt werden, und es lassen sich auch nicht lineare Zusammenhänge beschreiben. Des Weiteren können Faktorkombinationen, welche sich in der Realität nicht umsetzen lassen, dem Versuchsplan ausgenommen werden und es können bereits durchgeführte Versuche mit in den Versuchsplan einbezogen werden. Außerdem ist die Anzahl der benötigten Versuche kleiner als bei zum Beispiel vollfaktoriellen Versuchsplänen. Die Anzahl der mindestens benötigten Versuche lässt sich für ein quadratisches Modell mit Gleichung 2.7 berechnen [9].

$$n = p + p + p \cdot \frac{p-1}{2} + 1 \quad (2.7)$$

Dabei ist p die Anzahl an betrachteten Faktoren. Um die Streuung der Ergebnisse zu beurteilen, bzw. eine bestimmte statistisch signifikante Aussage zu erhalten, sind möglicherweise mehr Versuche erforderlich.

Die Erstellung und Auswertung D-Optimaler Versuchspläne wird meistens softwaregestützt durchgeführt. In dieser Arbeit wird die Statistiksoftware Visual XSel verwendet.

2.3.3 Auswertung

Um die aus dem Versuchsplan gewonnenen Daten auszuwerten, gibt es verschiedene Diagramme, mit denen sich die Zusammenhänge visualisieren lassen. Einige Ausgewählte werden folgend kurz erläutert.

Kurvendiagramm

Das Kurvendiagramm zeigt die Wirkung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Zielgrößen. Dazu sind die Einflussfaktoren auf der X-Achse und die Zielgrößen auf der Y-Achse eingetragen. Die Steigung der sich ergebenden Verläufe zeigt entsprechend die Wirkung des betrachteten Einflussfaktors auf die Zielgröße. Vergleicht man die Steigung der einzelnen Verläufe der Einflussfaktoren, lässt sich erkennen, welche Einflussfaktoren die größte Wirkung auf die Zielgröße haben. Da die Verläufe aufgrund der Wechselwirkungen unter den Einflussfaktoren jeweils nur für bestimmte Wertekombinationen dargestellt werden können, können bei Betrachtung anderer Werte Kombinationen in Abhängigkeit der Stärke der Wechselwirkungen unterschiedliche Verläufe ergeben [10].

Wechselwirkungsdiagramm

In dem Wechselwirkungsdiagramm werden wie beim Kurvendiagramm die Einflussfaktoren auf der X-Achse und die Zielgrößen auf der Y-Achse dargestellt. Für jeden Einflussfaktor wird bei bestehender Wechselwirkung der Verlauf bei minimaler und maximaler Einstellung dargestellt. Anhand von Unterschieden der Verläufe können die Wechselwirkungen erkannt werden [7].

3 Systemanalyse und Modifikationen

In diesem Kapitel wird der Ausgangszustand des für diese Arbeit betrachteten Drucker Setups untersucht. Ausgehend von dieser Untersuchung werden Maßnahmen zur Verbesserung abgeleitet und die Hardware entsprechend angepasst. Des Weiteren wird untersucht, ob und in welchem Ausmaß die Anpassungen eine tatsächliche Verbesserung darstellen.

3.1 Untersuchung des Ausgangszustandes

Um einen ersten Eindruck über mögliche auftretende Probleme bei der Herstellung von Grünteilen mit dem vorhandenen Druckeraufbau zu erhalten, werden Probedrucke durchgeführt. Basierend auf den daraus hervorgehenden Erkenntnissen werden Verbesserungsmöglichkeiten abgeleitet.

Die Probedrucke erfolgen mit einem Fil-316L-F Feedstock Material. Für dieses Material wurden im Rahmen einer Bachelorthesis bereits Parametersätze ermittelt, welche für unterschiedliche Zielsetzungen optimale Druckergebnisse liefern sollen. Die Parametersätze sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Parametersatz	Schichthöhe [mm]	EM [-]	Schichtbreite [mm]	Düsentemperatur [°C]	Erwartete Dichte [g/cm ²]
Alle gleich	0,145	1,023	0,48	120	4,90
Wirtschaftlichkeit	0,220	1,113	0,48	120	5,06
Qualität	0,100	1,080	0,48	132	5,06

Tabelle 3: Parametersätze Fil-316L-F [1]

Es ist anzumerken, dass die hier aufgeführten Parametersätze nicht explizit getestet wurden.

Um mögliche Probleme mit dem vorhandenen Druckeraufbau für die Verarbeitung der Feedstockmaterialien zu erlangen, wird versucht mit den in Tabelle 3 aufgeführten Parametersätzen jeweils einen Probekörper zu drucken. Für die Proben wurde ein Würfel mit den Abmaßen 20x20x20mm gewählt, bei dem orthogonal zu den Drucker XYZ-Achsen der entsprechende Buchstabe eingelassen ist [11].

Es wird als erstes der Parametersatz „alle gleich“ verwendet. Die Erkenntnisse aus den Versuchen sind in Tabelle 4 festgehalten.

Nr.	Besonderheiten	Komplikationen	Beobachtungen
1	-	Extrusion stoppt nach erster Schicht	Filament an Extruderrädern abgerieben
2	-	Extrusion stoppt nach erster Schicht	Filament an Extruderrädern abgerieben; Filament unterhalb deutlich geknickt
3	PTFE-Schlauch erneuert	Extrusion stoppt nach erster Schicht	Filament an Extruderrädern abgerieben

Tabelle 4: Druckversuche "alle gleich"

Mit diesem Parametersatz ist es auch nach drei Versuchen nicht möglich, den Probekörper zu drucken.

Um weitere Erkenntnisse zu gewinnen, werden die anderen Parametersätze getestet. Es wird vermutet, dass die Kraft bei der niedrigen Extrusionstemperatur zu groß ist.

Auch bei der Verwendung des Parametersatzes „Wirtschaftlichkeit“ kommt es zu denselben Problemen (s. Tab. 5).

Nr.	Besonderheiten	Komplikationen	Beobachtungen
1	-	Extrusion stoppt nach erster Schicht	Filament an Extruderrädern abgerieben; Filament deutlich gestaucht
2	Drucktemperatur auf 150°C erhöht	Extrusion stoppt bei oberster Schicht	Filament an Extruderrädern abgerieben
3	Drucktemperatur auf 160°C erhöht	-	Unterextrusion; Unregelmäßigkeiten auf Oberfläche

Tabelle 5: Druckversuche "Wirtschaftlichkeit"

Mit deutlich erhöhter Drucktemperatur konnte ein Probekörper gefertigt werden.

Auch bei der Verwendung des Parametersatzes „Qualität“ zeichnen sich gleichende Probleme ab (s. Tab. 6).

Nr.	Besonderheiten	Komplikationen	Beobachtungen
1	-	Extrusion stoppt nach erster Schicht	Filament an Extruderrädern abgerieben
2	Drucktemperatur auf 160°C erhöht	-	Unterextrusion; Boden beim Entfernen von Druckplatte ausgerissen

Tabelle 6: Druckversuche "Qualität"

Mit deutlich erhöhter Temperatur konnte auch mit diesem Parametersatz ein Probekörper vollständig gedruckt werden.

Bei den niedrigen Drucktemperaturen, welche in den Parametersätzen angegeben sind, bricht die Extrusion nach Vollendung der ersten Schicht ab. Es ist zu beobachten, dass das Filament an den Extruderrädern abgerieben ist (s. Abb. 3.1).

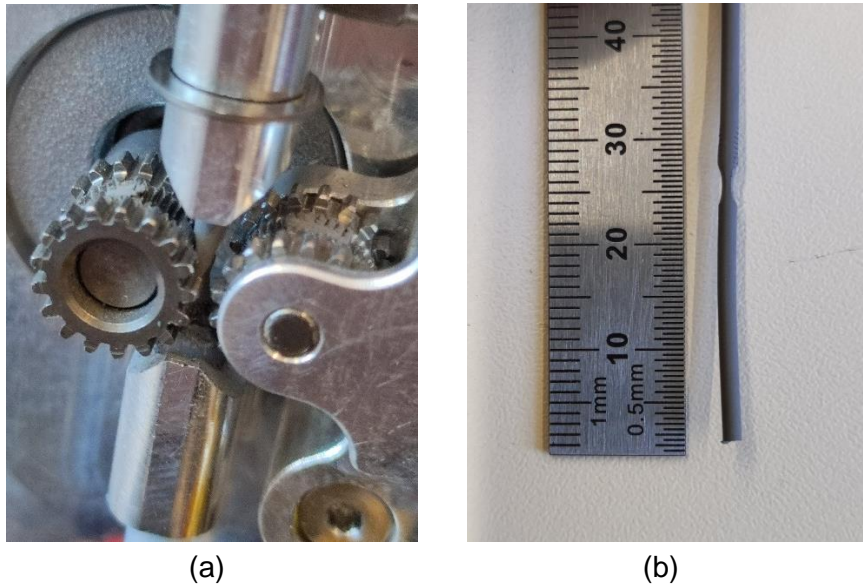


Abbildung 3.1: Abgeriebenes Filament im Extruder (a) und abgeriebenes Filament (b)

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Kraft, welche benötigt wird, um das Filament durch die Druckerdüse zu fördern, maßgeblich von der Düsentemperatur abhängig ist. Entsprechend ist die benötigte Kraft bei den niedrigen Temperaturen von 120°C vermutlich deutlich größer als bei 160°C . Eine geringere benötigte Kraft führt zu einer geringeren Beanspruchung des Filaments an den Extruderrädern. Dies würde erklären, warum die Probekörper nach Erhöhung der Düsentemperatur vollständig gedruckt werden konnten.

Des Weiteren ist zu beobachten, dass die erste Schicht noch gedruckt wird, aber danach die Extrusion stoppt. Die erste Schicht wird mit einer geringeren Geschwindigkeit gedruckt als der Rest des Bauteils. Dies dient dazu, eine qualitativ bessere erste Schicht zu produzieren und so eine gute Anhaftung an das Druckbett zu erhalten. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Druckgeschwindigkeit ebenfalls, wie auch die Düsentemperatur einen Einfluss auf die benötigte Extrusionskraft hat. Bei höheren Geschwindigkeiten bleibt dem Material weniger Zeit zum Schmelzen, was in einer höheren benötigten Kraft resultiert. Dieser Effekt wird jedoch bei den betrachteten Geschwindigkeitsunterschieden als weniger signifikant eingeschätzt.

Neben der Extrusionskraft wird auch vermutet, dass der Einzug des Filaments dieses deutlich schwächt. Wenn sich der Druckkopf nach dem Ablegen einer Bahn zu dem Anfangspunkt der nächsten Bahn bewegt, wird dabei das Filament ein Stück zurückgezogen, um zu verhindern, dass Filament aus der Düse austritt. In der Praxis führt dies dazu, dass bei einem Einzug das Filament insgesamt dreimal durch die Extruderräder gefördert wird und vermutlich dadurch geschwächt wird. Dies begünstigt ebenfalls, dass sich das Filament an den Extruderrädern abreibt und die Extrusion stoppt.

Es konnte außerdem beobachtet werden, dass das Filament unterhalb der Extruderräder teilweise geknickt und gestaucht ist (s. Abb. 3.2).



Abbildung 3.2: Geknicktes Filament

Es wird vermutet, dass dies als Folge der hohen benötigten Extrusionskraft geschieht. Des Weiteren ist der Abstand zwischen den Extruderrädern und dem Hotend relativ groß (vgl. Abb. 3.3). Dieser Umstand dürfte das Knicken des Filaments begünstigen.

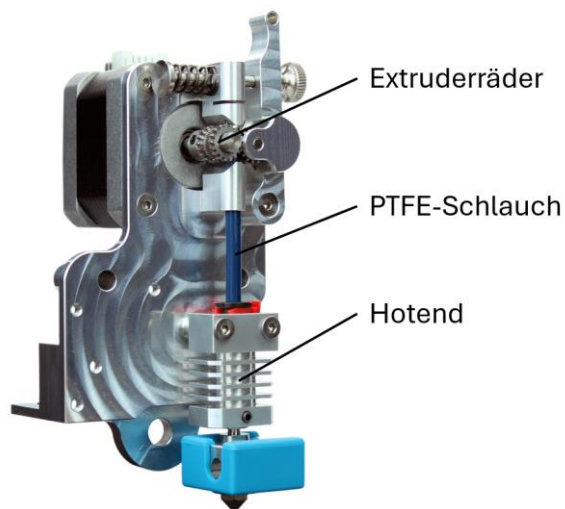


Abbildung 3.3: Micro Swiss Extruder (in Anlehnung an [12])

Es wird vermutet, dass das Knicken und die Stauchungen des Filaments die Reibung innerhalb des PTFE-Schlauches deutlich erhöhen und somit ebenfalls die erforderliche Extrusionskraft weit in die Höhe treiben. Dies führt im Umkehrschluss auch wieder zu einer stärkeren Ausprägung der Knickungen und Stauchungen.

Neben diesen Beobachtungen, die sich unmittelbar auf die Druckbarkeit der Feedstocks beziehen, sind weitere Dinge aufgefallen.

Bei dem Probedruck mit dem Parametersatz „Wirtschaftlichkeit“ sind deutliche Artefakte auf der Oberfläche erkennbar. Bei der Probe, welche mit dem Parametersatz „Qualität“ gedruckt wurde, ist die Ausprägung deutlich geringer, aber auch sichtbar.

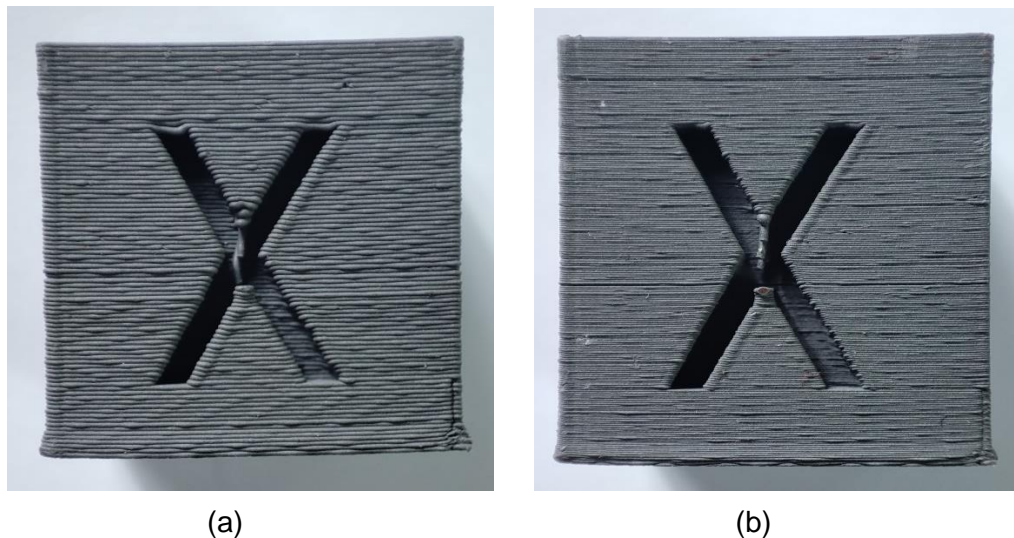


Abbildung 3.4: Grünteileprobe "Wirtschaftlichkeit" (a) und Grünteileprobe "Qualität" (b)

Es wird vermutet, dass diese Artefakte durch eine unsaubere Ansteuerung der Schrittmotoren hervorgerufen werden. Durch eine unsaubere Ansteuerung der Motoren könnten Schwingungen angeregt werden, zu dem könnte es zu kleinen temporären Positionsabweichungen kommen.

3.2 Ableitung von Verbesserungen

Aus den in Kapitel 3.1 gewonnenen Erkenntnissen werden Maßnahmen zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Benutzerfreundlichkeit abgeleitet. Dafür werden Anpassungen an dem Mainboard des Druckers, an dem Filamentspulenhalter sowie an dem Extruder und Toolhead vorgenommen.

3.2.1 Drucker Mainboard

Bei den Vorversuchen hat sich gezeigt, dass die Oberflächen der gedruckten Proben ungewünschte Artefakte aufweisen. Als Ursache dafür werden die Schrittmotortreiber vermutet. Um eine bessere Oberflächenqualität zu erreichen, sollen diese gegen bessere ausgetauscht werden.

Verbesserungsansätze

Bei dem verwendeten Ender-3 Drucker sind die Schrittmotortreiber fest auf dem Mainboard verlötet. Das Austauschen der Schrittmotortreiber kommt unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Werkzeuge nicht in Frage. Anstatt neue Schrittmotortreiber auf das bestehende Mainboard zu löten, wird ein neues Mainboard mit bereits besseren verbauten Schrittmotortreibern eingebaut.

Gewählt wurde ein BTT SKR mini E3 V3.0.

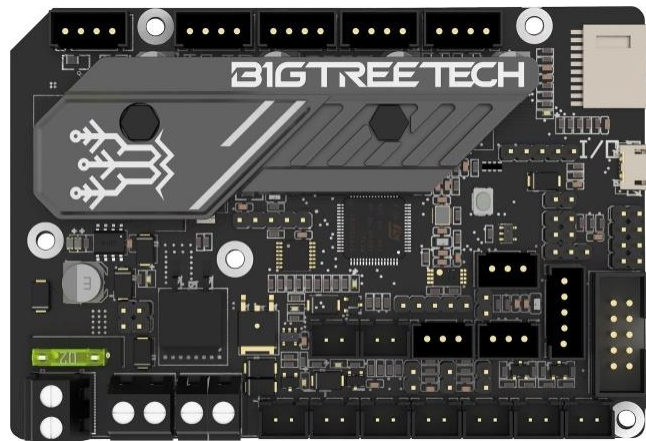


Abbildung 3.5: BTT SKR mini E3 V3.0 [13]

Dieses Mainboard ist für die Verwendung mit einem Ender-3 Drucker konzipiert und sollte somit eine vergleichsweise simple Umrüstung ermöglichen. Des Weiteren sind auf diesem Mainboard Trinamic TMC2209 Schrittmotoren verbaut. Trinamic wirbt bei den TMC2209 Schrittmotortreibern mit einer Funktion namens „StealthChop“. Dabei werden die Schritimpulse von dem Schrittmotortreiber mit 256 Microschritten geglättet. Dies führt zu gleichmäßigeren Drehbewegungen und einem deutlich leiseren Betrieb der Motoren [14].

Validierung der Verbesserungsansätze

Um festzustellen, ob das neue Mainboard mit den TMC2209 Treibern tatsächlich eine Verbesserung gegenüber dem originalen Mainboard darstellt, werden die Schwingungen der Motoren gemessen.

Konkret wird die Beschleunigung der Druckplatte beim Verfahren in Y-Richtung gemessen. Dazu wird ein Mobiltelefon auf der Druckplatte platziert (s. Abb. 3.6).



Abbildung 3.6: Versuchsaufbau Schwingungsanalyse

Auf diesem Mobiltelefon wird die App PHYPOX verwendet. Diese App erlaubt es, die Sensoren des Telefons auszulesen. Es wird die absolute Beschleunigung ohne Berücksichtigung der Erdbeschleunigung aufgezeichnet. Für die Messung wird die Druckplatte mit der Jog-Funktion des Druckers aus der maximalen Y-Achsen Position (hinten) zu der minimalen Y-Achsposition bewegt. Dies wurde sowohl mit dem originalen als auch mit dem neuen Mainboard durchgeführt.

Dabei zeigen die Messungen deutliche Unterschiede (vgl. Abb. 3.7).

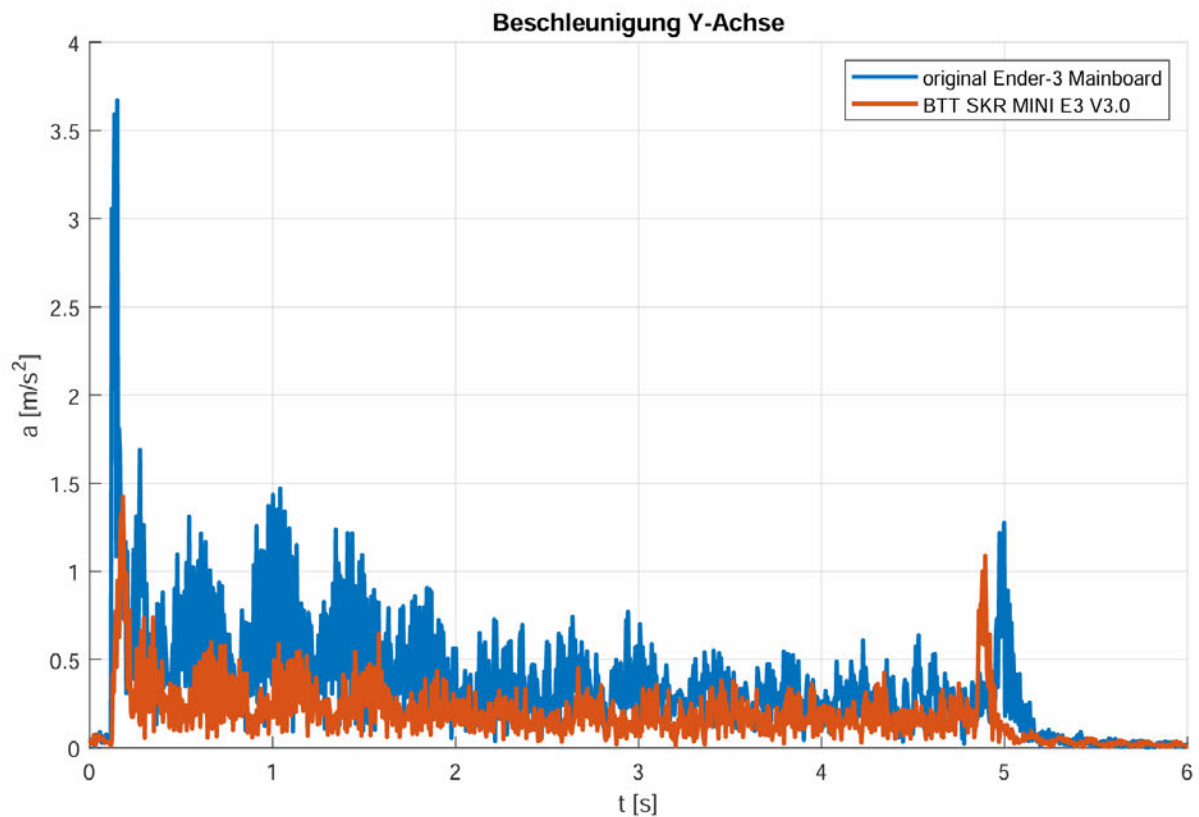


Abbildung 3.7: Mainboard Vergleich Schwingungsanalyse

Es ist zu erkennen, dass die Schwingungen gegenüber dem originalen Mainboard mit dem neuen Mainboard deutlich geringer sind. Des Weiteren ist an dem Verlauf deutlich erkennbar, dass die Schwingungen mit fortlaufendem Verfahrensweg abnehmen. Dies korreliert mit dem Abstand zwischen Druckplatte und Motor (vgl. Abb. 3.8).

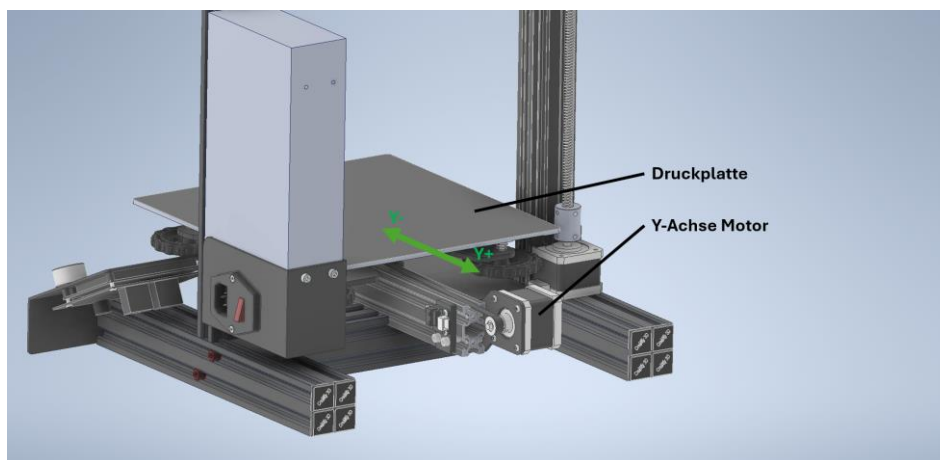


Abbildung 3.8: Aufbau der Kinematik der Y-Achse

Mit dem neuen Mainboard ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt.

Um die gemessenen Beschleunigungen zu vergleichen, werden aus allen Messpunkten zwischen den ersten und vierten Sekunden der Messung der Mittelwert gebildet. Die tatsächlich gewollte Beschleunigung und Abbremsung der Druckplatte werden somit nicht berücksichtigt (vgl. Abb. 3.7).

Mainboard	Beschleunigungs Durchschnitt [mm/s ²]
originales Mainboard	0,41
SKR Min E3 V3.0	0,20

Tabelle 7: Mainboard-Vergleich Schwingungsanalyse Mittelwerte

Es zeigt, sich dass die Beschleunigung der Druckplatte mit dem neuen Mainboard im Durchschnitt nur noch halb so groß ist.

Jedoch ist diese Messung kritisch zu hinterfragen. So beträgt die maximale Abtastrate, mit welcher diese Messungen aufgenommen wurden, nur 100Hz. Die zu erwartende Erregerfrequenz des Motors liegt bei der vorhandenen Verfahrensgeschwindigkeit bei 235Hz. Diese Frequenz kann mit dem verwendeten Messmittel nicht vollständig aufgenommen werden. Dafür wäre nach dem Nyquist-Kriterium eine Abtastung mit mindestens doppelter Frequenz des aufzuzeichnenden Signals erforderlich [15]. Es ist dennoch davon auszugehen, dass die Messung qualitativ verwertbar ist. Auf eine weitere Untersuchung der Messdaten wird deshalb jedoch verzichtet.

Neben diesen Messungen wird ein Probekörper gedruckt. Dabei wird derselbe Körper mit denselben Parametern („Wirtschaftlichkeit“) gedruckt, wie sie bereits in Kapitel 3.1 verwendet wurden.

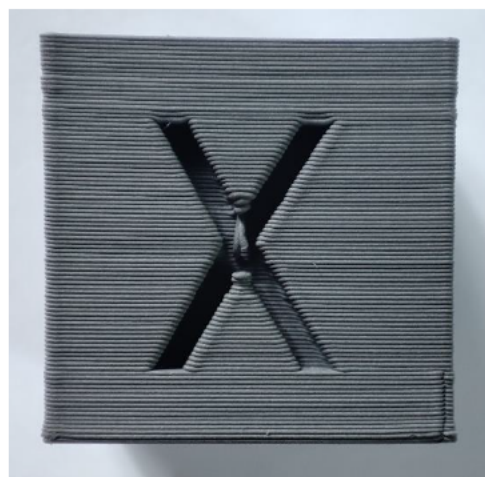


Abbildung 3.9: Grünteilprobe "Wirtschaftlichkeit" mit SKR MINI Mainboard

Der Würfel, welcher mit dem neuen Mainboard gedruckt wurde, weist im Gegensatz zu dem Würfel, welcher mit dem originalen Mainboard gefertigt wurde, keine sichtbaren Artefakte auf der Oberfläche auf.

3.2.2 Spulenhalter

In dem Ausgangszustand des Setups besteht der Spulenhalter nur aus einem Aluminiumprofil, über das die Spule gehängt wird (s. Abb. 3.10.).

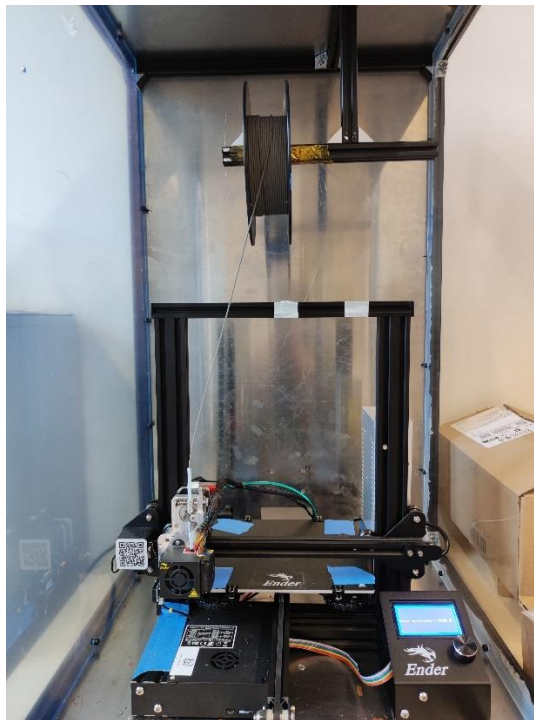


Abbildung 3.10: Ender-3 Ausgangszustand

Zwar konnten bei den Vorversuchen keine Probleme bezüglich der Druckbarkeit des Feedstockmaterials direkt auf den Spulenhalter zurückgeführt werden, trotzdem wird die vorhandene Spulenhalterung als nicht optimal bewertet.

Es kann beobachtet werden, dass die Spule beim Drucken anfängt, etwas vor- und zurückzuschwingen. Außerdem wird die Spule nur auf das Aluminiumprofil gehängt und reibt somit beim Abrollen an diesem. Es wird vermutet, dass die Reibung und damit die benötigte Kraft des Extruders zum Abrollen der Spule unnötig hoch ist. Des Weiteren reibt das Filament, wenn der Druckkopf nahe an den Enden des X-Achsen-Verfahrweges ist, an dem Rand der Filamentspule. Des Weiteren ist zu beobachten, dass deutlich an dem Filament gezogen wird, wenn der Druck aus der X-Achsen-Mitte an den Rand fährt. Dies könnte das Material beschädigen.

Verbesserungsansätze

Um den Spulenhalter zu verbessern, wurden einige Anforderungen aus den erkannten Problemen abgeleitet. Zum einen soll die Spule in ihrer Bewegungsfreiheit bis auf die Rotationsachse vollständig eingeschränkt sein, um nur eine kontrollierte Abrollbewegung ausführen zu können. Zum anderen soll die Reibung beim Abrollen minimiert werden. Außerdem sollen Zugkraft und besonders Spannungsspitzen, die durch die Dynamik beim Drucken auf das Filament wirken, verringert werden.

Es wird ein neuer Spulenhalter konstruiert. Ein Großteil der Bauteile ist mit Hilfe eines FFF-Druckers aus PETG gefertigt. Der neu konstruierte Spulenhalter ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

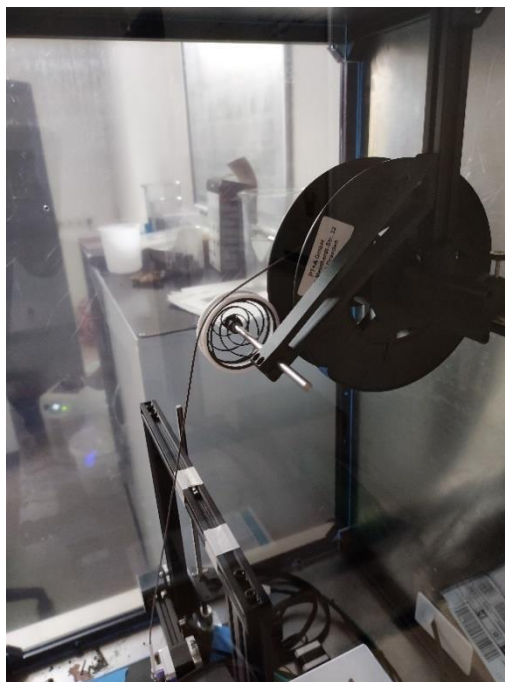


Abbildung 3.11: Neu konstruierter Spulenhalter mit Umlenkrolle

Die Spule wird zwischen zwei Kegeln eingespannt, so können Spulen mit unterschiedlichem Innendurchmesser verwendet werden. Einer der Kegel ist auf einer Stange fest verbaut. Der zweite Kegel kann auf die Stange geschoben werden und mit Hilfe eines Totpunktmechanismus fixiert werden. Somit können auch unterschiedlich breite Spulen verwendet werden. Die Stange, auf dem die Kegel befestigt werden, sind mit einer Fliegenden Lagerung unter der Verwendung von zwei Kugellagern reibungsarm gelagert. Um ein unkontrolliertes Abrollen, bei zum Beispiel Bruch des Filaments einzuschränken, ist zusätzlich eine einstellbare Reibbremse verbaut.

Das Filament wird über eine Umlenkrolle geführt. Diese Rolle ist ebenfalls kugelgelagert und außerdem mit zwei Axial-Radial Federn ausgestattet. Wird von dem Drucker an dem Filament gezogen, federt die Umlenkrolle ein.

Validierung der Verbesserungsansätze

Mit dem neu konstruierten Spulenhalter konnten alle Hauptanforderungen erfüllt werden. Die Spule kann so fixiert werden, dass sie sich nur noch um die eigene Drehachse drehen kann. Mit den verbauten Kugellagern lässt sich die Spule sehr reibungsarm drehen. Es lässt sich mit der verbauten Bremse der Reibwiderstand einstellen. Jedoch ist ein leichtes Rastmoment feststellbar, dieses ist so gering, dass es nicht als problematisch eingestuft wird. Das Filament reibt auch nicht mehr am Rand der Spule. Während eines Druckvorgangs kann beobachtet werden, dass die Umlenkrolle ausgelenkt wird und so die Kräfte abfedert.

Da nicht davon auszugehen ist, dass durch den neuen Spulenhalter sichtbare Änderungen am Druckbild erkennbar sind, wird auf einen weiteren Testdruck an dieser Stelle verzichtet.

3.3 Extruder

Bei den Vorversuchen hat sich der Extruder als am meisten problematisch herausgestellt. Bei den Druckversuchen, besonders mit niedriger Drucktemperatur, hat die Extrusion vor Vollendung des Druckauftrages ausgesetzt.

Verbesserungsansätze

Es ist zu beobachten, dass das Filament an den Extruderräder abgerieben wird. Des Weiteren kann beobachtet werden, dass das Filament unterhalb der Extruderräder geknickt und teilweise auch gestaucht ist. Um diese Umstände zu minimieren, werden unterschiedliche Ansätze verfolgt.

Um für eine bessere Krafteinleitung in den Filamentstrang zu sorgen, soll die Eingriffsfläche maximiert werden. Dafür wurden unterschiedliche Ansätze in Betracht gezogen (vgl. Tab. 8).



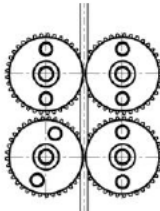
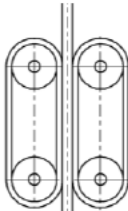
Multi Kontakt (FuseLab)	größere Extruderräder	Mehrere Extruderräder	Flächen Kontakt
 Multi Contact Drive			

Tabelle 8: Möglichkeiten für eine besser Krafteinleitung (in Anlehnung an [16] [17])

Aus Gründen der Machbarkeit wurde sich entschieden, ein zweites Paar Extruderräder zu verwenden und Extruderräder mit einem vergleichmäßig großem Durchmesser. Es wurden kommerziell erwerbbaare Extruderräder gewählt, welche diese Anforderungen erfüllen. Konkret wurden die Extruderräder eines Bausatzes für einen „ProtoXtruder“ Extruder gewählt [18]. Diese haben einen Durchmesser von 18 mm. In Abbildung 3.12 ist der Unterschied der Eingriffsfläche

durch den größeren Durchmesser der Extruderräder bei einer Eingriffstiefe von 0,2 mm visualisiert.

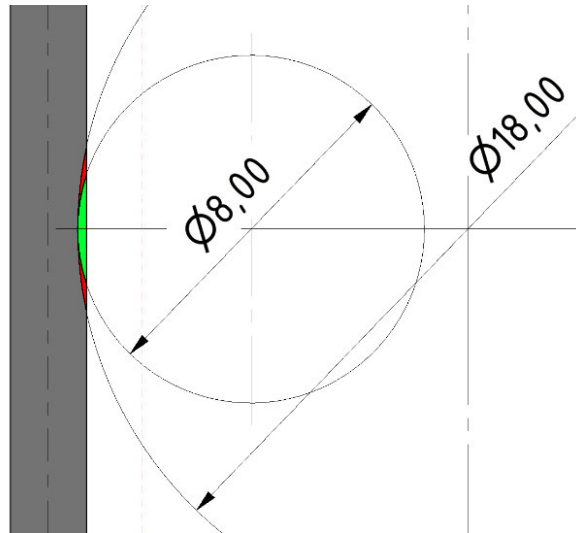


Abbildung 3.12: Extruderräder Durchmesser Vergleich

Durch den größeren Durchmesser der Extruderräder in Kombination mit dem zusätzlichen Räderpaar ist der Eingriff bei gleicher Eingriffstiefe dreifach so groß.

Neben der Eingriffsfläche werden weitere Verbesserungen vorgenommen. Um das Knicken des Filaments zu minimieren, ist der Abstand zwischen der Kraftübertragung auf das Filament und dem Hotend zu verkleinern. So soll zum einen die Knicklänge und die Fläche, an der das Filament reibt, minimiert werden. Um die Reibung gering zu halten, wurde das Extrudergehäuse, welches eine Filamentführung zwischen dem Extruderräderpaaren beinhaltet aus PETG mit einem Anteil an PTFE gefertigt. Der Hersteller wirbt für dieses Material mit guten tribologischen Eigenschaften [19].

Die Neukonstruktion des Extruders ist Abbildung 3.13 zu entnehmen.

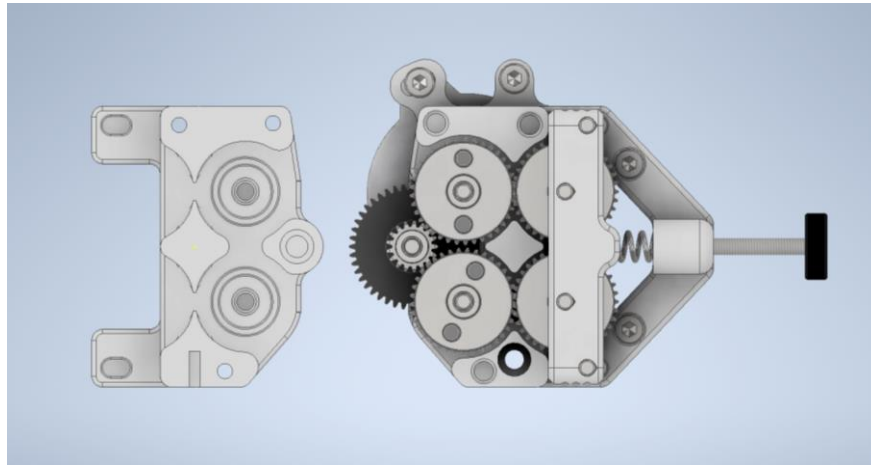


Abbildung 3.13: Neu konstruierter Extruder

Der vordere Deckel ist in Abbildung 3.13 demontiert und umgeklappt auf der linken Seite dargestellt.

Der Anpressdruck der Extruderräder kann mittels einer Rändelschraube eingestellt werden. Des Weiteren ist das Gehäuse so gestaltet, dass die Extruderräder von außen zugänglich sind. So können diese einfach, ohne den Extruder demontieren zu müssen, gereinigt werden. Außerdem ist die Filamentführung sowie die Aufnahme für den PTFE-Schlauch zwischen Extruder und Hotend vollständig in dem vorderen Deckel integriert. Sollte das Filament stecken bleiben und nicht einfach wieder entfernt werden können, kann der Deckel mit nur drei Schrauben gelöst und das Filament entnommen werden. Das Hotend kann dabei somit montiert bleiben. Dies verhindert, dass das Druckbett jedes Mal neu nivelliert werden muss, wenn das Filament stecken bleibt.

Im Gegensatz zu dem ursprünglichen Micro-Swiss-Extruder kann das Filament einfach in die obere Öffnung gesteckt werden und mit Drehen des Zahnrades einfach geladen werden. Bei dem Micro-Swiss-Extruder ist es teilweise schwer, beim Laden des Filaments das Loch des PTFE-Schlauches unterhalb der Extruderräder zu treffen.

Da sich der ursprüngliche Micro-Swiss-Extruder nicht als Halterung für einen neuen Extruder eignet und die originale Halterplatte des Druckers nicht mehr vorhanden ist, wird eine neue Halterplatte konstruiert (s. Abb. 3.14).

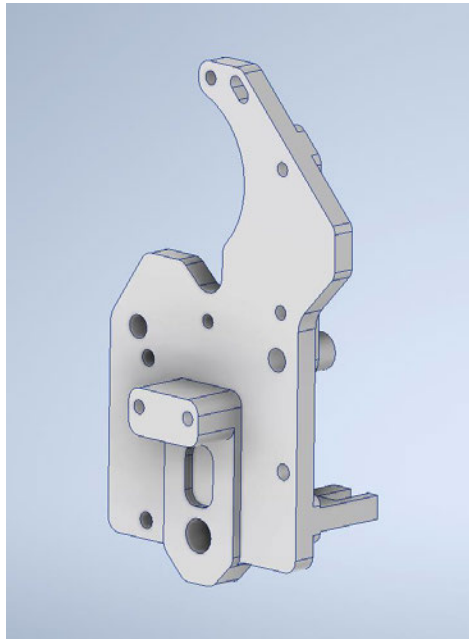


Abbildung 3.14: Halterplatte

Für die konstruierte Halterplatte wurde eine naturharte Aluminiumlegierung als Werkstoff gewählt, da dies einen guten Kompromiss zwischen der hier erforderlichen Steifigkeit und dem Gewicht bietet. Die Platte wurde aus einem EN AW-5083 Aluminiumblock gefräst.

Die originale Halterung des Bauteil- und Heatbreaklüfters wird an die neue Halterung angepasst. Dabei ist eine Befestigung für einen Bettnivellierungs-Sensor für eine mögliche Nachrüstung vorgesehen.

Der neu konstruierte Extruder im montieren Zustand ist Abbildung 3.15 zu entnehmen.

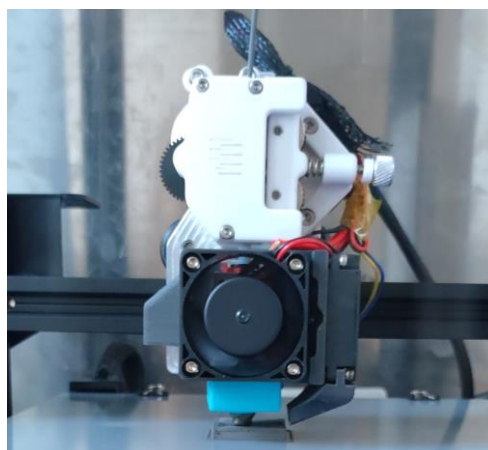


Abbildung 3.15: Montierter Extruder

Validierung der Verbesserungsansätze

Um zu untersuchen, ob und in welchem Maße der neu konstruierte Extruder tatsächlich eine Verbesserung gegenüber dem Micro-Swiss-Extruders darstellt, wurde eine Testvorrichtung angefertigt.

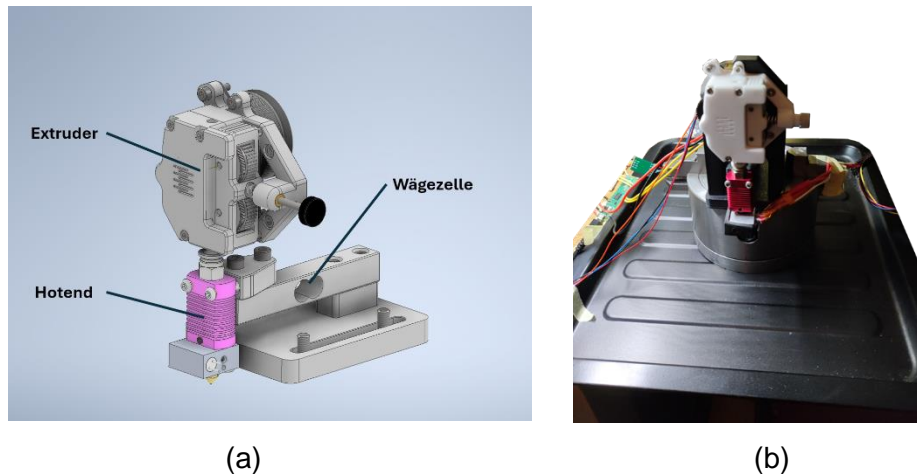


Abbildung 3.16: Extruder-Testvorrichtung CAD-Modell (a) und tatsächlich aufgebaut (b)

Mit dem in Abbildung 3.16 abgebildeten Teststand wird die benötigte und maximal mögliche Extrusionskraft ermittelt. Neben den Hauptkomponenten, welche in Abbildung 3.16 (a) dargestellt sind, sind weitere Komponenten erforderlich. Die für den Versuch verwendeten Bauteile und deren Zusammenhang ist in Abbildung 3.17 dargestellt.

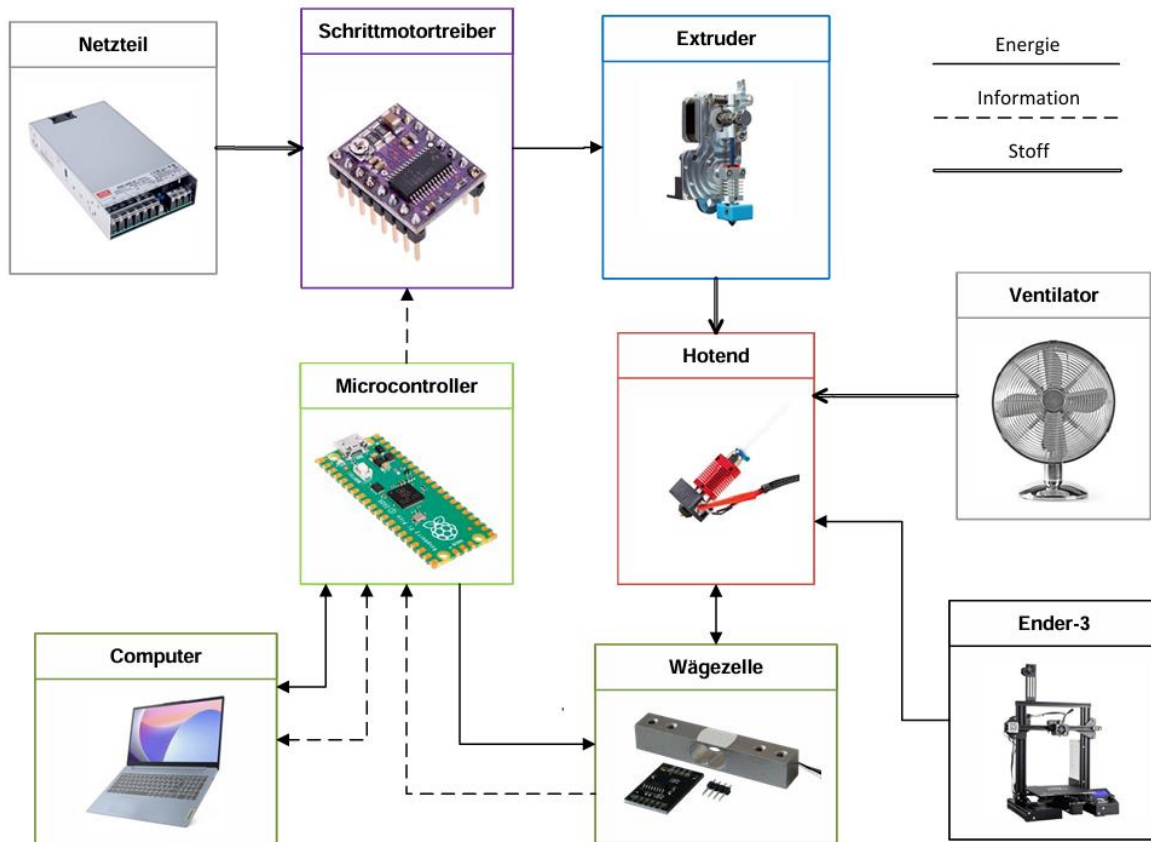


Abbildung 3.17: Extruder-Testvorrichtung Bauteile und deren Zusammenhang

Es wird ein Microcontroller verwendet, um einen Schrittmotortreiber anzusteuern. Dieser Schrittmotortreiber steuert den Schrittmotor des Extruders an. Der verwendete Microcontroller ist außerdem für das Auslesen und Speichern der Messdaten zuständig, die anschließend auf einen Computer übertragen werden. An dem Microcontroller ist eine Wägezelle angeschlossen. Mit der Wägezelle ist das Hotend mechanisch verbunden. Die gemessene Kraft die auf das Hotend wirkt wird im Folgenden als Extrusionskraft bezeichnet. Die Temperatursteuerung des Hotends wird von einem baugleichen zu dem in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Creality Ender-3 Drucker vorgenommen. Der Kühlkörper des Hotends wird mit einem Ventilator gekühlt.

Für den Versuch wird die Kraft über 15 Sekunden gemessen. Dabei wird eine konstante Extrusionsgeschwindigkeit eingestellt. Die Geschwindigkeit wird so gewählt, dass sie einem Druck mit einer 0,4 mm Düse, einer 0,2 mm Schichthöhe und einer Druckgeschwindigkeit von 55 mm/s entspricht. Für den Versuch wird zuerst die höchste betrachtete Temperatur eingestellt, dann wird ein Versuchsdurchgang durchgeführt, ohne diesen auszuwerten, danach werden drei weitere Versuchsdurchläufe nacheinander gestartet und aufgenommen. Danach wird die Temperatur auf die nächste Stufe abgesenkt und der Ablauf wiederholt. Sollte die Extrusion nicht mehr möglich sein, wird der Versuchsdurchgang, welcher sonst nicht verwendet wird, ausgewertet und das Filament entfernt und der Versuch für die Temperaturstufe weitere Male durchgeführt.

Um einen generellen Überblick über die Ergebnisse des Versuchs zu bekommen, sind ausgewählte Messungen in Abbildung 3.18 dargestellt.

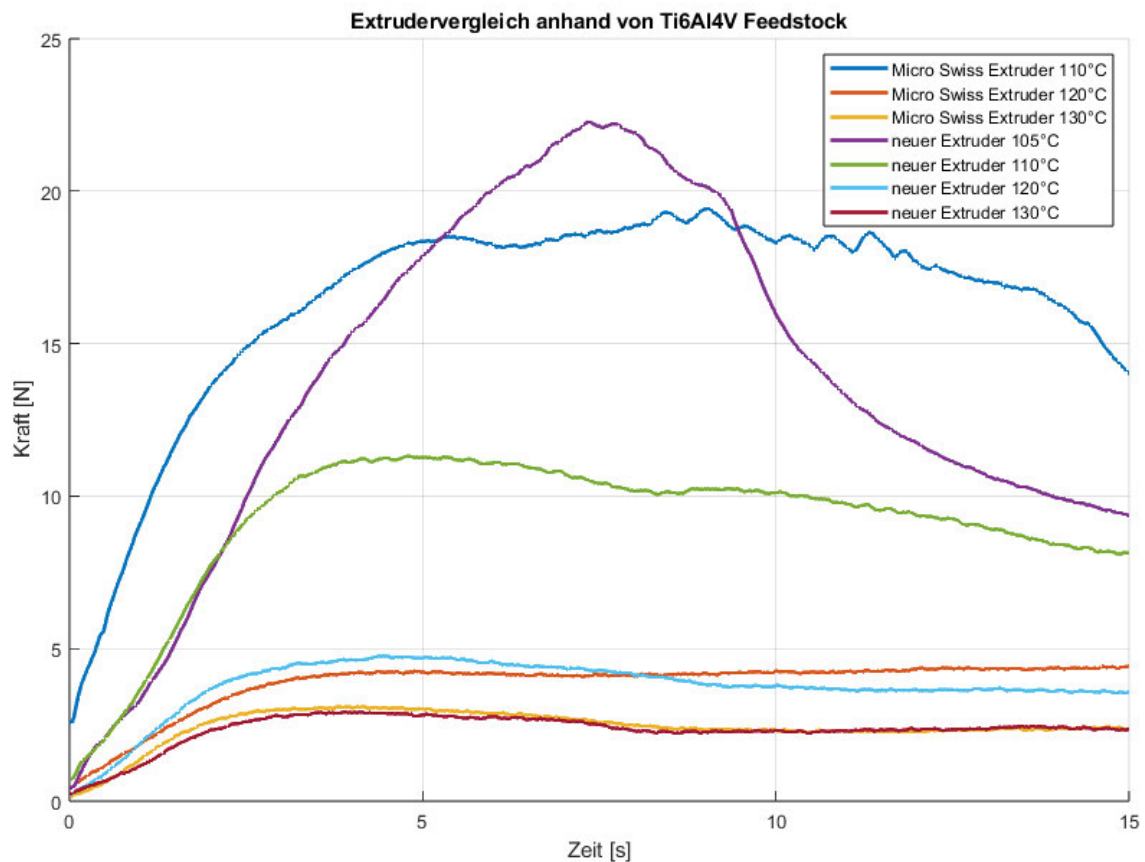


Abbildung 3.18: Extruder-Testvorrichtung Extrusionskraft

Mit dem Micro Swiss Extruder bei 110°C und bei dem neuen Extruder bei 105°C hat sich das Material an den Extruderrädern abgerieben. Bei jeder Messung, bei der die Extrusion ausgesetzt hat, konnte dies beobachtet werden.

Unabhängig von dem verwendeten Extruder kann beobachtet werden, dass die Kraft erst ansteigt, dann ein Maximum erreicht und wieder etwas abfällt und dann relativ stabil bleibt. Der zeitliche Verlauf ist dabei bei allen Messungen in etwa gleich. Es wird vermutet, dass dies damit zu tun hat, dass vor jedem Versuch das Material kurze Zeit nicht extrudiert wird. Dadurch könnte es auch etwas über der gewollten Schmelzzone erweichen und zu mehr Reibung und somit zu einer höheren erforderlichen Kraft führen.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Extrudern herzustellen, wurde aus den Messungen jeweils die sich nach acht Sekunden einstellende Extrusionskraft sowie die maximale Extrusionskraft ermittelt. Die Werte dafür wurden aus den drei pro Einstellung durchgeführten Versuchen gemittelt. Neben den Mittelwerten ist auch die Standardabweichung der jeweiligen Werte zwischen den drei Durchgängen errechnet. Die Ergebnisse sind Tabelle 9 und 10 zu entnehmen.

Micro Swiss Extruder				
Temperatur [°C]	einstellende Kraft [N]	Standard- abweichung	maximal Kraft [N]	Standard- abweichung
130	2,36	0,09	3,02	0,18
120	4,26	0,23	5,00	0,71
110	-	-	20,30	1,51
105	-	-	-	-

Tabelle 9: Micro Swiss Extruder Extrusionskraft

Neu konstruierter Extruder				
Temperatur [°C]	einstellende Kraft [N]	Standard- abweichung	maximal Kraft [N]	Standard- abweichung
130	2,26	0,06	2,90	0,08
120	3,74	0,02	4,79	0,07
110	9,43	0,20	11,33	1,36
105	-	-	23,01	1,70

Tabelle 10: Neu konstruierter Extruder Extrusionskraft

Interessant ist, dass sich die einstellende Extrusionskraft bei 130°C zwischen den Extrudern kaum unterscheidet, bei dem Micro Swiss Extruder bei 120°C dann schon um 14% höher ist. Bei 110°C bleibt die Extrusion aus und die maximale Extrusionskraft beträgt dann nahezu das Doppelte des neu konstruierten Extruders, welcher bei der Temperatur noch normal extrudiert. Auch die Standardabweichung ist bei dem Micro-Swiss-Extruder bei jeder Einstellung höher. Dies stärkt die in 3.1 aufgestellte Hypothese, dass das Filament in dem langen PTFE-Schlauch des Micro Swiss Extruder knickt und für eine höhere Reibung sorgt.

Die maximalsaufbringbare Extrusionskraft des neuen konstruierten Extruders ist um knapp 14% höher. Dies entspricht weniger als erwartet wurde. Betrachtet man die Abdrücke, welche die jeweiligen Extruder in dem Material hinterlassen, erkennt man deutliche Unterschiede (vgl. Abb. 3.19).

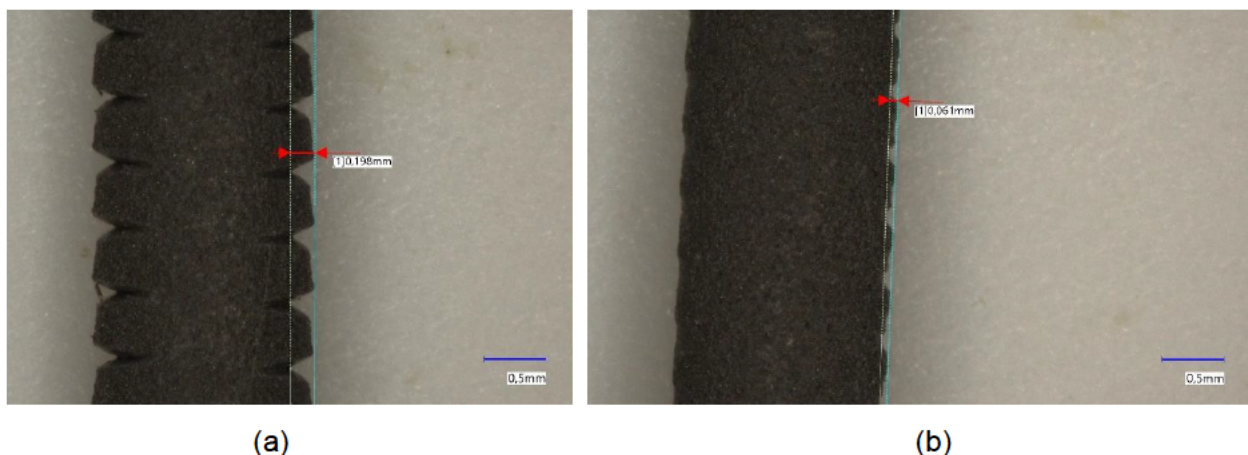


Abbildung 3.19: Extruder Eingriffstiefe Vergleich, (a) Micro Swiss, (b) neuer Extruder

Die Eingriffstiefe des neuen Extruders beträgt nur etwa 30% gegenüber dem Micro Swiss Extruder. Beachtet man, dass das Filament teilweise knickt und gestaucht wird, ist nicht klar, ob ein tiefer Eingriff, wie er bei dem Micro-Swiss-Extruder vorhanden ist, erstrebenswert ist, da dadurch das Filament geschwächt wird. Jedoch erscheint die Eingriffstiefe der bei dem neuen Extruder verwendeten Extruderräder zu gering. Es müsste weiter untersucht werden, welche Eingriffstiefe optimale Extrusionskraft und zuverlässig gewährt.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Eingriff bei dem neuen Extruder auf beiden Seiten nicht symmetrisch ist. Es wird vermutet, dass dies auf verdrehte oder qualitativ minderwertige Extruderräder zurückgeführt werden kann.

Mit dem Versuch lassen sich zwar einige Erkenntnisse gewinnen, jedoch werden dabei nicht alle Rahmenbedingungen, die bei einem tatsächlichen Druck vorhanden sind, berücksichtigt. Es wird keine Beschleunigung oder Rückzüge berücksichtigt. Des Weiteren wird bei dem Versuchsaufbau das Filament in die Luft extrudiert. Bei einem echten Druckvorgang wird das Filament auf die unterliegende Bahn gepresst, dadurch ist ein Gegendruck vorhanden. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Gegendruck ein großer Einfluss auf die erforderliche Extrusionskraft hat.

Um den neuen Extruder unter allen richtigen Bedingen zu testen, wird ein Probekörper gedruckt.

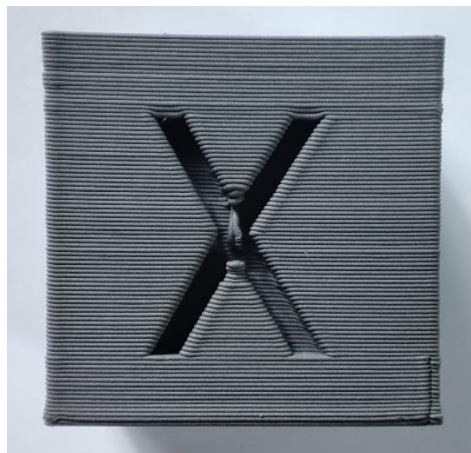


Abbildung 3.20: Grünteileprobe "Qualität" mit neuem Mainboard und Extruder

Ein Druck mit dem 120°C Fil-316L-F Feedstock ist mit dem neuen Extruder im Gegensatz zu dem Micro Swiss Extruder möglich.

4 Ermittlung eines Parametersatzes

Es soll ein erster Parametersatz ermittelt werden, mit dem Ti6Al4V-Feedstockfilament der Firma Element22 verarbeitet werden kann. Dabei wird sich als Hauptziel gesetzt, dass die mit dem ermittelten Parametersatz gedruckten Grünteile eine möglichst hohe Dichte aufweisen. Außerdem sollen Kenntnisse über den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Grünteildichte und deren Wechselwirkung untereinander gewonnen werden.

4.1 System Analyse

Um eine sinnvolle und zielgerichtete Versuchsplanung durchführen zu können, muss zuerst das zu untersuchende System analysiert werden. Dafür werden die Einflussgrößen, welche einen Einfluss auf die Zielgrößen haben, gesammelt (s. Abb. 4.1).

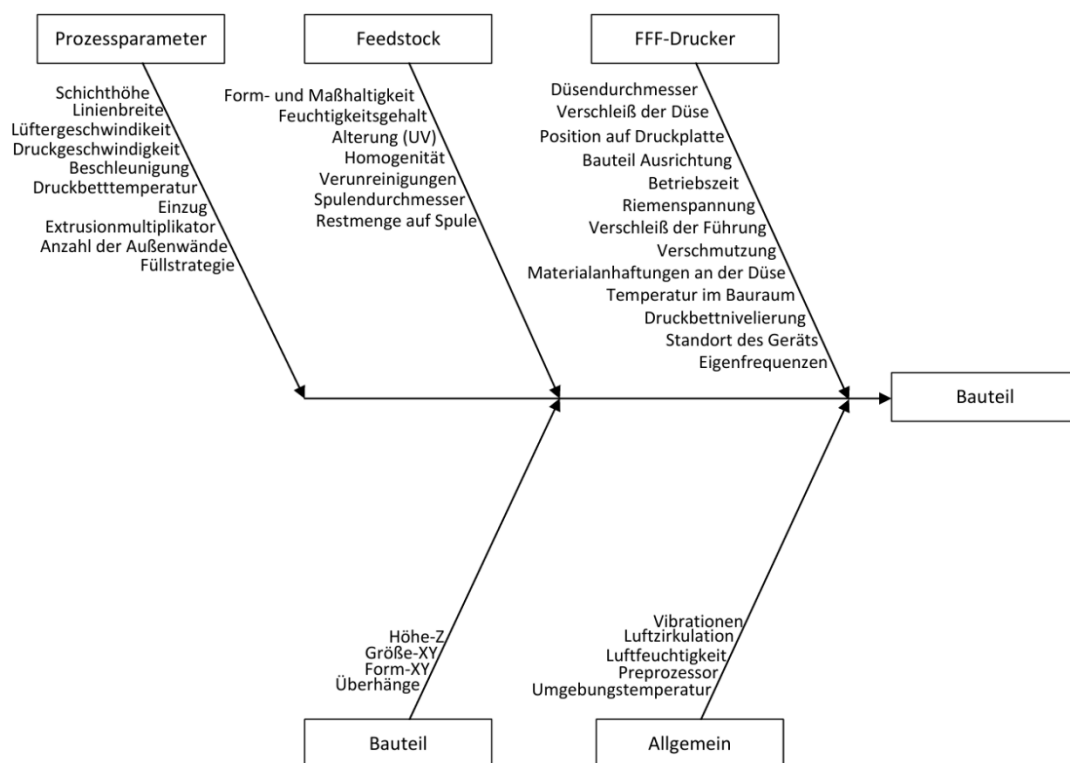


Abbildung 4.1: Ishikawa-Diagramm FFF

4.2 Wahl von Faktoren und Grenzen

Aus den in 4.1 gesammelten Einflussgrößen werden einige Faktoren ausgewählt, welche in der weiteren Versuchsplanung berücksichtigt werden. Um die Menge an zu fertigenden Proben in einem handhabbaren Rahmen zu halten, wurden vier Faktoren ausgewählt, von denen erwartet wird, dass diese den größten Einfluss auf die Grünteildichte haben.

Faktor	Einheit	Faktorstufen	Begründung
Schichthöhe	mm	0,08-0,24	Entspricht minimal empfohlener Schichthöhe des Druckers und für eine 0,4mm Düse relativ große Schichthöhe
Druckgeschwindigkeit	mm/s	30-80	Empfehlender Geschwindigkeitsbereich anderer Feedstocks (für das verwendete Feedstock sind keine Angaben vorhanden)
Drucktemperatur	°C	120-180	Empfohlener Temperaturbereich des Herstellers
Extrusionsmultiplikator	-	0,92-1,08	Basieren auf Erfahrungswerten

Tabelle 11: Gewählte Faktoren und Faktorstufen

Um abzuschätzen, ob alle Proben mit den Faktoren in allen Einstellungskombinationen tatsächlich gefertigt werden können, wird ein Probe mit als besonders kritisch zu bewertenden Einstellungen gefertigt.

Faktor	Einstellung
Schichthöhe	0,24 mm
Druckgeschwindigkeit	80 mm/s
Drucktemperatur	120 °C
Extrusionsmultiplikator	1,08

Tabelle 12: Vorversuch Parameter

Beim Drucken der Probe setzt die Extrusion vor Vollendung des Druckauftrages aus.

Bei erneutem Start des Druckes mit einer erhöhten Drucktemperatur von 125°C treten keine Probleme mehr auf. Für die weitere Versuchsplanung wird die minimale Drucktemperatur deshalb von 120°C auf 125°C erhöht.

4.3 Überprüfung der Messmittel und Wiederholbarkeit

Im Folgenden soll abgeschätzt werden, wie stark die Dichte von gedruckten Proben bei gleichen Prozessparametern streut. Aus dieser Streuung lässt sich ermitteln, wie groß die feststellbaren statisch signifikanten Unterschiede bezüglich der Grünteildichte sind.

4.3.1 Dichtemessung

Die Dichtemessung der Grünteilproben wird an Anlehnung an DIN3369 durchgeführt. Bedingt durch Einschränkungen an dem zur Verfügung stehenden Equipment wird jedoch von der Norm in einigen Punkten abgewichen.

Die DIN3369 sieht vor, die zu messenden Proben auf einem Gestell oder Waagschale zu platzieren und das Gewicht zu messen. Anschließend soll die Haltevorrichtung samt Probe in ein Wasserbehältnis abgelassen und der Auftrieb gemessen werden.

Des Weiteren soll nach DIN3369 eine Präzisionswaage verwendet werden, die das Ablesen von $\pm 0,1\text{mg}$ ermöglicht.

Die für diese Arbeit zur Verfügung stehende Waage ermöglicht das Ablesen $\pm 1\text{mg}$ und erfüllt somit nicht die Anforderungen der DIN3369. Des Weiteren sind die in der DIN3369 beschriebene Gestelle mit dem vorhandenen Equipment nicht ohne weiters umsetzbar. Die Halterung wird ebenfalls abweichend von der Norm realisiert. Außerdem wird dem destillierten Wasser kein Netzmittel beigelegt [20].

Der verwendete Aufbau für die Dichtemessung ist Abbildung 4.2 zu entnehmen.



Abbildung 4.2: Dichtemessung Versuchsaufbau

Die zu vermessenden Proben werden zuerst alle an der Luft gewogen. Anschließend wird ein Behältnis mit destilliertem Wasser auf die Waage gestellt (vgl. Abb. 4.2). Um die Proben in dem Behältnis zu halten, wird ein gebogener Draht verwendet. Dieser wird erst ohne Probe in das Wasser abgelassen, anschließend wird die Waage genullt. Dann wird der Draht entnommen und die Probe auf diesen gelegt und erneut in das Wasser abgelassen und der Wert auf der Waage abgelesen.

Da teilweise stark von der DIN3369 abgewichen wird, soll ermittelt werden, ob die Messwerte plausibel und wie reproduzierbar die Messergebnisse sind.

Dafür wird zunächst bestimmt, ob die Messergebnisse normalverteilt sind. Um dies zu überprüfen, wurde ein einfacher Quader mit den soll-Maßen 20x20x5 mm aus dem Titan-

Feedstock gedruckt. Da beobachtet werden kann, dass das Trockengewicht sich bei erneutem Wiegen desselben Probekörpers deutlich weniger als der gemessene Auftrieb unterscheidet, wurde für diese Untersuchung nur die Messung des Auftriebs berücksichtigt.

Von der Probe wird mit dem zuvor beschriebenen Versuchsaufbau 25-mal der Auftrieb gemessen. Die Messwerte sind in voller Einzelheit dem Anhang B.1 zu entnehmen.

Um eine statistisch valide Aussage über die Verteilung der Messwerte zu treffen, werden die Messwerte in einem Diagramm eingetragen. Die Gerade stellt eine Normalverteilung da, liegen die Messwerte auf der geraden sind diese Normalverteilt.

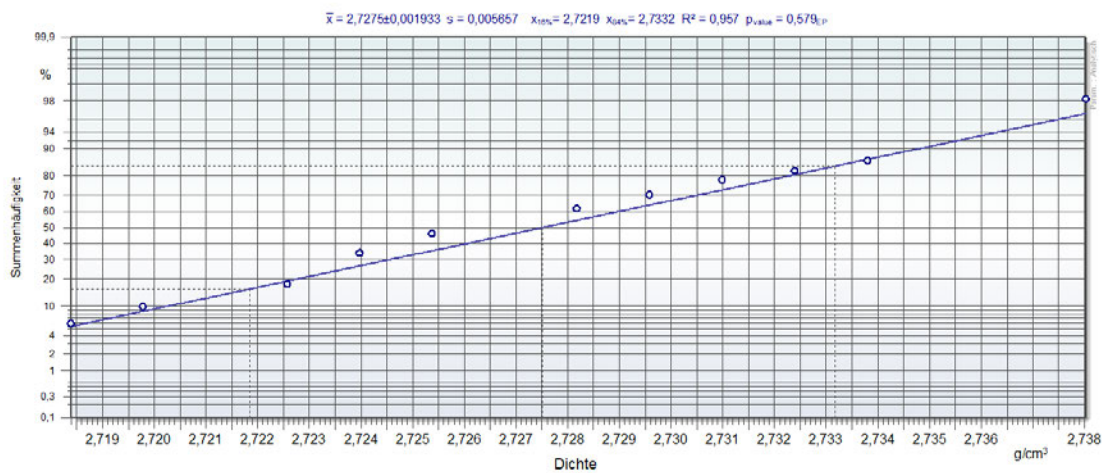


Abbildung 4.3: Dichtemessung Verteilungstest

Die Messwerte liegen relativ genau auf der Geraden, dies bedeutet, dass es sich vermutlich um normalverteilte Werte handelt. Auch ein Epps-Pulley Verteilungstest zur Überprüfung, ob es sich um eine Normalverteilung handelt, bestätigt die Hypothese mit hoher Wahrscheinlichkeit. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,957 und einem p-Wert von 0,579 ist eine Normalverteilung wahrscheinlich.

Es wird festgelegt, dass die Dichte der Proben mit einem Vertrauensbereich von etwa $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ ermittelt werden sollen. Des Weiteren wurde festgelegt, dass die Messung jeder einzelnen Probe maximal dreimal durchgeführt werden soll, um den Zeitaufwand in einem handhabbaren Rahmen zu halten.

Um zu überprüfen, wie oft die Dichtemessung für jede Probe wiederholt werden muss, um die festgelegte Toleranz einzuhalten, wird Gleichung 2.5 verwendet. Die verwendeten eingesetzten Werte sind aus den Daten im Anhang B.1 bestimmt.

$$n \geq \left(\frac{t \cdot s}{E} \right)^2 = \left(\frac{2,086 \cdot 0,00566}{0,01} \right)^2 = 1,36$$

Es werden mindestens jeweils zwei Messungen pro Probe benötigt, um die geforderte Toleranz einzuhalten. Um genauere Messergebnisse zu erhalten, werden im Folgenden dennoch jeweils drei Messungen durchgeführt.

Der verwendete Haltedraht könnte zu abweichenden Messwerten führen.

Der verwendete Draht hat einen Durchmesser von 1 mm. Beim Ablassen der Probe in das Wassergefäß wird Wasser verdrängt, wodurch der Wasserspiegel in dem Gefäß ansteigt. Durch den ansteigenden Wasserspiegel wird ebenfalls mehr Wasser von dem Haltedraht verdrängt und somit die Messung verfälscht. Es muss überprüft werden, ob dieser Effekt eine signifikante Größe annimmt.

Der Durchmesser des verwendeten Wassergefäßes beträgt ungefähr 80 mm. Die in diesem Fall untersuchten Proben haben die Abmaße 20x20x5 mm. Durch Gleichstellung des Volumens der Probe und dem Querschnitt des Behältnisses kann der Anstieg h_{wasser} des Wassers berechnet werden.

$$V_{\text{probe}} = V_{\text{behälter}}$$

$$(20\text{mm})^2 \cdot 5\text{mm} = \left(\frac{80\text{mm}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot h_{\text{wasser}}$$

$$h_{\text{wasser}} = \frac{(20\text{mm})^2 \cdot 5\text{mm}}{\left(\frac{80\text{mm}}{2}\right)^2 \cdot \pi} = 0,40\text{mm}$$

Das Wasser steigt beim Eintauchen der Probe um 0,4 mm an. Aus dem berechneten Anstieg kann nun berechnet werden, wie viel zusätzliches Volumen von dem Haltedraht verdrängt wird.

$$V_{\text{draht}} = \left(\frac{1\text{mm}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot h_{\text{wasser}} = 0,31\text{mm}^3$$

Unter Berücksichtigung der Dichte des Wassers kann die zu erwartende messbare Gewichtszunahme errechnet werden.

$$\Delta m = V_{\text{draht}} \cdot \rho_{\text{wasser}} \approx 0,00031\text{cm}^3 \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0,31\text{mg}$$

Die zu erwartende Gewichtszunahme beträgt nur 0,31mg und ist somit mit der vorhandenen Waage nicht messbar und ist somit vernachlässigbar gering.

Da die Dichte als mit Abstand wichtigstes Bewertungskriterium für die zu ermittelnden Parameter gehandhabt wird, wird an dieser Stelle auf die Untersuchung weiterer Messmittel verzichtet.

4.3.2 Reproduzierbarkeit der Grünteildichte

Neben dem Messaufbau der Dichtemessung wird auch überprüft, wie reproduzierbar die Proben hinsichtlich der Dichte mit dem modifizierten Drucker gefertigt werden können. Mit dieser Erkenntnis kann dann im Weiteren bestimmt werden, wie viele Wiederholungen der einzelnen Probekörper bei der Versuchsplanung vorgesehen werden müssen.

Um die Reproduzierbarkeit in Bezug auf die Dichte abschätzen zu können, werden fünf Proben gedruckt. Die Proben werden mit denselben Einstellungen unter möglichst gleichen Randbedingungen gefertigt.

Es wurden dafür Parameter im Mittelfeld des zu betrachtenden Faktorraums gewählt (s. Tab. 13)

Faktor	Einstellung
Schichthöhe	0,16mm
Druckgeschwindigkeit	55 mm/s
Drucktemperatur	150 °C
Extrusionsmultiplikator	1

Tabelle 13: Parameter für Reproduzierbarkeitsuntersuchung

Für diese Untersuchung wurden wie auch bei der Untersuchung der Dichtemessung Probekörper mit Quaderform und den Abmaßen 20x20x5 mm gefertigt.

Für die Bestimmung der Streuung wurden die Dichte der jeweiligen Probekörper jeweils dreimal gemessen. Die daraus entstandenen Messwerte sind in Tabelle 14 festgehalten.

Nr.	Gewicht [g]	gemittelter Auftrieb [g]	Dichte [g/cm ³]
1	5,318	1,948	2,725
2	5,323	1,941	2,736
3	5,255	1,945	2,697
4	5,263	1,952	2,691
5	5,244	1,956	2,676
Standardabweichung:			0,025

Tabelle 14: Messergebnisse Reproduzierbarkeitsuntersuchung

Aus den Messwerten ergibt sich eine Standardabweichung von 0,025 g/cm³.

4.4 Festlegung der Probenform

Für den Versuchsplan soll eine sinnvolle Probengeometrie gewählt werden. Es wird angenommen, dass die zu erkennenden Unterschiede in der Dichte proportional zu dem Volumen

ansteigen. Ausgenommen von dieser Annahme sind die Einflüsse der Druckgeschwindigkeit. Da wie jedes Mechanische System auch der vorhandene Drucker eine vorgegebene Geschwindigkeit nicht sofort erreicht, sondern immer eine Zeit zum Beschleunigen braucht, wird eine verhältnismäßig flacher Probekörper gewählt. In dem verwendeten Slicer ist in dem Standardprofil für den benutzen Ender-3 Drucker eine Beschleunigung von 500 mm/s^2 voreingestellt. Für die Voruntersuchung wurden Quader mit den Abmaßen $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}$ verwendet. Die Obergrenze für die Druckgeschwindigkeit wurde auf 80 mm/s festgelegt. Betrachtet man die maximale Druckgeschwindigkeit und die Beschleunigung des Druckes lässt sich die Strecke berechnen, welche der Drucker benötigt, um die volle Geschwindigkeit zu erreichen.

Für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen ohne Anfangsgeschwindigkeit gilt der in Gleichung 4.1 dargestellte Zusammenhang [21].

$$v^2 = 2 \cdot a \cdot x \quad (4.1)$$

Durch Umstellen der Gleichung erhält man Gleichung 4.2.

$$x = \frac{v^2}{2 \cdot a} \quad (4.2)$$

$$x = \frac{\left(80 \frac{\text{mm}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 500 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}} = 6,4 \text{ mm}$$

Es ergibt sich eine Strecke von $6,4 \text{ mm}$. Berücksichtigt man, dass das Füllmuster den Quader diagonal zu den Wänden füllt, ergibt sich somit ein Rand von $6,4 \text{ mm}$ Breite der nicht mit der eingestellten Druckgeschwindigkeit gedruckt wird.

Bei einem Abmaß in XY-Ebene von $20 \times 20 \text{ mm}$ werden im schlimmsten Fall unter Vernachlässigung der Wandschleifen nur knapp 13% des gesamten Volumens mit der vorgegebenen Druckgeschwindigkeit gedruckt. Dies wird als zu gering eingestuft. Es wird für den weiteren Versuch ein Quader mit den Abmaßen $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}$ gewählt. Bei dieser Größe werden bei der höchsten Geschwindigkeitsstufe immerhin knapp 24% mit der vorgegebenen Geschwindigkeit gedruckt. Des Weiteren bietet die Größe einen guten Kompromiss aus Materialverbrauch und benötigter Druckzeit.

4.5 Aufstellung des Versuchsplans

Es werden nicht lineare Zusammenhänge erwartet. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass Wechselwirkungen zwischen den gewählten Faktoren vorhanden sind, außerdem soll die Möglichkeit bestehen, den Versuchsplan nachträglich um weitere Proben zu erweitern. Aus diesen Gründen wird sich dafür entschieden, einen D-Optimalen Versuchsplan zu verwenden. Es wird erwartet, dass ein Quadratisches-Modell die Realität ausreichend gut abbilden kann.

Mit Gleichung 2.7 lässt sich die minimal benötigte Anzahl an Proben bestimmen.

$$n = p + p + p \cdot \frac{p-1}{2} + 1$$

$$n = 4 + 4 + 4 \cdot \frac{4-1}{2} + 1 = 15$$

Mit den vier ausgewählten Faktoren müssen mindestens 15 Proben angefertigt werden.

Neben den 15 mindestens benötigten Proben werden drei weitere Zusatzversuche durchgeführt, um die Qualität des Modells bei der Auswertung besser beurteilen zu können.

Des Weiteren muss ermittelt werden, ob oder wie viele Wiederholungen durchgeführt werden müssen.

Es wird festgelegt, dass mindestens Unterschiede von 2% der Dichte erkannt werden sollen. Die genaue Dichte des Ti6Al4V-Feedstocks ist nicht mit absoluter Sicherheit bekannt, wird aber auf etwa 3,0g/cm³ geschätzt. Unter der Annahme, dass die Standardabweichung der Dichte von gedruckten Proben, welche mit denselben Prozessparametern gefertigt werden, proportional mit dem Volumen des betrachteten Probekörpers skalieren, wird die Standardabweichung mit Berücksichtigung der Ergebnisse der Voruntersuchung aus Kapitel 4.3 auf etwa 0,04 g/cm³ geschätzt.

Mit Gleichung 2.6 kann berechnet werden, wie viele Wiederholungen notwendig sind.

$$n_w \approx \frac{60}{n_{plan}} \cdot \left(\frac{s}{\Delta}\right)^2 - 1 = \frac{60}{18} \cdot \left(\frac{0,04}{0,06}\right)^2 - 1 = 0,48$$

Es wird somit eine Wiederholung benötigt. Es müssen 36 Probekörper gefertigt werden. Die Reihenfolge der Versuche ist randomisiert, um den Effekt von möglicherweise auftretenden Störfaktoren zu minimieren. Auf eine Blockbildung wurde verzichtet, da dies nicht mit den zeitlichen Rahmenbedingungen dieser Arbeit sinnvoll durchführbar wäre. Der Versuchsplan wird mit der Statistiksoftware Visual XSel aufgestellt. Der aufgestellte Versuchsplan ist dem Anhang B.2 zu entnehmen.

Um abzuschätzen, ob der aufgestellte Versuchsplan mit den zur Verfügung stehenden zeitlichen und Material Ressourcen durchgeführt werden kann, wird der Zeit- und Materialbedarf geschätzt. Dafür wird ein Blick auf die Druckzeit einer Probe mit mittlerer Einstellung herangezogen. Die im Slicer angegebene Druckzeit für eine Probe mit der in Kapitel 4.4 festgelegten Geometrie und mittleren Einstellung aus den in 4.2 festgelegten Grenzen beträgt 21 Minuten. Für die Schätzung der gesamten Druckzeit wird angenommen, dass sich die erwartete längere Druckzeit von Proben mit geringerer Schichthöhe und Druckgeschwindigkeit durch die Proben mit Einstellungen an den entgegengesetzten Extrempunkten ausgleichen.

Der Materialbedarf wird aus der geschätzten Dichte des Feedstocks und dem soll-Volumen des Probekörpers überschlagen.

Der unter den beschriebenen Annahmen ermittelten überschlägige Ressourcenbedarf ist in Tabelle 15 festgehalten.

Zeitbedarf	12,6 h
Materialbedarf	338 g

Tabelle 15: Ressourcenbedarf für Versuchsplan

Zur Verfügung stehen etwa 800g Ti6Al4V Feedstockfilament, somit ist genug Material für die Ausführung des Versuchsplans und mögliche weitere Versuche vorhanden.

Auch die benötigte Druckzeit wird als machbar eingestuft.

4.6 Durchführung

Entsprechend des aufgestellten Versuchsplans werden die Proben gefertigt. Vorab wurde das Druckbett nivelliert. Damit sich das Druckbett während der Ausführung des Versuchsplans nicht verstellt, wurden die Einstellmutter des Druckbetts mit Kontermuttern versehen.

Des Weiteren wird davon abgesehen, mehrere Proben gleichzeitig in einem Druckjob zu fertigen, da davon ausgegangen wird, dass die Position der Proben auf dem Druckbett einen Einfluss auf das Ergebnis haben könnte. So kann beobachtet werden, dass die X-Achse des Druckers in positive Richtung etwas durchhängt, des Weiteren wurde in Kapitel 3.2.1 gemessen, dass das Druckbett mit zunehmender Y-Achse-Position mehr schwingt.

Aus den genannten Bedenken werden alle Proben einzelnen nacheinander an derselben Druckbettposition mit der gleichen Ausrichtung gefertigt.

Um weitere Abweichungen zu minimieren, wird das Druckbett nach jeder Entnahme der Probe mit Isopropanol gereinigt. Außerdem wird nach jedem Druckjob die Düse von Materialanhaftungen befreit.

Unmittelbar nach Beendigung jedes Druckjobs wird außerdem die Lufttemperatur im Innenraum des Druckergehäuses gemessen, um mögliche Einflüsse der Temperatur bei Bedarf untersuchen zu können.

Für die Auswertung des Versuchsplans wird nach Vollendung aller Proben die Dichte mit dem in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Verfahren gemessen. Außerdem wird die Oberflächenrauheit der Oberseite senkrecht zu den Bahnlinien mit einem Rauheitsmessgerät gemessen. Des Weiteren werden die Abmaße der Proben in XYZ-Richtung gemessen. Es hat sich gezeigt, dass einige Parameterkombinationen Anhaftungen an den Seitenwänden aufweisen (s. Abb. 4.4).

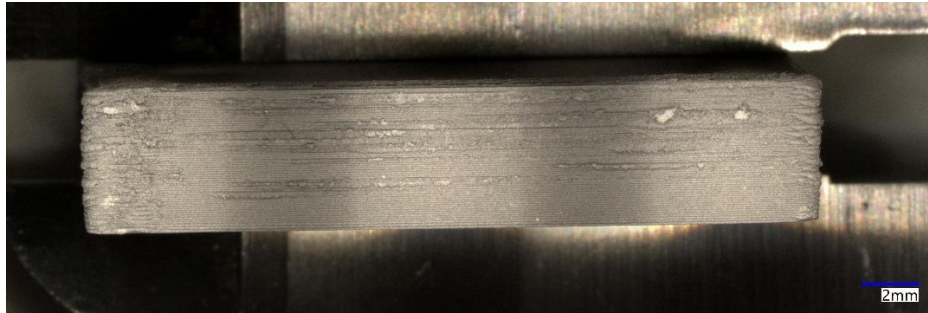


Abbildung 4.4: Grünteileprobe mit Anhaftungen an Seitenwand

Um dies in die Auswertung mit einfließen zu lassen, wird die Oberfläche der Seitenwände in Hinsicht auf das Vorhandensein dieser Anhaftungen optisch von 0 (keine Anhaftungen) bis 2 (starke Anhaftungen) bewertet. Auch die pro Probe benötigte Druckzeit wird mit aufgenommen.

4.7 Auswertung

Im Folgendem werden die aus dem Versuchsplan erhobenen Daten ausgewertet. Der ausgewertete Versuchsplan und weitere Unterlagen sind dem Anhang B zu entnehmen.

4.7.1 Analyse der Daten

Die Auswertung des Versuchsplans erfolgt, wie auch schon die Erstellung des Selben, mit Hilfe der Software Visual XSel.

Allgemeiner Überblick

Es wird zunächst nur die Grünteildichte als Zielgröße betrachtet.

Um einen ersten Überblick zu bekommen, wird zuerst ein Blick auf das Kurvendiagramm geworfen. Die Kurvenverläufe sind aufgrund der vorhandenen Wechselwirkungen von den betrachteten Faktor Stufen abhängig. In Abbildung 4.5 werden die Effekte ausgehend von Visual XSel errechneten optimalen Werte der Faktoren für eine maximale Dichte des Grünteils

angezeigt.

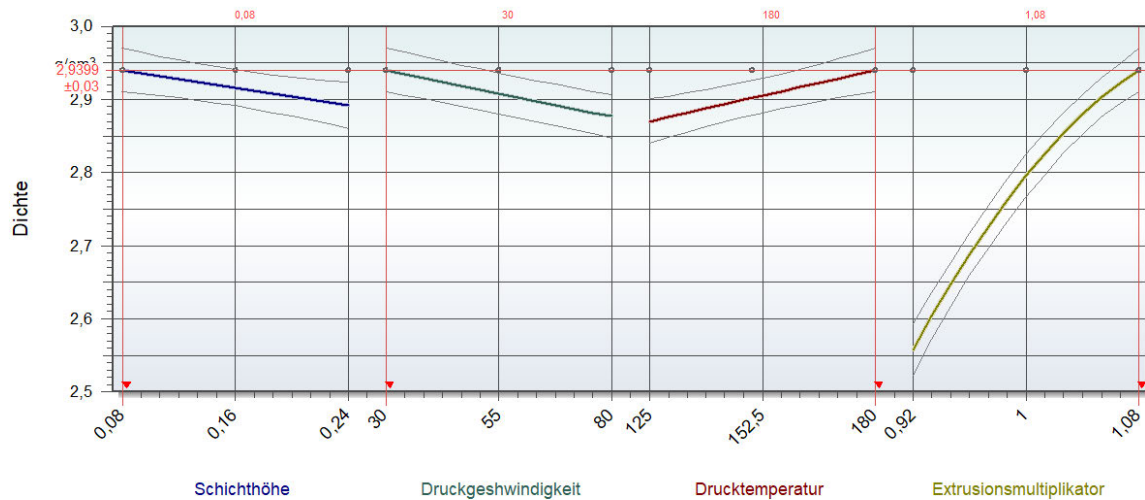


Abbildung 4.5: Kurvendiagramm Dichte

Es zeigt sich, dass der Verlauf des Extrusionsmultiplikators nahezu einer Geraden entspricht. Dies weicht von der zu erwartenden Wirkung ab.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Dichte mit höherem Extrusionsmultiplikator bis zu einem gewissen Punkt ansteigt, jedoch ist irgendwann eine relative Dichte des Grünteils von nahezu 100% erreicht, ab dann entspricht die Dichte des Grünteils die des Feedstocks. Unter Betrachtung dieser Annahme wird vermutet, dass die Obergrenze des Extrusionsmultiplikators zu gering gewählt wurde.

Dem vorhandenen Versuchsplan werden deswegen noch zwei weitere Proben mit einem Extrusionsmultiplikator von 1,16 angefügt. Im Folgenden wird nur das modifizierte Modell betrachtet. Aufgrund der Fülle an ermittelten Informationen wird nur auf ausgewählte Ergebnisse eingegangen.

Die Ergänzung um die weitere Stufe des Extrusionsmultiplikators hat zur Folge, dass die Auswertung für selbigen kubisch gewählt werden kann. Neben der Dichte als einzige Zielgröße werden im Folgenden ebenfalls die in Kapitel 4.6 aufgezählten Zielgrößen berücksichtigt.

Bei erneuter Betrachtung des Kurvendiagramms kann jetzt ein deutliches Abflachen des Verlaufs bei zunehmendem Wert des Extrusionsmultiplikator erkannt werden (vgl. Abb 4.6).

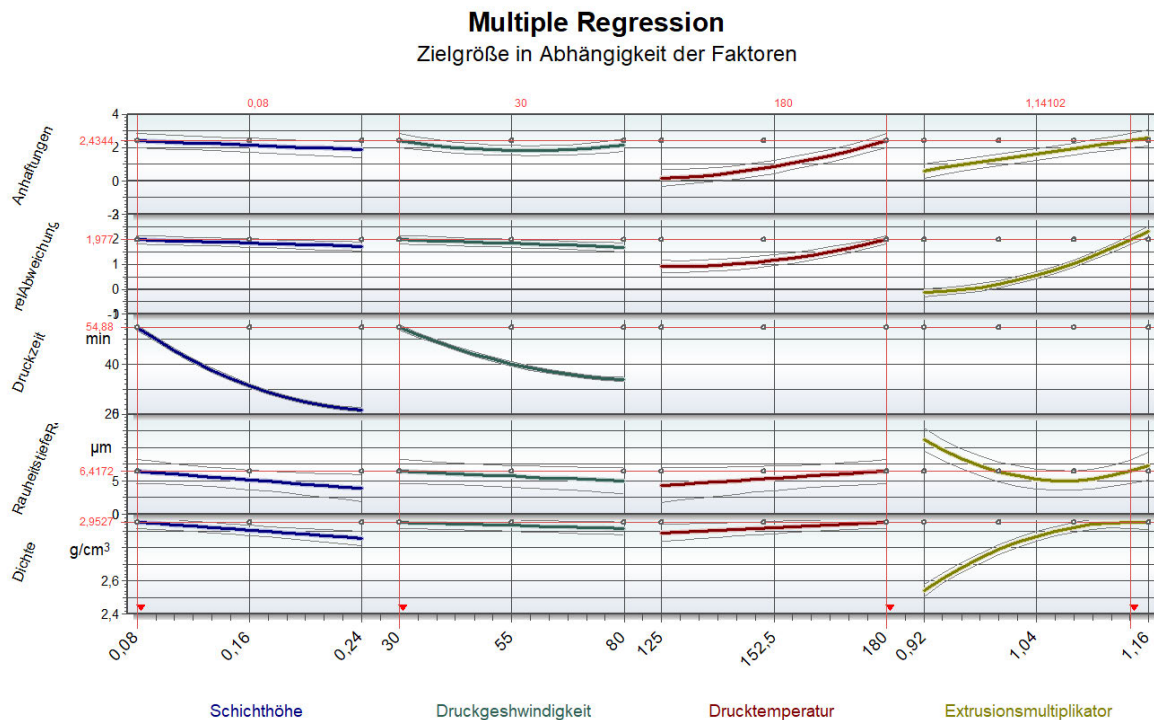


Abbildung 4.6: Kurvendiagramm Versuchspanauswertung

Die Oberflächenrauheit der Oberseite kann ebenfalls als Anhaltspunkt für einen optimalen Extrusionsmultiplikator herangezogen werden. Dabei ist zu erwarten, dass die Oberflächenrauheit bei starker Unterextrusion durch das Entstehen von Lücken zwischen den gedruckten Bahnen sehr hoch ist. Bei einem optimalem Extrusionsmultiplikator ist zu erwarten, dass die Rauheit in der Theorie gegen Null geht und dann bei Überextrusion durch Material, was sich neben der Düse hochdrückt, wieder ansteigt. Der Verlauf im Kurvendiagramm zeigt einen solchen Verlauf.

Es ist zu beobachten, dass Anhaftungen, welche minimiert werden sollen, den Verläufen der Dichte, welche maximiert werden sollen, relativ gleichen. Es können somit keine Parametersätze ermittelt werden, mit denen die höchstmögliche Dichte und eine saubere Oberfläche erreicht wird.

In dem Diagramm ist auf der Y-Achse die jeweilige Zielgröße aufgetragen und auf der X-Achse jeweilige Faktor, entsprechend zeigt die Steigung somit an, wie stark der Faktor die Zielgröße beeinflusst. Es ist zu erkennen, dass der Extrusionsmultiplikator auf alle Zielgrößen bis auf die Druckzeit den größten Einfluss hat.

Um die Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren darzustellen, wird ein Blick auf das Wechselwirkungsdiagramm geworfen.

Multiple Regression Wechselwirkung Diagramme

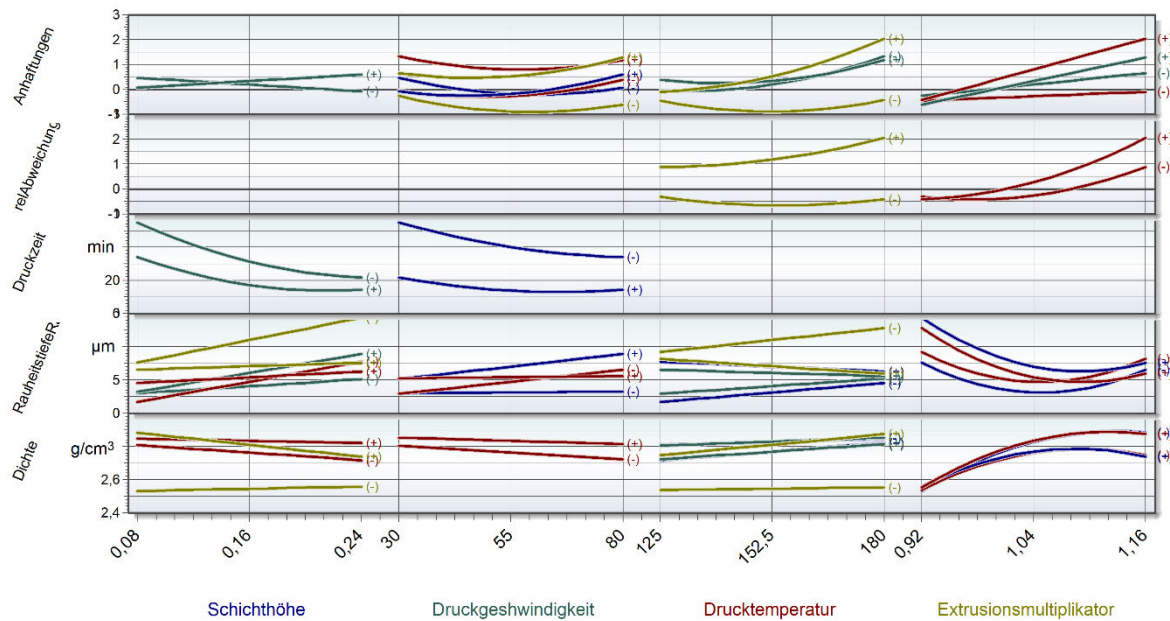


Abbildung 4.7: Wechselwirkungsdiagramm

Eine interessante Wechselwirkung besteht zwischen Schichthöhe und Extrusionsmultiplikator in Bezug auf die Oberflächenrauheit. Die Schichthöhe hat bei einem geringen Extrusionsmultiplikator einen großen Einfluss auf die Oberflächenrauheit. Der Zusammenhang zwischen Oberflächenrauheit und Schichthöhe verläuft linear. Dies ist damit zu erklären, dass bei der starken Unterextrusion Lücken zwischen den abgelegten Strängen entstehen. Somit misst das Rauheitsmessgerät die Schicht unter der obersten Schicht. Entsprechend ist der Ausschlag der Messung beziehungsweise die gemessene Oberflächenrauheit direkt von der Schichthöhe abhängig. Ist der Extrusionsmultiplikator hoch genug, sind die Lücken geschlossen und die Schichthöhe spielt kaum noch eine Rolle (vgl. Abb. 4.8).

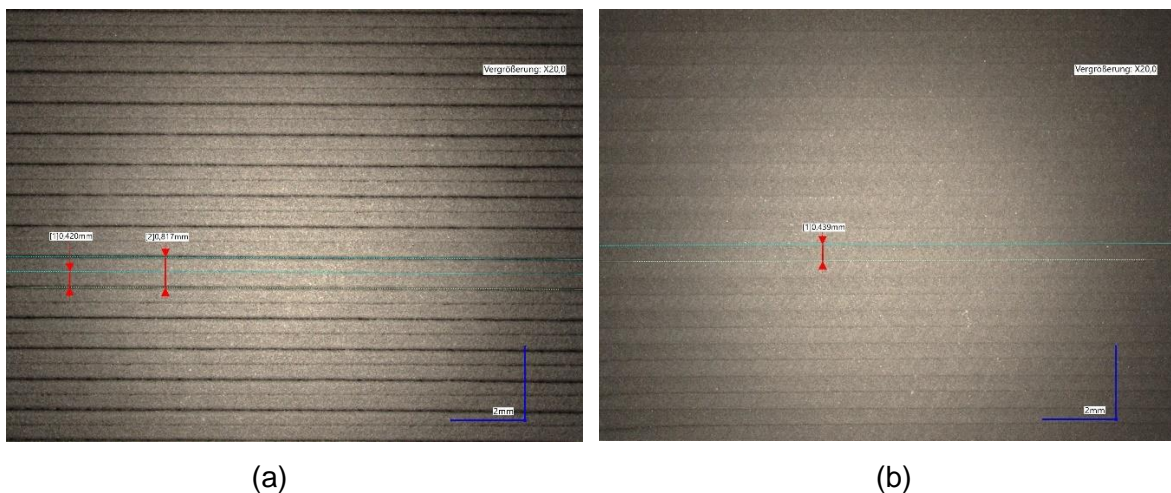


Abbildung 4.8: Oberfläche mit Unterextrusion (a) und mit normaler Extrusion (b)

Parameter Optimierung

Aus den mathematischen Zusammenhängen lassen sich für gewählte Zielgrößen und Kombinationen dieser optimale Parameter errechnen.

Da die Optimierungsfunktion in Visual XSel teilweise bei mehrfacher Durchführung der Optimierung unterschiedliche Parametersätze vorgeschlagen hat und die ermittelten Parametersätze teilweise mit den einstellbaren Gewichtungen keine sinnvollen Kompromisse geliefert hat, wurde für die Ermittlung optimaler Parametersätze ein einfaches Matlabskript zur Lösung des Gleichungssystems benutzt.

Es werden unterschiedliche Zielsetzungen festgelegt (s. Tab. 16).

Bezeichnung	Zielsetzung
Dichte	Optimierung für die größtmögliche Dichte
Dichte ohne Anhaftungen	Optimierung für die größtmögliche Dichte, ohne dass Anhaftungen auftreten
Dichte Druckzeit	Optimierung für die größtmögliche Dichte, ohne dass Anhaftungen auftreten mit einer möglichst kurzen Druckzeit
Kompromiss	Optimierung der Dichte, Oberflächenrauheit Druckzeit, ohne dass Anhaftungen entstehen

Tabelle 16: Zielsetzung für Parametersätze

Die relative Abweichung wurde für die Optimierung außen vorgegeben. Bei Bedarf kann das zu druckende Bauteil mit im OrcaSlicer verfügbaren Compensation-Funktionen angepasst werden, um exakte Abmaße zu bekommen. Entsprechend ist eine Optimierung der Parameter hinsichtlich dieser nicht zielführend.

Die aus der Optimierung hervorgegangenen Parametersätze sind in Tabelle 17 aufgelistet.

Bezeichnung	Schichthöhe [mm]	Druckgeschwindigkeit [mm/s]	Drucktemperatur [°C]	EM [-]
Dichte	0,08	30	180	1,141
Dichte ohne Anhaftungen	0,08	30	144	1,117
Dichte Druckzeit	0,16	51	163	1,093
Kompromiss	0,22	64	174	1,078

Tabelle 17: optimierte Parametersätze

Mit den Parametersätzen werden folgende Werte der Zielgrößen erwartet (s. Tab. 18)

Bezeichnung	Dichte [g/cm ³]	Rauheitstiefe Ra [μm]	Druckzeit [min]	relative Abweichung [%]	Anhaftungen [-]
Dichte	2,95	6,4	55	1,98	2,4
Dichte ohne Anhaftungen	2,91	3,8	55	0,67	0,5
Dichte Druckzeit	2,86	4,8	21	0,48	0,5
Kompromiss	2,83	5,58	13	0,39	1,0

Tabelle 18: Erwartete Werte der Zielgrößen

4.7.2 Validierung der Parametersätze

Die in dem vorherigen Kapitel ermittelten Parametersätze werden im Folgenden getestet. Mit jedem Parametersatz wurden jeweils drei Proben gedruckt. Für den Parametersatz „Kompromiss“ wurde abweichend dazu nur eine Probe gedruckt, da dieser wenig Mehrwert bietet. Bei Auswertung der Testdrucke wird nur auf die Dichte und Anhaftungen eingegangen, da diese die wichtigsten Ziele der Optimierung darstellen. Es hat sich gezeigt, dass die Druckzeit von dem Modell ausreichend gut wiedergegeben wird, auf einen genauen Vergleich zwischen zu erwartender und tatsächlicher Druckzeit wird verzichtet. Die Auswertung der Proben ist in Tabelle 19 festgehalten.

Durchgang	Parametersatz	Anhaftungen [-]	Dichte [g/cm ³]	Modellabweichung [g/cm ³]
1	Dichte	stark ausgeprägt	2,915	0,035
2	Dichte	stark ausgeprägt	2,913	0,037
3	Dichte	stark ausgeprägt	2,912	0,038
1	Dichte ohne Anhaftungen	nicht vorhanden	2,932	-0,022
2	Dichte ohne Anhaftungen	nicht vorhanden	2,924	-0,014
3	Dichte ohne Anhaftungen	nicht vorhanden	2,931	-0,021
1	Dichte Druckzeit	nicht vorhanden	2,872	-0,012
2	Dichte Druckzeit	nicht vorhanden	2,873	-0,013
3	Dichte Druckzeit	nicht vorhanden	2,867	-0,007
1	Kompromiss	leicht ausgeprägt	2,838	-0,008

Tabelle 19: Überprüfung der Parametersätze

Die Dichte weicht nur leicht von den vom Modell vorhergesagten Werten ab. Es ist zu sehen, dass bei dem Parametersatz „Dichte“ das Modell eine höhere Dichte vorhersagt als tatsächlich gemessen. Bei den Proben mit diesem Parametersatz sind starke Anhaftungen vorhanden. An diesen sammeln sich bei der Dichtemessung nicht entfernbare Luftblasen (s. Abb. 4.9).



Abbildung 4.9: Probe mit Anhaftungen und Luftblasen

Dies führt dazu, dass eine geringere Dichte gemessen wird. Wie stark dieser Effekt die Messung verfälscht, ist nicht bekannt. Es ist jedoch auch anzumerken, dass die Proben eine etwas geringere Dichte als Proben mit einem Extrusionsmultiplikator von 1,08 aber sonst gleichen Parametern, welche als Teil des Versuchsplans gefertigt wurden, aufweisen (vgl. Anhang B.3). Diese haben auch Materialanhaftungen an den Seiten. Eine weitere Erhöhung des Extrusionsmultiplikators von 1,08 ist somit in der Parameterkombination nicht zielführend.

Am vielversprechendsten ist der Parametersatz „Dichte ohne Anhaftungen“, dieser bietet die höchste gemessene Dichte und saubere Wände.

Ob die geringe Dichte der andern Parametersätze annehmbar ist, muss je nach Anwendungsfall entschieden werden.

4.7.3 Vergleich zu einem Industriellen Drucker

Die Druckergebnisse mit den optimierten Parametersätzen werden im Folgenden mit den optimierten Druckergebnissen eines industriellen FuseLab-FFF Drucker verglichen.

Dafür werden mit einem industriellen FuseLab-Drucker wie in Kapitel 4.7.2 mit dem Ender-3 Drucker drei Proben mit optimierten Parametern bezüglich der Dichte gefertigt und mit dem vorgestellten Messverfahren ausgewertet. Die Messdaten sind in Tabelle 20 dargestellt.

Nr.	Dichte [g/cm ³]
1	2,894
2	2,864
3	2,884

Tabelle 20: Dichte Grünteilproben FuseLab-Drucker

Aus den drei gedruckten Grünteilproben ergibt sich eine mittlere Dichte von 2,881 g/cm³. Die Dichte ist im Vergleich zu der Probe, welche mit dem Ender-3 unter der Verwendung des Parametersatzes „Dichte ohne Anhaftungen“ um 0,048 g/cm³ geringer. Dies entspricht 1,6%.

5 Fazit und Ausblick

Es wurden Verbesserungen bezüglich des Mainboards, Extruders und Spulenhalters eingeführt, mit welchen die Verarbeitbarkeit von Feedstockmaterialien mit einem sehr günstigen Hobby FFF-Drucker deutlich gesteigert werden konnte. Dazu wurde erst das Ausgangssystem analysiert und auftretende Probleme erkannt und Verbesserungsansätze ausgearbeitet und umgesetzt. Die Wirksamkeit dieser Verbesserungsansätze konnte nachgewiesen werden. Des Weiteren konnten in dieser Arbeit mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung umfangreiche Erkenntnisse über das Wirkungsverhalten verschiedener Druckparameter ermittelt werden. Daraus konnte ein mathematisches Modell des Systems abgeleitet werden, mit dem optimale Parameter für die Fertigung von Grünteilen aus einem Ti6Al4V-Feedstockmaterial mit hoher Dichte ermittelt wurden. Es konnte gezeigt werden, dass die resultierenden Grünteile mit den eines Industriellen Druckers mithalten oder diese teilweise übertreffen können.

Bei der Parameteroptimierung hat sich gezeigt, dass die Parameterkombination, welche zu Grünteilen mit hoher Dichte führen, auch dafür sorgen, dass sich überschüssiges Material mit der Zeit an der Düse ansammelt und sich teilweise wieder ablöst. Dies führt zu sehr unsauberen Oberflächen. Es ist weiterführend denkbar, eine automatische Düsenreinigungsroutine zu implementieren, so dass nach einer bestimmten Zeit oder nach einem bestimmten extrudierten Volumen das überschüssige Material an der Düse entfernt wird. So könnte man die Parametersätze weiter optimieren.

Es wird davon ausgegangen, dass auch mit den optimierten Parametern immer noch Hohlräume in dem Grünteil vorhanden sind, die möglicherweise nicht mit den verwendeten Messmethoden bestimmt werden können.

Des Weiteren sollte untersucht werden, ob und in welchem Ausmaße, die in dem Grünteil vorhandenen Lücken und hohlen Stellen in das gesinterte Bauteil übertragen werden und zu ungewünschten Effekten, wie zum Beispiel eine geringe Dauerfestigkeit führen. Auf Basis dieser Erkenntnis könnten, wenn nötig weitere Optionen für eine höhere Bauteildichte untersucht werden.

So könnte die Untersuchung weiterer Parameter erstrebenswert sein. Beispielsweise könnte die im OrcaSlicer vorhandene Funktion „Bügeln“ untersucht werden, um eine weitere Steigerung der Dichte zu erreichen. Bei dieser Funktion fährt der Druckkopf nach dem Drucken einer Schicht nochmal mit gleicher Höhe und mit geringer Geschwindigkeit über diese, um Lücken zu füllen. Normalerweise wird diese Funktion genutzt, um Oberflächen zu glätten. Es ist aber davon auszugehen, dass sich die Dichte damit erhöhen lässt. Dies müsste weiter untersucht werden.

Es ist auch denkbar, den in dieser Arbeit konstruierten Extruder weiter zu verbessern. Dabei könnten unterschiedliche Extruderräder mit unterschiedlicher Eingriffsgeometrie getestet werden oder es könnte möglicherweise auch infrage kommen, das Filament mittel reinem Reibschluss zu fördern, um eine Schädigung des Filaments vorzubeugen.

Des Weiteren sollte untersucht werden, wie übertragbar die ermittelten Zusammenhänge anhand der gedruckten Grünteilproben auf komplexere Bauteilgeometrien sind.

6 Literaturverzeichnis

- [1] A. Solod, „Konstruktion und Modifikation eines FFF-Druckers für die Verarbeitung metalgefüllter Feesstockmaterialien,“ Hamburg, 2024.
- [2] F. Klocke, Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing, Aachen: Springer, 2015.
- [3] Forward AM, „Ultrafuse-Filaments-for-Fused-Filaments-Fabrication,“ [Online]. Available: <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [4] TU Graz/ IFT, „Additive Fertigung,“ [Online]. Available: <https://www.tugraz.at/institute/ift/forschung/additive-fertigung/>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [5] V. E. K. u. a., „Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process,“ 13 März 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4360/10/3/313#>.
- [6] Creality, „Ender-3 3D Printer,“ [Online]. Available: https://store.creality.com/products/ender-3-3d-printer-4za7?official-website-product-ender-bottom=&spm=..product_ce00868d-efe2-4fa8-9168-240e7c3b3cd1.single_product_1.1. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [7] P. D. W. Kleppmann, Versuchsplanung, München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [8] CRGRAPH, „Versuchsplanung Design of Experiment DoE,“ 2025. [Online]. Available: <https://crgraph.de/downloads/docs/versuchsmethoden/Versuchsplanung.pdf>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [9] CRGRAPH, „D-Optimaler Versuchsplan,“ 2025. [Online]. Available: <https://crgraph.de/downloads/docs/versuchsmethoden//D-Optimal.pdf>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [10] CRGRAPH, „Multiple Regression,“ 2025. [Online]. Available: https://crgraph.de/downloads/docs/versuchsmethoden/Multiple_Regression.pdf. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [11] iDig 3Dprinting, „XYZ 20mm Calibration Cube,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:1278865>. [Zugriff am 10 Mai 2025].
- [12] Micro Swiss, „Micro Swiss Direct Drive Extruder for Creality CR-10 / Ender 3 Printers,“ [Online]. Available: <https://store.micro-swiss.com/collections/extruders/products/micro-swiss-direct-drive-extruder>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [13] 3D Jake, „SKR Mini E3, V3.0,“ [Online]. Available: <https://www.3djake.de/bigtreotech/skr-mini-e3>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [14] Analog Devices, „TMC2209,“ [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/tmc2209.html>. [Zugriff am 19 Mai 2025].

- [15] UNI Wuppertal, „Das Abtasttheorem,“ [Online]. Available: https://www2.math.uni-wuppertal.de/~fritzsche/lectures/met/sitn_33.pdf. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [16] FuseLab, „FL300M,“ [Online]. Available: <https://fuselab3d.com/>. [Zugriff am 12 Mai 2025].
- [17] „LGX Large Gears eXtruder,“ [Online]. Available: <https://www.bondtech.se/product/lgx-large-gears-extruder/>. [Zugriff am 12 Mai 2025].
- [18] Nathan, „ProtoXtruder,“ [Online]. Available: <https://github.com/nhchiu/VoronMods/blob/main/Extruders/ProtoXtruder/README.md>. [Zugriff am 12 Mai 2025].
- [19] Fiberlogy, „PETG+PTFE – Weniger Reibung und hohe Haltbarkeit im 3D-Druck,“ [Online]. Available: <https://fiberlogy.com/de/filamente/petg-ptfe/>. [Zugriff am 12 Mai 2025].
- [20] DIN, DIN EN ISO 3369, Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [21] LEIFiPhysik, „Gleichmäßig beschleunigte Bewegungen,“ [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/lineare-bewegung-gleichungen/grundwissen/gleichmaessig-beschleunigte-bewegungen>. [Zugriff am 13 Mai 2025].

A Grundlagen

A.1 Datenblatt Ti6Al4V

Datasheet Filament Ti6Al4V FIL01A

Date: 08. March 2021
Version: Datasheet short V2.1



Product: Ti6Al4V Fil01A

Fused Filament Fabrication (FFF) of Titanium offers the possibility to produce complex shaped parts net shape or near net shape quality at low investment costs.

Element22 has over 15 years of experience in MIM of Titanium and is now offering its proprietary filament including the patented sintering process for commercial use.

The Element22 filament system offers the basis for the production of Titanium parts with outstanding material properties. To achieve the best material properties, the correct processing equipment and parameters need to be maintained. Element22 recommends processing equipment for debinding and sintering from TIGEN GmbH, Germany (www.tigen.de).

Element22 is offering a debind and sinter service to process your parts printed with the Element22 filament.

Scale Factor

Typical value:
x-y: 120.3%
z: 118.3%

Range: 115% - 121% depending on printing parameters; build direction and part dimensions.

Shelf Life

12 Months if properly stored. Protect from moisture. Store in a dry and dark place at room temperature.

Typical Printing Parameters

Nozzle temperature: 120-180°C, typical 150°C
Print bed temperature: 20-90°C, typical 50°C

Debind and Sinter (D&S)

with Element22s D&S service
(www.element22.de/services/debind-and-sinter-ds-service)
or with appropriate Debind & Sinter Equipment (www.tigen.de)

Typical Properties

-as printed and sintered-

Mechanical Properties are dependent on interstitial elements and residual porosity.

	Typical Value
Tensile Strength Rm / MPa	1005
Yield Strength Rp0.2 / MPa	920
Elongation A / %	14%

Typical Chemical Composition

-as sintered-

Content of interstitial elements is highly dependent on thermal debinding and sintering equipment and process parameters.

Element	Value [wt.%]
Nitrogen	≤ 0.035
Carbon	≤ 0.045
Hydrogen	≤ 0.015
Iron	≤ 0.30
Oxygen	≤ 0.35
Aluminum	5.5 - 6.75
Vanadium	3.5 - 4.5
Yttrium	≤ 0.005
Titanium	balance

Density

-as printed and sintered-

Typical value: 98% of theoretical density
Range: 95-100% of theoretical density
Theoretical Density: 4.43 g/ccm

Disclaimer:

The values may vary according to the processing; the mentioned values are for guidance only and without guarantee.

A.2 Datenblatt Fil-316L-F

Data Sheet

22.02.2023



Product	Fil-316L-F												
Batch No.	Fil-316L-F-200222-15												
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.	16,6	10,3	2,2	1,38	0,65	0,03	0,003	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	%	4,65	min										
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/cm	~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.												

PT+A GmbH
Fritz-Meinhardt-Str. 32
01239 Dresden

Telefon: +49 (0) 351 27049547
Telefax: +49 (0) 351 27049547

info@pt-a.de
www.pt-a.de

B Ermittlung eines Parametersatzes

B.1 Dichtemessunguntersuchung

	Trockengewicht:	5,318g
Nr.	Auftrieb [g]	Dichte [g/cm ³]
1	1,938	2,7380
2	1,944	2,7296
3	1,943	2,7310
4	1,938	2,7380
5	1,944	2,7296
6	1,948	2,7240
7	1,941	2,7338
8	1,938	2,7380
9	1,942	2,7324
10	1,948	2,7240
11	1,949	2,7226
12	1,945	2,7282
13	1,948	2,7240
14	1,948	2,7240
15	1,945	2,7282
16	1,945	2,7282
17	1,952	2,7184
18	1,947	2,7254
19	1,943	2,7310
20	1,949	2,7226
21	1,951	2,7198
22	1,945	2,7282
23	1,947	2,7254
24	1,952	2,7184
25	1,947	2,7254

B.2 Versuchsplan

Nr.	Schichthöhe [mm]	Druckgeschwindigkeit [mm/s]	Drucktemperatur [°C]	Extrusionsmultiplikator [-]
1	0,16	80	180	1,08
2	0,16	80	180	1,08
3	0,24	80	180	0,92
4	0,24	80	180	0,92
5	0,08	30	180	1,08
6	0,08	30	180	1,08
7	0,24	80	125	1,08
8	0,24	80	125	1,08
9	0,08	55	150	1,08
10	0,08	55	150	1,08
11	0,08	80	180	1,00
12	0,08	80	180	1,00
13	0,08	80	125	0,92
14	0,08	80	125	0,92
15	0,08	80	125	1,08
16	0,08	80	125	1,08
17	0,24	30	150	1,08
18	0,24	30	150	1,08
19	0,24	30	180	0,92
20	0,24	30	180	0,92
21	0,16	30	125	1,08
22	0,16	30	125	1,08
23	0,24	80	180	1,08
24	0,24	80	180	1,08
25	0,08	55	180	0,92
26	0,08	55	180	0,92
27	0,16	30	150	1,00
28	0,16	30	150	1,00
29	0,24	55	180	1,00
30	0,24	55	180	1,00
31	0,08	30	125	0,92
32	0,08	30	125	0,92
33	0,24	80	125	0,92
34	0,24	80	215	0,92
35	0,24	30	125	0,92
36	0,24	30	125	0,92
37	0,16	55	180	1,16
38	0,16	55	180	1,16

B.3 Messwerte Zielgrößen

Fertigungstag	Nr.	Dichte [g/cm ³]	Anhaftungen [-]	Ra [μm]	Druckzeit [min]	rel. Abweichung [%]	Temperatur [°C]
Tag 1	1	2,8508	2	3,96	19	0,485	26,11
	2	2,8586	2	4,10	19	0,689	26,69
	3	2,5546	0	16,34	14	-0,592	26,57
	4	2,5599	0	17,04	14	-0,596	26,78
	5	2,9230	2	4,09	56	0,865	27,39
	6	2,9193	2	4,65	56	1,347	27,65
	7	2,6417	1	8,88	14	-0,373	26,36
	8	2,6372	1	11,66	14	-0,349	26,15
	9	2,8611	0	2,99	39	0,143	26,59
	10	2,8457	0	2,96	39	0,035	27,27
Tag 2	11	2,7408	0	5,87	34	-0,229	27,11
	12	2,7365	0	6,22	34	-0,229	27,45
	13	2,4873	0	5,87	34	-0,355	27,03
	14	2,5176	0	5,37	34	-0,334	26,75
	15	2,8321	0	2,80	34	-0,013	26,40
	16	2,8345	0	3,08	34	0,000	26,35
Tag 3	17	2,8470	0	4,06	22	-0,107	26,23
	18	2,8643	0	4,93	22	0,090	26,31
	19	2,5901	0	12,94	22	-0,559	26,24
	20	2,5714	0	13,85	22	-0,567	26,45
	21	2,8227	0	3,43	30	0,261	25,87
	22	2,8399	0	3,37	30	0,284	25,95
	23	2,8311	2	5,16	14	0,700	25,46
	24	2,8280	2	4,46	14	0,442	25,58
	25	2,5497	0	10,32	39	-0,181	26,67
	26	2,5483	0	9,31	39	-0,103	27,12
	27	2,7371	0	7,69	30	-0,193	26,95
	28	2,7547	0	5,07	30	-0,236	27,60
	29	2,7869	0	9,52	15	-0,251	26,79
	30	2,7729	0	9,12	15	-0,343	27,01
	31	2,5657	0	3,99	56	-0,136	25,47
	32	2,5582	0	3,93	56	-0,151	25,48
	33	2,5137	0	18,39	14	-0,537	26,61
	34	2,5064	0	15,49	14	-0,524	26,64
	35	2,5808	0	9,80	22	-0,301	26,84
	36	2,5835	0	10,24	22	-0,277	26,80
Tag 4	37	2,8692	2	7,17	21	2,098	25,51
	38	2,8659	2	7,06	21	1,967	26,61

B.4 Messprotokoll

Nr	Maße in mm			mittig gemessen			Mittelw. X		Y1	Y2	Y3	Mittelw. Y		Z1	Z2	Z3	Mittelw. Z	rel. Abweichung XY in ‰	
	X1	X2	X3																
1	25,115	25,098	25,098	25,104	25,146	25,139	25,132	25,139	25,139	25,139	25,132	25,139	25,139	25,139	4,944	4,945	4,944	4,944	0,460
2	25,195	25,173	25,164	25,177	25,166	25,162	25,173	25,162	25,162	25,162	25,173	25,162	25,162	25,167	4,933	4,934	4,933	4,933	0,674
3	24,813	24,811	24,809	24,811	24,897	24,891	24,891	24,891	24,891	24,891	24,891	24,891	24,891	24,893	4,923	4,923	4,922	4,923	-0,600
4	24,802	24,807	24,802	24,804	24,904	24,897	24,894	24,897	24,904	24,897	24,894	24,894	24,894	24,898	4,924	4,924	4,922	4,923	-0,608
5	25,128	25,126	25,118	25,124	25,326	25,302	25,297	25,302	25,326	25,302	25,297	25,302	25,302	25,308	4,914	4,914	4,914	4,914	0,830
6	25,252	25,245	25,239	25,245	25,435	25,428	25,422	25,428	25,435	25,428	25,422	25,428	25,428	25,428	4,916	4,916	4,916	4,916	1,322
7	24,868	24,866	24,865	24,866	24,950	24,947	24,945	24,947	24,950	24,947	24,945	24,947	24,947	24,947	4,943	4,943	4,943	4,943	-0,380
8	24,873	24,870	24,869	24,871	24,962	24,952	24,950	24,952	24,962	24,952	24,950	24,950	24,950	24,955	4,939	4,940	4,940	4,940	-0,362
9	24,998	24,996	24,996	24,997	25,074	25,076	25,075	25,076	25,074	25,076	25,075	25,075	25,075	25,075	4,925	4,925	4,925	4,925	0,142
10	24,967	24,966	24,965	24,966	25,054	25,051	25,050	25,051	25,054	25,051	25,050	25,050	25,050	25,052	4,936	4,936	4,936	4,936	0,030
11	24,900	24,899	24,899	24,899	24,987	24,986	24,986	24,986	24,987	24,986	24,986	24,986	24,986	24,986	4,937	4,937	4,936	4,937	-0,232
12	24,901	24,898	24,896	24,898	24,988	24,987	24,986	24,987	24,988	24,987	24,986	24,986	24,986	24,987	4,936	4,935	4,935	4,935	-0,236
13	24,878	24,877	24,876	24,877	24,947	24,945	24,945	24,945	24,947	24,945	24,945	24,945	24,945	24,946	4,943	4,944	4,942	4,943	-0,358
14	24,881	24,881	24,879	24,880	24,955	24,953	24,950	24,953	24,955	24,953	24,950	24,950	24,950	24,953	4,949	4,948	4,949	4,949	-0,342
15	24,969	24,968	24,966	24,968	25,028	25,026	25,023	25,026	25,028	25,026	25,023	25,023	25,023	25,026	4,969	4,969	4,969	4,969	-0,022
16	24,968	24,966	24,966	24,967	25,034	25,034	25,032	25,034	25,034	25,034	25,032	25,032	25,032	25,033	4,965	4,965	4,965	4,965	-0,004
17	24,914	24,914	24,915	24,914	25,034	25,034	25,033	25,033	25,034	25,033	25,033	25,029	25,033	25,032	5,014	5,014	5,012	5,013	-0,112
18	24,948	24,948	24,946	24,947	25,100	25,098	25,095	25,098	25,100	25,098	25,095	25,095	25,095	25,098	4,988	4,988	4,986	4,987	0,082
19	24,817	24,816	24,815	24,816	24,905	24,906	24,903	24,906	24,905	24,906	24,903	24,903	24,903	24,905	4,937	4,936	4,937	4,937	-0,564
20	24,814	24,813	24,807	24,811	24,904	24,906	24,905	24,906	24,904	24,906	24,905	24,905	24,905	24,905	4,935	4,935	4,935	4,936	-0,576
21	25,027	25,022	25,025	25,025	25,110	25,105	25,103	25,105	25,110	25,105	25,103	25,103	25,103	25,106	4,956	4,955	4,957	4,956	0,256
22	25,030	25,030	25,028	25,029	25,116	25,111	25,111	25,111	25,116	25,111	25,111	25,111	25,111	25,113	4,956	4,954	4,956	4,955	0,278
23	25,175	25,146	25,133	25,151	25,212	25,196	25,188	25,196	25,212	25,196	25,188	25,188	25,188	25,199	4,944	4,945	4,946	4,945	0,642
24	25,112	25,102	25,101	25,105	25,120	25,116	25,112	25,116	25,120	25,116	25,112	25,112	25,112	25,116	4,958	4,958	4,959	4,958	0,426
25	24,913	24,912	24,911	24,912	25,002	24,996	24,994	24,996	25,002	24,996	24,994	24,994	24,994	24,997	4,928	4,928	4,926	4,927	-0,190
26	24,937	24,934	24,931	24,934	25,018	25,014	25,012	25,014	25,018	25,014	25,012	25,012	25,012	25,015	4,922	4,923	4,925	4,923	-0,114
27	24,912	24,910	24,902	24,908	24,997	24,995	24,994	24,995	24,997	24,995	24,994	24,994	24,994	24,995	4,925	4,924	4,926	4,925	-0,208
28	24,897	24,895	24,895	24,896	24,989	24,986	24,986	24,986	24,989	24,986	24,984	24,984	24,984	24,986	4,931	4,931	4,931	4,931	-0,242
29	24,896	24,896	24,891	24,894	24,981	24,980	24,979	24,980	24,981	24,980	24,979	24,979	24,979	24,980	4,925	4,923	4,926	4,925	-0,260
30	24,874	24,872	24,872	24,873	24,958	24,957	24,953	24,957	24,958	24,957	24,953	24,953	24,953	24,956	4,922	4,922	4,922	4,922	-0,350
31	24,930	24,928	24,927	24,928	25,006	25,003	25,002	25,003	25,006	25,003	25,002	25,002	25,002	25,004	4,929	4,929	4,928	4,929	-0,142
32	24,928	24,926	24,923	24,926	25,000	24,998	24,998	24,998	25,000	24,998	24,998	24,998	24,998	24,999	4,932	4,933	4,932	4,932	-0,158
33	24,831	24,826	24,826	24,828	24,909	24,902	24,900	24,902	24,909	24,902	24,900	24,900	24,900	24,904	4,932	4,932	4,932	4,932	-0,548
34	24,838	24,835	24,833	24,835	24,903	24,903	24,901	24,904	24,903	24,903	24,901	24,901	24,901	24,903	4,934	4,933	4,932	4,933	-0,532
35	24,885	24,882	24,881	24,883	24,968	24,967	24,966	24,967	24,968	24,967	24,966	24,966	24,966	24,967	4,930	4,928	4,930	4,929	-0,306
36	24,888	24,887	24,886	24,887	24,977	24,973	24,973	24,973	24,977	24,973	24,973	24,973	24,973	24,974	4,926	4,927	4,928	4,927	-0,282
37	25,478	25,472	25,465	25,472	25,602	25,599	25,561	25,569	25,602	25,599	25,561	25,561	25,561	25,577	5,015	5,016	5,017	5,016	2,052
38	25,530	25,518	25,515	25,521	25,432	25,481	25,474	25,481	25,432	25,481	25,474	25,474	25,474	25,462	4,991	4,995	4,991	4,992	1,978

B.5 Drucker und Filament Profil

Die Untersuchten Faktorgrößen müssen der Ausarbeitung entsprechend angepasst werden.

Filamentprofil:

```
{
  "fan_max_speed": [
    "0"
  ],
  "fan_min_speed": [
    "0"
  ],
  "filament_density": [
    "4.43"
  ],
  "filament_flow_ratio": [
    "1"
  ],
  "filament_max_volumetric_speed": [
    "20"
  ],
  "filament_retraction_length": [
    "0.8"
  ],
  "filament_settings_id": [
    "Ti6Al4V"
  ],
  "filament_type": [
    "Ti6Al4V"
  ],
  "filament_vendor": [
    "element22"
  ],
  "from": "User",
  "hot_plate_temp": [
    "40"
  ],
  "hot_plate_temp_initial_layer": [
    "40"
  ],
  "inherits": "Creality Generic PETG",
  "is_custom_defined": "0",
  "name": "Ti6Al4V",
  "nozzle_temperature": [
    "150"
  ],
  "nozzle_temperature_initial_layer": [
    "150"
  ],
  "nozzle_temperature_range_high": [
    "180"
  ],
  "nozzle_temperature_range_low": [
    "120"
  ],
  "version": "2.2.0.4"
}
```

Druckerprofil:

```
{
  "from": "User",
  "gap_infill_speed": "55",
  "inherits": "0.20mm Standard @Creality Ender3",
  "initial_layer_line_width": "0.45",
  "inner_wall_speed": "55",
  "internal_solid_infill_line_width": "0.45",
  "internal_solid_infill_speed": "55",
  "is_custom_defined": "0",
  "layer_height": "0.24",
  "name": "Ti6Al4V - DoE",
  "outer_wall_speed": "55",
  "print_settings_id": "Ti6Al4V - DoE",
  "small_perimeter_speed": "100",
  "sparse_infill_density": "100%",
  "sparse_infill_speed": "55",
  "support_speed": "55",
  "top_surface_line_width": "0.45",
  "top_surface_speed": "55",
  "version": "2.2.0.4",
  "wall_sequence": "outer wall/inner wall"
}
```



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 selbständig 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: Zabel

Vorname: Pit

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

Modifizierung eines FFF-Druckers für die Verarbeitung metallgefüllter Feedstockmaterialien und Parameteroptimierung

ohne fremde Hilfe selbständig 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 Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

21.05.2025

Datum

Unterschrift im Original