

---

# Untersuchung der Prozessfähigkeit des SLS-3D-Druckers Fuse 1 von Formlabs

Norbert Babel\*, Georg Dornaus

Hochschule für angewandte Wissenschaft Landshut, Fakultät Maschinenbau,  
Am Lurzenhof 1, 84036 Landshut

\*) Corresponding author: E-Mail: [norbert.babel@haw-landshut](mailto:norbert.babel@haw-landshut)

## Schlüsselworte

Formlabs, Fuse 1, SLS, Additive Manufacturing, 3D-Druck, Pulverdruck, Rapid Prototyping, Selective Laser Sintern, PA

## Zusammenfassung

Gegenstand dieses Artikels ist die Untersuchung der Prozessfähigkeit des 3D-Druckers Fuse 1 von der Firma Formlabs.

Mit dem Fuse 1 erweiterte das amerikanische Unternehmen Formlabs, das bereits für seine Stereolithografie-3D-Drucker (SLA) bekannt ist, sein Produktportfolio um das selektive Lasersintern (SLS).

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Qualität hinsichtlich der (Wiederhol-) Genauigkeit wurden verschiedene Versuche durchgeführt. Neben dem Drucken von Probekörpern zur Untersuchung der Maßhaltigkeit, wurden auch Zug-, Biege- und Relaxationsversuche durchgeführt. Hierbei wurden zusätzlich die, für additive Fertigungsverfahren, übliche anisotropen Festigkeitseigenschaften ermittelt. Entgegen der Erwartungen zeigten sich lediglich geringfügig anisotrope Eigenschaften.

In allen untersuchten Bereichen zeigte sich der Fuse 1 durchwegs als ausgereift und zuverlässig. Die einfache und weitgehend automatisierte Bedienung, wurde auch bei diesem Modell beibehalten und damit ist sie sowohl für den professionellen als auch semi-professionellen Einsatz prädestiniert. Die dafür notwendige Druckvorbereitung unterstützt Formlabs mit einer eigenen Slicer-Software ebenfalls recht gut.

# 1. Einleitung

Der 3D-Drucker Fuse 1 (Abbildung 1 links) mit zugehöriger Nachbearbeitungs- und Reinigungsstation Fuse Sift (Abbildung 1 rechts) arbeitet nach dem Verfahren des selektiven Lasersinterns (SLS), welches im Zuge der fortschreitenden Verbreitung der additiven Fertigung, und aufgrund der hervorragenden mechanischen Festigkeitswerte zunehmend an Bedeutung gewinnt. Hierbei wird ein pulverförmig vorliegender Kunststoff selektiv mit einem Laser belichtet und so stark erhitzt, dass es zu einem partiellen Verschmelzen bzw. Versintern des Kunststoffpulvers kommt und so die gewünschte Geometrie schichtweise erzeugt wird (Technische Daten siehe Tab. 1).



Abbildung 1: Fuse 1 (links) mit zugehöriger Nachbearbeitungs- und Reinigungsstation Fuse Sift (rechts) [1]

Verarbeitet wird vor allem Polyamid 12 (PA12), das auch als Nylon 12 bezeichnet wird. In den beschriebenen Versuchen wurde ausschließlich dieser Kunststoff verwendet und getestet. Der Druck findet in einem Pulverbett statt, aus welchem die erzeugten Bauteile anschließend befreit werden müssen. Hierzu bietet Formlabs die Reinigungsstation Fuse Sift an, welche während des Entpackens, das anfallende überschüssige Pulver sammelt, mit neuem vermengt und damit eine erneute Befüllung des Druckers vorbereitet.

Tabelle 1: Technische Daten Fuse 1 [1]

|                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| Bauraum B x T x H [mm]   | 165 x 165 x 300           |
| Düsendurchmesser [mm]    | 0,3 – 1,0; 0,4 (Standard) |
| Schichthöhe [mm]         | 0,11                      |
| Laserspotgröße [mm]      | 0,2 (Laserklasse 1)       |
| Betriebstemperatur [°C]  | 200                       |
| Aufwärmzeit [min]        | 60                        |
| Verarbeitbare Formate    | STL oder OBJ              |
| Unterstützte Materialien | PA 11 / PA 12= Nylon      |

## 1.1 Nachbearbeitungsstation

Wie oben beschrieben besteht der Fuse 1 Arbeitsplatz nicht nur aus dem eigentlichen Drucker, sondern beinhaltet auch eine Nachbearbeitungsstation, genannt Fuse Sift (siehe Abbildung 1). Diese dient, neben dem Befreien der gedruckten Bauteile aus dem Bauraum, auch dem Sieben von unverbrauchtem Druckwerkstoff, sowie dem Befüllen eines Nachfüllbehälters mit frischem bzw. recyceltem Pulver. Ein großer Vorteil der pulverbasierenden 3D-Druckverfahren besteht in der Wiederverwendbarkeit des unverbrauchten Pulvers, das nur eine Stütz- oder Supportfunktion während des Druckes übernommen hat und somit nicht verbraucht wurde. Diese Wiederverwendbarkeitsquote liegt beim Fuse 1 bei 70 %, was bedeutet, dass vom Drucker nicht verbrauchtes Pulver mit nur 30 % frischem Pulver vermengt werden muss, und kein Abfall entsteht.

## 1.2 Silcer Software

Die Druckvorbereitung erfolgt in der herstellereigenen Software PreForm (siehe Abbildung 2), welche ein sogenanntes „One-Click-Printing“ bietet. Hierfür werden zunächst die digitalen 3D-Modelle aller Druckobjekte eines Druckjobs im STL- oder Obj-Dateiformat in die Software geladen, anschließend vollautomatisch positioniert, gesliced und für den Druck vorbereitet. Dabei versucht die Software eine möglichst hohe Packungsdichte zu erzielen.

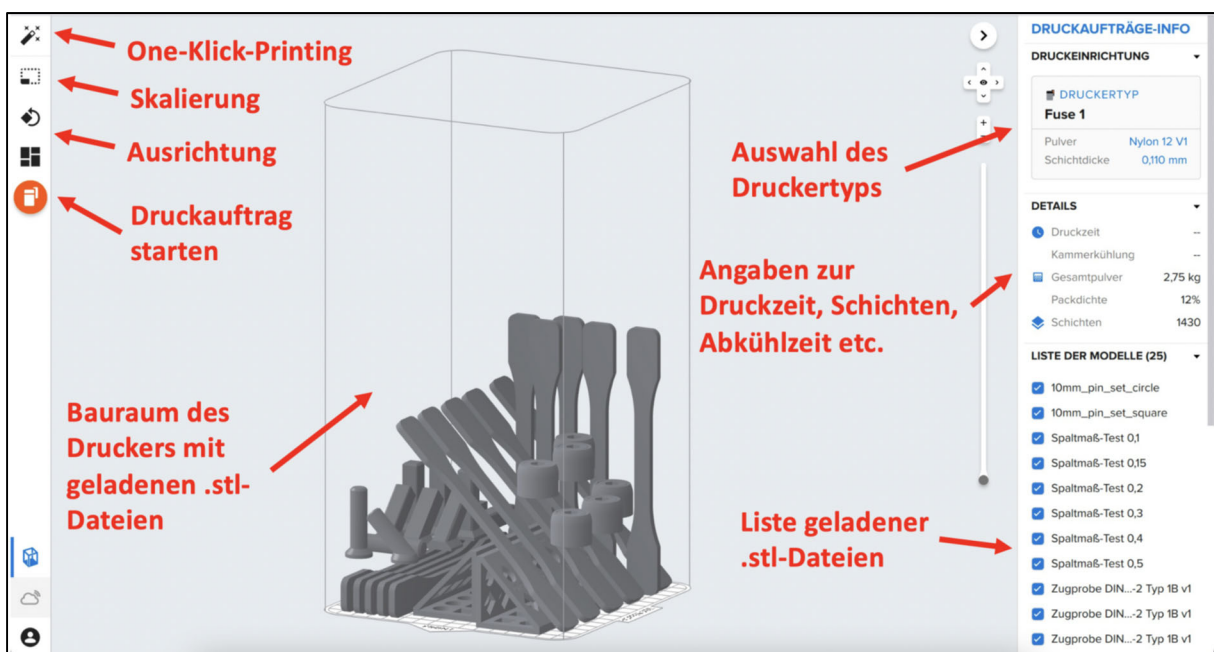


Abbildung 2: Oberfläche der Software PreForm zur Druckvorbereitung für Drucke mit dem den Fuse 1 [4]

Die Druckparameter betreffend (z.B. Temperatur, Geschwindigkeit), bietet PreForm keinerlei Möglichkeiten einzugreifen. Der Anwender ist daher auf die Verwendung der von Formlabs

---

angebotenen Druckwerkstoffe und deren Softwareprofile angewiesen. Dies führt nicht nur zu einer Einschränkung der Werkstoffvielfalt, sondern auch zu einer Herstellerbindung beim Einkauf des Druckmaterials. Andererseits sind aufgrund der herstellereitig optimierten Parameter durchweg gute Ergebnisse erzielt worden und es müssen keine aufwendigen Druckversuche für die Suche nach optimalen Einstellungen durchgeführt werden.

### **1.3 Druckvorgang**

Nach Abschluss der Druckvorbereitung wird der Druckauftrag über eine Netzwerkschnittstelle an den Drucker gesendet. Dies kann entweder direkt erfolgen oder innerhalb eines Online-Dashboards, in welchem Druckaufträge für einen längeren Zeitraum geplant werden können, beispielsweise bei einer Serienproduktion oder falls die Anlage von mehreren Nutzern beschickt wird. Das Dashboard gibt zudem Aufschluss über den Zustand des Druckers und die verbleibende Dauer des aktuellen Druckauftrages.

Der hochgeladene Druckauftrag wird dann direkt an der Maschine gestartet. Vorab muss ein Bauraumcontainer (siehe Abb. 3 links) in den Drucker eingesetzt und angeschlossen werden. Sobald dies erfolgt ist, verriegelt der Drucker die Baumraumtüre, um Temperaturschwankungen und Unfälle durch versehentliches Öffnen zu vermeiden. Anschließend wird der Benutzer aufgefordert, einige vorbereitende Schritte durchzuführen. Hierzu gehört die Kontrolle des Pulvervorrats und der Infrarot- (IR)-Linse, welche die Temperatur der Druckkammer überwacht.

Sollte der Pulvervorrat für den aktuellen Druckauftrag nicht ausreichen, muss dieser vor Beginn des Drucks aufgefüllt werden. Hierzu wird der Nachfüllbehälter in die Nachbearbeitungs- und Säuberungsstation Fuse Sift eingesetzt. Dort wird nun über ein Display das gewünschte Mischungsverhältnis von recyceltem und frischen Druckwerkstoff eingestellt und anschließend vollautomatisch befüllt. Anschließend wird der Behälter entnommen, in eine seitlich an der Sift-Station angebrachte Halterung eingesetzt und für eine optimale Durchmischung in Rotation versetzt. Dieser Vorgang dauert ca. 10 Minuten.

Sind alle Vorbereitungen abgeschlossen, beginnt der Drucker mit der Aufheizphase, in welcher einige Materialsichten in den Bauraum eingebracht und mittels Heizelementen auf 180 °C aufgeheizt werden. Dieser Vorgang dauert etwa 45 Minuten. Anschließend erfolgt der eigentliche Bauteildruck, bei welchem ein Laserstrahl selektiv auf die auszuhärtenden Koordinaten gelenkt wird.

---

## 1.4 Bauteilentnahme

Sobald der Druckvorgang abgeschlossen ist, beginnt die Abkühlphase, in welcher die Temperatur innerhalb des Bauraumcontainers (Abb. 3 links) wieder auf Raumtemperatur abkühlt. Um in dieser Zeit den Drucker nicht zu blockieren, kann ein großer Teil dieser Abkühlphase außerhalb der Anlage geschehen, indem der Bauraumcontainer bereits nach kurzer Zeit entnommen und durch einen zweiten ersetzt wird. Somit ist der Fuse 1 in der Lage, nahezu ohne Unterbrechung zu drucken, was der Wirtschaftlichkeit der Anlage deutlich zugutekommt.

Zum Entpacken wird der Bauraumcontainer in die Nachbearbeitungs- und Reinigungsstation Fuse Sift eingesetzt und über einen Stecker elektrisch verbunden. Die Sift-Station erkennt den Container selbstständig und gibt ihn bei einer ausreichend geringen Temperatur, welche ein Messfühler ermittelt, zum manuellen Entpacken frei. Die Bauplattform innerhalb des Containers kann nun nach oben bewegt werden. So wird der gesamte Baurauminhalt so positioniert, dass ihn der Bediener entnehmen und auf ein nebenliegendes Gitter versetzen kann (Abb. 3 rechts). Die Reinigungsstation verfügt über ein Rüttelsieb unter dem o.g. Gitter, durch welches das beim Entpacken anfallende, überschüssige Pulver direkt gesiebt und in den anlageninternen Pulvertank gelangt, aus dem es später, mit frischem Pulver vermengt, wiederverwendet werden kann.



Abbildung 3: Rechts: Bauraumcontainer und links Bauteilentnahme im Arbeitsbereich der Nachbearbeitungs- und Reinigungsstation Fuse Sift [4]

---

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Untersuchung der Maßhaltigkeit

Die Maßhaltigkeit ist eines der wichtigsten Kriterien zur Beurteilung eines Fertigungsverfahrens. Besonders für Konstrukteure ist es zwingend erforderlich, die erreichbaren Toleranzen zu kennen, da hiervon die Funktionsfähigkeit einer Konstruktion abhängt.

Die in Abbildung 4 dargestellten beiden Probekörper (Quader mit Bohrung in verschiedenen Größen) wurden jeweils dreifach, sowohl liegend als auch stehend gedruckt, um eine allgemeine und gegebenenfalls richtungsabhängige Maßhaltigkeit zu identifizieren. In die Bewertung fließen die Maßhaltigkeit der Außenmaße sowie der durchgehenden Bohrung ein.

Abmessungen:

Kleiner Quader: B x T x H 15 x 15 x 20 mm mit einer 5 mm Bohrung

Großer Quader: B x T x H 25 x 25 x 40 mm mit einer 10 mm Bohrung

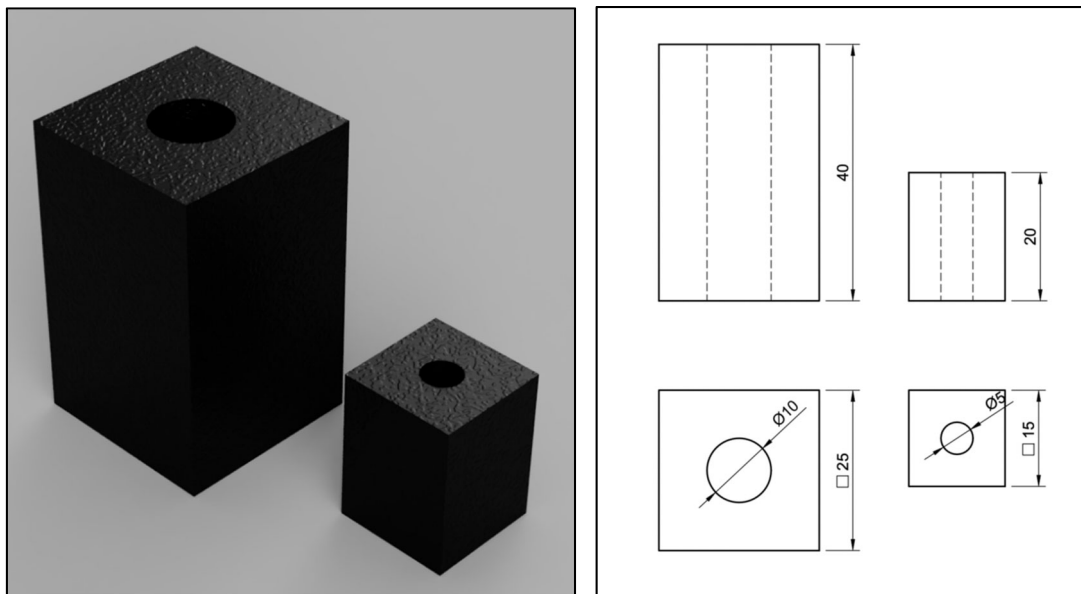


Abbildung 4: Probekörper zur Prüfung der Maßhaltigkeit mit Abmessungen rechts [4]

## 2.2 Ermittlung des minimalen Spaltmaßes

Um die Vorteile der additiven Fertigung konstruktiv vollumfänglich nutzen zu können, ist neben der Kenntnis über die Maßhaltigkeit, auch das minimal erreichbare Spaltmaß von Bedeutung. Dies ist bei der Produktion von integrierten Gelenksfunktionen erforderlich, also wenn mehrere Bauteile montagefrei ineinander liegend gedruckt werden sollen. Wird hier ein zu kleines Spaltmaß gewählt, stellt sich die gewünschte Beweglichkeit nicht ein, wohingegen bei einem zu großen Gelenkspiel die notwendige Führungsgenauigkeit nicht mehr gegeben ist.

Um hier valide Ergebnisse zu erzielen, wurden drei verschiedene Versuche konzipiert und durchgeführt. Zunächst wurde eine universelle Lehre gedruckt (Abb.5), welche eine Reihe von Durchbrüchen verschiedener Größe und Form haben, sowie die dazu passenden Formprobekörper, jeweils in verschiedenen Ausrichtungen gedruckt (siehe Abb. 6).

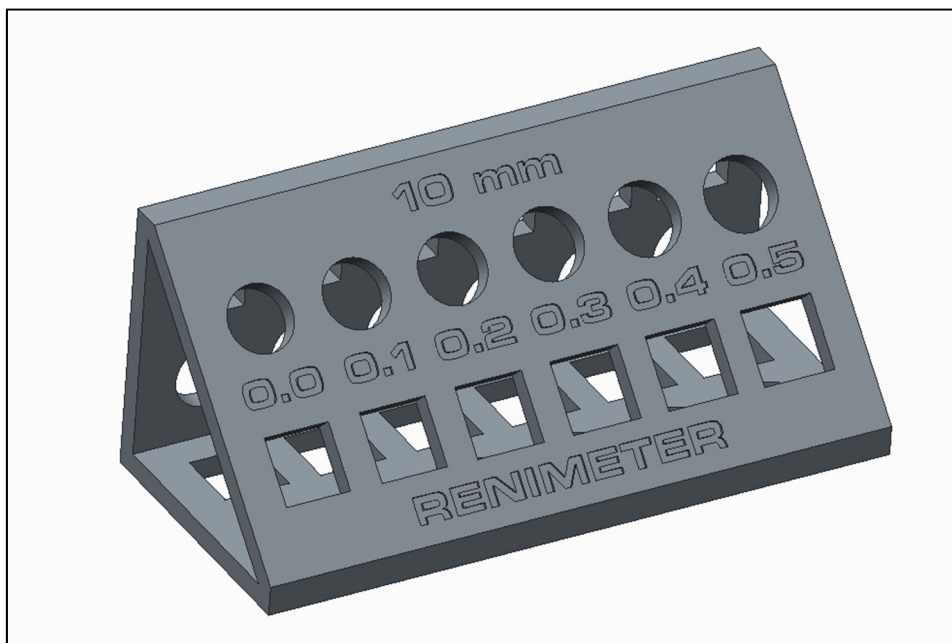


Abbildung 5: Lehre mit Prüfgeometrie zur Ermittlung eines minimalen Spaltmaßes [2]

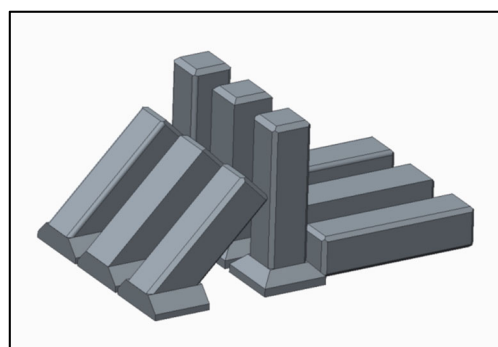
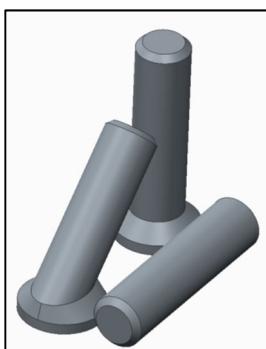


Abbildung 6: Verwendete Formprobekörper für die Ermittlung des minimalen Spaltmaßes. Diese wurden stehend, liegend und unter 45° gedruckt [2]

Als zweites wurde ein Kugelgelenk gedruckt, um eine möglichst praktische Anwendung zu realisieren (siehe Abb. 7), wobei hier das Beseitigen von Pulverresten aus den Gelenkkontaktflächen konstruktiv berücksichtigt werden muss.

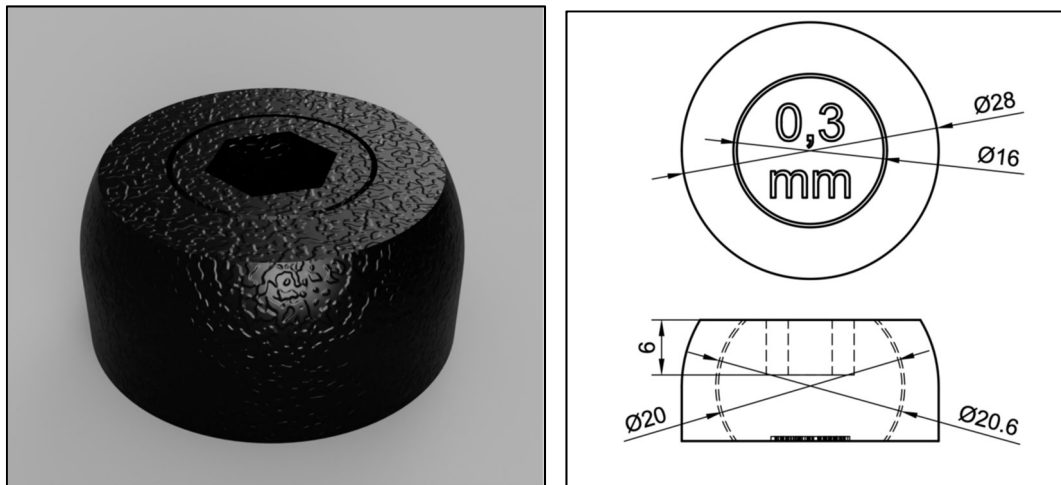


Abb. 7: Kugelgelenk zur Ermittlung des funktionalen Spaltmaßes. Spalt z.B. 0,3 mm [4]

Die dritte Probekörpergeometrie wurde ebenfalls die Ermittlung eines Spaltgrenzwertes versucht, bei welchem das Zusammensintern angrenzender Flächen dazu führt, dass sich in den Gelenken keine Beweglichkeit mehr erzielen lässt. Hierzu wurde die, in Abbildung 8 gezeigte „Kammgeometrie“ verwendet, deren Spalten mit einem stetig, um 0,1 mm abnehmendem Abstand modelliert wurde; beginnend mit einer Spaltweite von 2 mm bis 0,1 mm.

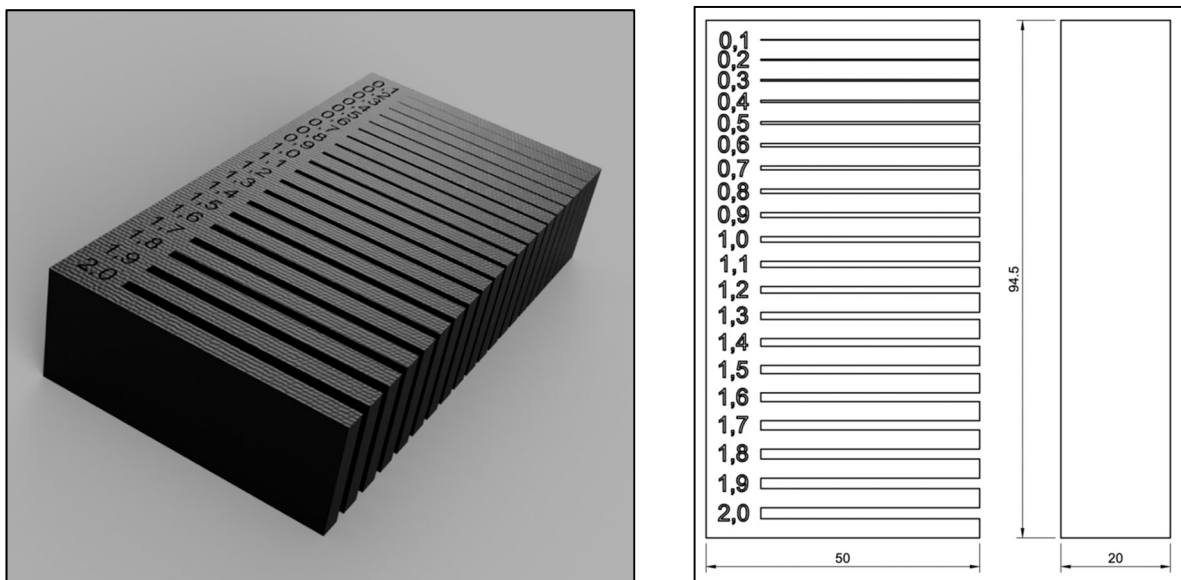


Abbildung 8: Kammgeometriemodell links, Technische Zeichnung rechts [4]



## 2.3 Ermittlung der kleinstmöglich druckbaren Geometrien

Vor allem im Modell- und Leichtbau werden mitunter sehr filigrane Strukturen benötigt, welche sich ggf. nicht mehr drucken bzw. entpacken lassen. Dies wurde ebenfalls mit einer passenden Geometrie zur Ermittlung eines Grenzwert untersucht.

Betrachtet wurden zylinder- und plattenförmige Prüfgeometrien, wie in den Abbildungen 9 und 10 dargestellt.

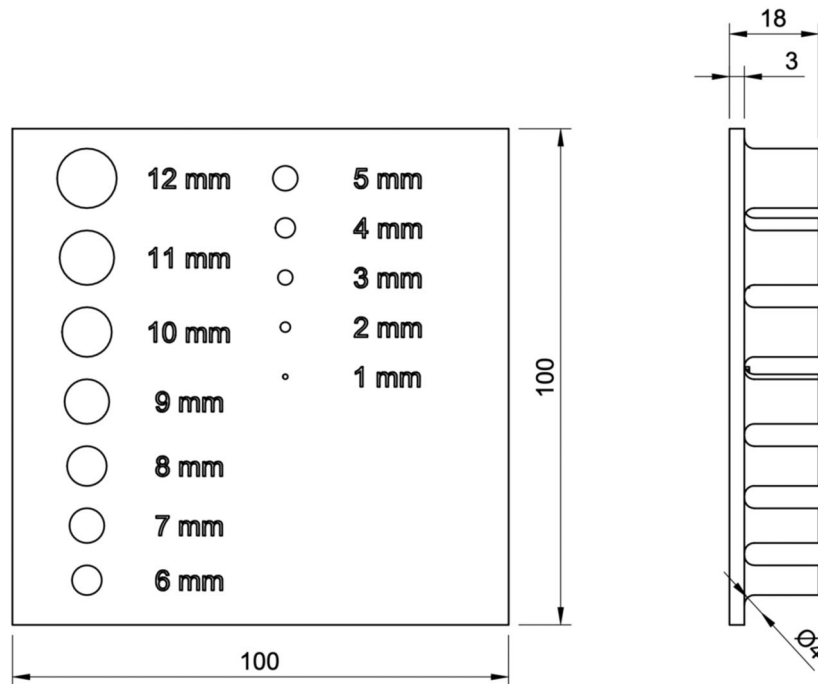


Abbildung 9: Zylinderförmige Prüfgeometrie zur Ermittlung von minimal möglichen Druckabmessungen für Zylindergeometrien [4]

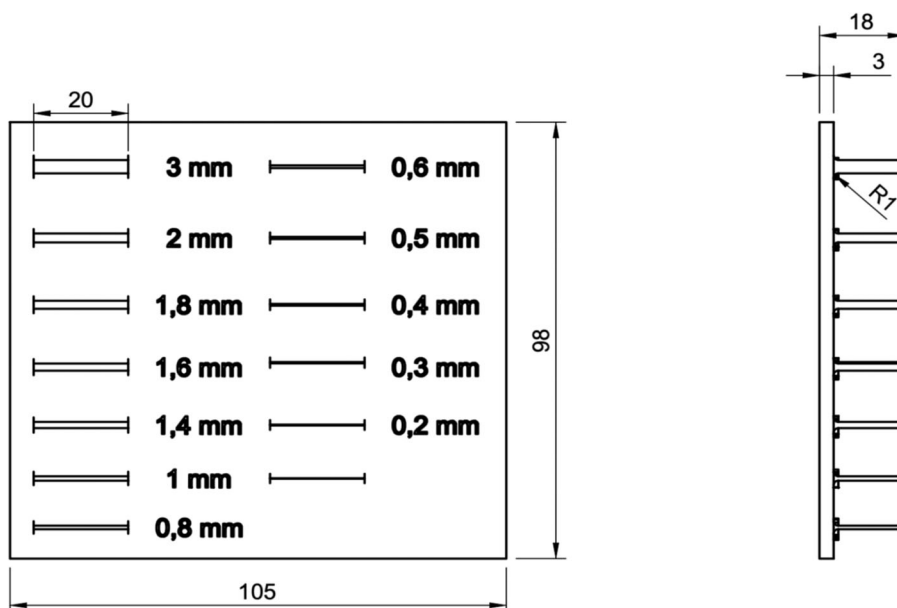


Abbildung 10: Plattenförmige Prüfgeometrie zur Ermittlung der minimalen Druckgröße [4]

## 2.4 Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-2 Typ 1B

Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Bauteilen hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit wurden Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-2 Typ 1B, durchgeführt. Hierbei wird ein genormter Probekörper (Abbildung 11) in eine Zugprüfmaschine eingespannt und anschließend bis zum Versagen auf Zug beansprucht. Währenddessen wird neben der aufgetragten Zugkraft  $F$  die Längung der Probe  $\Delta L$  erfasst.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F \cdot \Delta L}{b \cdot d \cdot L}$$

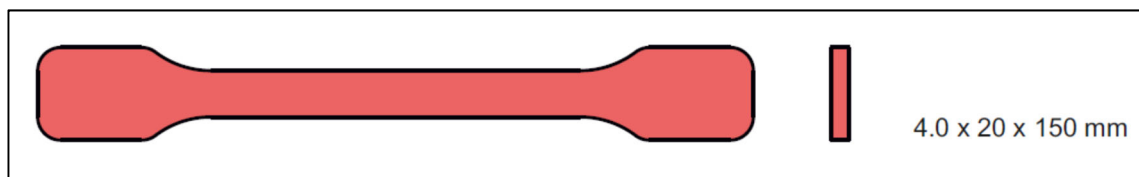


Abb. 11: Abmessungen einer Zugprobe nach DIN ISO 527-2 Typ 1B [6]

Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen besitzen Kunststoffe kein ausgeprägtes linear-elastisches Verhalten. Daher kann der E-Modul nicht, wie bei Metallen üblich, als Steigung der linear-elastischen Gerade im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bestimmt werden, sondern muss als Sekanten-Modul im vorhandenen linear-viskoelastischen Bereich einer Dehnung von 1 % bis 2 % ermittelt werden (siehe Abbildung 12) [7].

$$\text{Berechnung: 2 \% Sekanten-Modul} = \frac{\text{Zugspannung bei 2 \% Dehnung} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]}{0,02}$$

Auch bei diesem Versuch wurden mehrere Druckausrichtungen geprüft, um eine ggf. vorliegende Anisotropie zu erkennen und die Angaben mit dem Herstellerdatenblatt [5] zu vergleichen.

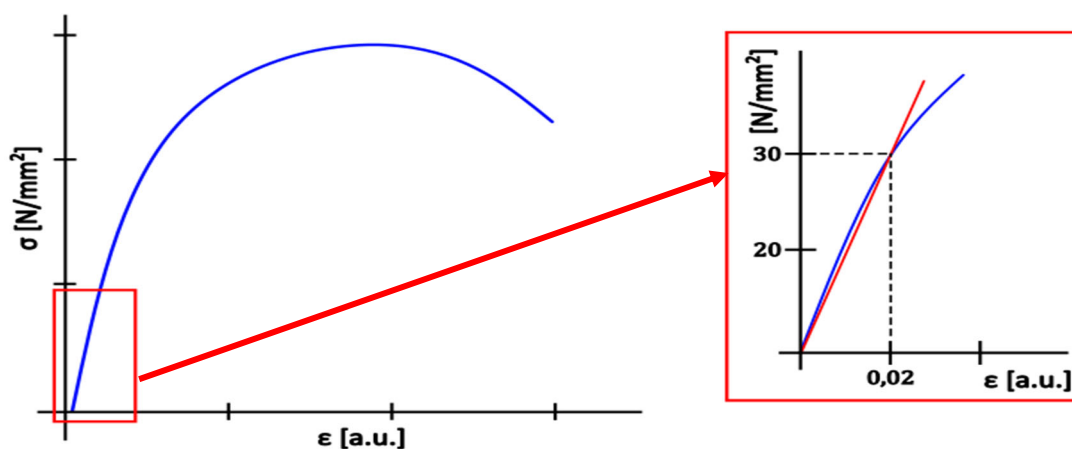


Abb. 12: Bestimmung des E-Moduls als Sekanten-Modul

Die nachfolgenden Abbildungen 13 bis 15 zeigen die Definition der verschiedenen Druckausrichtungen. Alle Proben wurden in einem Druckjob mit optimalem Nesting<sup>1</sup> hergestellt (siehe Abb. 16). Unterschieden wird zwischen: „flach liegend“; „flach stehend“; „unter 45°“ und „stehend“. Jede Probe wurde je Ausrichtung 5x gedruckt, um eine minimale statistische Auswertung zu ermöglichen.

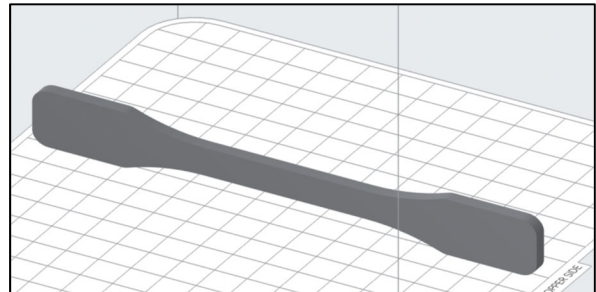
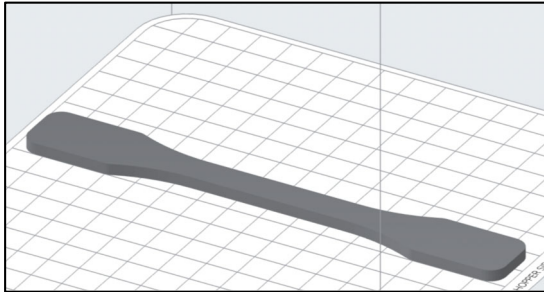


Abbildung 13: Ausrichtung „flach liegend“ links und „flach stehend“ rechts [4]

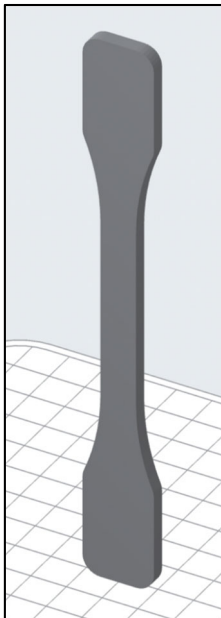


Abbildung 14:  
Ausrichtung stehend [2]

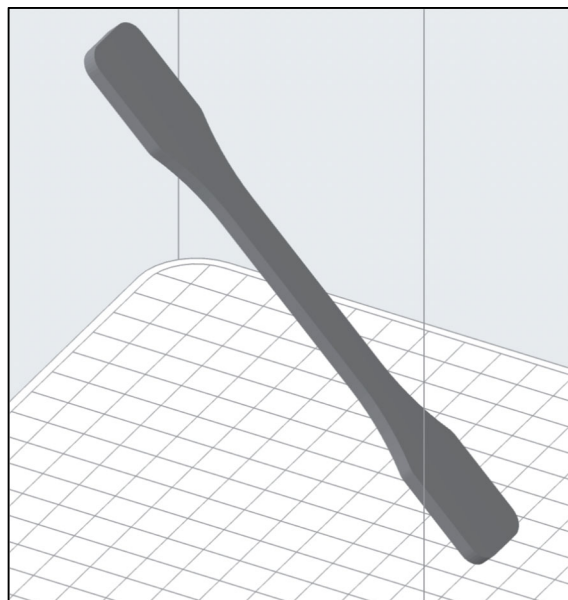


Abbildung 15: Ausrichtung „unter 45°“ [4]

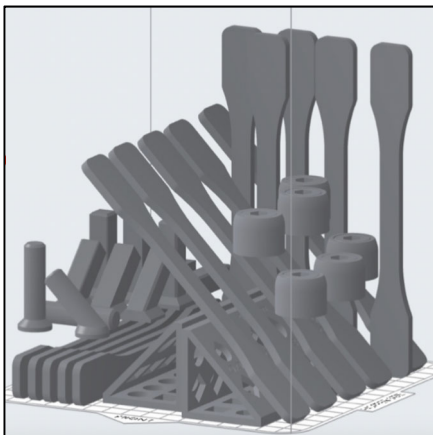


Abbildung 16: Ausrichtung und Positionierung (Nesting) den Druckjob [4]

<sup>1</sup> Nesting beschreibt die effiziente und damit wirtschaftlichste Verschachtelung von 3D Druck Bauteile, sodass möglichst wenig Bauraum im 3D Drucker verbraucht wird [9]. Diese kleinstmögliche Packungsdichte unter der Einhaltung von Mindestabständen wird von der Software berechnet.

## 2.5 Spannungsrelaxationsversuch DIN 53441

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, unterscheidet sich das Verhalten von Kunststoffen unter Last grundlegend von dem von Metallen. Während die mechanische Spannung in Metallen bei konstanter Belastung innerhalb des linear-elastischen Bereichs auch über einen längeren konstant Zeitraum gehalten wird, erfahren Kunststoffe eine Relaxation, also den Abbau von mechanischen Spannungen bei gleichbleibender Dehnung.

Um dieses Verhalten abzubilden, wurden erneut Probekörper nach DIN EN ISO 527-2 Typ 1B in verschiedenen Ausrichtungen gedruckt und in eine Universalprüfmaschine, Modell inspekt table, mit einem Messbereich bis 20 kN, Fa. Hegewald & Peschke Mess- und Prüftechnik GmbH, Nossen, Deutschland, eingespannt. Nun wird nach einer schlagartig aufgebracht Kraft von 430 N, welche anschließend fünf Minuten lang konstant gehaltenen wird, die resultierende Dehnung gemessen. Da im Rahmen des Zugversuchs bereits eine weitgehende Isotropie des Materials nachgewiesen wurde, beschränkte sich der durchgeführte Relaxationsversuch auf je fünf Probekörper in zwei Druckausrichtungen.

## 2.6 Dreipunkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178

Ein weiterer wichtiger Werkstoffparameter ist die Biegesteifigkeit, welche im Rahmen eines Dreipunkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 ermittelt wurde (siehe Abb. 17). Hierbei wird ein quaderförmiger Probekörper ( $b \times d \times L = 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ) ohne Nut zentrisch zwischen zwei Auflagern mithilfe eines Stempels auf Biegung belastet. Die Messung endet bei Erreichen eines eingestellten maximalen Verfahrwegs oder bei Versagen des Probekörpers.

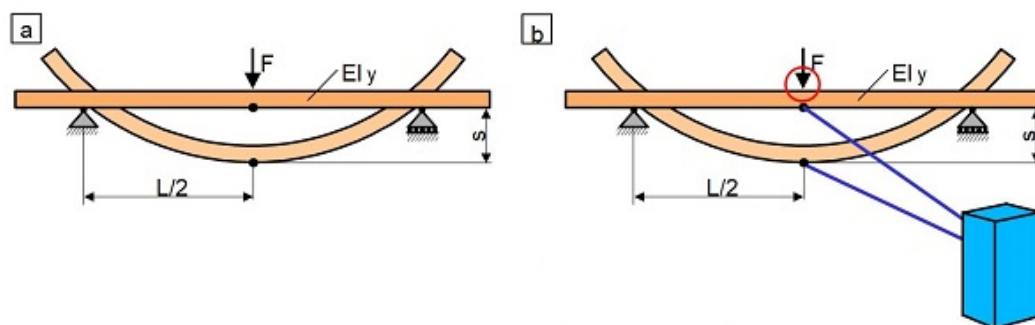


Abbildung 17: Schematische Darstellung des durchgeführten Dreipunkt-Biegeversuchs [3]

Auch hier wurden die Druckausrichtungen flach liegend und flach stehend untersucht. Auf weitere Ausrichtungen wurde aufgrund der bereits bei den Zugversuchen festgestellten, geringen richtungsabhängigen Unterschiede verzichtet.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Untersuchung der Maßhaltigkeit

Die Vermessung der gedruckten quaderförmigen Probekörper erbrachte die, in den Diagrammen, Abbildung 18 bis 21 dargestellten Ergebnisse. Hierbei sind die Mittelwerte von jeweils drei gedruckten Proben pro Abmessung abgebildet.

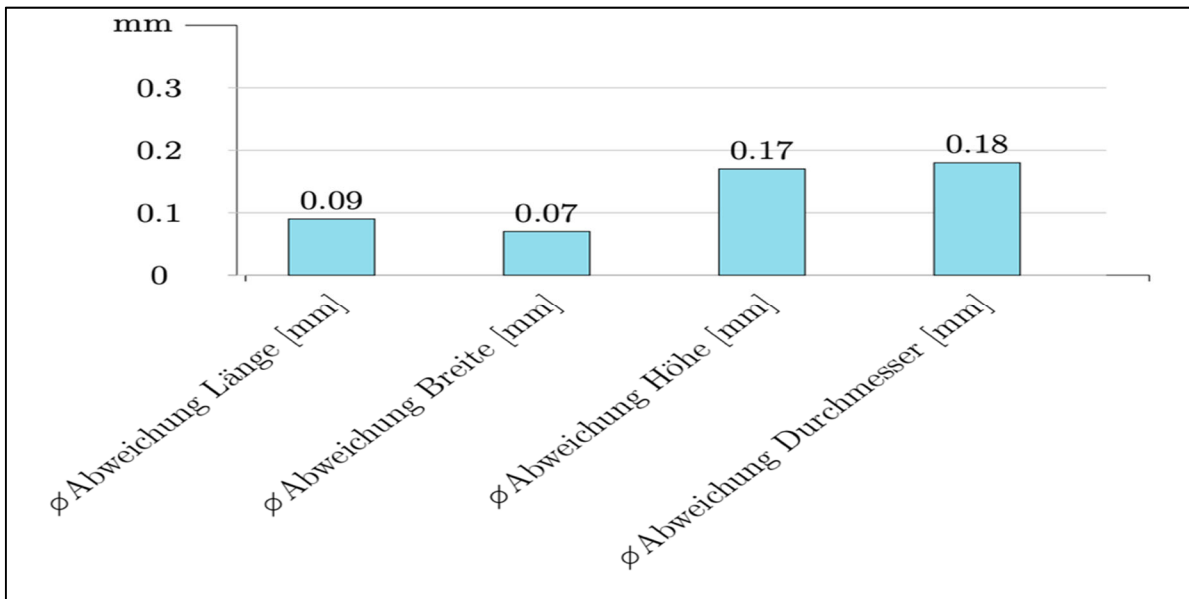


Abbildung 18: Absolute Abweichung vom Nennmaß von stehend gedruckten Probekörpern mit den Abmaßen 15 x 15 x 20 mm und einer 5 mm Bohrung (Mittelwerte aus fünf Proben) [4]

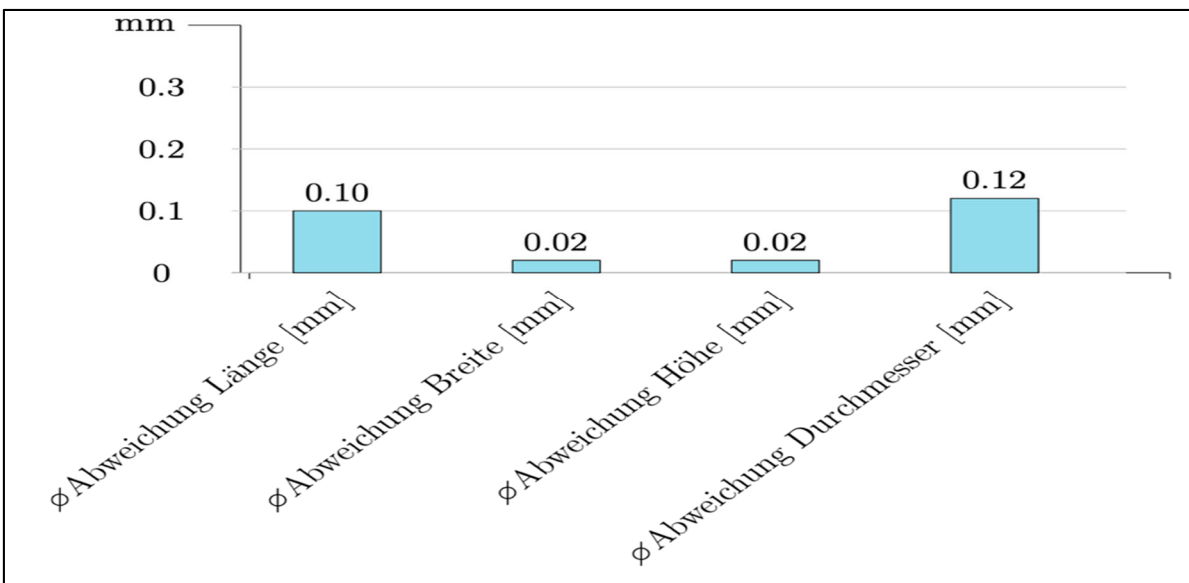


Abbildung 19: Absolute Abweichung vom Nennmaß von liegend gedruckten Probekörpern mit den Abmaßen 25 x 25 x 40 mm mit einer 10 mm Bohrung (Mittelwerte fünf Proben) [4]

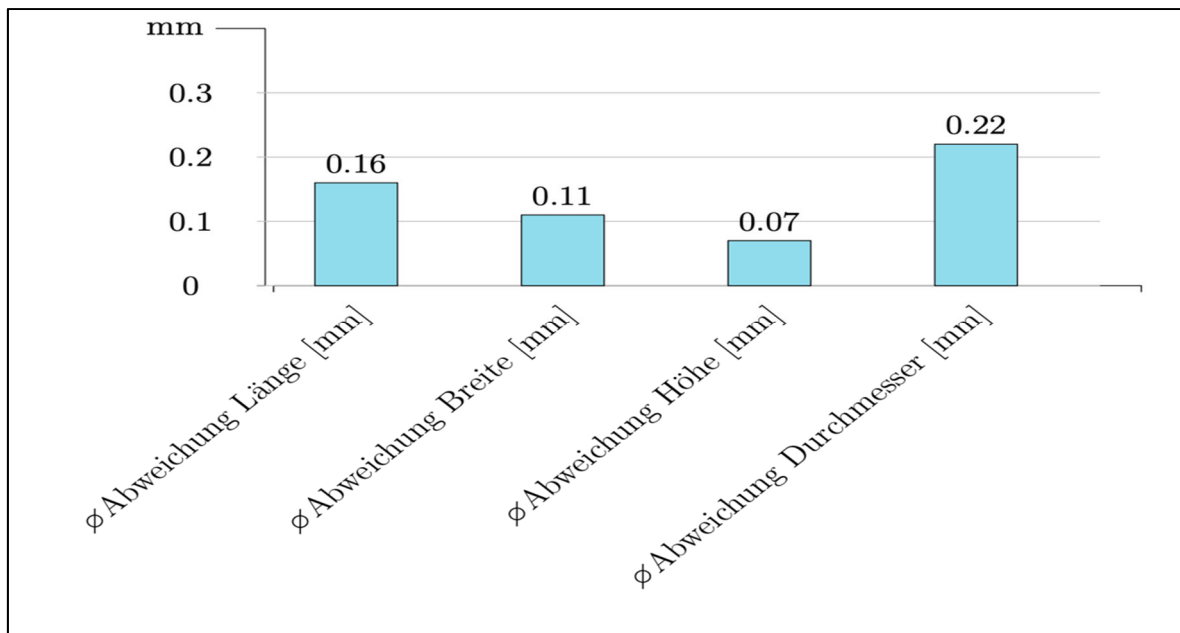


Abbildung 20: Absolute Abweichung vom Nennmaß bei liegend gedruckten Probekörpern mit den Abmaßen 15 x 15 x 20 mm mit einer 5 mm Bohrung (Mittelwerte fünf Proben) [4]

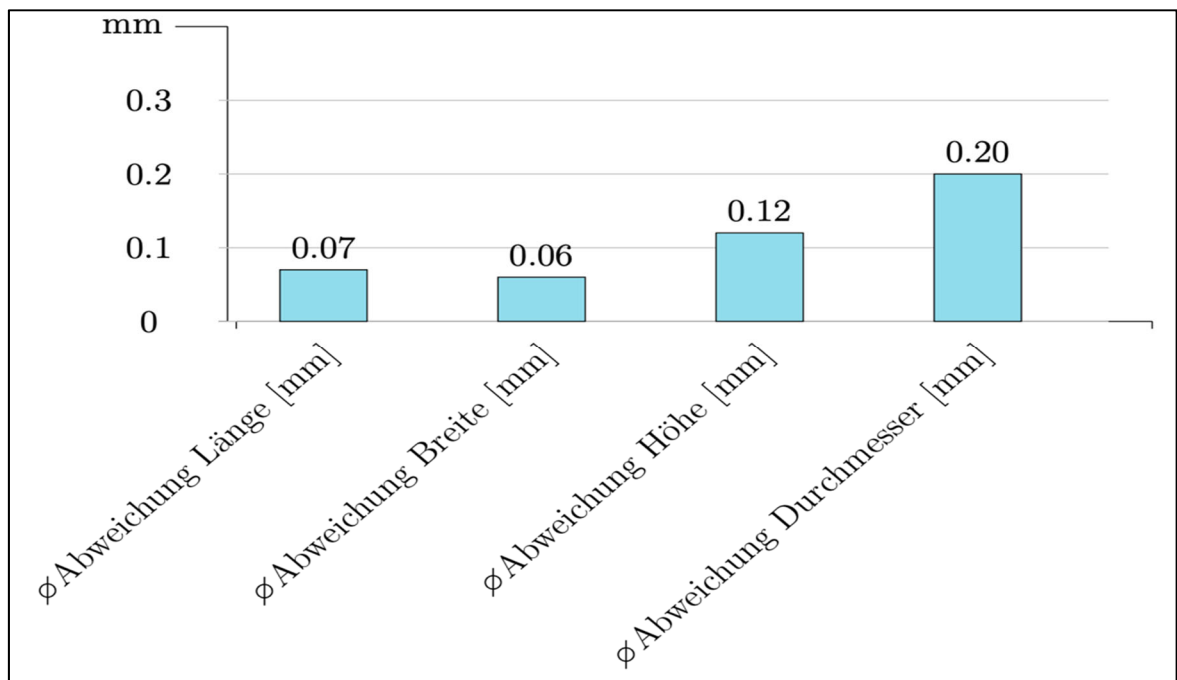


Abbildung 21: Absolute Abweichung vom Nennmaß von stehend gedruckten Probekörpern mit den Abmaßen 25 x 25 x 40 mm mit einer 10 mm Bohrung (Mittelwerte fünf Proben) [4]

Besonders bei den Bohrungen war eine erhöhte Abweichung vom Sollmaß zu verzeichnen. Daraus lässt sich ableiten, dass in allen Raumrichtungen Toleranzen von + 0,1 bis + 0,2 mm zu berücksichtigen sind. Eine ausgeprägte maßliche Isotropie konnte nicht festgestellt werden.

## 3.2 Ermittlung des minimalen Spaltmaßes

### 3.2.1 Lehre mit Durchbrüchen

Die Auswertung des Versuchs mit der Lehre und den verschiedenen Formprobekörpern zeigte, dass, unabhängig von der Druckrichtung, die Probekörper erstmals bei einem Spaltmaß von 0,2 mm ohne größere Krafteinwirkung in die Lehre eingefügt werden konnten.

### 3.2.2 Kugelgelenk

Bei diesem Probekörper (Abb. 7) war zu beobachten, dass sich die Proben bei allen gewählten Spaltmaßen zunächst nur gegen Widerstand bewegen ließen, da Pulverreste im Spalt zuvor entfernt werden mussten, bevor die gewünschte Beweglichkeit eintrat. Als minimales Spaltmaß, bei welchem noch eine Beweglichkeit erzielt werden konnte, wurden hier 0,2 mm ermittelt (daraus folgt ein konstruktiver Durchmesserunterschied 0,4 mm). Dieser Wert sollte bei funktionsintegrierten Gelenken nicht unterschritten werden.

### 3.2.3 Kammgeometrie

Auch bei der „Kammgeometrie“ (Abb. 8) zeigte sich, dass ein minimales Spaltmaß von 0,2 mm nicht unterschritten werden darf, um eine Funktion sicher zu gewährleisten.

Betrachtet man die, sich aus allen Versuchen ergebenden minimalen funktionalen Spaltmaße, und vergleicht diese mit den, in Tabelle 1 dargestellten technischen Daten (Schichthöhe 0,11 mm und Laserspotgröße 0,2 mm) so waren diese mit ca. 0,2 mm fast schon zu erwarten.

Konstruktiv wichtig zu beachten ist grundsätzlich, dass beim Druck von geschlossenen Gelenkgeometrien (nicht demontierbare bewegliche Funktionseinheiten) bei allen pulverbasierenden Verfahren nach der Fertigstellung das noch nicht versinterte, und als Stützmaterial dienende Restpulver, gut entfernt werden kann (Beispiel Abb. 22).

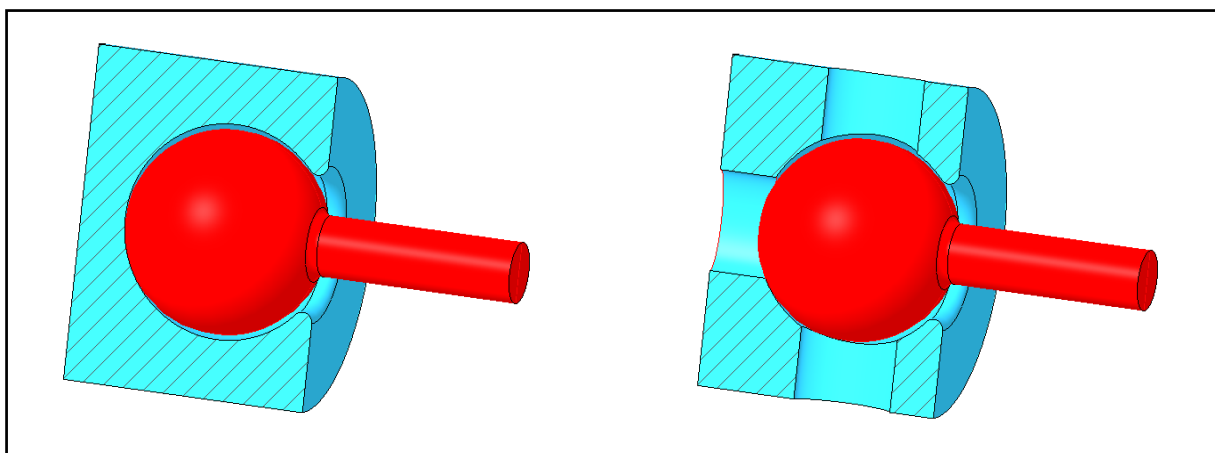


Abbildung 22: Links: Pulverreste können nicht ausreichend entfernt werden, Funktionssicherheit nicht gewährleistet. Rechts: Konstruktiv vorgesehene Öffnungen zur Restpulverentfernung

### 3.3 Ermittlung der kleinstmöglich druckbaren Geometrien

Beim Versuch zur Ermittlung der kleinstmöglichen druckbaren Geometrien stellte sich heraus, dass das Drucken bis zu einer Wandstärke, bzw. einem Durchmesser  $\geq 1$  mm kein Problem darstellte. Alle darunterliegenden Maße konnten, unabhängig von der gedruckten Raumrichtung, nicht mehr fehlerfrei hergestellt werden.

Aufgrund des mechanischen Entpackungsprozesses sind aber grundsätzlich, etwas größere Geometrien zu empfehlen, da sich z.B. die Zylinder erst ab einem Durchmesser von  $\geq 3$  mm zerstörungsfrei entpackt ließen, wobei dies bei den plattenförmigen Geometrien bereits bei  $\geq 1$  mm möglich war (siehe Abb. 23).

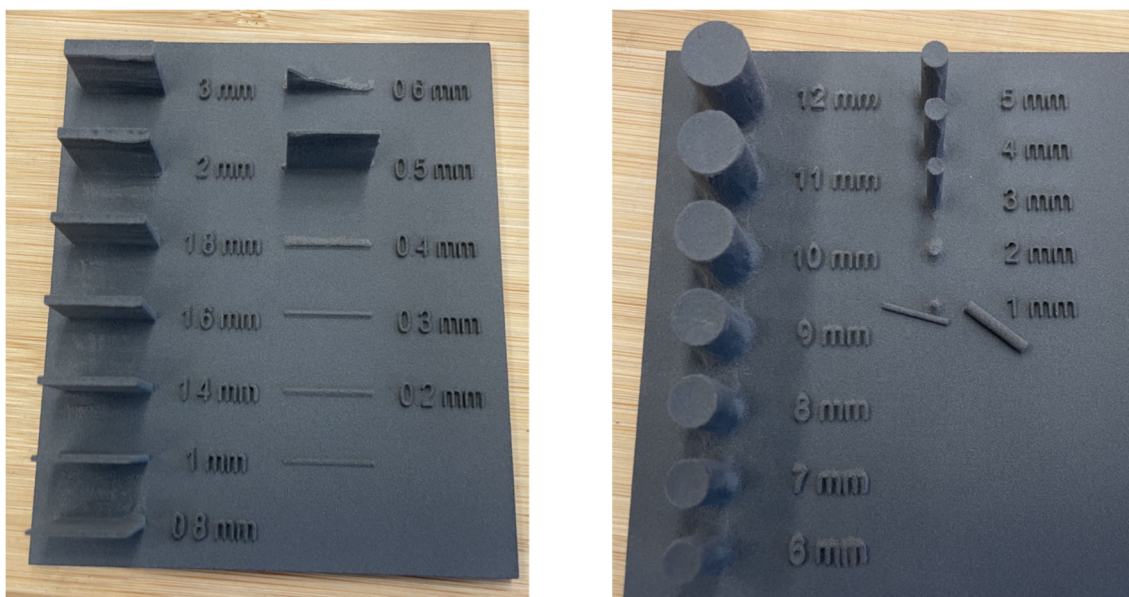


Abbildung 23: Links Ergebnisse der kleinstmöglichen Plattengeometrien und rechts kleinstmögliche Zylindergeometrien jeweils vollständig entpackt [4]



### 3.4 Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-2 Typ 1B

Bei diesem Versuch (Abb. 24) wurden mehrere Druckausrichtungen geprüft, um eine ggf. vorliegende Anisotropie zu erkennen und die Angaben mit dem Herstellerdatenblatt [5] zu vergleichen.

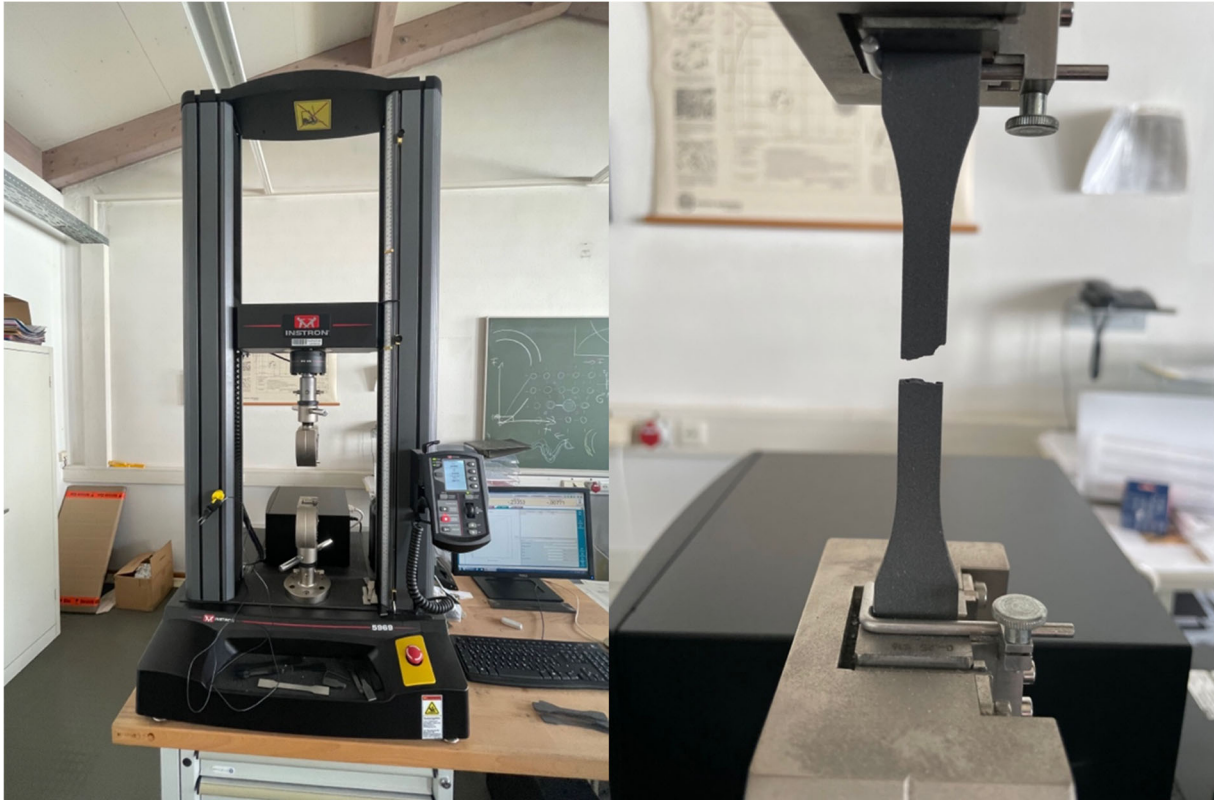


Abbildung 24: Zugprüfmaschine links und eingespannte, geprüfte Zugprobe rechts [4]

Sämtliche Proben versagten in Form eines Sprödbruchs ohne Einschnürungseffekte (Abb. 25) und die Festigkeitswerte zeigten ein weitgehend isotropes Verhalten, wobei die erzielten Werte die Herstellerangaben (Tabelle 2) nicht unterschreiten. Die detaillierten Ergebnisse können den Abbildung 26 bis 28 entnommen werden.



Abbildung 25: Alle fünf geprüften Zugproben

Tabelle 2: Herstellerangaben der technischen Werte von PA 12 (Nylon 12) im SLS- Druck [4]

| Maximale Zugfestigkeit [MPa] | Zugmodul [MPa] | Bruchdehnung [X / Y] | Bruchdehnung [Z] | Wärmeformbeständigkeitstemperatur bei 0,45 MPa |
|------------------------------|----------------|----------------------|------------------|--|
| 50                           | 1850           | 11%                  | 6%               | 171 °C   |

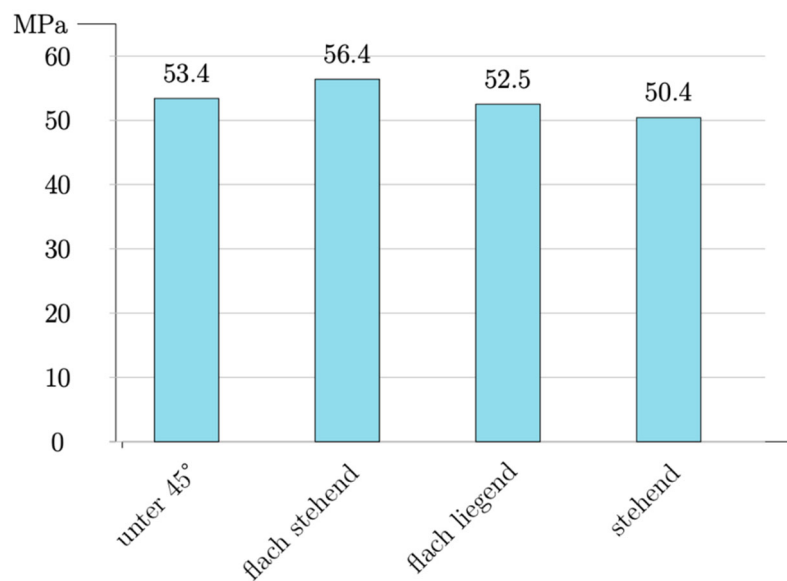


Abbildung 26: Zugfestigkeit der in verschiedenen Ausrichtungen gedruckten Probekörper (jeweils gemittelt aus fünf Proben) [4]

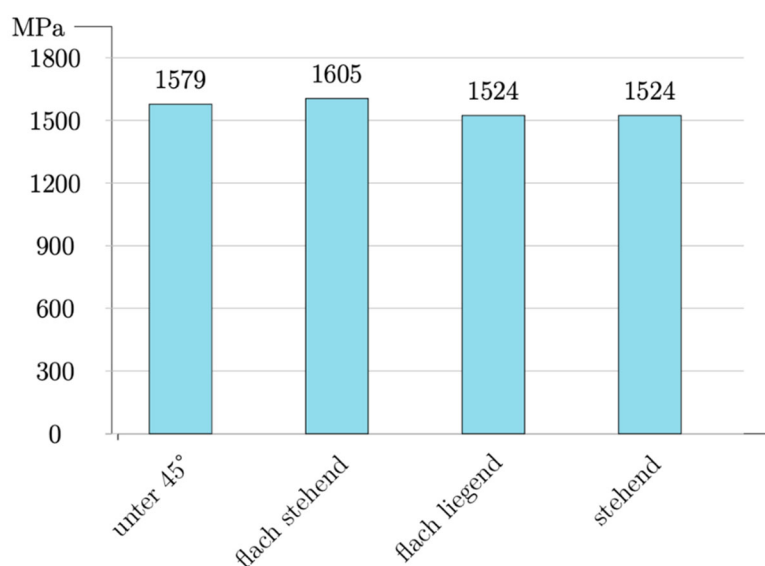


Abbildung 27: E-Modul der in verschiedenen Ausrichtungen gedruckten Probekörper (jeweils gemittelt aus fünf Proben) [4]

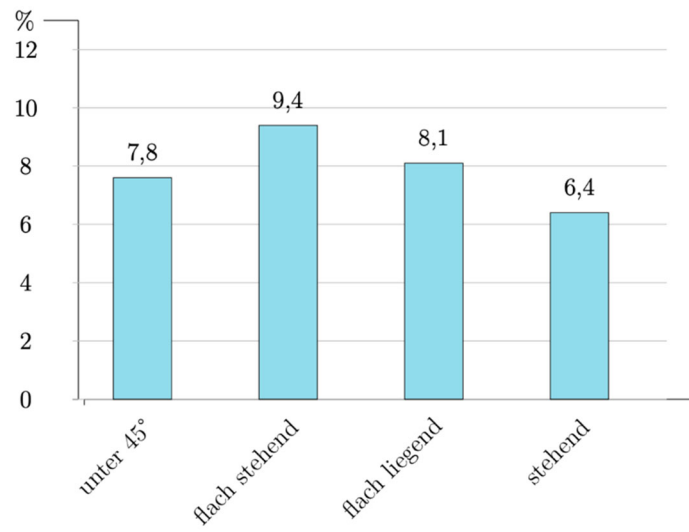


Abbildung 28: Bruchdehnung der in verschiedenen Ausrichtungen gedruckten Probekörper (jeweils gemittelt aus fünf Proben) [4]

### 3.5 Spannungsrelaxationsversuch DIN 53441

Die Ergebnisse der Spannungsrelaxationsversuche sind in den Abbildungen 29 und 30 grafisch dargestellt. Klar erkennbar ist der Abfall der Kraft und damit der Spannung in den Probekörpern von 430 N auf 300 N um maximal 30 % im Messzeitraum von 5 Minuten. Der Spannungsabfall verläuft annähernd asymptotisch und streut relativ stark. Eine ausgeprägte Isotropie in Abhängigkeit von der Druckrichtung ist wiederum nicht feststellbar.

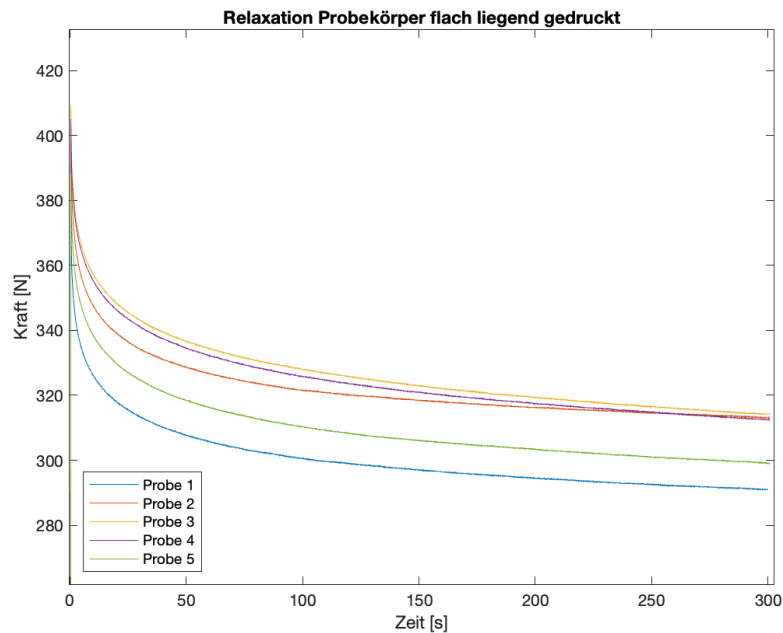


Abbildung 29: Zeitlicher Verlauf der mechanischen Zugspannung bei konstanter Dehnung (Probekörper flach liegend gedruckt) [4]

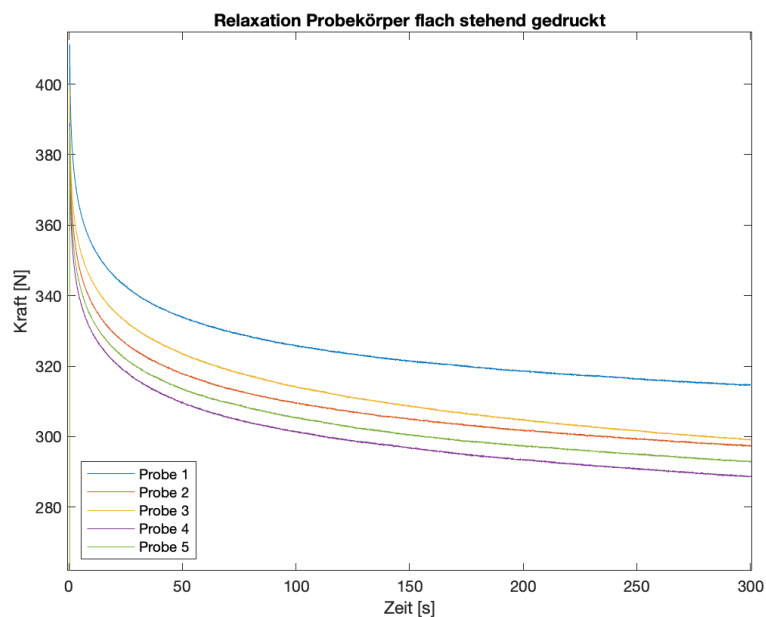


Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der mechanischen Zugspannung bei konstanter Dehnung (Probekörper flach stehend gedruckt) [4]

### 3.6 Dreipunkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178

Wie bereits erwähnt, wurde zur Messung eine Universalprüfmaschine Modell inspekt table, Messbereich bis 20 kN, Fa. Hegewald & Peschke Mess- und Prüftechnik GmbH, Nossen, Deutschland, verwendet. Aus den gemessenen Parametern Kraft  $F$  und Verfahrweg  $s$  (jeweils beim maximalen Verfahrweg = Versagen der Probe) des Biegestempels, sowie unter Berücksichtigung der Länge  $L = 80$  mm und der Querschnittsabmaße  $b = 4$  mm und  $d = 10$  mm der Probe ohne Kerbe (siehe Abb. 17), lässt sich anschließend die Biegefestigkeit nach der dargestellten Formel berechnen [3].

$$\sigma_{fB} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2}$$

Die Versuchsreihe mit je fünf „flach stehend“ und fünf „flach liegend“ gedruckten Probekörpern (siehe Abb. 13) lieferte die in Abbildung 31 dargestellten Ergebnisse. Im Vergleich mit den Ergebnissen der Zugversuche, fällt hier eine leichte Anisotropie auf. So lieferten die stehend gedruckten Probekörper durchschnittlich eine um etwa 12 % höhere Biegefestigkeit als die liegend gedruckten Proben.

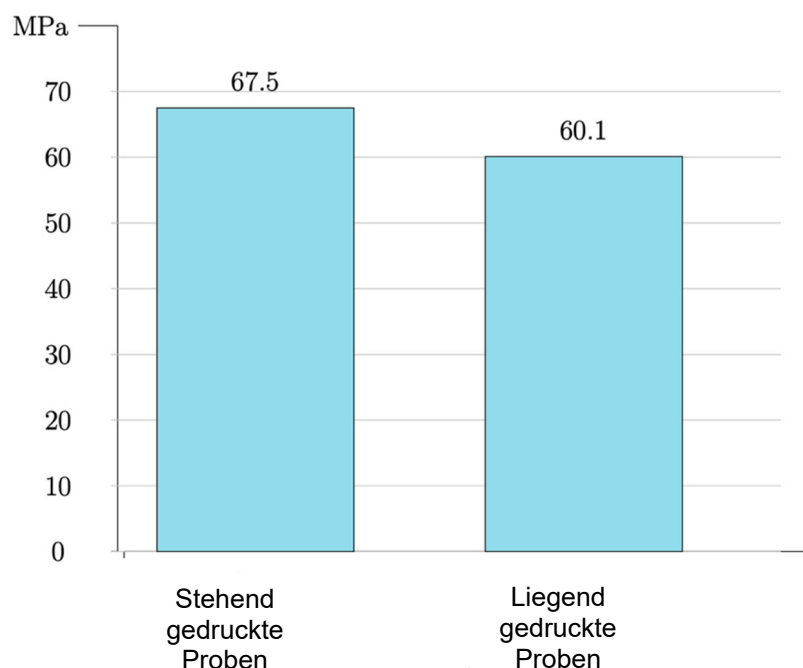


Abbildung 31: Biegefestigkeit der untersuchten Proben (jeweils gemittelt aus fünf Proben) [4]

---

## 4.0 Fazit

Der Fuse 1 kann durchaus als ein gelungener Einstieg der Firma Formlabs in die SLS-Technologie angesehen werden. Die Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen in Blick auf die erzielten Festigkeiten und die erzielte Maßhaltigkeit, die ausgereifte und gut durchdachte Prozesskette, sowie eine hohe Benutzerfreundlichkeit der Gesamtanlage zeichnen den Fuse 1 aus.

Insbesondere der geringe Einarbeitungsaufwand, sowie die sehr hohe Druckerfolgsquote (im Versuchszeitraum 100 %) sind positiv zu erwähnen. Die (Werkstoff-) Datenblätter und Beschreibungen des Herstellers sind im Wesentlichen klar verständlich und stimmen mit unseren eigenen Versuchsergebnissen gut überein.

Je nach Standpunkt kann die geringe Möglichkeit des Anwenders die voreingestellten Parameter zu verändern als Vor- oder Nachteil gesehen werden. Zu begrüßen wäre eine größere Materialvielfalt, die in Zukunft vielleicht vom Hersteller noch angeboten wird.

Die notwendige Nachbearbeitung der gedruckten Objekte, vor allem das Entpacken aus dem Pulverbett, bietet jedoch noch Möglichkeiten für weitere Optimierungen.

Hinsichtlich einer längerfristigen Zuverlässigkeit und der damit einhergehenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kann, aufgrund des kurzen Untersuchungszeitraums, noch keine Aussage getroffen werden.

## Interessenskonflikte

Es besteht kein Interessenkonflikt aufgrund von Abhängigkeiten oder Unterstützungen durch Firmen oder etwaige Geldgeber. Die Untersuchungen wurden komplett unabhängig durchgeführt.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Fuse 1  
<https://formlabs.com/de/3d-printers/fuse-1/>  
(Letzter Aufruf 14.08.2022)
- [2] Renimeter - reni - 26.03.2014  
<https://www.thingiverse.com/thing:281358>  
(Letzter Aufruf 14.08.2022)
- [3] Biegefestigkeit  
<https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Biegeversuch>  
(Letzter Aufruf 14.08.2022)
- [4] Dornaus, Georg; Untersuchung der Prozessfähigkeit des FUSE 1 SLS 3D-Druckers von Formlabs, Bachelorarbeit, Hochschule Landshut 2022
- [5] Datenblatt Nylon 12 Formlabs  
<https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001447-TDS-DE-0.pdf>  
(Letzter Aufruf 14.08.2022)
- [6] Prüfkörperübersicht von der Firma Q-tec, innovative thinking.  
[https://q-tec-gmbh.de/fileadmin/user\\_upload/Produkte/Stanzmesser/Allgemein/Pruefkoerper\\_V0\\_1\\_Sx.pdf](https://q-tec-gmbh.de/fileadmin/user_upload/Produkte/Stanzmesser/Allgemein/Pruefkoerper_V0_1_Sx.pdf)  
(Letzter Zugriff 11. Juli 2022)
- [7] INNOFORM, 13. Aug, 2015  
<https://www.innoform-coaching.de/blog/2015/08/13/fohlenpruefungen-der-zugversuch/>  
(Letzter Zugriff 25. August 2022)
- [8] Internetseite der Firma Formlabs, 13. März, 2021  
<https://formlabs.com/de/blog/fuse-1-nylon-12-3d-druck-faq/>  
(Letzter Zugriff 1. September 2022)
- [9] Internetseite der Firma 3DBAVARIA  
<https://www.3dbavaria.com/wissenswertes/leitfaden-zum-verschachteln-von-bauteilen-bzw-nesting/>  
(Letzter Zugriff 8. Oktober 2022)