

Vorwissenschaftliche Arbeit im Rahmen der Reifeprüfung

Einfluss von Parametern beim 3D-Druckverfahren „Fused Deposition Modeling (FDM)“ auf die Zugfestigkeit von 3D-gedruckten Objekten

Julius Hussl

8B, 2020/21

Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium Wien 4
Wiedner Gymnasium / Sir Karl Popper Schule
A-1040 Wien, Wiedner Gürtel 68

Betreuungslehrperson: Mag. Felix Schöfl

Vorgelegt am 25. Februar 2021

Abstract

Beim häufig verwendeten FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-Druckverfahren können verschiedene Druckparameter beeinflusst werden, um visuelle, aber auch mechanische Eigenschaften des gedruckten Objekts zu verändern. Die Absicht dieser Arbeit ist es nun, den Einfluss von sechs Parametern (Düsendurchmesser, Füllichte, Füllmuster, Schalendicke, Schichthöhe, Düsentemperatur) auf die Zugfestigkeit bei vertikaler (stehender) und horizontaler (liegender) Ausrichtung (Orientierung) des Bauteils auf dem Druckbett zu untersuchen. Für die Versuchsreihen wurden zunächst Standardzugproben definiert und mit jeweils veränderten Parametern dreimal ausgedruckt. Eine eigens konstruierte Zugprüfmaschine testete im Anschluss die Zugfestigkeit der einzelnen Proben und lieferte Ergebnisse, mit denen die optimalen Werte der untersuchten Parameter bei liegender und stehender Orientierung zum Erreichen der höchsten Zugfestigkeit bestimmt werden können. Die Analyse der Testergebnisse lässt folgende Aussagen zu:

- Eine Vergrößerung des Düsendurchmesser, der Füllichte oder der Schalendicke sowie eine Verkleinerung der Schichthöhe bedingen eine höhere Zugfestigkeit.
- Die höchste Zugfestigkeit wird mit einem kubischen Füllmuster bei liegender und mit einem geradlinigen Füllmuster bei stehender Orientierung erzielt.
- Eine Erhöhung sowie auch einer Verringerung der Düsentemperatur führt bei liegender Orientierung zu einer geringeren Zugfestigkeit im Vergleich zur Standard-Testprobe, bei stehender Orientierung besteht kein Einfluss.
- Generell haben liegend orientierte Testproben eine höhere Zugfestigkeit als stehende.

Die Ergebnisse geben somit Aufschluss darüber, wie Veränderungen der jeweils untersuchten Parameter die Zugfestigkeit der Druckobjekte beeinflussen und bei welchen Werten die höchste Zugfestigkeit erreicht werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten in Zukunft durch weitere Versuchsreihen mit anderen Materialien wie ABS, PETG oder Nylon ergänzt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Aktueller Forschungsstand	6
3	FDM 3D-Druck	8
3.1	FDM Verfahren	8
3.2	Aufbau	8
3.2.1	X-, Y- und Z-Achsen	8
3.2.2	Rahmen	9
3.2.3	Druckkopf	9
3.2.4	Druckbett	9
3.2.5	Hauptplatine	9
3.3	Der Slicer	10
3.4	Parameter	11
3.4.1	Material	11
3.4.2	Düsentemperaturen	12
3.4.3	Düsendurchmesser	12
3.4.4	Schichthöhen	13
3.4.5	Schalendicke	13
3.4.6	Füllung	13
3.4.7	Orientierung	15
4	Zugfestigkeit	16
5	Empirische Arbeit	17
5.1	Zugprüfmaschine	17
5.1.1	Bauteile	17
5.1.2	Konstruktion	17
5.2	Testprobe	20
5.3	Varianz	22
5.3.1	Varianz der Wägezelle	22
5.3.2	Varianz der Testproben	22
5.4	Versuchsaufbau	23
5.5	Methodik für die Analyse der Ergebnisse	24
5.5.1	Bestimmung der statistischen Signifikanz	24
5.5.2	Visualisierung der Testergebnisse	25
5.6	Versuchsdurchführung	26
5.6.1	Druck der Testproben	26
5.6.2	Zugfestigkeitstest	26

5.7	Versuchsergebnisse	26
5.8	Auswertung der Ergebnisse	34
5.8.1	Düsendurchmesser	34
5.8.2	Füllichte	35
5.8.3	Füllmuster	35
5.8.4	Schalendicke	37
5.8.5	Schichthöhe	37
5.8.6	Düsentemperatur	37
5.8.7	Orientierung	38
6	Fazit	39
7	Zusammenfassung	41
8	Bibliografie	42
9	Abbildungsverzeichnis	45
10	Tabellenverzeichnis	46
11	Anhang	47

1 Einleitung

Die ersten 3D-Druckverfahren wurden schon in den 1990er Jahren entwickelt. Da diese Technologien aber patentiert waren, blieb der 3D-Druck bis vor zehn Jahren nur für professionelle Unternehmen zugänglich. Sobald aber die ersten Patente ausliefen, wurden verschiedene OpenSource Projekte gegründet, die erstmals billige und endverbraucherfreundliche 3D-Drucker einem breiten Markt zur Verfügung stellten. Besonders 3D-Drucker, welche nach dem „Fused Deposition Modeling“ (kurz FDM) Verfahren funktionieren, sind mittlerweile weit verbreitet, da das Druckmaterial sowie die im 3D-Drucker verwendeten Teile kostengünstig sind (vgl. Hagl 2014, 6-8). Heute werden 3D-Drucker im privaten Haushalt nicht mehr nur für Prototypen wie in der Industrie verwendet, sondern für Alltagsgegenstände, die mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Die Stabilität eines Druckobjekts ist daher ein neuer wesentlicher Faktor geworden. Es stellt sich daher die Frage, welchen Einfluss eine Veränderung der Parameter, die während eines 3D-Druckprozesses gesetzt werden können, auf die Zugfestigkeit von 3D-gedruckten Objekten ausübt (vgl. Fastermann 2012, 1).

Die folgende Arbeit untersucht den Einfluss der sechs Parameter Düsendurchmesser, Fülldicke, Füllmuster, Schalendicke, Schichthöhe und Düsentemperatur in Abhängigkeit von der Orientierung auf die Zugfestigkeit bei FDM 3D-gedruckten Objekten. In den ersten Kapiteln wird zunächst der aktuelle Forschungsstand bezüglich der Stabilität bei FDM 3D-gedruckten Objekten zusammengefasst und die Technologie eines FDM 3D-Druckers sowie die physikalischen Grundlagen der Zugfestigkeit erläutert. Im empirischen Teil der Arbeit wird zur Beantwortung der Forschungsfrage zuerst eine Zugprüfmaschine konstruiert, welche die maximale Zugfestigkeit einer Testprobe messen kann. In eigenen Versuchsreihen wird der Einfluss der oben erwähnten Parameter in Abhängigkeit von der Orientierung bestimmt. Die Messergebnisse erlauben abschließend eine Analyse der optimalen Parametereinstellungen für die höchste Zugfestigkeit.

2 Aktueller Forschungsstand

Die aktuelle Forschungsliteratur bietet bereits einige Erkenntnisse zur Zugfestigkeit. So wurde z.B. festgestellt, dass die Orientierung einen großen Einfluss auf die Zugfestigkeit ausübt. Im Jahr 2010 konnten Kirchner et al. eine signifikant höhere Zugfestigkeit bei liegend orientierten im Vergleich zu stehend orientierten Bauteilen nachweisen. Es wurde auch festgestellt, dass die Bauteilfestigkeit unter der Materialfestigkeit liegt. Dies sei auf den nicht optimalen Stoffeinschluss während des Fertigungsprozesses zurückzuführen (vgl. Kirchner u. a. 2010). Patadiya et al. kommen zur selben Erkenntnis (vgl. Patadiya, Dave und Rajpurohit 2020).

Bisherige Forschungen zeigen zudem, dass auch die Schichthöhe einen hohen Einfluss auf die Zugfestigkeit eines FDM 3D-gedruckten Bauteils hat. Kovan et al. konnten eine signifikante Abnahme der maximalen Bruchfestigkeit bei stehend orientierten Testproben mit Erhöhung der Schichthöhe im Bereich von 0.1 mm bis 0.5 mm messen. Dies sei auf einen höheren Lufteinschluss zwischen den Schichten bei größerer Schichthöhe zurückzuführen (vgl. Kovan, Altan und Topal 2017). 2018 wurde diese Erkenntnis von Kuznetsova et al. bestätigt. Es konnte eine 3.5 fache Erhöhung der Zugfestigkeit bei einer Verkleinerung der Schichthöhe von 0.4 mm auf 0.06 mm nachgewiesen werden (vgl. Kuznetsov u. a. 2018). Weiters hat Kovan et al. den gegenteiligen Effekt bei liegender Orientierung messen können, also eine erhöhte Bruchfestigkeit mit Vergrößerung der Schichthöhe. Dies konnte jedoch bei einer Messreihe von Rajpurohit et al. nicht bestätigt werden (vgl. Rajpurohit und Dave 2018 und Kovan, Altan und Topal 2017).

Neben der vorher erwähnten Schichthöhe haben Kuznetsov et al. auch den Einfluss des Düsendurchmessers bei stehender Orientierung untersucht. Dabei konnte bei den verwendeten Düsen (0.4 mm, 0.6 mm und 0.8 mm) eine Erhöhung der Zugfestigkeit mit größerem Düsendurchmesser festgestellt werden. Triyono et al. kamen auch bei liegenden Testproben zu einem ähnlichen Ergebnis. Es konnte aber kein linearer Zusammenhang nachgewiesen werden (vgl. Kuznetsov u. a. 2018 und Triyono u. a. 2020).

Weiters haben Kuznetsov et al. im Jahr 2019 einen weiteren Artikel veröffentlicht, in welchem der Einfluss der Düsentemperatur auf die Stärke einer Testprobe bei stehender Orientierung gemessen wurde. Es konnte eine Erhöhung der Festigkeit bei Erhöhung der Düsentemperatur von 200° auf 250° beobachtet werden. Zudem konnte auch eine schlechtere Festigkeit bei höheren Lüftergeschwindigkeiten sowie längeren Schichtdruckzeiten festgestellt werden (vgl. Kuznetsov u. a. 2020).

Der Einfluss der Füllung auf die Zugfestigkeit bei liegender Orientierung wurde 2016 von Fernandez-Vicente et al. untersucht. Sie kamen zum Ergebnis, dass die Füllichte großteils die Zugfestigkeit bestimmt, besonders zwischen 20% und 50%. Unter den untersuchten Füllmustern (Waben, Geradlinig, Gitternetz) konnte kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Zugfestigkeit festgestellt werden (vgl. Fernandez-Vicente u. a. 2016). Messemer et al. kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Jedoch gibt es in deren Messergebnissen, besonders ab einem Füllgrad von mehr als 75% eine hohe Schwankung. Dies sei auf variierende äußere Faktoren während des Experimentes zurückzuführen (vgl. Messemer u. a. 2016).

3 FDM 3D-Druck

FDM 3D-Druck zählt aktuell zu den am meisten im privaten Bereich verwendeten 3D-Druckverfahren. Der Aufbau des Druckers sowie seine Funktionsweise werden im Folgenden erläutert.

3.1 FDM Verfahren

Beim Fused-Deposition-Modeling (kurz FDM) handelt es sich um ein von der Firma Stratasys bereits 1989 entwickeltes Fertigungsverfahren, bei welchem ein schmelzfähiger Kunststoff additiv aufgebaut wird. Als Ausgangsmaterial dient ein Kunststofffaden, auch Filament genannt, der auf einer Rolle aufgewickelt ist. Das Filament wird mithilfe eines Motors in eine bewegliche und beheizte Düse gezogen. Die Düse erhitzt das Material knapp zum Verflüssigungspunkt und verteilt es auf der Bauplattform, auch Druckbett genannt, wo es sofort erstarrt. Im nächsten Schritt wird die Distanz zwischen Düse und Bauplattform um eine Schichtdicke vergrößert und „die nächste Schicht aufgetragen. Dabei verbinden sich die beiden Schichten durch thermisches Verschmelzen“ (Junk 2017, 8). Dieser Vorgang wird wiederholt, bis das dreidimensionale Objekt fertig ist und von der Plattform gelöst werden kann (vgl. Fastermann 2012, 120 und Junk 2017, 8 und Johansson 2016, 12).

3.2 Aufbau

Der Aufbau (s. Abb. 1) eines FDM 3D-Druckers kann zwar oft in Aufbau und Aussehen variieren, jedoch ist die Funktionsweise in den meisten Fällen ähnlich. Im Grunde besteht er aus drei linearen Achsen, einem Rahmen, einem Druckkopf, einem Druckbett, sowie einer Hauptplatine.

3.2.1 X-, Y- und Z-Achsen

Ein FDM 3D-Drucker ist ein kartesischer Roboter, also eine Maschine, die sich in drei linearen Richtungen entlang der X-, Y- und Z-Achsen, auch bekannt als die kartesischen Koordinaten, bewegen kann. Während des Druckvorgangs wird der Druckkopf relativ zum Druckbett durch Schrittmotoren bewegt, die sich um einen exakten Winkel drehen können. Wie diese relative Positionsänderung des Druckkopfes entsteht, kann bei FDM 3D-Druckern variieren. Beim Prusa I3 MK3S (s. Abb 1) kann die Druckplatte entlang der Y-Achse und der Druckkopf separat entlang der X-Achse bewegt werden. Die gesamte X-Achse ist zudem entlang der Y-Achse bewegbar (vgl. Evans 2012, 29).

3.2.2 Rahmen

Der Rahmen verbindet alle Elemente miteinander und gibt dem 3D-Drucker eine Struktur. Sein Material und seine Form haben einen großen Einfluss auf die Genauigkeit und Verlässlichkeit des 3D-Druckers. Er muss die bei den Schrittmotoren entstehenden Frequenzen absorbieren und schnellen Bewegungen des Druckkopfes widerstehen können. Die meisten Druckerrahmen bestehen aus Gewindestangen, welche mit gedruckten Teilen verbunden werden oder aus zusammengeschraubten Metall-, Holz- oder Acryl-Platten. Eine Alternative sind auch Aluminium Extrusionen, die zwar stabiler und einfacher zum Zusammenbauen, aber teurer sind (vgl. Evans 2012, 34-36).

3.2.3 Druckkopf

Der Druckkopf besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: dem Filamentantrieb und dem sogenannten *Hot-End*. Der Filamentantrieb besteht aus einem Schrittmotor mit einem Zahnrad, welches das Filament in das *Hot-End* zieht, wo es knapp zum Verflüssigungspunkt erhitzt und durch eine 0.1 mm bis 0.8 mm breite Düse gepresst wird. So kommt aus der Düse ein dünner, heißer Plastikfaden, der auf das Druckbett aufgetragen wird (vgl. Evans 2012, 29-31).

3.2.4 Druckbett

3D-Objekte werden auf einem sogenannten Druckbett gebaut, das üblicherweise eine Fläche von 100 mm² bis 200 mm² hat. Die meisten FDM 3D-Drucker sind mit einem beheizten Bett ausgestattet, was für eine bessere Haftung sorgt. Die Oberfläche des Druckbettes besteht entweder aus Glas oder Aluminium, die eine glatte Oberfläche bieten und auf denen Hitze besser verteilt werden kann (vgl. Evans 2012, 31-32).

3.2.5 Hauptplatine

Auf der Hauptplatine ist die Elektronik zur Steuerung des 3D-Druckers montiert. Sie regelt die Temperaturen der Düse und des Druckbettes, koordiniert die Bewegung der Schrittmotoren und regelt die Drehzahl der Lüfter. Die Berechnungen werden auf einem programmierbaren, kleinen und simplen Computer, auch Mikrocontroller genannt, durchgeführt (vgl. Evans 2012, 74-76).

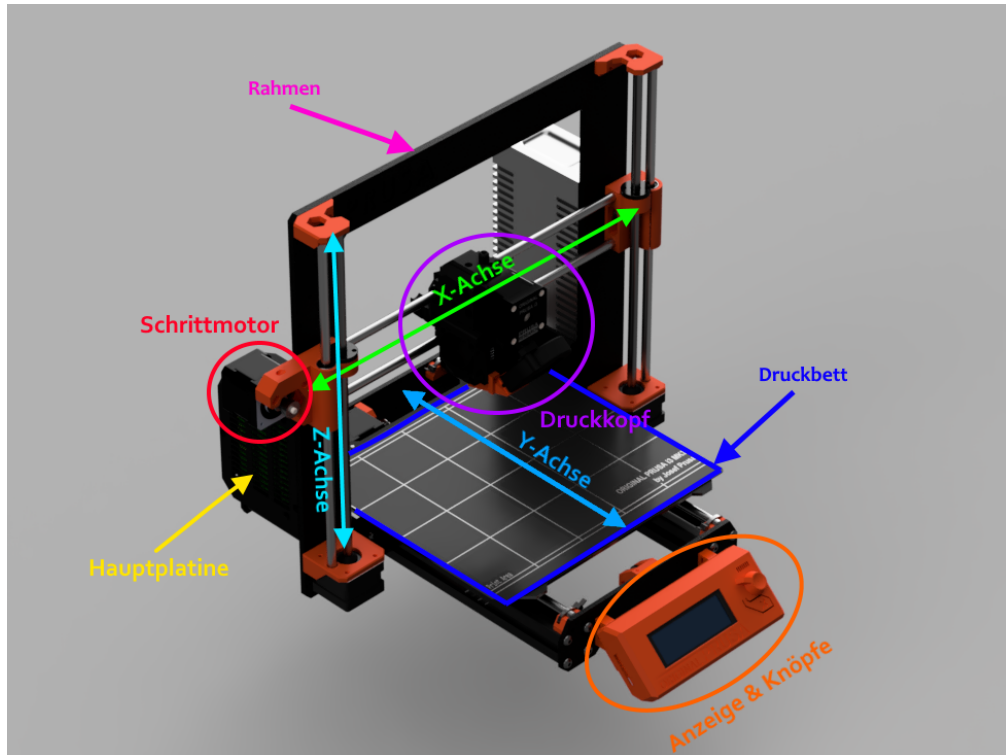


Abb. 1: Aufbau eines FDM 3D-Druckers am Beispiel eines Prusa I3 MK3s

3.3 Der Slicer

Als Grundlage eines 3D-Drucks dient ein 3D-Modell, das mittels eines Computerprogramms entworfen wird. Diese Modelle werden aber von den meisten 3D-Druckern nicht verstanden und müssen daher in einen *G-Code* übersetzt werden. Ein *G-Code* ist eine vereinfachte Programmiersprache, die dem 3D-Drucker Anweisungen gibt, z.B. wohin die Düse sich bewegen soll, wie heiß diese sein soll, wie viel Filament durch diese geschoben werden soll und dergleichen mehr. Ein Slicer ist die Software, welche aus dem 3D-Modell einen *G-Code* generiert. Sie schneidet zunächst das 3D-Modell in Schichten, die einzeln analysiert und in ein Set von *G-Code*-Befehlen umgewandelt werden. Damit ein Modell den Ansprüchen entsprechend gedruckt wird, müssen vor dem Generieren des *G-Codes* Parameter gesetzt werden.

3.4 Parameter

In diesem Kapitel werden die wichtigsten beeinflussbaren Parameter eines FDM 3D-Druckers erklärt.

3.4.1 Material

Die Wahl des Materials bestimmt nicht nur die äußere Erscheinung eines 3D-gedruckten Objekts, sondern auch die grundlegenden mechanischen Eigenschaften des fertigen Teils. Für den FDM 3D-Druck werden Thermoplaste verwendet. „Thermoplaste sind Kunststoffe mit kettenförmigen Makromolekülen, deren Zusammenhang im Wesentlichen durch Nebenvalenzkräfte¹ bestimmt wird“ (Bargel und Schulze 2013, 422). Bei Wärmeeinwirkung erhöht sich die Beweglichkeit der Makromoleküle, wodurch das Material erweicht und eine reversible Formänderung möglich wird. Diese Eigenschaft ermöglicht die starke Verformung des Materials während des FDM Prozesses. Die für den FDM 3D-Druck am häufigsten genutzten Thermoplasten sind: PLA, ABS, PETG, Nylon, PC (vgl. Bargel und Schulze 2013, 422 und All3DP 2020).

- PLA

PLA oder „Polylactic acid“ ist das am häufigsten verwendete FDM 3D-Druck Material. Es hat mit 175° einen relativ geringen Schmelzpunkt und kann deshalb auch ohne beheiztem Druckbett gedruckt werden. Seine niedrige thermische Ausdehnung verhindert, dass große Objekte nach dem Abkühlen zusammenschrumpfen. PLA ist auch ein vergleichsweise harter, aber spröder Thermoplast. Es wird „aus der Stärke von Pflanzen wie Mais, Zuckerrohr und Zuckerrüben hergestellt“ (Prusa3D 2020c) und ist daher biologisch abbaubar. Die Nachteile des Materials sind die geringe Temperatur- und UV-Beständigkeit (vgl. Prusa3D 2020c).

- ABS

ABS oder „Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer“ wird nach PLA am zweit häufigsten verwendet. Es eignet sich besonders für den Innen- und Außenbereich, da es eine hohe thermische Belastbarkeit aufweist. Mit ABS gedruckte Objekte zeigen Verformungen erst ab 98°. Zudem besteht es aus hochverschleißfesten Synthesekautschuk, wodurch es sehr stark und schlagfest und im Gegensatz zu PLA trotzdem leicht flexibel ist. Andererseits zieht sich ABS beim Drucken zusammen, was häufig zu Problemen während des Druckprozesses führt (vgl. Prusa3D 2020a).

- PETG

PET steht für „Polyethylene terephthalate“ und ist das am meisten genutzte Plastik auf der Welt. Beim FDM 3D-Druck wird PETG verwendet, eine Variante von

1. Nebenvalenzkräfte sind schwache, attraktive Wechselwirkungen zwischen Atomen, Ionen und Molekülen (vgl. Bargel und Schulze 2013, 405).

PET. Das „G“ steht für „Glykol-modifiziert“. Diese Variante ist klarer, weniger spröde und einfacher zu drucken. Ähnlich wie PLA hat es eine geringe thermische Ausdehnung, weshalb es relativ einfach zu drucken ist. Zusätzlich ist es flexibler und haltbarer als PLA und hat eine relativ gute Wärmebeständigkeit. Da es aber hygroskopisch ist, absorbiert es Feuchtigkeit und muss deshalb kalt und trocken gelagert werden muss (vgl. All3DP 2020).

- Nylon

Nylon ist ein im professionellen FDM 3D-Druck häufig verwendetes Material, da es sehr stark, flexibel und haltbar ist. Es muss jedoch bei hohen Temperaturen gedruckt werden und ist wie PETG hygroskopisch (vgl. All3DP 2020).

- PC

„Polycarbonate (PC) sind eine Gruppe von Polymeren, die für ihre Festigkeit, mechanische Beständigkeit, Zähigkeit und Temperaturbeständigkeit bekannt sind.“ (Prusa3D 2020d). Es ist jedoch aufgrund der hohen thermischen Ausdehnung, den hohen Temperaturen und der schlechten Druckbetthaftung schwer zu drucken. Zudem ist es wie PETG und Nylon hygroskopisch. Um es für den FDM 3D-Druck druckbarer zu machen, mischen viele Hersteller PC mit anderen Materialien, um die Eigenschaften zu verbessern (vgl. Prusa3D 2020d).

3.4.2 Düsentemperaturen

Jeder FDM 3D-Drucker hat ein Heizelement in der Düse eingebaut, um das Material zu schmelzen. Die Düsen- und Druckbetttemperaturen sind je nach Material und Hersteller unterschiedlich und hängen zusätzlich auch von der Druckgeschwindigkeit ab. Eine zu niedrige Düsentemperatur erhöht das Risiko, dass der Druckkopf verstopft und zu einem brüchigerem Druckobjekt führt, weil die Schichten schlechter zusammenhaften. Eine hohe Düsentemperatur führt zu einer besseren Schichthaftung und somit zu einer höheren Stabilität, jedoch auch zu einer unsaubereren Oberfläche (vgl. Sommer 2020).

3.4.3 Düsendurchmesser

Um diesen Parameter zu verändern, muss die Düse am Druckkopf ausgewechselt werden. Der Düsendurchmesser bestimmt die maximale Schichthöhe ² und Linienbreite. Mit einem kleinen Düsendurchmesser können detailliertere Strukturen gedruckt werden, was jedoch die Druckzeit verlängert. Große Düsendurchmesser haben den Vorteil, dass die Druckzeit verringert wird und die Objekte bessere mechanische Eigenschaften erhalten. Bei einer Messreihe des Herstellers Prusa wurde festgestellt, dass die Vergrößerung des Düsendurchmessers von 0.4 mm auf 0.6 mm eine 25.6% höhere Schlagfestigkeit der

2. Die benutzte Schichthöhe sollte nicht größer als 80% des Düsendurchmessers betragen

gedruckten Objekte bewirkte. Der Standard Düsendurchmesser ist 0.4 mm (vgl. Zuza 2018).

3.4.4 Schichthöhen

Dieser Parameter zeigt an, um welche Distanz sich die Düse vom Druckbett pro Schicht entfernt. FDM 3D-Drucker können mit Schichthöhen von 0.05 mm bis 0.5 mm drucken. Je geringer die Schichthöhe desto mehr Details und glattere Oberflächen werden erzielt, sodass sich das Modell mehr der tatsächlich gewünschten Form nähern kann. Geringere Schichthöhen verlängern natürlich auch die Druckzeit, da mehr Schichten benötigt werden. (vgl. May 2017).

3.4.5 Schalendicke

Die Schalendicke gibt an, aus wie vielen Schalen die Seitenwände des Objekts bestehen, bevor die Füllung gedruckt wird. Sie definiert die Dicke der Seitenwände und hat deshalb einen großen Einfluss auf die Stabilität des gedruckten Objekts. Es muss beachtet werden, dass dieser Parameter nur die Seitenwände beeinflusst. Um in alle Richtungen die gleiche Wandstärke zu erhalten, müssen auch die massiven Decken und Bodenschichten angepasst werden. Die minimale Schalendicke bei FDM 3D-Druckern ist der Düsendurchmesser der verwendeten Düse (vgl. Prusa3D 2020e).

3.4.6 Füllung

Um Zeit und Material zu sparen, werden beim FDM 3D-Druck die Objekte meistens nicht massiv, sondern mit einer bestimmten Füllstruktur gedruckt. Diese befindet sich innerhalb der äußeren Wände und kann nach Abschluss des Druckprozesses nicht mehr gesehen werden. Dieser Parameter wird durch zwei Werte definiert, Füllichte und Füllmuster, die die Dichte und Form der Füllstruktur bestimmen (vgl. Redwood, Schöffner und Garret 2017, 40).

Füllichte

Die Füllichte wird in den meisten Slicern in Prozenten angegeben. Der Prozentsatz gibt den ungefähren³ Anteil an, den die Füllstruktur einnimmt, d.h. bei 0% wird das Objekt hohl gedruckt und bei 100% massiv. Je mehr Füllung verwendet wird, desto länger ist die Druckzeit und desto höher ist der Materialverbrauch, desto stabiler ist aber auch das Objekt (vgl. Prusa3D 2020b).

3. Es ist nicht der genaue Anteil, da der Slicer das Infill optimiert, um bessere Druckzeiten und Stabilität zu erhalten.

Füllmuster

Das Füllmuster gibt die Form der Füllstruktur an. Dieser Wert muss aus einer Reihe von Optionen ausgewählt werden. Diese können sich bei den verschiedenen Slicern leicht unterscheiden, die häufigsten sind: Geradlinig (2D), Gitternetz (2D), Dreiecke (2D), Konzentrisch (2D), Kubisch (3D) und Gyroid (3D) (s. Abb. 2). Die 3D-Füllmuster sind in allen Richtungen gleich stabil, während die 2D-Füllmuster in einer Ebene stabiler als in der anderen sind (vgl. Rafiquel 2020 und Dwamena 2019).

- Geradlinig

Es ist das simpelste Füllmuster, da es nur aus parallel verlaufenden Linien besteht. Im Vergleich zu anderen Füllmustern ist es in keiner Richtung besonders stabil, dafür verbraucht es wenig Material und ist am schnellsten zu drucken. Es ist in vielen Slicern das Standard-Füllmuster (vgl. Rafiquel 2020).

- Gitternetz

Der Aufbau aus rechtwinkligen Linien ergibt zusammen ein Muster aus Quadraten. Dieses weist in vertikaler Richtung eine hohe Stabilität auf, nicht aber in horizontaler und diagonaler Richtung (vgl. Rafiquel 2020).

- Dreiecke

Dieses Füllmuster besteht aus Linien, die sich in 60° Winkel kreuzen, sodass sich gleichseitige Dreiecke ergeben. Es hat in allen Richtungen die gleiche Stärke, eignet sich jedoch nicht für hohe Füllichten (vgl. Rafiquel 2020).

- Konzentrisch

Der Aufbau aus parallel zur äußeren Wand geformten Ringen eignet sich besonders bei 100% Füllichte, weil die Kraft besser über das Objekt verteilt wird. Bei weniger als 100% sollte es jedoch nicht verwendet werden, da es nahezu keine zusätzliche Stabilität bietet (vgl. Rafiquel 2020).

- Kubisch

Dieses Füllmuster setzt sich aus verschiedenen großen Dreiecken zusammen, welche sich jedoch über mehrere Schichten verschieben, sodass ein dreidimensionales Füllmuster entsteht. Im Vergleich zum Gitternetz-Muster ist es in vertikaler Richtung weniger stabil, dafür aber in horizontaler und diagonaler. Wegen der langen und komplexen Bewegungen benötigt das Füllmuster eine höhere Druckzeit (vgl. Rafiquel 2020).

- Gyroid

Diese Füllmuster besteht aus Wellen, welche sich von Schicht zu Schicht leicht verschieben. Es bietet erhöhte Stabilität bei geringstem Materialverbrauch. Zudem ist es ein dreidimensionales Füllmuster, weshalb es in allen Richtungen gleich stabil ist. Es eignet sich besonders für flexible Filamente. Wegen der „kurvigen“ Linien kann es nicht bei hohen Geschwindigkeiten gedruckt werden und benötigt deshalb eine längere Druckzeit (vgl. Rafiqul 2020).

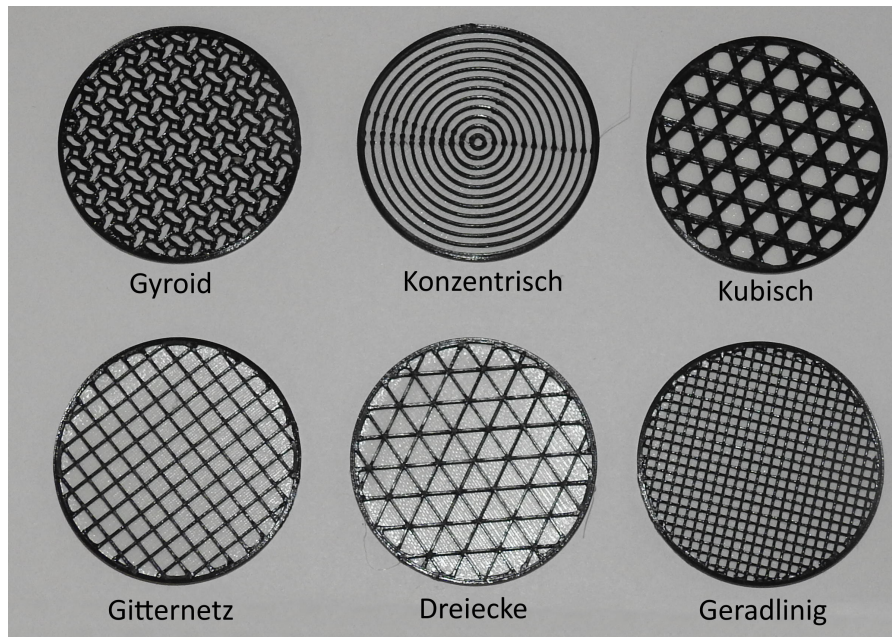


Abb. 2: Die am häufigsten verwendeten Füllmuster

3.4.7 Orientierung

Die Orientierung beschreibt die räumliche Ausrichtung des Druckobjekts auf dem Druckbett. Meistens wird das Objekt so orientiert, dass es eine möglichst große Auflagefläche auf dem Druckbett hat, um eine bessere Haftung zu bekommen. Es sollte auch so gedreht werden, dass es zu möglichst wenigen Überhängen kommt, um Stützstrukturen zu vermeiden. Die Orientierung kann als dreidimensionaler Vektor dargestellt werden, wobei jede Dimension für die Rotation entlang einer der kartesischen Achsen steht. Für ein besseres Verständnis wird in dieser Arbeit für die horizontale Orientierung der Begriff „liegend“ und für die vertikale Orientierung der Begriff „stehend“ verwendet. Liegend bezeichnet ein Objekt mit der größten Auflagefläche und stehend eine Orientierung, in welcher das Objekt am höchsten ist (vgl. Kirchner u. a. 2010).

4 Zugfestigkeit

Jede Belastung eines Objekts führt zu einer Verformung. Diese kann elastisch sein, d.h. das Objekt kehrt nach Entlastung in seine ursprüngliche Form zurück oder plastisch, wenn die Verformung auch nach der Entlastung bleibt. Die Verformung tritt in Form einer Längenänderung ΔL bzw. in einer Winkeländerung γ auf. Wenn man die Längenänderung ΔL durch die parallele Ausgangslänge L_0 dividiert, erhält man die dimensionslose Größe

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

auch Dehnung genannt. Die Winkeländerung γ ist bereits dimensionslos und hat die Bezeichnung Schiebung.

Die Spannung ist „[...] der zur Verformung des Elementes erforderliche, auf [die][...] Flächeneinheit bezogene Kraftanteil“ (Bargel und Schulze 2013, 138). Für eine Dehnung muss die Kraft normal zur Bezugsfläche wirken, die dabei entstehende Spannung wird Normalspannung σ genannt. Bei einer Schiebung wirkt die Kraft parallel (tangential) zur Bezugsfläche, die dabei entstehende Spannung heißt Schubspannung τ .

Die Zugfestigkeit ist eine Normalspannung. Sie ergibt „[...] sich aus der Höchstkraft F_m und dem Anfangsquerschnitt S_0 [...]“ (Bargel und Schulze 2013, 143) und wird mit folgender Formel berechnet:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Der Anfangsquerschnitt S_0 ist der Flächeninhalt der Bezugsfläche vor der Belastung. Die Höchstkraft F_m eines Objekts wird in einem Zugversuch bestimmt. Der Zugversuch ist ein mechanisches Prüfverfahren, welches der „[...]Ermittlung mechanischer Werkstoffeigenschaften unter homogenen, einachsigen Zugspannungen [dient]“ (Grote, Bender und Göhlich 2018, 293; vgl. auch Bargel und Schulze 2013, 137-138).

5 Empirische Arbeit

Das Ziel dieser empirischen Arbeit ist es, den Einfluss der Parameter Düsentemperatur, Düsendurchmesser, Schichthöhe, Schalendicke, Füllichte, Füllmuster in Abhängigkeit von der Orientierung auf die Zugfestigkeit von 3D-gedruckten Objekten zu analysieren, um in Folge die optimalen Druckeinstellungen bestimmen zu können.

5.1 Zugprüfmaschine

Mithilfe der Zugprüfmaschine werden Objekte bis zum Bruch bei konstanter Geschwindigkeit quasistatisch auf Zug belastet. Grundlage der Baupläne und Programme bildet das OpenSource Projekt⁴ „Open-Pull“ von Stefan Hermann (Hermann 2019).

5.1.1 Bauteile

Aller verwendeten Bauteile sind im Anhang 1 verzeichnet, die 3D-Dateien sind unter folgendem Link verfügbar:

github.com/Iqwertz/OpenPull-Web-Controller/tree/master/OpenPull/CAD
(Hussl 2020b).

5.1.2 Konstruktion

Die Konstruktion der Zugprüfmaschine kann in drei Teile geteilt werden: den Rahmen, die Klemmen und die Elektronik.

Der Rahmen besteht aus einem 7.5 cm breiten und 4.8 cm hohen Tannenholz. Vor dem Zusammenbauen müssen in die Hölzer Nr. 2 und 4 an den in Abbildung 3 gezeigten Stellen Löcher gebohrt werden. Danach werden die 75 cm langen mit den 30 cm langen Hölzern mit Winkelverbindern im rechten Winkel verschraubt und mithilfe der 26 cm langen Hölzern und weiteren Winkelverbindern miteinander verbunden. Im nächsten Schritt werden die Trapezgewindespindel durch die 12 mm breiten Löcher in die Teile Nr. 2 und 4 geschoben und der Trapezgewindeflansch aufgeschraubt. Auf die Trapezgewindespindel wird das Schrägkugellager geschoben und die Trapezgewindemutter mit der M10 Mutter aufgeschraubt. Nun wird die Trapezgewindespindel über die Kupplung mit den Schrittmotoren verbunden und unten durch die Achsenhalter fixiert. Zum Abschluss wird noch die Wägezelle an den Holzbalken Nr. 4 geschraubt. Der Rahmen ist nun fertig und sollte wie in Abbildung 4 aussehen.

4. Bei OpenSource Projekten ist der Quelltext der Software öffentlich zugänglich und kann von Dritten verändert und ergänzt werden.

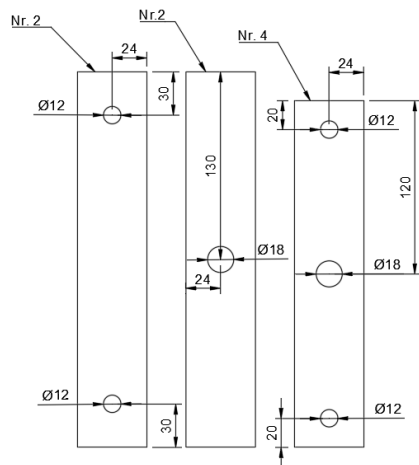


Abb. 3: Bohrlöcher in den Teilen
Nr. 2 & 4

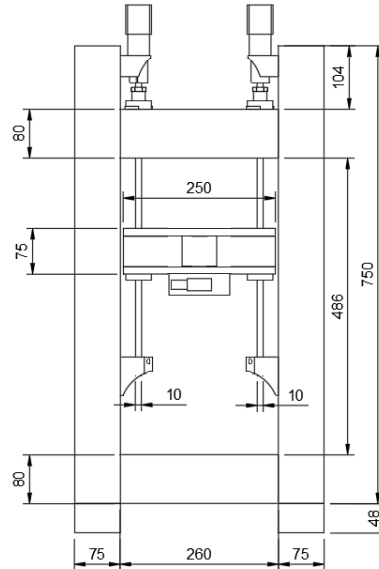


Abb. 4: Abmessungen und Aufbau
des Rahmens

Die Bauteile der Klemmen wurden 3D-gedruckt, könnten aber auch mithilfe einer CNC Fräse hergestellt werden. Da die Klemmen während des Testens unter starker Belastung stehen, müssen die Teile mit einer Füllung von mehr als 60% und mit mindestens 4 mm dicken Wänden gedruckt werden. Zudem empfiehlt es sich, PLA als Material zu nehmen, da es sich nur wenig verformt und somit die Varianz der Zugprüfmaschine verbessert. Für den Bau der Klemmen werden zunächst in die Innenseite des Teils Nr. 19 zwei M9 Muttern und die mit Sandpapier beklebten Blöcke gesteckt. Auf der Außenseite werden zwei M9 Schrauben eingeschraubt. Danach werden die vordere und hintere Platte mit M6 Schrauben und die mittlere Platte mit M6 Muttern zusammengeschraubt. Im letzten Schritt werden die Drehgriffe an die M9 Schrauben gesteckt. Nun sollte die Klemme wie in Abbildung 5 aussehen und kann an den Holzbalken Nr. 2 und an die Wägezelle geschraubt werden.

Die Zugprüfmaschine wird von einem Microcontroller gesteuert, der die Bewegung der Schrittmotoren koordiniert, die Daten der Wägezelle ausliest und die Testergebnisse auf die SD-Karte schreibt. Zudem gibt es ein Bluetooth Modul zur kabellosen Ansteuerung der Zugprüfmaschine. Das ganze System wird von einem 12V Netzteil versorgt, da aber alle Teile bis auf die Schrittmotoren mit maximal 5V funktionieren, wird die Spannung mithilfe eines DC-DC Wandlers auf 5V herunter geregelt. Abbildung 7 zeigt den Schaltplan.

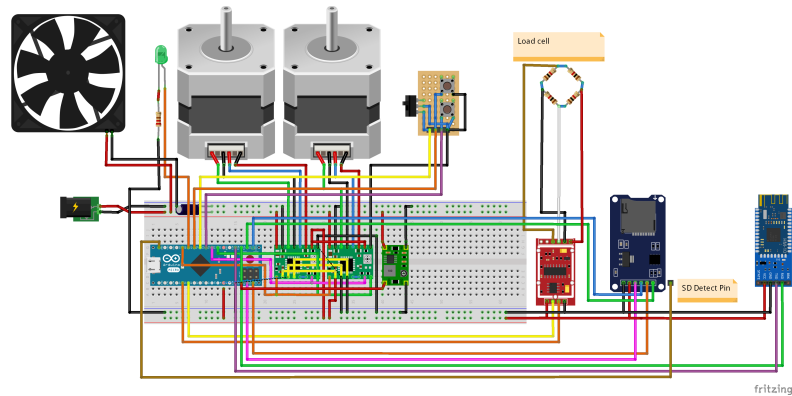


Abb. 7: Schaltplan der Zugprüfmaschine

5.2 Testprobe

Es gibt bisher kein Standardverfahren zum Testen von FDM 3D-gedruckten Objekten. In den bekannten wissenschaftlichen Artikeln wird zum Großteil die EN ISO 527 Norm verwendet, welche „die Prüfbedingungen zur Bestimmung der Zugeigenschaften von Form- und Extrusionsmassen fest[legt]“ (Messemer u. a. 2016, 2). Die bei der ISO 527 Norm verwendeten Testproben haben bei der Bruchstelle einen Querschnitt von 4 mm x 10 mm. Die geringe Breite im Vergleich zur Länge bedeutet eine kleine Fläche im Vergleich zum Umfang, was dazu führt, dass die Füllung im Vergleich zu den Schichtumfängen einen geringeren Effekt auf die Zugfestigkeit der Probe hat (vgl. Kuznetsov u. a. 2018, 3). Aus diesem Grund wurde für den Testversuch eine neue Probe konstruiert, welche folgende Kriterien erfüllen musste:

- Bruchstelle

Die Testprobe soll unabhängig von den eingestellten Parametern eine immer gleiche Bruchstelle haben. Diese Bruchstelle muss quadratisch sein und einen Flächeninhalt von mehr als 50 mm² haben, um einen eindeutigen Effekt der Füllichte auch bei niedrigen Werten messen zu können.

- **Höchstkraft**
Wenn die Testprobe massiv ist, also mit 100% Füllung gedruckt wird, dann darf die Höchstkraft nicht mehr als 3 kN betragen, um die Maximalwerte der Zugprüfmaschine nicht zu überschreiten.
- **Größe**
Das Volumen der Testprobe darf nicht größer als 10.000 mm³ sein, um Druckzeit und Druckkosten zu minimieren.
- **Druckbarkeit**
Die Testprobe muss liegend sowie stehend ohne Stützmaterial gedruckt werden können.
- **Kompatibilität**
Die Testproben werden über den Hackenhalter (Teil Nr. 12) in die Zugprüfmaschine eingespannt. Diese fixieren die Testprobe mit zwei 5 mm dicken Schrauben. Um mit diesen kompatibel zu sein, muss die Testprobe zwei 6 mm große Löcher haben.

Die Probe wurde mit dem CAD Programm Fusion 360 gezeichnet und mithilfe der Ergebnisse von statischen Simulationsstudien optimiert, um den Kriterien zu entsprechen. In Abbildung 8 sind die Dimensionen der Testprobe eingezeichnet.

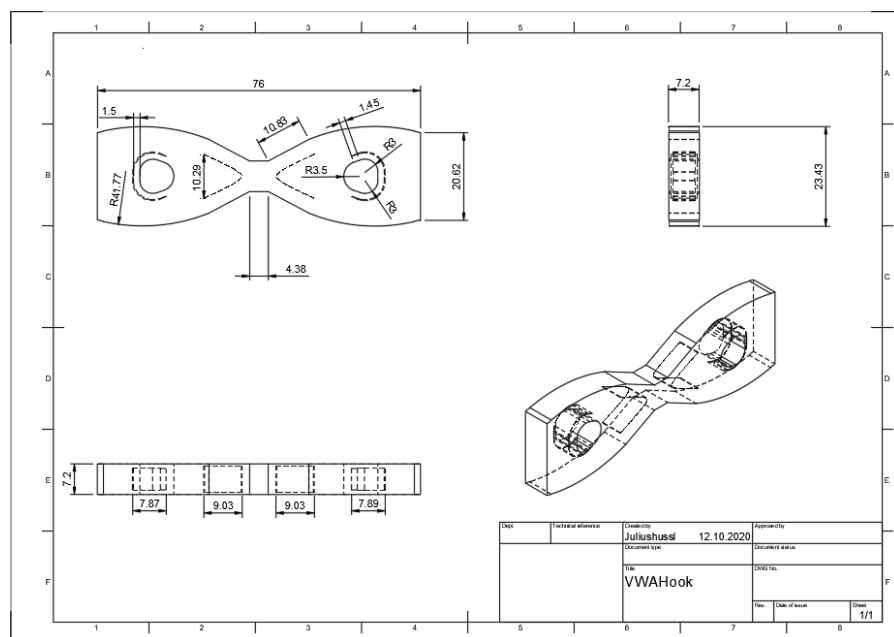


Abb. 8: Technische Skizze der Testprobe

5.3 Varianz

Die Varianz ist ein Maß für die Streuung der Messergebnisse von ihrem Mittelwert und ist somit ein Maß für die Genauigkeit der Messungen. Die Varianz wird mit der Formel

$$s^2 = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

berechnet (Papula 2016, 487). Da die Varianz nicht dieselbe Dimension wie die Messergebnisse hat und somit schwer interpretierbar ist, wird zusätzlich die Standardabweichung berechnet. Diese ist die positive Quadratwurzel aus der Varianz

$$\sigma = +\sqrt{s^2}$$

Zur Bestimmung der Varianz und damit auch der Standardabweichung der Messergebnisse muss die Varianz von der Zugprüfmaschine und von den Testproben festgelegt werden (vgl. Papula 2016, 486-488 658-659).

5.3.1 Varianz der Wägezelle

Die Varianz der Zugprüfmaschine wird durch die Genauigkeit der Wägezelle bestimmt. Diese hat laut Herstellerangaben eine Genauigkeit von $\pm 0.03\%$ Newton (vgl. aliexpress, n.d.).

5.3.2 Varianz der Testproben

Um die Varianz der Testproben zu bestimmen, wurden fünf Testproben mit gleichen Druckparametern gedruckt und mit der Zugprüfmaschine getestet. In Tabelle 1 sind die Testergebnisse aufgelistet. Mithilfe dieser Werte wurde die Varianz von 314N und die Standardabweichung von 17.72N ermittelt. Es muss also bei den Versuchsergebnissen eine Abweichung von mindestens ± 17.72 N beachtet werden.

Nr.	Wert (Newton)
1	1092
2	1132
3	1129
4	1136
5	1126

Tabelle 1: Varianz der Testproben

5.4 Versuchsaufbau

Im Versuch wird folgende Software verwendet:

- PrusaSlicer 2.3.0 alpha2
- OpenPull Webcontroller (<https://iqwertz.github.io/OpenPullController/>)
- OpenPull Visualizer (<https://iqwertz.github.io/Visualizer/>)

und folgende Materialien:

- Zugprüfmaschine
- 3D-Drucker: Prusa Mini
- 1kg bq „PLA Coal Black“ Filament (bq 2016)

Um den Einfluss, den ein Parameter auf die Zugfestigkeit eines 3D-gedruckten Objekts ausübt, messen zu können, wird eine Standard-Testprobe mit den in Tabelle 2 aufgelisteten Parametern definiert.

Parameter	Wert
Material	PLA
Füllmuster	Geradlinig
Fülldicke	25%
Schichthöhe	0.2 mm
Düsendurchmesser	0.4 mm
Schalendicke	0.8 mm
Düsentemperatur	215°

Tabelle 2: Werte der Standard-Testprobe

Die Standard-Testprobe wird einmal bei liegender und einmal bei stehender Orientierung mit gleich bleibenden Parameterwerten gedruckt. Diese beiden Standard-Testproben werden jeweils um den zu messenden Parameter verändert. Tabelle 3 listet die veränderten Parameterwerte in zwei bzw. mehr Abweichungen auf. Für die Berechnung der Varianz wird jede Testprobe dreimal gedruckt und getestet.

Parameter	Standard	Abweichung 1	Abweichung 2	Abweichung 3	Abweichung 4	Abweichung 5
liegende Orientierung						
Düsentemperatur	215°	180°	240°			
Düsendurchmesser	0.4 mm	0.2 mm	0.6 mm			
Schichthöhe	0.2 mm	0.1 mm	0.3 mm			
Schalendicke	0.8 mm	0.4 mm	1.2 mm			
Füllichte	25%	0%	50%	75%	100%	
Füllmuster	Geradlinig	Gyroid	Dreiecke	Gitternetz	Kubisch	Konzentrisch
stehende Orientierung						
Düsentemperatur	215°	180°	240°			
Düsendurchmesser	0.4 mm	0.2 mm	0.6 mm			
Schichthöhe	0.2 mm	0.1 mm	0.3 mm			
Schalendicke	0.8 mm	0.4 mm	1.2 mm			
Füllichte	25%	0%	50%	75%	100%	
Füllmuster	Geradlinig	Gyroid	Dreiecke	Gitternetz	Kubisch	Konzentrisch

Tabelle 3: Veränderung an den Parametern bei liegender und stehender Orientierung

5.5 Methodik für die Analyse der Ergebnisse

Nach der Messung liegen die Ergebnisse in Form von Textdateien vor. Für die Verarbeitung wurde eine Webseite programmiert, die Daten der Zugprüfmaschine zusammenfasst und visualisiert. Die Webseite ist wie die Zugprüfmaschine OpenSource und unter folgendem Link aufzufinden: <https://iqwertz.github.io/Visualizer/> (Hussl 2020a). Die Ergebnisse werden in zwei Schritten analysiert: Zuerst wird die statistische Signifikanz einer Veränderung im Vergleich zu der dazugehörigen Standard Testprobe bestimmt und danach wird der Einfluss der Veränderung eines Parameters zueinander analysiert.

5.5.1 Bestimmung der statistischen Signifikanz

Zur Bestimmung der statistischen Signifikanz wurde der Welch-Test gewählt, welcher eine Variante des t-Tests ist. Nach Kanji dient der t-Test zur „Untersuchung der Signifikanz des Unterschieds zwischen den Mitteln zweier Populationen“ (Kanji 2006, 198). Beim Welch-Test müssen zudem die Ergebnisse der zwei Populationen unabhängig voneinander sein. Dies entspricht genau den Bedingungen der Versuchsreihe in dieser Arbeit. Um einen t-Test durchzuführen, muss zuerst eine Null Hypothese $H_0 : \mu_0 = \mu_1$ und eine Alternativhypothese $H_1 : \mu_0 \neq \mu_1$ aufgestellt werden, wobei μ_0 und μ_1 den Mittelwerten der zu untersuchenden Populationen entsprechen. Danach wird der t-Wert mittels folgender Formel berechnet:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\left(\frac{(N_1-1)s_1^2 + (N_2-1)s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}\right) \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)}}$$

Für die Berechnung der Freiheitsgrade df wird folgende Formel verwendet:

$$df = (N_1 - 1) + (N_2 - 1)$$

Dabei steht $\bar{X}_1$ und $\bar{X}_2$ für die Mittelwerte, s_1^2 und s_2^2 für die Standardabweichungen und N_1 und N_2 für die Anzahl der Testproben der jeweiligen Population.

Mithilfe dieser beiden Werte kann der p-Wert aus einer t-Verteilungstabelle ausgelesen werden (vgl. Kanji 2006, 198). Der p-Wert gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass beide Mittelwerte aus der gleichen Population stammen und somit die Nullhypothese falsch ist. In dieser Arbeit wird angenommen, dass der Unterschied zwischen den zwei Populationen statistisch signifikant ist, wenn der p-Wert unter 0.05% liegt (vgl. Kanji 2006, 42).

Um die Ergebnisse der t-Test Analyse zu vereinfachen werden diese im APA (American Psychological Association) style formatiert, bei dem die p-Werte mit den in Tabelle 4 gezeigten Symbolen ersetzt werden.

p-Wert Bereich	Symbol
$p > 0.05$	ns
$p \geq 0.05$	*
$p \geq 0.01$	**
$p < 0.01$	***

Tabelle 4: APA Formatierungstabelle

5.5.2 Visualisierung der Testergebnisse

Um den Einfluss der Veränderungen einfacher analysieren zu können, werden die Testergebnisse mittels Balkendiagramme visualisiert. Die Höhe eines Balkens entspricht dem Mittelwert der gemessenen Höchstkraft von drei identischen Testproben. Weiters wird die Standardabweichung zur Einschätzung der Genauigkeit einer Messung als „Errorbalken“ visualisiert.

5.6 Versuchsdurchführung

Der Versuch besteht aus zwei Teilen: Zuerst werden die Testproben 3D-gedruckt und danach mithilfe der Zugprüfmaschine auf ihre Zugfestigkeit überprüft.

5.6.1 Druck der Testproben

Mit der Slicer Software „PrusaSlicer“ wurden für jeden Messpunkt in Tabelle 3 drei Testproben mit entsprechend verändertem Parameter „gesliced“. Die dabei generierten *G-Codes* wurden auf einem „Prusa Mini“ 3D-Drucker ausgedruckt. Um einen Einfluss durch Luftfeuchtigkeit zu verhindern, wurde eine originalverpackte Rolle Filament verwendet und alle Testproben wurden innerhalb einer Woche gedruckt und getestet. Die Luftfeuchtigkeit beim Drucker sowie bei der Zugprüfmaschine betrug 33% und die Temperatur 27°. Beide Werte wurden möglichst konstant gehalten. Da Messemer et al. bei ihrer Versuchsreihe einen negativen Einfluss der Düsentemperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Varianz der Messergebnisse bei PLA beobachten konnten, wurde auf diese Faktoren besonders geachtet (vgl. Messemer u. a. 2016, 6-7).

5.6.2 Zugfestigkeitstest

Die gedruckten Testproben wurden in die Zugprüfmaschine eingespannt und die Parameter der jeweiligen Messung im „OpenPull WebController“ angegeben und die Messung gestartet. Die Testproben wurden dann bei 10 mm/s auf Zug belastet bis sie auseinandergerissen. Die Messergebnisse wurden nach Abschluss der Messung auf einer SD-Karte gespeichert.

5.7 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der 36 Testdurchgänge finden sich in Rohform in Anhang 2 und können unter folgendem Link abgerufen und visualisiert werden:
iqwertz.github.io/Visualizer/?data=VWA (Hussl 2021).

Tabelle 5 listet die statistische Signifikanz der Versuchsergebnisse im APA style auf.

Parameter	Orientierung	Signifikanz	Orientierung	Signifikanz
Düsendurchmesser 0.2 mm	Stehend	***	Liegend	***
Düsendurchmesser 0.6 mm	Stehend	ns	Liegend	***
Fülldicke 0%	Stehend	***	Liegend	***
Fülldicke 50%	Stehend	ns	Liegend	**
Fülldicke 75%	Stehend	*	Liegend	***
Fülldicke 100%	Stehend	***	Liegend	***
Füllmuster Dreiecke	Stehend	**	Liegend	ns
Füllmuster Gitternetz	Stehend	**	Liegend	*
Füllmuster Gyroid	Stehend	***	Liegend	ns
Füllmuster Konzentrisch	Stehend	**	Liegend	*
Füllmuster Kubisch	Stehend	***	Liegend	***
Schalendicke 0.4 mm	Stehend	*	Liegend	***
Schalendicke 1.2 mm	Stehend	ns	Liegend	***
Schichthöhe 0.1 mm	Stehend	ns	Liegend	***
Schichthöhe 0.3 mm	Stehend	**	Liegend	ns
Düsentemperatur 190°	Stehend	***	Liegend	ns
Düsentemperatur 240°	Stehend	**	Liegend	ns

Tabelle 5: statistische Signifikanz der Versuchsergebnisse (APA Style)

Die Versuchsergebnisse werden in den Abbildungen 9 bis 20 als Balkendiagramme dargestellt.

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen, dass eine Vergrößerung des Düsendurchmessers zu einer Erhöhung der Höchstkraft bei liegender und stehender Orientierung führen.

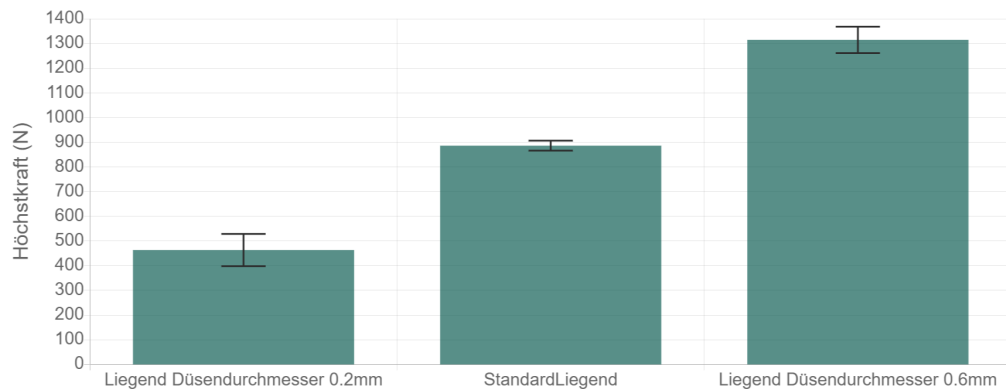


Abb. 9: Versuchsergebnisse: **Düsendurchmesser**, liegende Orientierung

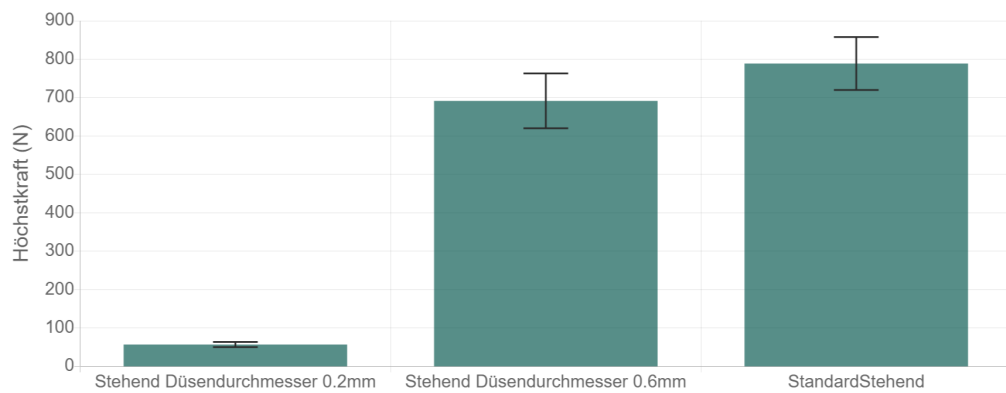


Abb. 10: Versuchsergebnisse: **Düsendurchmesser**, stehende Orientierung

Eine Erhöhung der Fülldichte führt zu einer Erhöhung der Höchstkraft bei liegender und stehender Orientierung, wie in den Abbildungen 11 und 12 dargelegt.

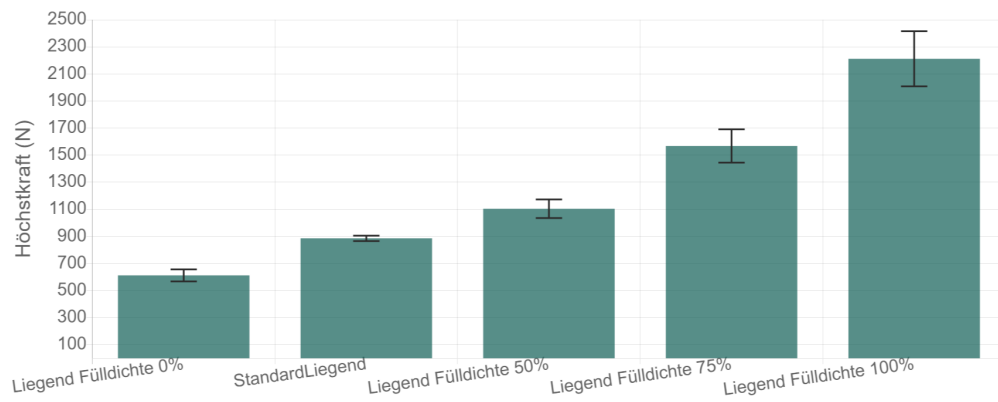


Abb. 11: Versuchsergebnisse: **Fülldichte**, liegende Orientierung

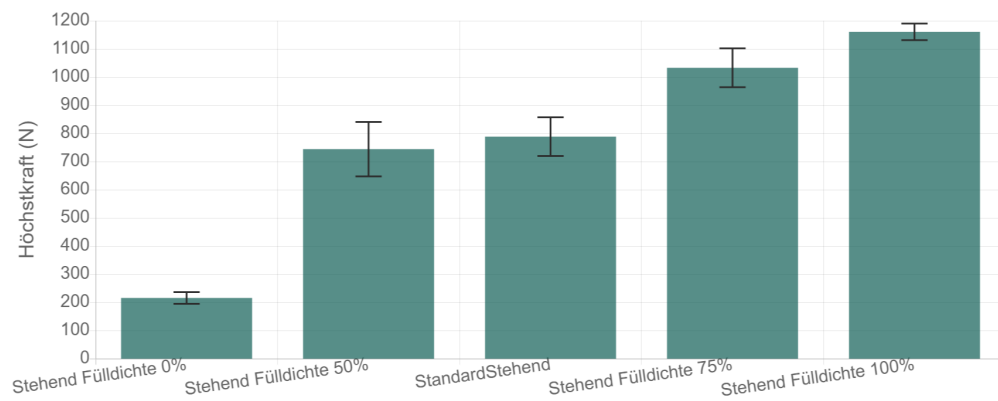


Abb. 12: Versuchsergebnisse: **Fülldichte**, stehende Orientierung

Das kubische Füllmuster zeigt eine Verbesserung der Höchstkraft von 880 N auf 1100 N bei liegender Orientierung (Abb. 13). Bei den Füllmustern Gyroid, Konzentrisch, Gitternetz und Dreiecke ist ein vergleichsweise geringer Unterschied zur Standard-Testprobe zu sehen.

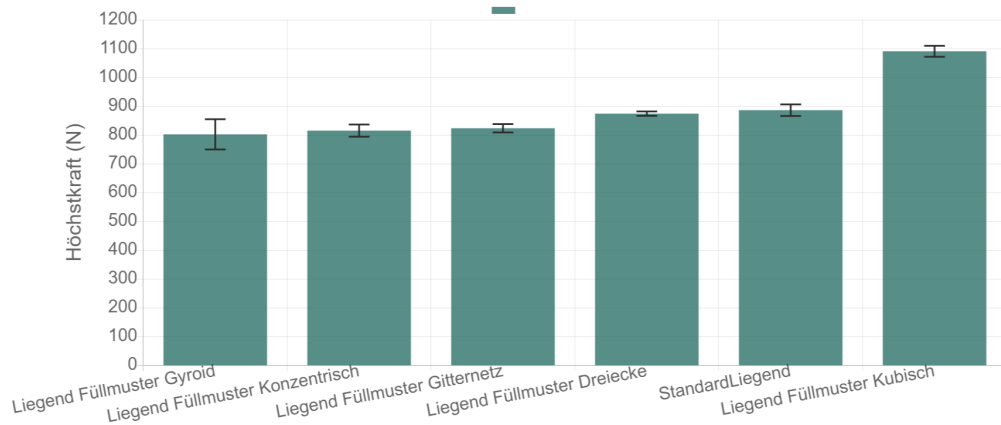


Abb. 13: Versuchsergebnisse: **Füllmuster**, liegende Orientierung

Eine Verschlechterung der Höchstkraft zeigt sich bei allen untersuchten Füllmustern im Vergleich zur Standard-Testprobe bei stehender Orientierung (Abb. 14).

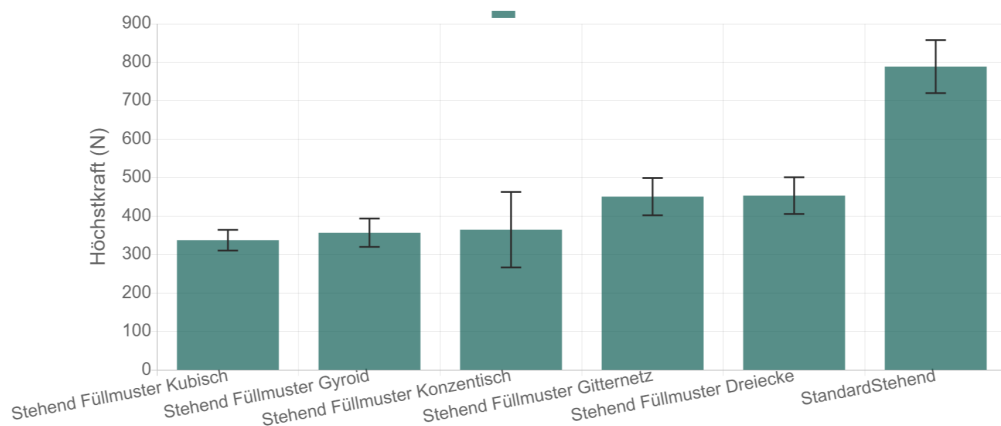


Abb. 14: Versuchsergebnisse: **Füllmuster**, stehende Orientierung

Abbildung 15 zeigt, dass eine Vergrößerung der Schalendicke bei liegender Orientierung zu einer höheren Höchstkraft im Vergleich zur Standard-Testprobe führt.

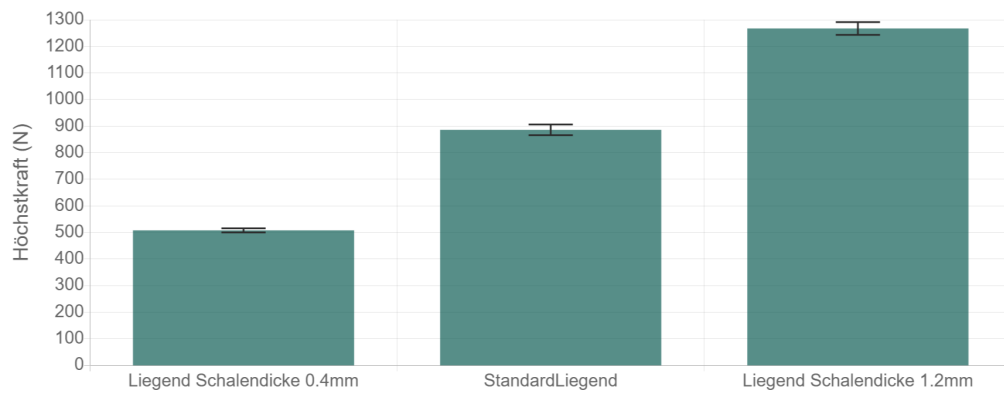


Abb. 15: Versuchsergebnisse: **Schalendicke**, liegende Orientierung

Die Verkleinerung der Schalendicke von 0.8 mm auf 0.4 mm bei stehender Orientierung bewirkt eine Verschlechterung der Höchstkraft. Bei Erhöhung der Schalendicke auf 1.2 mm kann kein Unterschied beobachtet werden. (Abb. 16)

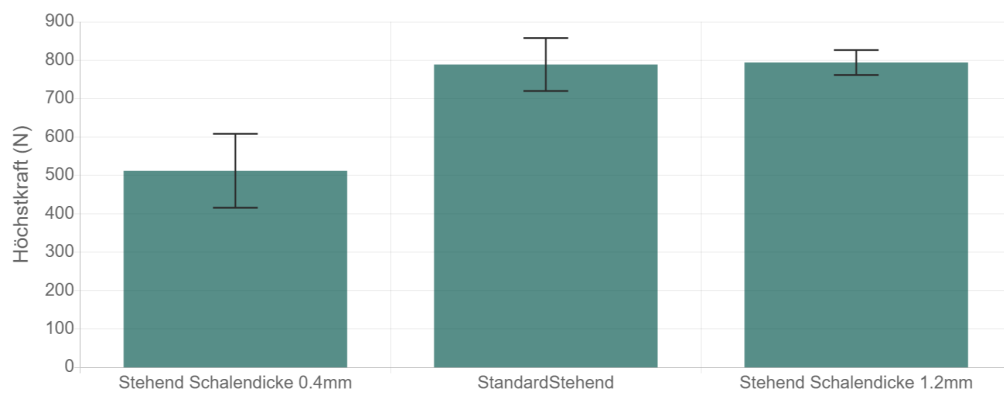


Abb. 16: Versuchsergebnisse: **Schalendicke**, stehende Orientierung

Die Verkleinerung der Schichthöhe von 0.2 mm auf 0.1 mm bei liegender Orientierung bewirkt eine Verbesserung der Höchstkraft. Bei Erhöhung der Schichthöhe auf 0.3 mm kann kein Unterschied beobachtet werden. (Abb. 17)

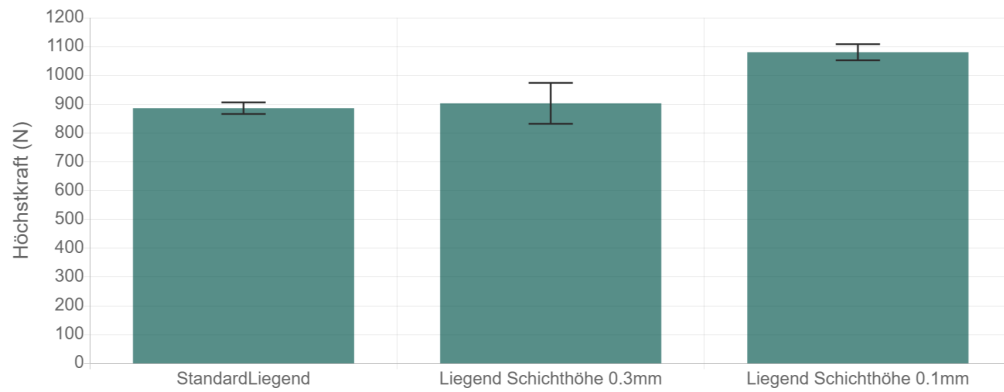


Abb. 17: Versuchsergebnisse: **Schichthöhe**, liegende Orientierung

Die Erhöhung der Schichthöhe von 0.2 mm auf 0.3 mm bei stehender Orientierung bewirkt eine Verschlechterung der Höchstkraft. Bei Verkleinerung der Schalendicke auf 0.1 mm kann kein Unterschied beobachtet werden. (Abb. 18)

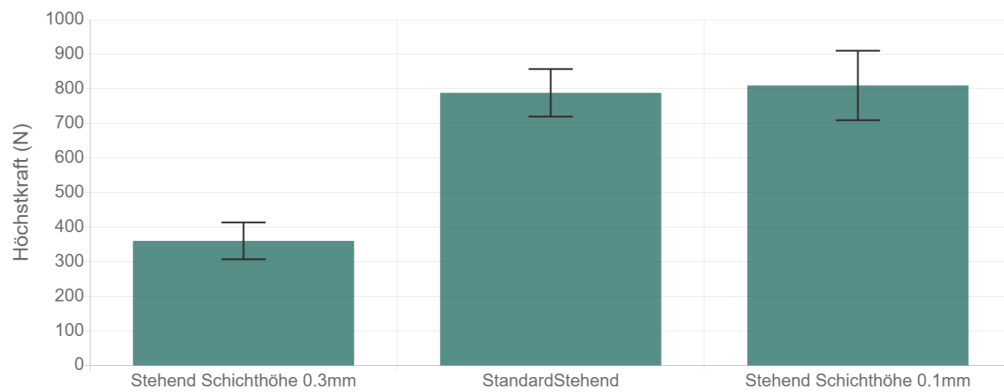


Abb. 18: Versuchsergebnisse: **Schichthöhe**, stehende Orientierung

Keine Veränderung der Höchstkraft bewirkt die Verringerung bzw. Erhöhung der Düsentemperatur von 215° auf 190° bzw. auf 240° bei liegender Orientierung. (Abb. 19)

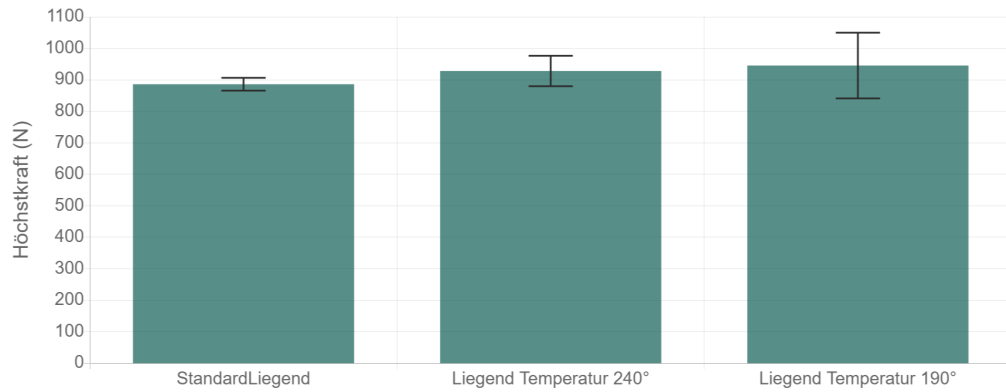


Abb. 19: Versuchsergebnisse: **Düsentemperatur**, liegende Orientierung

Eine Verschlechterung der Höchstkraft ist bei Erhöhung bzw. Verringerung der Düsentemperatur von 215° bei stehender Orientierung festzustellen. (Abb. 20)

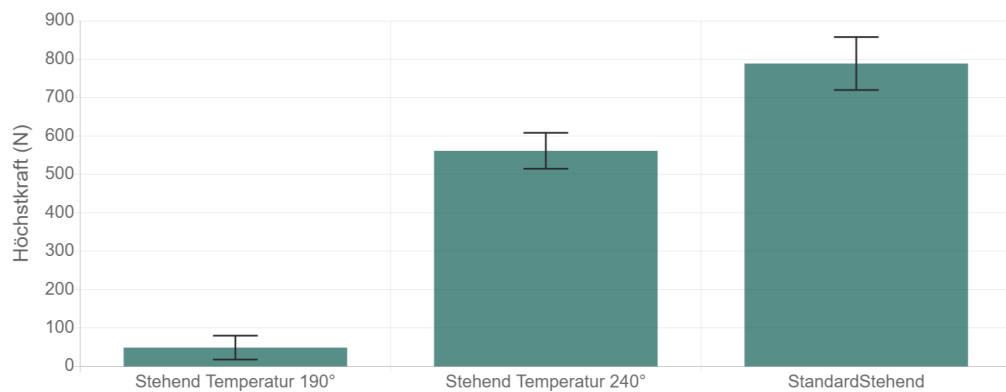


Abb. 20: Versuchsergebnisse: **Düsentemperatur**, stehende Orientierung

5.8 Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuchsreihe werden im Folgenden für jeden Parameter analysiert und interpretiert.

5.8.1 Düsendurchmesser

Liegend:

Eine statistisch signifikante Erhöhung der Höchstkraft und somit auch der Zugfestigkeit mit Vergrößerung des Düsendurchmessers konnte bei liegender Orientierung gemessen werden. Dies bestätigt die Ergebnisse von Triyono et al.. Jedoch lässt sich im Gegensatz zu ihnen auch ein ansatzweise linearer Zusammenhang feststellen. Um diesen aber zu bestätigen, müsste eine genauere Versuchsreihe durchgeführt werden (vgl. Triyono u. a. 2020).

Stehend:

Bei stehender Orientierung konnte ein signifikanter Unterschied nur bei einem Düsendurchmesser von 0.2 mm gemessen werden. Die so gravierend niedrigere Höchstkraft lässt sich durch fehlerhafte Schichten erklären. Da die Schichthöhe bei kleinerem Düsendurchmesser gleich blieb, konnte während des Druckprozesses manchmal nicht genug Material durch die Düse geschoben werden, was zu einer schlechteren Schichthaftung führte. Dieser Effekt zeigt einen stärkeren Einfluss bei stehender Orientierung, da hier die Schichthaftung der schwächsten Schicht ausschlaggebend für die gesamte Zugfestigkeit eines Bauteils ist. Die vergleichsweise niedrige Varianz von 6.56 N unterstreicht, dass dieser Effekt konstant und nicht zufällig wegen äußerer Faktoren auftritt. In Abbildung 21 ist eine fehlerhafte Schicht bei einer der betroffenen Testproben markiert. Der Einfluss des Düsendurchmessers auf die Zugfestigkeit steht also in einem Zusammenhang mit der Schichthöhe.

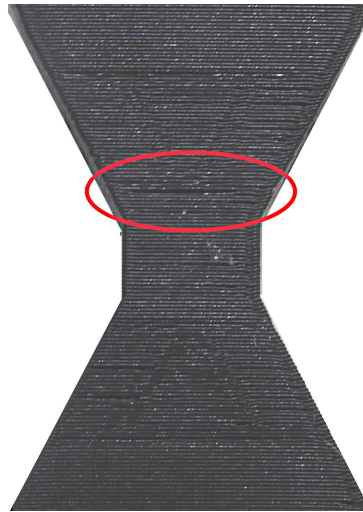


Abb. 21: Fehlerhafte Schicht bei 0.2 mm Düsendurchmesser, Stehend

5.8.2 Fülldichte

Liegend:

Bei einer Veränderung der Fülldichte bei liegenden Testproben konnte mit Erhöhung der Fülldichte eine signifikante Verbesserung der Zugfestigkeit erreicht werden. Wie bei Messemer et al. wurde auch eine erhöhte Varianz bei mehr als 75% gemessen (vgl. Messemer u. a. 2016). Es ließ sich jedoch im Gegensatz zu Fernandez-Vicente et al. kein höherer Einfluss auf die Zugfestigkeit bei 20% bis 50% Fülldichte feststellen (vgl. Fernandez-Vicente u. a. 2016).

Stehend:

Bei stehender Orientierung ließ sich ebenso eine Erhöhung der Zugfestigkeit bei einer höheren Fülldichte feststellen. Der Unterschied ist jedoch nicht so groß wie bei liegender Orientierung. Bei 50% ist er zum Beispiel statistisch nicht signifikant. Der stärkste Einfluss kann bei einer Fülldichte zwischen 0% und 25% gemessen werden.

Für diesen Parameter ist also eine von der Orientierung unabhängige Erhöhung der Zugfestigkeit bei Erhöhung der Fülldichte festzustellen.

5.8.3 Füllmuster

Liegend:

Bei liegender Orientierung konnte eine signifikante Verbesserung der Zugfestigkeit nur beim kubischen Füllmuster gemessen werden. Eine schwach signifikante Verschlechterung der Zugfestigkeit ergab sich beim geradlinigen und konzentrischen Füllmuster. Das kubi-

sche scheint somit das stärkste Füllmuster bei liegender Orientierung zu sein. Die anderen Füllmuster weisen im Vergleich zu den übrigen Parametern einen so geringen Einfluss auf, dass er nicht von Bedeutung ist. Möglicherweise steigt der Einfluss mit wachsendem Bruchstellen-Querschnitt, da der Anteil der Füllung bei großen Objekten größer ist.

Stehend:

Bei stehender Orientierung konnte bei allen Testproben eine signifikante Verschlechterung der Zugfestigkeit im Vergleich zur Standard-Testprobe gemessen werden. Dies könnte beim geradlinigen Füllmuster durch die große Schnittfläche zwischen zwei Schichten erklärt werden, denn der Slicer berechnet das Füllmuster so, dass das Material den bei der Füllichte angegebenen Prozentsatz der Schicht ausfüllt. Beim geradlinigen Füllmuster gibt es nur parallele Linien, was bedeutet, dass diese pro Schicht enger beieinander generiert werden als zum Beispiel beim Gitternetz. Da aber die einzelnen Schichten um 90° gedreht aufeinander gelegt werden, ist das resultierende Netz enger und die resultierende Auflagefläche somit größer als bei anderen Füllmustern mit gleicher Füllichte (s. Abb. 22). Diese größere Auflagefläche resultiert in einer besseren Schichthftung und somit in einer höheren Zugfestigkeit bei stehender Orientierung. Da aber die Dichte im Vergleich zu den anderen Füllmustern gleich bleibt, ist dieser Effekt nur bei stehender Orientierung zu messen.

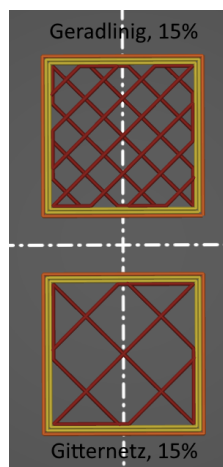


Abb. 22: Querschnitt des geradlinigen und Gitternetz-Füllmusters bei gleicher Füllichte

5.8.4 Schalendicke

Liegend:

Bei liegender Orientierung konnte eine eindeutige Verbesserung der Zugfestigkeit mit höherer Schalendicke gemessen werden. Dieser Zusammenhang scheint linear zu sein.

Stehend:

Bei stehender Orientierung zeigt sich eine schwach signifikant schlechtere Zugfestigkeit mit kleinerer und kein signifikanter Unterschied mit höherer Schalendicke. Daraus kann man schließen, dass bei stehender Orientierung die Schalendicke einen vergleichsweise niedrigen Einfluss ausübt.

5.8.5 Schichthöhe

Liegend:

Bei liegender Orientierung konnte eine signifikante Verbesserung der Zugfestigkeit nur bei 0.1 mm Schichthöhe gemessen werden.

Stehend:

Hier lässt sich nur bei einer höheren Schichthöhe eine signifikante Verschlechterung der Zugfestigkeit messen.

Allgemein ist bei der Schichthöhe festzustellen, dass eine Verkleinerung der Schichthöhe eine Erhöhung der Zugfestigkeit unabhängig von der Orientierung bewirkt. Dies bestätigt die Ergebnisse von Kuznetsova et al. (vgl. Kuznetsov u. a. 2018).

5.8.6 Düsentemperatur

Liegend:

Bei liegender Orientierung konnte kein signifikanter Unterschied bei Veränderung der Düsentemperatur gemessen werden. Bei einer Düsentemperatur von 190° war aber ein „Klick“ Geräusch beim Druckkopf hörbar. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Düse durch zu kalte Düsentemperaturen teilweise verstopft wird, was zu fehlerhaften Schichten sowie schlechterer Schichthaftung führt. Da aber die Zugfestigkeit trotz der schlechteren Schichthaftung gleich geblieben ist, scheint die Schichthaftung keinen großen Einfluss auf die Zugfestigkeit bei liegender Orientierung auszuüben.

Stehend:

Bei stehender Orientierung konnte eine schlechtere Zugfestigkeit bei Erhöhung sowie Verringerung der Düsentemperatur gemessen werden. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die optimale Düsentemperatur für PLA bei ungefähr 215° liegt. Bei 190° gab es wie bei liegender Orientierung fehlerhafte Schichten und in Folge eine geringere Zugfestigkeit.

5.8.7 Orientierung

Der Mittelwert der Zugfestigkeit aller Testversuche bei liegender Orientierung ist fast doppelt so groß wie bei stehender Orientierung. Die Zugfestigkeit bei 3D-gedruckten Objekten parallel zum Druckbett ist also höher als normal zum Druckbett. Dies bestätigt die Ergebnisse von Kirchner et al. (vgl. Kirchner u. a. 2010).

6 Fazit

Die vorliegenden Testergebnisse und ihre Analyse erlauben für den Faktor Zugfestigkeit eine genauere Bestimmung der optimalen Werte von den FDM 3D-Druck Parametern Düsendurchmesser, Füllichte, Füllmuster, Schalendicke, Schichthöhe und Düsentemperatur. In Tabelle 6 werden die Werte bei liegender Orientierung und in Tabelle 7 bei stehender Orientierung aufgelistet. Sind zwei Werte aufgelistet besteht zwischen diesen kein Unterschied.

Parameter	Wert
Düsendurchmesser	0.6 mm
Füllichte	100%
Füllmuster	Kubisch
Schalendicke	1.2 mm
Schichthöhe	0.1 mm
Düsentemperatur	kein Einfluss

Tabelle 6: Optimale Werte für die höchste Zugfestigkeit bei liegender Orientierung

Parameter	Wert
Düsendurchmesser	0.4 mm / 0.6 mm
Füllichte	100%
Füllmuster	Geradlinig
Schalendicke	0.8 mm / 1.2 mm
Schichthöhe	0.1 mm / 0.2 mm
Düsentemperatur	215°

Tabelle 7: Optimale Werte für die höchste Zugfestigkeit bei stehender Orientierung

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus der Analyse zusammenfassen:

- Eine Erhöhung des **Düsendurchmessers** im untersuchten Bereich von 0.2 mm bis 0.6 mm führt zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit. Diese Veränderung ist bei stehender Orientierung jedoch nur zwischen 0.2 mm und 0.4 mm beobachtbar.

- Eine höhere **Füllichte** führt zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit. Diese Veränderung ist unabhängig von der Orientierung.
- Bei liegender Orientierung weist das kubische **Füllmuster** die höchste Zugfestigkeit auf, bei stehender Orientierung das geradlinige.
- Eine Erhöhung der **Schalendicke** im untersuchten Bereich von 0.4 mm bis 1.2 mm führt zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit bei liegender Orientierung. Bei stehender Orientierung hat die Schalendicke einen vergleichsweise niedrigen Einfluss.
- Eine Verkleinerung der **Schichthöhe** führt unabhängig von der Orientierung im untersuchten Bereich von 0.1 mm bis 0.3 mm zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit.
- Die **Düsentemperatur** hat bei liegender Orientierung im untersuchten Bereich von 190° bis 240° keinen Einfluss auf die Zugfestigkeit. Bei stehender Orientierung hingegen zeigt jegliche Veränderung der Düsentemperatur einen negativen Einfluss auf die Zugfestigkeit.
- Liegend orientierte Objekte haben eine höhere Zugfestigkeit als stehend orientierte Objekte.

Es ist festzuhalten, dass die Testproben für diese empirische Arbeit mit dem Material PLA durchgeführt wurden. In zukünftigen Forschungen könnte diese Versuchsreihe auch mit anderen häufig verwendeten Materialien wie ABS, PETG oder Nylon wiederholt werden, um zu überprüfen, ob der Einfluss der untersuchten Parameter unabhängig vom verwendeten Material ist. Weiters könnte der in Kapitel 5.8.1 angesprochene lineare Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser und Zugfestigkeit noch untersucht und die in Kapitel 5.8.6 vermutete optimale Düsentemperatur in Bezug auf die Zugfestigkeit, genauer bestimmt werden. Zudem könnte das Verhältnis der einzelnen Parameter zueinander untersucht werden, ob z.B. eine Veränderung der Schichthöhe bei unterschiedlichen Düsentemperatur ein unterschiedliches Ergebnis bringt.

7 Zusammenfassung

Die 3D-Druck Technologie hat sich in den letzten zehn Jahren so weiter entwickelt, dass sie nicht mehr nur für große Unternehmen sondern auch für kleinere Firmen, Hobbybastler und sogar für den Haushalt anwendbar und v.a. leistbar wurde. Da in Folge die 3D-Druck Technologie nicht nur für Prototypen, sondern auch für Endprodukte verwendet wird, ist die Stabilität eines 3D-gedruckten Objektes ein wichtiger Faktor geworden.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der FDM 3D-Druck Parameter Düsendurchmesser, Füllichte, Füllmuster, Schalendicke, Schichthöhe und Düsentemperatur in Abhängigkeit von der Orientierung auf die Zugfestigkeit von 3D-gedruckten Objekten zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine 5kN Zugprüfmaschine konstruiert und eine geeignete Testprobe entworfen, die als Standard-Testprobe definiert wurde. Diese wurde dann mit jeweils veränderten Parametern bei liegender wie stehender Orientierung ausgedruckt. Die anschließende Überprüfung ihrer Zugfestigkeit mithilfe der Zugprüfmaschine lieferte aussagekräftige Daten. Die Auswertung der Ergebnisse definiert nun genauer die optimalen Werte der jeweiligen Parameter für die höchste Zugfestigkeit und kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei liegender Orientierung führt ein Düsendurchmesser von 0.6 mm zu der höchsten Zugfestigkeit, während bei stehender die Düsendurchmesser 0.4 mm und 0.6 mm optimal sind.
- Die optimale Füllichte ist bei beiden Orientierungen 100%.
- Bei liegender Orientierung führt das kubische und bei stehender das geradlinige Füllmuster zur höchsten Zugfestigkeit.
- Bei beiden Orientierungen ist eine Schalendicke von 1.2 mm optimal, wobei bei stehender Orientierung kein signifikanter Unterschied zwischen 0.8 mm und 1.2 mm gemessen wurde.
- Bei liegender und stehender Orientierung führt eine Schichthöhe von 0.1 mm zu der höchsten Zugfestigkeit, jedoch wurde bei stehender Orientierung kein signifikanter Unterschied zwischen 0.1 mm und 0.2 mm gemessen.
- Die Temperatur hat bei liegender Orientierung keinen Einfluss auf die Zugfestigkeit, bei stehender Orientierung sind 215° optimal.

Diese Erkenntnisse bieten eine Grundlage, um in Zukunft Objekte für den FDM 3D-Druck so „slicen“ zu können, dass sie ein zugfesteres und damit stabileres Druckobjekt ergeben. Die Arbeit liefert so einen Beitrag, um die 3D-Druck Technologie für den Alltagsgebrauch bzw. für praktische Anwendungen zu optimieren.

8 Bibliografie

- aliexpress. n.d. "Datenblatt 5kN Wägezelle". Besucht am 30. Dezember 2020. <https://www.aliexpress.com/item/1083523348.html>.
- All3DP. 2020. "2020 3D Printer Filament Buyer's Guide". Besucht am 26. Dezember 2020. <https://all3dp.com/1/3D-printer-filament-types-3D-printing-3D-filament/>.
- Bargel, Hans-Jürgen, und Günter Schulze. 2013. *Werkstoffkunde*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-17717-0.
- bq. 2016. *PLA Coal Black Filament 1.75mm*. https://cdn-3d.niceshops.com/upload/file/Technical_specifications_-_BQ_PLA.pdf.
- Dwamena, Michael. 2019. "What is the Strongest Infill Pattern?" Besucht am 30. Dezember 2020. <https://3dprinterly.com/what-is-the-strongest-infill-pattern/>.
- Evans, Brian. 2012. *Practical 3D Printers - The Science and Art of 3D Printing*. New York: Apress. ISBN: 978-1-430-24393-9.
- Fastermann, Petra. 2012. *3D-Druck/Rapid Prototyping - Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-29225-5.
- Fernandez-Vicente, Miguel, Wilson Calle, Santiago Ferrandiz und Andres Conejero. 2016. "Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing". *3D Printing and Additive Manufacturing* 3 (3): 183–192. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036>.
- Grote, Karl-Heinrich, Beate Bender und Dietmar Göhlich. 2018. *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-662-54805-9.
- Hagl, Richard. 2014. *Das 3D-Druck-Kompendium - Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-658-07047-2.
- Hermann, Stefan. 2019. "OpenPull Visualizer". Besucht am 10. Dezember 2020. <https://github.com/CNCKitchen/Open-Pull>.
- Hussl, Julius. 2020a. "OpenPull Visualizer". <https://github.com/Iqwertz/OpenPullTestDataVisualizer>.
- Hussl, Julius. 2020b. "OpenPull WebController". <https://github.com/Iqwertz/OpenPull-Web-Controller>.
- Hussl, Julius. 2021. "Rohdaten der VWA im OpenPull Visualizer". <https://iqwertz.github.io/Visualizer/?data=VWA>.

- Johansson, Frans. 2016. "Optimizing Fused Filament Fabrication 3D printing for durability". Magisterarbeit, Blekinge Institute of Technology.
- Junk, Stefan. 2017. *Onshape - kurz und bündig - Praktischer Einstieg in Cloud-basiertes CAD und 3D-Druck*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-658-17960-1.
- Kanji, Gopal K. 2006. *100 Statistical Tests* -. London: SAGE. ISBN: 978-1-446-22250-8.
- Kirchner, Karsten, Hannah Jäschke, Hans-Joachim Franke, Thomas Vietor und Karl-Heinz Grote. 2010. "Mechanisch-technologische Eigenschaften generativ gefertigter Bauteile in Abhängigkeit von der Bauteilorientierung". *RTejournal - Forum für Rapid Technologie*, ISSN: 1614-0923. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-2-25776>.
- Kovan, Volkan, Gurkan Altan und Eyüp Topal. 2017. "Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints". *Journal of Mechanical Science and Technology* 31 (Mai): 2197–2201. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0415-7>.
- Kuznetsov, Vladimir, Alexey Solonin, Oleg Urzhumtsev, Richard Schilling und Azamat Tavitov. 2018. "Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process" (März). <https://doi.org/10.20944/preprints201803.0036.v1>.
- Kuznetsov, Vladimir, Alexey N. Solonin, Azamat Tavitov, Oleg Urzhumtsev und Anna Vakulik. 2020. "Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process". *Rapid Prototyping Journal* 26 (1): 107–121. <https://doi.org/10.1108/rpj-01-2019-0017>.
- May, Markus. 2017. "Einfluss der Schichtstärke auf die 3D-Druckqualität". Besucht am 28. Dezember 2020. <https://3faktor.com/einfluss-der-schichtstaerke-auf-die-3D-druckqualitaet>.
- Messemer, Joachim, Thomas Kaufmann, Christian Martin, Malte Neises, André Schmidt und Henrik te Heesen. 2016. "Untersuchung der Zugfestigkeit von FLM-Zugproben aus PLA bei Variation von Schichtdicke und Füllgrad". *RTejournal* 2016 (Oktober).
- Papula, Lothar. 2016. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3 - Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-658-11924-9.

- Patadiya, Naushil H., Harshit K. Dave und Shilpesh R. Rajpurohit. 2020. *Effect of Build Orientation on Mechanical Strength of FDM Printed PLA*, herausgegeben von M. S. Shunmugam und M. Kanthababu. Singapore: Springer Singapore. ISBN: 978-981-32-9433-2.
- Prusa3D. 2020a. "Prusa Knowledgebase - ABS". Besucht am 28. Dezember 2020. https://help.prusa3d.com/de/article/abs_5008.
- Prusa3D. 2020b. "Prusa Knowledgebase - Infill". Besucht am 29. Dezember 2020. https://help.prusa3d.com/de/article/infill_5225.
- Prusa3D. 2020c. "Prusa Knowledgebase - PLA". Besucht am 28. Dezember 2020. https://www.help.prusa3d.com/de/article/pla_5064.
- Prusa3D. 2020d. "Prusa Knowledgebase - Polykarbonat (PC)". Besucht am 28. Dezember 2020. https://help.prusa3d.com/de/article/polykarbonat-pc_165815.
- Prusa3D. 2020e. "Prusa Knowledgebase - Schichten und Konturen". Besucht am 29. Dezember 2020. https://help.prusa3d.com/de/article/schichten-und-konturen_5932.
- Rafiqul, Iam. 2020. "Cura Infill Patterns". Besucht am 30. Dezember 2020. <https://iamrafiqul.medium.com/cura-infill-patterns-6dd62be22d77>.
- Rajpurohit, Shilpesh, und Harshit Dave. 2018. "Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part". *Rapid Prototyping Journal* 24 (Oktober). <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2017-0134>.
- Redwood, Ben, Filemon Schöffner und Brian Garret. 2017. *The 3D Printing Handbook - Technologies, Design and Applications*. Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs B.V. ISBN: 978—9-0-82-74-8.
- Sommer, Ethan. 2020. "The Perfect PLA Print & Bed Temperature". Besucht am 27. Dezember 2020. <https://all3dp.com/2/the-best-pla-print-temperature-how-to-achieve-it/>.
- Triyono, Joko, Heru Sukanto, Rizki Mica Saputra und Dharu Feby Smaradhana. 2020. "The effect of nozzle hole diameter of 3D printing on porosity and tensile strength parts using polylactic acid material". *Open Engineering* 10, Nr. 1 (August): 83. <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0083>.
- Zuza, Mikolas. 2018. "Everything about nozzles with a different diameter". Besucht am 28. Dezember 2020. https://blog.prusaprinters.org/everything-about-nozzles-with-a-different-diameter_8344/.

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Aufbau eines FDM 3D-Druckers am Beispiel eines Prusa I3 MK3s . .	10
Abb. 2	Die am häufigsten verwendeten Füllmuster	15
Abb. 3	Bohrlöcher in den Teilen Nr. 2 & 4	18
Abb. 4	Abmessungen und Aufbau des Rahmens	18
Abb. 5	Zusammengebaute Klemme	19
Abb. 6	Die zusammengebaute Zugprüfmaschine	19
Abb. 7	Schaltplan der Zugprüfmaschine	20
Abb. 8	Technische Skizze der Testprobe	21
Abb. 9	Versuchsergebnisse: Düsendurchmesser , liegende Orientierung . .	28
Abb. 10	Versuchsergebnisse: Düsendurchmesser , stehende Orientierung . .	28
Abb. 11	Versuchsergebnisse: Fülldicke , liegende Orientierung	29
Abb. 12	Versuchsergebnisse: Fülldicke , stehende Orientierung	29
Abb. 13	Versuchsergebnisse: Füllmuster , liegende Orientierung	30
Abb. 14	Versuchsergebnisse: Füllmuster , stehende Orientierung	30
Abb. 15	Versuchsergebnisse: Schalendicke , liegende Orientierung	31
Abb. 16	Versuchsergebnisse: Schalendicke , stehende Orientierung	31
Abb. 17	Versuchsergebnisse: Schichthöhe , liegende Orientierung	32
Abb. 18	Versuchsergebnisse: Schichthöhe , stehende Orientierung	32
Abb. 19	Versuchsergebnisse: Düsentemperatur , liegende Orientierung . . .	33
Abb. 20	Versuchsergebnisse: Düsentemperatur , stehende Orientierung . . .	33
Abb. 21	Fehlerhafte Schicht bei 0.2 mm Düsendurchmesser, Stehend	35
Abb. 22	Querschnitt des geradlinigen und Gitternetz-Füllmusters bei gleicher Fülldicke	36

Sämtliche Abbildungen stammen vom Verfasser.

10 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Varianz der Testproben	22
Tab. 2	Werte der Standard-Testprobe	23
Tab. 3	Veränderung an den Parametern bei liegender und stehender Orientierung	24
Tab. 4	APA Formatierungstabelle	25
Tab. 5	statistische Signifikanz der Versuchsergebnisse (APA Style)	27
Tab. 6	Optimale Werte für die höchste Zugfestigkeit bei liegender Orientierung	39
Tab. 7	Optimale Werte für die höchste Zugfestigkeit bei stehender Orientierung	39
Tab. 8	Teile für die Zugprüfmaschine	47
Tab. 9	Ergebnisse der Versuchsreihe	48

Sämtliche Tabellen stammen vom Verfasser.

11 Anhang

Anhang 1:

Nr	Bauteil	Anzahl	Details	Zusätzliche Daten
1	Holzbalken	2	4.8 cm x 7.5 cm x 75 cm	
2	Holzbalken	2	4.8 cm x 7.5 cm x 26 cm	
3	Holzbalken	2	4.8 cm x 7.5 cm x 30 cm	
4	Holzbalken	1	4.8 cm x 7.5 cm x 24 cm	
5	Trapezgewindespindel	2	0.5 m 10 mm x 2 mm	
6	Schräggugellager	2		
7	Trapezgewinde Flansch	2	Gewinde 10 mm x 2 mm	
8	Kugellager 6202	2		
3D-gedruckte Teile				
9	Achsen Halter	2		AchsenHalter.stl
10	Schrittmotor Halter	2		SchrittMotorHalter.stl
11	Schaltung Halterung	1		MainBoardHalterung.stl
12	Hacken Halter	2		HackenHalter.stl
13	Kugellager Halter	2		KugellagerHalter.stl
14	Bluetooth und SD Halter	1		BluetoothSDHalter.stl
15	M10 Trapezoidal Mutter	2		M10Nut.stl
16	Klemme: vordere Platte	2		Vorne.Klemme.stl
17	Klemme: Mitte	2		Mitte.Klemme.stl
18	Klemme: hintere Platte	2		Hinten.Klemme.stl
19	Klemme: Block	4	Schleifpapier auf greifender Fläche für bessere Haltung	Block.Klemme.stl
20	Klemme: Drehgriff	4		DrehGriff.Klemme.stl
21	Kupplung	2		Kupplung.stl
Elektronik				
22	Schrittmotor	2	Nema17 mit 14:1 Planetengetriebe	
23	5kN Wägezelle	1		
24	Hx711 Modul	1		
25	Netzteil	1	24v 5A	
26	Lüfter	1	5v	
27	Kondensator	1	0.1mF	
28	DC-DC wandler	1	24v zu 5v	
29	Arduino Micro	1		
30	Schrittmotor Treiber	2	Typ: A4988	
31	MicroSd Card Module	1		
32	Bluetooth Modul	1	Typ: HM10	

Tabelle 8: Teile für die Zugprüfmaschine

Anhang 2:

Name	Stichproben Anzahl	Wert1 (N)	Wert2 (N)	Wert3 (N)	Mittelwert (N)	Standardabweichung (N)
Stehend Düsentemperatur 190°	3	18	49	80	49	31
Stehend Düsendurchmesser 0.2mm	3	63	50	58	57	6.56
Stehend Fülllichte 0%	3	193	234	221	216	20.95
Stehend Füllmuster Kubisch	3	327	368	317	337.33	27.02
Stehend Füllmuster Gyroid	3	370	385	315	356.67	36.86
Stehend Schichthöhe 0.3mm	3	420	317	344	360.33	53.41
Stehend Füllmuster Konzentisch	3	438	403	253	364.67	98.28
Stehend Füllmuster Gitternetz	3	500	449	403	450.67	48.52
Stehend Füllmuster Dreiecke	3	468	400	492	453.33	47.72
Liegend Düsendurchmesser 0.2mm	3	388	497	505	463.33	65.36
Liegend Schalendicke 0.4mm	3	516	501	507	508	7.55
Stehend Schalendicke 0.4mm	3	571	564	401	512	96.19
Stehend Düsentemperatur 240°	3	522	613	549	561.33	46.74
Liegend Fülllichte 0%	3	644	562	631	612.33	44.07
Stehend Düsendurchmesser 0.6mm	3	633	670	771	691.33	71.43
Stehend Fülllichte 50%	3	824	772	637	744.33	96.52
StandardStehend	3	818	710	838	788.67	68.86
Stehend Schalendicke 1.2mm	3	785	767	830	794	32.45
Liegend Füllmuster Gyroid	3	819	844	743	802	52.6
Stehend Schichthöhe 0.1mm	3	833	897	700	810	100.49
Liegend Füllmuster Konzentrisch	3	839	807	799	815	21.17
Liegend Füllmuster Gitternetz	3	808	837	825	823.33	14.57
Liegend Füllmuster Dreiecke	3	875	881	866	874	7.55
StandardLiegend	3	884	907	867	886	20.07
Liegend Schichthöhe 0.3mm	3	941	821	947	903	71.08
Liegend Düsentemperatur 240°	3	875	940	969	928	48.14
Liegend Düsentemperatur 190°	3	1042	835	959	945.33	104.17
Stehend Fülllichte 75%	3	1106	1024	969	1033	68.94
Liegend Schichthöhe 0.1mm	3	1109	1079	1053	1080.33	28.02
Liegend Füllmuster Kubisch	3	1075	1112	1085	1090.67	19.14
Liegend Fülllichte 50%	3	1169	1111	1032	1104	68.77
Stehend Fülllichte 100%	3	1153	1136	1193	1160.67	29.26
Liegend Schalendicke 1.2mm	3	1295	1256	1251	1267.33	24.09
Liegend Düsendurchmesser 0.6mm	3	1255	1358	1331	1314.67	53.41
Liegend Fülllichte 75%	3	1660	1616	1428	1568	123.22
Liegend Fülllichte 100%	3	2198	2422	2015	2211.67	203.84

Tabelle 9: Ergebnisse der Versuchsreihe

Name: Julius Hussl

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich diese vorwissenschaftliche Arbeit eigenständig angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Wien, 24.02.2021

Ort, Datum

A handwritten signature in blue ink, reading "Julius Hussl", written over a horizontal line.

Unterschrift