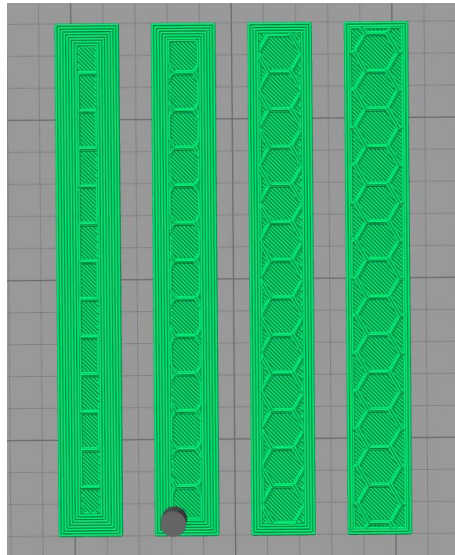




Ermittlung von Struktureigenschaften von im FFF-Verfahren hergestellten Biegeprüflingen



Bachelorarbeit von Swantje Armbrecht

Matrikelnummer: 525592

Angefertigt am:

Inst. f. Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

der Technischen Universität Clausthal

im SoSe 2025

Abgabedatum: 20.08.2025

Betreuer: Dr. Leif Steuernagel

Gutachter: Dr. Leif Steuernagel

Prof. Dr. -Ing. Johannes Buhl

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und dass alle Stellen dieser Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht wurden und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsstelle vorgelegt wurde.

Des Weiteren erkläre ich, dass ich mit der öffentlichen Bereitstellung meiner Abschlussarbeit in der Instituts- und/oder Universitätsbibliothek einverstanden bin. Ich stimme hiermit außerdem einer softwaregestützten Plagiatsprüfung zu.



Clausthal Zellerfeld, den 20.08.2025

Abstrakt

Diese Bachelorarbeit untersucht die Strukturzusammensetzungen von im FFF-Verfahren 3D-gedruckten Biegeprüflingen unter 3-Punkt-Biegung. Durch ein mechanisches Prüfverfahren und eine Kosten-Nutzen-Analyse wurde eine Bewertung der verwendeten Materialien in Hinblick auf ihren Einsatz als Materialien für kosten- und materialeinsparende, nachhaltige Werkzeugformen für das Thermoformen durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass acht Wände und 60% Infill-Dichte eine Zusammensetzung mit hohen mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitiger Materialeinsparung ist. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Wandanzahl, sowie die Extrusionsdicke eines Filaments am meisten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Für mechanisch und thermisch belastbare, recyclebare Materialien mit einer thermischen Leitfähigkeit eignen sich vor allem technische oder Hochleistungsthermoplaste mit einer Kohlenstofffaserverstärkung. Ob die beiden untersuchten Materialien PPS CF und PAHT CF für den Gebrauch als Werkzeugformen im Thermoformen geeignet sind, muss weiter untersucht werden.

Schlüsselwörter: [FFF-Verfahren], [3-Punkt-Biegung], [Werkzeugformen]

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Abstrakt	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	VIII
1. Einführung in das Thema.....	1
1.1 Stand der Forschung	1
1.1.1 FFF-Druckverfahren	1
1.1.2 Verwendete Materialien und ihre Eigenschaften.....	7
1.1.3 Der Einfluss von Faserverstärkungen auf die Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffen	8
1.1.4 Mechanische und thermische Belastungen auf die Werkzeugform beim Thermoformen.....	10
1.2 Problemstellung	12
2. Methodisches Vorgehen	13
2.1 Entscheidungsmatrix.....	13
2.2 Druck und Biegeprüfung von Biegeprüflingen aus ABS	14
2.3 Druck und Biegeprüfung von Biegeprüflingen aus PAHT CF und PPS CF	22
3. Ergebnisse.....	25
3.1 3-Punkt-Biegeprüfung	25
3.2 Kosten-Nutzen-Analyse.....	27
4. Mögliche Fertigungsanwendungen.....	29
5. Diskussion.....	30
6. Schlussbemerkung/Fazit	33

Literaturverzeichnis	34
Anhang	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mögliche Funktionsweise eines FFF-Druckers [3]	2
Abbildung 2: Infill	3
Abbildung 3: Warping	4
Abbildung 4: Calibration Cube	5
Abbildung 5: Temperaturbaum	6
Abbildung 6: Kategorische Einteilung technisch relevanter Thermoplaste [12]	7
Abbildung 7: Polyamid 12 [6]	8
Abbildung 8: Poly-Phenylen-Sulfid [6]	8
Abbildung 9: Prinzipskizze Thermoformen [21]	11
Abbildung 10: Positiv- und Negativformung der Werkzeugformen	11
Abbildung 11: Temperaturbaum ABS+	15
Abbildung 12: Calibration Cube ABS+	15
Abbildung 13: Biegeprüflinge mit verschiedenen Wandanzahlen	17
Abbildung 14: Auffälliges Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Probe	18
Abbildung 15: Nahaufnahmen der auffälligen Bereiche	18
Abbildung 16: Biegeprüfling aus Vollmaterial	19
Abbildung 17: Mittelwerte der Biegemodule von Biegeprüflingen verschiedener Wandanzahlen	20
Abbildung 18: Biegeprüflinge mit verschiedenen Infill-Dichten	21
Abbildung 19: Mittelwerte der Biegemodule von Biegeprüflingen verschiedener Infill-Dichten	21
Abbildung 20: Temperaturbaum PAHT CF	22
Abbildung 21: Calibration Cube PAHT CF	23
Abbildung 22: Calibration Cube PPS CF	24
Abbildung 23: Durchbrochener und angebrochener Biegeprüfling aus PPS CF ..	26

Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm PPS CF und PAHT CF	27
Abbildung 25: Skirt und Raft bei einem Biegeprüfling	28
Abbildung 26: Biegeprüflinge aus PAHT CF und PPS CF im Vergleich.....	30
Abbildung 27: Skizze der resultierenden Querschnittsfläche	31

Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
CAD.....	Computer-Aided Design
CF	Kohlenstofffaser; Kohlenstofffaseranteil
FDM	Fused Deposition Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication
GF	Glasfaser
HT	High Temperature
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PPS	Poly-Phenylene-Sulfid

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Eigenschaften von Kohlenstoff- und Glasfaser	10
Tabelle 2: Entscheidungsmatrix	13
Tabelle 3: Druckparameter ABS	16
Tabelle 4: Druckparameter PAHT CF	23
Tabelle 5: Druckparameter PPS CF	25
Tabelle 6: Biegefestigkeit und -steifigkeit von PAHT CF und PPS CF.....	26
Tabelle 7: Kosten-Nutzen-Analyse	28

1. Einführung in das Thema

An Werkzeugformen werden in der heutigen Zeit immer mehr Anforderungen gestellt. Für bestimmte Anwendungen sollten diese beispielsweise einer thermischen und/oder einer mechanischen Belastung ausgesetzt werden können. Weiterhin sollen individuelle, kosten- und materialsparende, sowie recyclebare Formen hergestellt werden können. Dies könnte eine Herstellung der Formen im FFF-3D-Druck-Verfahren ermöglichen. Um zu prüfen, ob und welche Materialien die Anforderungen erfüllen, werden im Folgenden Strukturzusammensetzungen und -eigenschaften von 3D-gedruckten Prüflingen auf ihre Biegefestigkeit und -steifigkeit geprüft. Des Weiteren werden die Kosten und Nutzen der ausgewählten Materialien gegenübergestellt, sowie eine mögliche technische Anwendung vorgestellt und diskutiert. Es wurde sich bei der Materialauswahl auf zwei Kunststoffe beschränkt: PAHT CF, ein technischer Thermoplast und PPS CF, ein Hochleistungsthermoplast.

1.1 Stand der Forschung

Die Wahl der Materialien kann mit dem Druckverfahren, den materialabhängigen Eigenschaften und dem Einfluss von Faserverstärkung auf thermoplastische Kunststoffe, sowie der Belastung bei einer möglichen technischen Anwendung, dem Thermoformen, begründet werden.

1.1.1 FFF-Druckverfahren

Beim Fused-Filament-Fabrication (FFF)- Verfahren, übersetzt Schmelzschichtverfahren [1], wird ein thermoplastischer Kunststoff bis knapp über den Verflüssigungspunkt erhitzt und Schicht für Schicht auf einem Druckbett übereinandergelagt. Dabei entsteht ein 3D-Modell. Das Verfahren wurde von der Firma Stratasys entwickelt und ist unter dem patentierten Namen Fused-Deposition-Modelling (FDM)- Verfahren bekannt geworden [2]. Um ein 3D-Modell drucken zu können, muss der Drucker in X-, Y- und Z-Richtung verfahren, das verwendete Filament in eine Druckdüse einziehen und erhitzen können. Die Kombination aus Druckdüse und Heizelementen wird als Extruder bezeichnet.

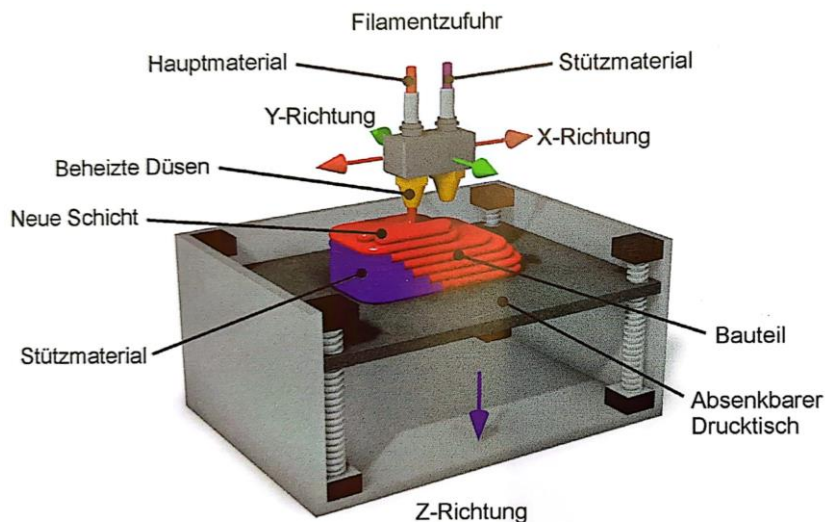


Abbildung 1: Mögliche Funktionsweise eines FFF-Druckers [3]

Die Anordnung des Extruders, Filaments und der X-, Y- und Z-Motoren variiert je nach Hersteller des 3D-Druckers [1]. Eine mögliche Funktionsweise ist in Abbildung 1 dargestellt. Der in dieser Arbeit verwendete 3D-Drucker ist der x500 der Firma German RepRap GmbH (Datenblatt, siehe Anhang). Um ein Computer-Aided Design (CAD)-Modell oder ein 3D-gescanntes Modell drucken zu können, muss dieses zuerst mit einer Software, dem sogenannten Slicer, bearbeitet werden [3]. In der Arbeit wurde der Simplify 3D-Slicer verwendet. Mithilfe des Slicers lassen sich neben der Ausrichtung des Bauteils auf dem Druckbett auch weitere Einstellungen wie die Wandanzahl, Arbeitstemperaturen, Druckgeschwindigkeiten und die Infill-Art und -Dichte vornehmen. Als Infill wird die Innenraumfüllung eines 3D-gedruckten Modells bezeichnet. Beim 3D-Druck muss der Innenraum, anders als beispielsweise beim Spritzgussverfahren, nicht komplett ausgefüllt sein. Dadurch können Material und Gewicht des Modells eingespart werden. Die Dichte und die Art des Infills nehmen allerdings auch Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils [4]. In Abbildung 2 ist das Infill der Art Honeycomb während eines Druckvorgangs dargestellt.



Abbildung 2: Infill

Anders als Gitterlinien oder Kreisformen, zeichnet sich die bienenwabenförmige Struktur des Infills dadurch aus, Kräfte in alle Richtungen aufnehmen zu können [4]. Allerdings dauert der Druck von Honeycombs länger als beispielsweise ein Gitterlinien-Infill [5]. Ähnlich ist es bei der Anzahl der Außenwände eines Modells. Auch diese haben Auswirkungen auf Materialverbrauch, Druckdauer, Gewicht und Festigkeit des Bauteils. Es muss vor dem 3D-Druck entschieden werden, welche Kriterien, beispielsweise die Fertigungszeit oder die mechanischen Eigenschaften für das Endprodukt von Bedeutung sind. Die Struktureinstellungen sollten anschließend im Slicer entsprechend vorgenommen werden.

Neben der richtigen Düsentemperatur haben auch die Temperatur des Druckbettes und die Bauraumtemperatur eine Bedeutung für die Qualität des Objektes. Nicht jeder 3D-Drucker gewährleistet ein beheizbares Druckbett, sowie einen beheizbaren und damit einhergehenden geschlossenen Druckraum, auch Bauraum genannt. Für den Druck von Konstruktions- und Hochleistungsthermoplasten, aber auch manchen Standardthermoplasten sind diese beheizten Aggregate essenziell, um einem Verzug des Bauteils, dem sogenannten Warping [6], beim Abkühlen der gedruckten Schichten entgegen zu wirken. In Abbildung 3 ist eine Folge des Warping, das Ablösen der unteren Schichten von der Druckplatte, erkennbar. Die Elemente krümmen sich durch innere Spannungen, welche beim Abkühlen entstehen.



Abbildung 3: Warping

Dadurch ist die Geometrie des Produktes nicht mehr gegeben. Zudem verringern die Eigenspannungen auch die mechanischen Eigenschaften. Es gibt mehrere Möglichkeiten, dem Warping entgegenzuwirken. Durch eine beheizte Druckplatte bleibt das Bauteil besser am Druckbett haften. Die unteren Schichten bleiben aufgrund der Wärmeübertragung der Druckplattentemperatur durchgängig warm und relaxiert, es bauen sich weniger innere Spannungen auf [6]. Einer fehlenden Druckbetthaftung kann weiterhin durch ein Haftmittel, wie einem Sprühkleber oder durch „Funktionen zur Druckbetthaftung“ [6] entgegengewirkt werden. Die gängigsten Funktionen Raft und Brim können im Slicer ausgewählt werden. Beim Raft werden mehrere Materialschichten unter dem eigentlichen Modell gedruckt. Das Raft ist dabei größer als die unterste Schicht des eigentlichen 3D-Drucks. Dadurch ist das Produkt weniger anfällig für einen Verzug der unteren Schichten. Beim Brim wird im Gegensatz zu mehreren Schichten, nur eine Erweiterung der untersten Schicht um das Modell gedruckt [7]. Damit wird, wie beim Raft, die Haftungsfläche auf der Druckplatte vergrößert [6]. Beide, Raft oder Brim, müssen nach der Fertigstellung des 3D-Drucks entfernt werden. Neben der Druckbetthaftung, verlangsamt ein beheizter Bauraum das Abkühlen der bereits gedruckten Schichten und wirkt so dem Auftreten von inneren Spannungen in allen Schichten des Bauteils entgegen. Nach der Fertigstellung des 3D-Drucks ist es wichtig, Bauraum und Druckplatte langsam abkühlen zu lassen. Damit soll der Schrumpfung und damit einhergehender Verzug des Materials, welcher bei abkühlenden Thermoplasten eine bekannte Eigenschaft ist, möglichst gering gehalten werden [6].

Die Druckbetthaftung, Druckraum- und Druckbetttemperatur sind nur wenige Funktionen, welche im Slicer für die Qualität des 3D-Drucks eingestellt werden können. Welche weiteren Eigenschaften und Funktionen angepasst werden können, ist häufig vom Slicer abhängig. Bei der Arbeit mit dem Simplify 3D-Slicer wurden bei allen Filamenten folgende Funktionen mithilfe von Testdrucken angepasst:

Der sogenannte Extrusion Multiplier bestimmt wie viel Filament aus der Düse gefördert wird [8]. Der Wert ist wichtig um eine Über- oder Unterextrusion, also das Fördern von zu viel oder zu wenig Material zu vermeiden. Wie viel Material aus der Düse gefördert wird ist abhängig vom Düsendurchmesser und der Extrusion Width, also der Dicke des Filaments nach dem Fluss aus der Düse. Beide Werte können gemessen und in den Slicer eingetragen werden. Danach kann der Extrusion Multiplier angepasst werden. Dazu kann der Calibration Cube genutzt werden. Dieses Bauteil ist ein Testdruck, bei dem ein kleiner Würfel gedruckt wird, siehe Abbildung 4.

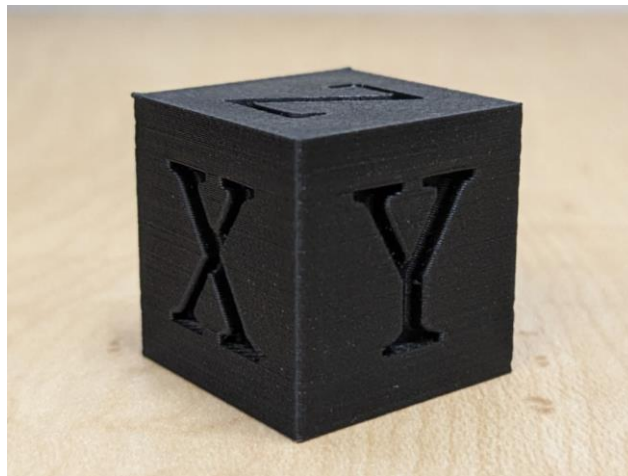


Abbildung 4: Calibration Cube

Anhand dieses Würfels können unter anderem Über- und Unterextrusion bewertet werden. Fehlende Materialschichten oder Löcher in den Deckflächen sind ein Indikator für Unterextrusion. Dicke, unförmige Ecken hingegen deuten auf eine Überextrusion hin. Neben der Filamentförderung kann hingegen auch die Druckgeschwindigkeiten zu den gleichen Druckfehlern führen. Diese kann ebenfalls im Slicer angepasst werden. Um die Oberflächenqualität weiterhin zu verbessern, kann zudem die Druckgeschwindigkeit für die äußeren Schichten, auch Outlines genannt, im Vergleich zum restlichen Druck verlangsamt werden. Im Simplify 3D-Slicer ist dies unter Outline Underspeed anpassbar [9]. Für eine gute Oberflächenqualität ist auch die Schichthöhe, im Slicer Layer Height, von Bedeutung. Je geringer die Schichthöhe ist, desto glatter ist die Oberfläche und die einzelnen Schichten sind schlechter zu erkennen. Allerdings erhöht sich bei geringer Schichthöhe die Druckzeit. Eine weitere wichtige Einstellung für die Qualität und Stabilität des 3D-Drucks

ist die Düsentemperatur. Die richtige Temperatur lässt sich beispielsweise mit einem Temperaturbaum bestimmen.



Abbildung 5: Temperaturbaum

Bei einem Temperaturbaum, wie in Abbildung 5 gezeigt, werden einzelne Abschnitte mit verschiedenen Düsentemperaturen gedruckt. Dadurch können die einzelnen Temperaturen direkt miteinander verglichen werden. Dabei wird auf die Schichtlage, das Durchhängen einzelner Schichten oder dem Entstehen dünner Fäden, dem sogenannten Stringing, geachtet. Neben der richtigen Düsentemperatur ist es bei einigen Materialien wichtig eine Kühlung durch einen Luftstrom einzurichten, damit die Schichten während des Drucks nicht zu weich werden.

Falls eine besonders glatte Oberfläche benötigt wird, könnte abschließend die Funktion des Ironings genutzt werden. Beim Ironing fährt die heiße Düse des 3D-Druckers erneut über das gedruckte Bauteil. Dabei wird nur eine geringe Menge von Material extrudiert. Durch die Hitze schmilzt der Kunststoff und mögliche Lücken an der Oberfläche werden durch das zusätzlich extrudierte Material gefüllt. Es entsteht eine glatte Oberfläche [10].

Gerade bei der Nutzung von Faserverbundwerkstoffen kann zusätzlich der Druck eines Skirts von Nutzen sein. Der Skirt ist eine einzelne gedruckte Schicht, welche in einem gewissen Abstand zum eigentlichen 3D-Modell in den gleichen Konturen

um den 3D-Druck gelegt wird. Da dies vor dem Druck der eigentlichen Schicht geschieht, wird die Düse vor dem Druck des Objekts gereinigt und mögliche Faser-rückstände in der Düse beeinflussen die Qualität des Bauteils nicht [11].

1.1.2 Verwendete Materialien und ihre Eigenschaften

Thermoplastische Kunststoffe bestehen aus unvernetzten, langen und hauptsächlich linearen Molekülketten. Durch die fehlende chemische Vernetzung ist eine thermoplastische Verformbarkeit gegeben. Der Thermoplast kann mehrfach aufgeschmolzen und umgeformt werden und in einer neuen Form erstarren. Durch diese Eigenschaften können Thermoplasten recycelt, also beispielsweise durch Zerkleinern und Neuextrusion zu Filament wiederverwendet werden [6]. Aufgrund verschiedener Polymerzusammensetzungen unterscheiden sich die Thermoplaste in ihren Eigenschaften. Für den technischen Gebrauch sind vor allem die mechanischen Eigenschaften und die Wärmeformbeständigkeit der einzelnen Kunststoffe von Bedeutung. Dabei wird häufig eine Einteilung nach der Dauergebrauchstemperatur in Standardthermoplaste, technische Thermoplaste und Hochleistungsthermoplaste vorgenommen, siehe Abbildung 6.

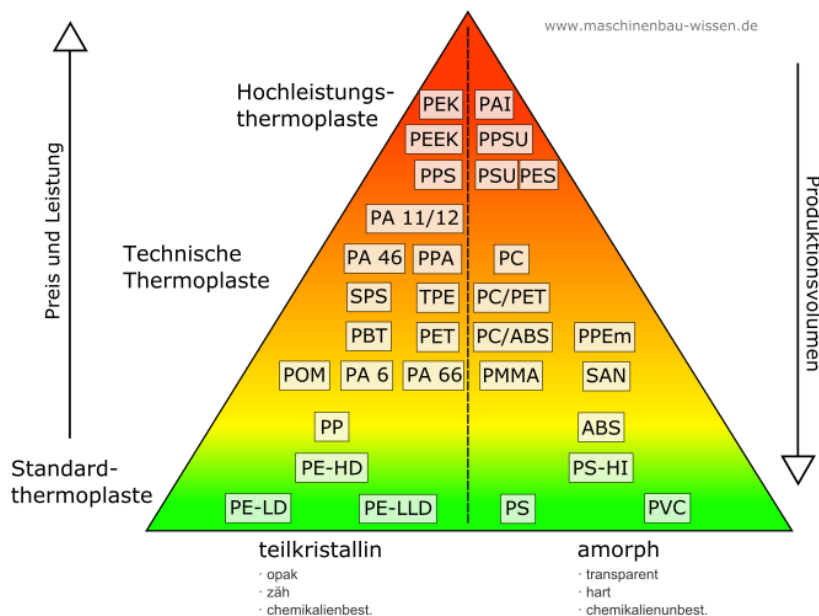


Abbildung 6: Kategorische Einteilung technisch relevanter Thermoplaste [12]

PAHT CF ist ein hochtemperatur-kohlenstofffaserverstärkter Thermoplast mit 15% Kohlefaseranteil auf der Basis von PA 12 [13]. PA 12 gehört zu den teilkristallinen Thermoplasten, bildet also regelmäßige Bereiche, die sogenannten Spherulite aus [6]. In diesen regelmäßigen Bereichen liegen die langen Polymerketten geordnet

nebeneinander und können besser zwischenmolekulare Kräfte ausbilden. Dadurch wird die Schmelztemperatur eines teilkristallinen Thermoplasten im Vergleich zu glasartigen Thermoplasten, wo es zu keiner Bildung von Spheruliten kommt, erhöht [6]. PA12 ist ein Polyamid. Die funktionelle Gruppe dieses Polymers ist die Amidgruppe mit der sogenannten Amidbindung (-CONH-). Die Zwölf steht für die Anzahl der Kohlenstoffatome pro Monomer, siehe Abbildung 7.

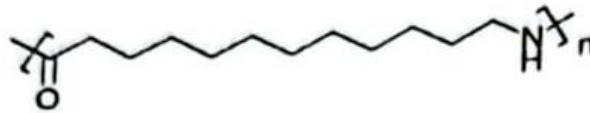


Abbildung 7: Polyamid 12 [6]

Das in der Arbeit verwendete Material ist das Luvocom® 3F PAHT CF 9891 BK Filament der Firma Lehmann&Voss&Co. KG (technisches Datenblatt siehe Anhang).

PPS CF ist ein Hochleistungsthermoplast mit einem Kohlenstofffaseranteil von 15% [14]. Poly-Phenylen-Sulfid (PPS), dargestellt in Abbildung 8, gehört zu der Gruppe der Polyaryle. Bei PPS sind aromatische Ringe über ein Schwefelatom miteinander verbunden [6].

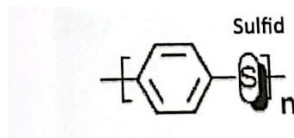


Abbildung 8: Poly-Phenylen-Sulfid [6]

Durch den aromatischen Ring ist die regelmäßige, langkettige Anordnung der Molekülketten gegeben, da die Ringe untereinander gut zwischenmolekulare Kräfte ausbilden können. PPS gehört somit wie PA 12 zu den teilkristallinen Thermoplasten [6]. Das verwendete Filament ist das Luvocom® 3F PPS CF 9938 BK von Lehmann&Voss&Co. KG (technisches Datenblatt siehe Anhang).

1.1.3 Der Einfluss von Faserverstärkungen auf die Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffen

Durch den Zusatz von Fasern können die mechanischen, dynamischen und thermischen Eigenschaften eines Thermoplastes verändert werden. Dabei werden im FFF-Verfahren häufig Kurzfasern verwendet. Kurzfasern sind nach ihrer Verarbeitung

zu einem Faserverbundwerkstoff häufig nicht länger als 0,5 mm [15]. Durch die Verwendung von Kurzfasern können die Festigkeit und die Steifigkeit der Thermoplaste verbessert werden, andererseits sind diese Veränderungen der mechanischen Eigenschaften nicht so hoch wie bei langfaserverstärkten Kunststoffen. Ebenfalls neigen Kurzfasern eher zu Faserbruch, was zu einer Verminderung der eigentlichen Funktion führen kann [16]. Allerdings sind Kurzfasern leichter zu verarbeiten und eignen sich besser für komplexe Formen, da sie weniger Einschränkungen bei der Fließfähigkeit haben. Dadurch sind die Kurzfasern prädestiniert für die Verwendung im 3D-Druck [17]. Aufgrund der Extrusion des Filaments im FFF-Verfahren, muss darauf geachtet werden, dass eine Verstärkung des Bauteils nur in der Ablageebene erreicht wird [6]. Vor allem für die Herstellung mechanischer und thermischer belasteter Komponenten sind Faserverstärkungen von Bedeutung, da sie beispielsweise die Einsatztemperatur, der als Matrix verwendeten Thermoplaste und die Belastungsdauer erhöhen können. Als Verstärkungsmaterial können verschiedene Materialien genutzt werden, welche aufgrund ihrer eigenen mechanischen Eigenschaften die des späteren Faserverbundwerkstoffes beeinflussen können. Im FFF-Verfahren können dafür Glas-, Kohlenstoff-, Natur- oder Keramikfasern verwendet werden [6]. Die Naturfasern unterscheiden sich je nach Art in ihrer Form, Länge, chemischer Zusammensetzung und mechanischen Eigenschaften. Als Verstärkung eines Kunststoffes in Form von Kurzfasern werden sie ebenfalls verwendet. Allerdings muss auf die Temperaturbeständigkeit der Fasern geachtet werden. Hohe Düsentemperaturen wie beim Druck von technischen oder Hochleistungsthermoplasten könnten zu einer Zersetzung der Fasern führen [6]. Deswegen sind Naturfasern für den Gebrauch von möglicherweise thermisch belasteten Bauteilen nicht geeignet. Möchte man mechanisch und thermisch belastbare Komponenten im FFF-Verfahren fertigen, sollte man Kohlenstoff-, Keramik- oder Glasfasern als Verstärkungsmaterial in Betracht ziehen.

Tabelle 1: Ausgewählte Eigenschaften von Kohlenstoff- und Glasfaser

Verstärkungs- material	E-Modul	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	Wärmeleitfähigkeit
Kohlenstofffaser	228-490 GPa [18]	-1,3 - -0,6 $10^{-6}/K$ [18]	Sehr gut [19]
Glasfaser	71-87 GPa [18]	4 - 7,2 $10^{-6}/K$ [18]	Sehr gering [19]

Im Vergleich zur Glasfaser hat die Kohlenstofffaser, wie in Tabelle 1 aufgeführt, einen geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten und eine bessere Wärmeleitfähigkeit, was die Kohlenstofffaser für den Einsatz von thermisch und mechanisch belasteten Bauteilen auszeichnet. Ähnlich ist es bei den Keramikfasern. Keramikfasern haben eine hohe thermische Stabilität und mechanische Festigkeit bei hohen Temperaturen. Allerdings sind Keramiken für ihre geringe Wärmeleitfähigkeit bekannt und werden häufig als Hitzeschutzmaterial eingesetzt [6]. Mithilfe eines wärmeleitfähigen Materials ist es hingegen möglich eine Werkzeugform zu temperieren. Wie, bewusst durch Kühlkanäle, eine schnellere Abkühlung des warmen Produkts zu ermöglichen und die Werkzeugform kühl zu halten [21]. Möchte man sicherstellen, dass sich eine Werkzeugform einer thermischen Belastung ohne Versagen standhält und die Temperatur leiten kann, eignet sich nur die Kohlenstofffaser als Verstärkungsmaterial.

1.1.4 Mechanische und thermische Belastungen auf die Werkzeugform beim Thermoformen

Als Thermoformen versteht man das „Umformen von thermoplastischen Halbzeugen bei erhöhter Temperatur zu Formteilen“ [21]. Dabei werden die Halbzeuge, meist Platten, auf ihre Umformtemperatur im elastoplastischen Bereich aufgeheizt und anschließend mithilfe eines Thermoformwerkzeugs in die endgültige Form gebracht. Nach dem Abkühlen in der Werkzeugform kann das formstabile Produkt entformt und weiterverarbeitet werden. Die Ausformung der warmen Halbzeuge erfolgt mithilfe von Vakuum- oder Druckluft. Die Werkzeugform kann entweder eine Positiv- oder Negativformung des Produkts sein.

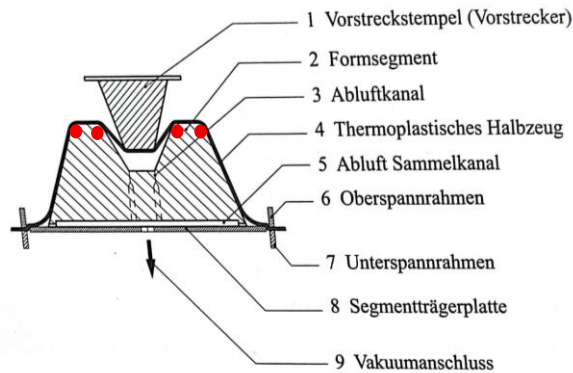


Abbildung 9: Prinzipskizze Thermoformen [21]

Abbildung 9 zeigt ein mögliches Prinzip des Thermoformens. Es wird vor allem sichtbar, dass in der Werkzeugform Luftkanäle für die Vakuum- oder Druckluftzufuhr benötigt werden.

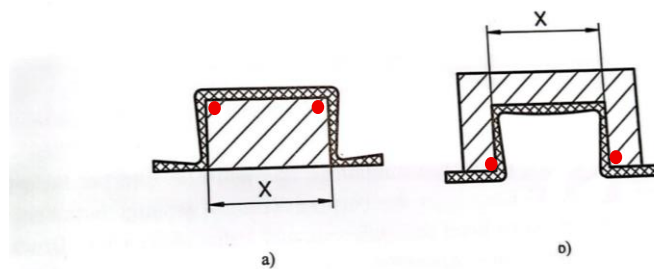


Bild 2.1 Positiv- und Negativformung
a) Positivformung (schematisch)
b) Negativformung (schematisch)
X = vom Formwerkzeug abgeformtes Maß

Abbildung 10: Positiv- und Negativformung der Werkzeugformen

In Abbildung 10 sind die beiden Formungen der Werkzeugform skizziert. Die in Abbildung 9 und 10 dargestellten roten Punkte an den Außenkanten der Werkzeugformen sollen die Hauptlastpunkte der Werkzeugform hervorheben. Wird im Fertigungsprozess das aufgeheizte Halbzeug über die Werkzeugform gezogen oder gedrückt, entsteht vor allem an diesen Punkten eine Biegebelastung, da das Halbzeug über diese Punkte in seine endgültige Form gebogen wird. Um bei den ausgewählten Materialien bewerten zu können, ob diese einer Belastung als Werkzeugform im Thermoformen standhalten können, sollten diese deshalb auch unter Biegebelastung betrachtet werden.

1.2 Problemstellung

Die vorgestellten Materialien PAHT CF und PPS CF sollen im FFF-3D-Druck-Verfahren zu individuellen Bauteilen verarbeitet werden und möglicherweise im technischen Gebrauch, beispielsweise als Werkzeugformen für das Thermoformen, Anwendung finden. Dadurch können mechanische Belastungen entstehen, welche die Materialien in ihrer Strukturzusammensetzung aus Wandanzahlen und Infill standhalten müssen. Durch die Zusammensetzung aus Wänden und Infill wird sich eine Material- und somit auch eine Kosteneinsparung erhofft. Weiterhin könnte das Wiederverwenden der 3D-gedruckten Formen durch das Recyclen des Materials eine Fertigung nachhaltiger gestalten. Dabei könnten bereits gedruckte 3D-Modelle zerkleinert, regranuliert und als neues Filament extrudiert werden [6]. Um dadurch einer möglicherweise kostengünstigeren und nachhaltigeren Fertigung von Werkzeugformen näher zu kommen werden folgende Forschungsfragen in der Arbeit behandelt:

Welche Strukturzusammensetzungen eines im FFF-Verfahren gefertigten Biegeprüflings aus Wandanzahl und Honeycomb-Infill liefern die besten mechanischen Eigenschaften?

Wie groß ist die Biegefestigkeit und -steifigkeit dieser Struktur aus PAHT CF und PPS CF?

Wie stehen die Kosten und Nutzen der Materialien zueinander?

Ergeben sich aus den Versuchen mögliche technische Anwendungen?

2. Methodisches Vorgehen

Vor dem 3D-Druck der Biegeprüflinge musste sich zu Beginn eine Materialauswahl erfolgen. Dazu wurde eine Entscheidungsmatrix erstellt. Anschließend wurden die richtigen Druckparameter der Materialien bestimmt. Nach dem Druck der Prüflinge aus PAHT CF und PPS CF wurden die Biegefestigkeit und- steifigkeit in der 3-Punkt-Biegeprüfung nach DIN EN ISO 178 [22] bestimmt und eine Kosten-Nutzen-Analyse aufgestellt.

2.1 Entscheidungsmatrix

In der Entscheidungsmatrix, siehe Tabelle 2, wurden verschiedene druckbare Filamente in den Kriterien Verfügbarkeit, Druckbarkeit, thermische und mechanische Belastbarkeit mit 1-5 Punkten bewertet. Bei der Verfügbarkeit wurde darauf geachtet, ob das Material bereits im Additiven Fertigungslabor des Instituts für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik vorhanden und verwendbar ist. Die Druckbarkeit, also wie gut das Material gedruckt werden kann, ohne dass Druckfehler während des Prozesses auftreten, wurde anhand von Erfahrungsberichten vorheriger Nutzer bewertet. Die mechanischen und thermischen Eigenschaften konnten Datenblättern entnommen werden (siehe Anhang). Da bereits in 1.1.3 erläutert wurde, warum sich nur ein kohlenstofffaserverstärkter Thermoplast für die Verwendung als Material für thermisch leitbare und mechanisch belastete Bauteile eignet, werden in der Entscheidungsmatrix, auch nur solche bewertet.

Tabelle 2: Entscheidungsmatrix

Kriterium	PAHT CF	PPS CF	PEEK CF	PC CF [23]
Verfügbarkeit	5	5	5	0
Druckbarkeit	4	3	1	unbekannt
Thermische Belastbarkeit	3	5	5	3
Mechanische Belastbarkeit	4	5	5	4

Um den Prozess nachhaltig zu gestalten, wurde vor allem auf die Verfügbarkeit geachtet. Es war für die Entscheidung wichtiger bereits vorhandenes Material aufzubrauchen, als neues zu bestellen. Deshalb wurden andere technische oder Hochleistungsthermoplaste mit einer Kohlenstofffaserverstärkung und damit einer guten thermischen und mechanischen Belastbarkeit, wie das PC CF nicht in Betracht gezogen. Aufgrund der schlechten Druckbarkeit von PEEK CF wurde sich für PAHT CF und PPS CF für die Bewertung als mögliche Materialien für Werkzeugformen entschieden. Um Material und Kosten der vergleichsweise teureren Materialien PPS CF und PAHT CF zu sparen, wurde zur Festlegung der Struktur des Biegeprüflings ABS genutzt. Anschließend wurden mit der ermittelten Struktur Prüflinge aus PPS CF und PAHT CF gedruckt und untersucht. Die beiden Materialien wurden zudem in einer Kosten-Nutzen-Analyse verglichen.

2.2 Druck und Biegeprüfung von Biegeprüflingen aus ABS

Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) ist ein amorpher Thermoplast und zählt zu den Standardkunststoffen. Für den Druck der Biegeprüflinge wurde das ABS+ von Devil Design (Datenblatt siehe Anhang) verwendet.

Bevor die Biegeprüflinge gedruckt werden konnten, mussten die Druckparameter bestimmt werden. Um die richtigen Druckparameter des Materials zu bestimmen, wurden Temperaturbäume und Calibration Cubes verwendet. Dabei wurde bei den Testdrucken auf folgende Qualitätsmerkmale geachtet:

- Kein Stringing oder das Durchhängen einzelner Filamentstränge beim Temperaturbaum
- eine glatte Oberfläche und damit einhergehend eine gute Schichthaftung, Maßhaltigkeit und keine Über- oder Unterextrusion bei den Calibration Cubes

Die Bewertung der Qualität erfolgte visuell und durch das Abtasten der Oberfläche. Für die Überprüfung der Maßhaltigkeit wurde weiterhin ein Messschieber genutzt.



Abbildung 11: Temperaturbaum ABS+

In Abbildung 11 ist einer der aus ABS+ gedruckten Temperaturbäume dargestellt. Bei allen gedruckten Temperaturen, 235 °C – 225 °C, sind Fadenbildungen und das Durchhängen von Filamentsträngen bei dem Druck mit Überhang erkennbar. Die Fadenbildung und der Durchhang sind bei 235 °C am geringsten. Allerdings ist die Druckqualität bei keiner der dargestellten Temperaturen zufriedenstellend. Es wurden daher weitere Temperaturbäume mit anderen Temperaturen gedruckt. Abschließend wurde eine Düsentemperatur von 240 °C für alle weiteren Bauteile gewählt.

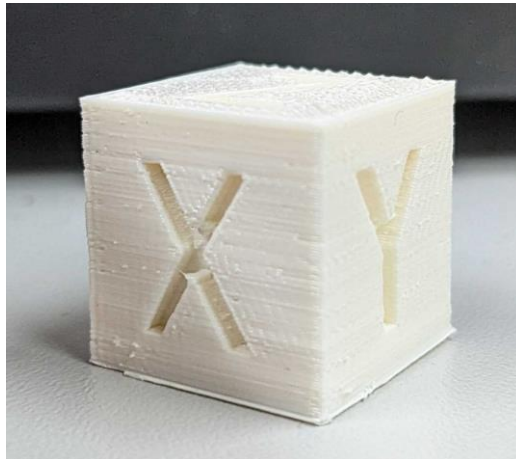


Abbildung 12: Calibration Cube ABS+

Beim in Abbildung 12 dargestellten Calibration Cube ist die Oberfläche nicht zufriedenstellend. An manchen Stellen an den Außenflächen wurde zu viel oder zu wenig Material gefördert. Ebenfalls ist die Stirnfläche uneben. Da an den Außenflächen beides, Über- und Unterextrusion auftreten, wurde statt des Extrusion Multipliers die Geschwindigkeit angepasst. Besonders wurde die Outline Underspeed

verringert, damit die Oberfläche eine bessere Qualität bekommt. Nach mehreren Anpassungen wurden folgende Druckparameter festgelegt, welche in Tabelle 3 aufgeführt sind.

Tabelle 3: Druckparameter ABS

Druckparameter	Ermittelter Wert
Extrusion Multiplier	0,93 %
Extrusion Width	0,44 mm
Düsendurchmesser	0,35 mm
Layer Height	0,2 mm
Düsentemperatur	240 °C
Druckbetttemperatur	90 °C
Bauraumtemperatur	50°C
Kühlung	Ab 3. Schicht mit 50%
Druckgeschwindigkeit	2100 mm/min
Outline Underspeed	75 %

Um nun die Strukturzusammensetzung mit den besten mechanischen Eigenschaften zu bestimmen, wurden anschließend Biegeprüflinge nach DIN EN ISO 178 [22] mit verschiedenen Wandanzahlen gedruckt. Die Wandstärken wurden in zweier Schritten von zwei auf acht Wände erhöht, siehe Abbildung 13. Von jeder Wandanzahl wurden fünf Proben gedruckt. Da es beim 3D-Druck zu Druckfehlern, wie Hohlräume, Delaminationen oder ungleichmäßige Schichtablagerungen in den einzelnen Prüflingen kommen kann, reicht eine einzelne Probe für die Bestimmung mechanischer Eigenschaften nicht aus. Es müssen mehrere Biegeprüflinge der gleichen Zusammensetzung geprüft werden, um einen repräsentativen Durchschnitt zu erzielen [24]. Die Proben wurden jeweils in der Mitte des Druckbettes gedruckt, um mögliche Unebenheiten im äußeren Druckbett und daraus resultierende unterschiedliche Prüflinge zu vermeiden. Als Infill wurden Honeycombs mit 20 % Dichte gewählt.

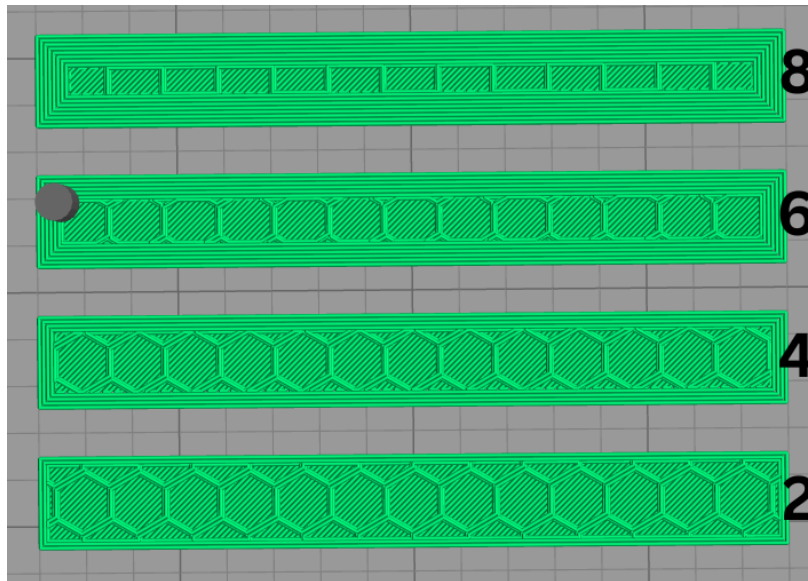


Abbildung 13: Biegeprüflinge mit verschiedenen Wandanzahlen

Es wurde sich für die Honeycombs entschieden, da Bienenwaben Kräfte in alle Richtungen aufnehmen können [4]. Allerdings ist zu erkennen, dass bei höherer Wandanzahl in den Biegeprüflingen die Form der Honeycombs verloren geht und damit ihre Eigenschaften eingeschränkt sind. Es wurde eine möglichst geringe In-fill-Dichte gewählt, um die Hauptlast auf die Wände zu legen. Die Biegeprüfung wurde bei 80 °C durchgeführt, da auch eine thermische Belastung von Werkzeugformen berücksichtigt werden soll. Trifft ein erhitztes Material auf die Werkzeugform, wird diese im Laufe eines Herstellungsprozesses eine erhöhte Eigentemperatur annehmen. Diese erhöhte Eigentemperatur soll mit einer Biegeprüfung bei 80 °C abgebildet werden. Die Prüfungen erfolgten auf der Universalprüfmaschine der Firma ZwickRoell GmbH & Co KG bis 10 kN. Der Prüfbereich wurde mithilfe eines Ofens auf 80 °C erhitzt. Damit die Proben die Temperatur von 80 °C annehmen können, wurden sie vor der Prüfung für sieben Minuten im beheizten Prüfbereich erwärmt. Bei den Biegeprüfungen kam es zu Auffälligkeiten bei der Spannungs-Dehnungslinie, dargestellt in Abbildung 14 und 15.

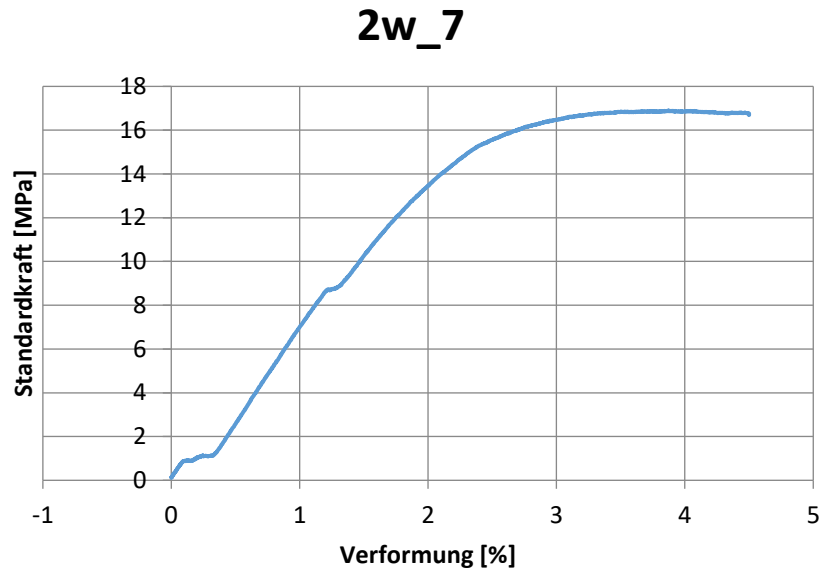


Abbildung 14: Auffälliges Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Probe

Auffällige Bereiche sind bei 0-0,4 % Verformung und bei 0,8- 1,4 % Verformung.

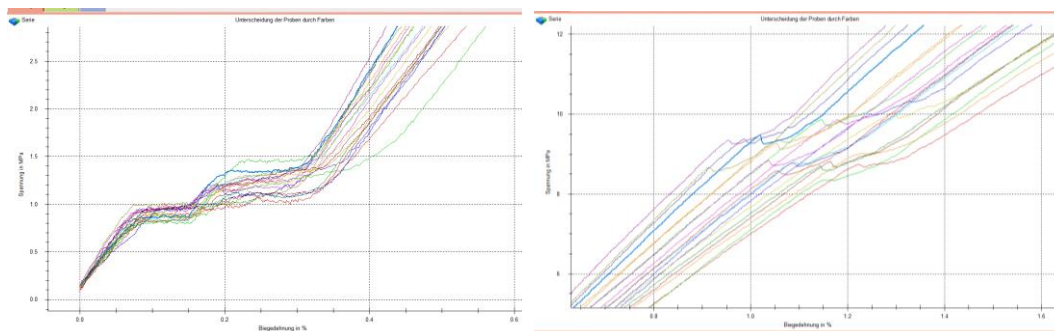


Abbildung 15: Nahaufnahmen der auffälligen Bereiche

Normalerweise sollte die Spannungs-Dehnungslinie ohne Knick, gerade verlaufen. Ungewöhnlich ist, dass die Unregelmäßigkeiten bei allen Proben an denselben Stellen auftreten. Ein Druckfehler einzelner Proben, die diesen Verlauf hervorrufen könnten, ist daher unwahrscheinlich. Nach Überprüfung der Maschine im kalten Zustand wurde festgestellt, dass sich eine Schraube des oberen Biegestempels durch die Hitze gelockert hat. Dadurch wackelte der obere Stempel, was die Knick im Kurvenverlauf hervorrief. Dadurch dass die Knick im Bereich von 0-0,4 % Verformung auftreten, dem Bereich, in dem das Biegemodul bestimmt wird, konnte kein valides Biegemodul bestimmt werden. Die Prüfungsergebnisse wurden verworfen. Bei einem Neudruck der Biegeprüflinge kam es zu Warping. Durch den

Verzug wurde das Biegemodul verfälscht, auch diese Werte konnten nicht weiterverwendet werden. Da aus dem restlichen Filament des ABS+ keine weiteren Biegeprüflinge mehr gedruckt werden konnten, wurde nun ein recyceltes ABS genutzt. Die Druckparameter und der Druckablauf wurden beibehalten. Das recycelte ABS erweichte allerdings bei 80 °C bereits, wodurch eine Prüfung bei dieser Temperatur nicht möglich war. Die folgenden Prüfungen wurden deshalb bei Raumtemperatur durchgeführt, die anderen Prüfparameter wurden beibehalten. Neben den Biegeproben mit verschiedenen Wandanzahlen wurden auch Proben aus Vollmaterial geprüft. Dabei wurden 12 Wände gedruckt und das Infill auf 100% gestellt.

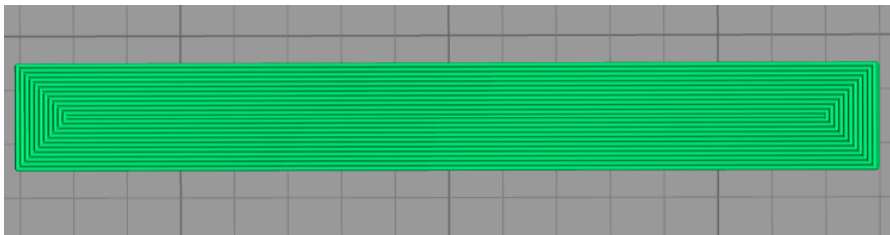


Abbildung 16: Biegeprüfling aus Vollmaterial

Wie in Abbildung 16 zu erkennen, bestehen die Prüflinge aus Vollmaterial nur aus Wänden. Eine Infill-Struktur ist nicht auszumachen. Aus den aufgezeichneten Biegemodulen wurden für die einzelnen Wandanzahlen Mittelwerte gebildet. Diese wurden zueinander aufgetragen, siehe Abbildung 17.

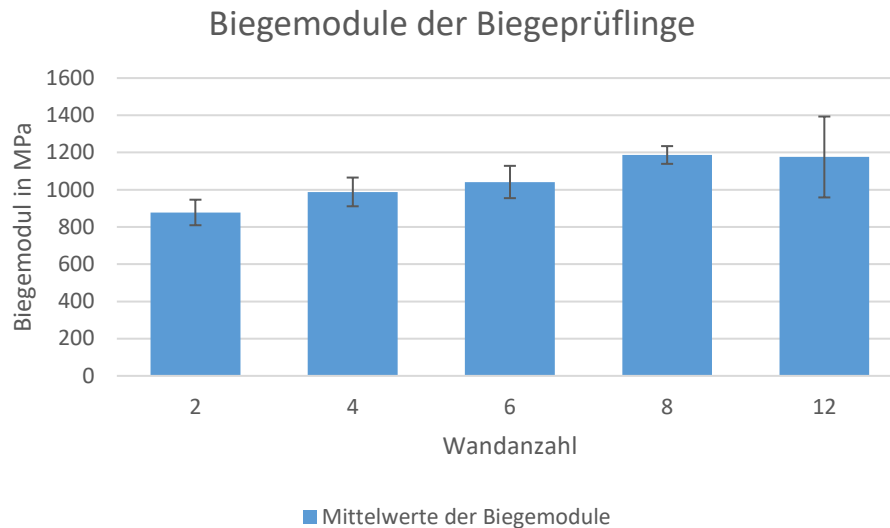


Abbildung 17: Mittelwerte der Biegemodule von Biegeprüflingen verschiedener Wandanzahlen

Die Biegesteifigkeit σ_{fM} wurde bei den Versuchen nicht aufgezeichnet, da es zu keinem Bruch der Prüflinge kam. Aus den Werten lässt sich ableiten, dass sich die Prüflinge aus acht Wänden und Vollmaterial nur geringfügig unterscheiden und die besten mechanischen Eigenschaften aufweisen. Da auf Material- und Kosteneinsparung geachtet wird, werden acht Wände als Wandanzahl für weitere Versuche festgelegt.

Nach der Bestimmung der optimalen Wandanzahl wurde weiterhin die optimale Dichte des Infills ermittelt. Dazu wurden erneut Biegeprüflinge mit verschiedenen Prozentanzahlen des Infills und acht Wänden gedruckt. Die Anzahl des Infills unterschied sich von 40 % - 80% jeweils in zwanziger Schritten, siehe Abbildung 18.

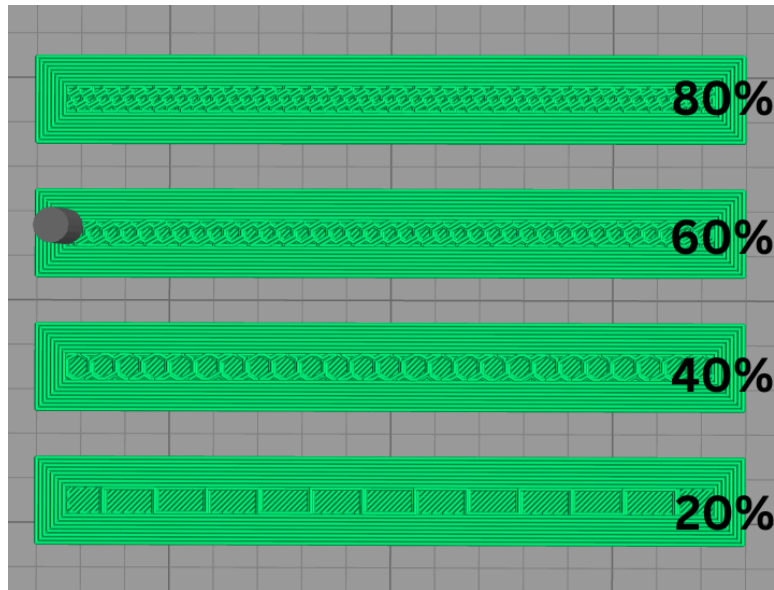


Abbildung 18: Biegeprüflinge mit verschiedenen Infill-Dichten

Eine Kombination aus acht Wänden und 20% Infill wurden bereits bei den Prüfungen der verschiedenen Wandanzahlen untersucht. Diese Prüfungen werden ebenfalls mit den Proben aus Vollmaterial verglichen.

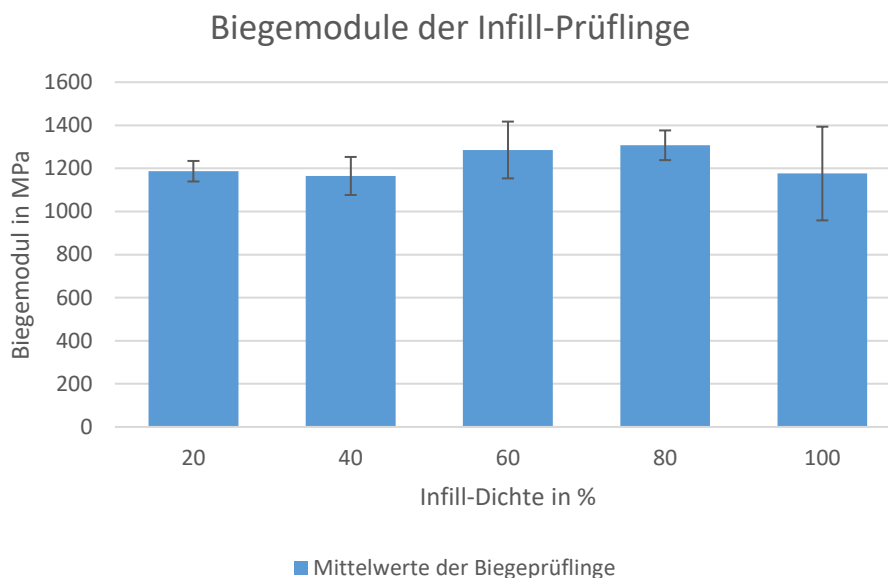


Abbildung 19: Mittelwerte der Biegemodule von Biegeprüfungen verschiedener Infill-Dichten

Die Unterschiede der Biegemodule aller Infill-Dichten, dargestellt in Abbildung 19, sind gering. Gerade die Mittelwerte der Biegemodule der Infill-Dichten von 60 % und 80 % unterscheiden sich kaum. Die geringen Unterschiede der Mittelwerte las-

sen vermuten, dass die Infill-Dichte weniger Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften nimmt, als die Anzahl der Wände. Trotzdem scheint das Infill die mechanischen Eigenschaften positiv zu beeinflussen, da alle Mittelwerte der Biegemodule mit Infill, gleichauf oder höher als der Mittelwert des Vollmaterials liegen, bei dem die Prüflinge so gesehen nur aus Wänden bestehen (siehe Abbildung 16). Um weiterhin Material einsparen, aber gleichzeitig die bestmöglichen mechanischen Werte erzielen zu können, wurde sich für ein Infill-Dichte von 60 % entschieden.

2.3 Druck und Biegeprüfung von Biegeprüflingen aus PAHT CF und PPS CF

Um passende Druckparameter von PAHT CF herauszufinden, wurden zu Beginn erneut Temperaturbäume gedruckt. Allerdings mussten diese abgebrochen werden, da das Filament ab der zweiten Schicht nicht mehr gefördert wurde, siehe Abbildung 20.

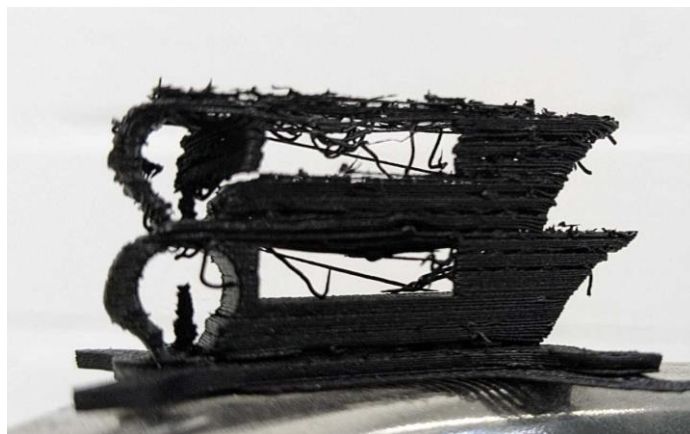


Abbildung 20: Temperaturbaum PAHT CF

Ein möglicher Grund ist, dass der Wechsel der Düsentemperatur während des Drucks vom Drucker nicht umgesetzt werden konnte, weshalb ab dem Wechsel kein Filament mehr gefördert wurde. Das Problem wurde nicht weiter untersucht. Stattdessen wurden, um trotzdem die richtige Düsentemperatur bestimmen zu können, mehrere Calibration Cubes mit unterschiedlichen Temperaturen gedruckt und diese in ihrer Qualität verglichen. Beim Druck dieser Calibration Cubes wurde weiterhin festgestellt, dass in manchen Schichten zu wenig Material gefördert wurde. Dadurch entstand eine ungewollte Sollbruchstelle im Bauteil, an den Stellen, wo zu wenig Material gefördert wurde.

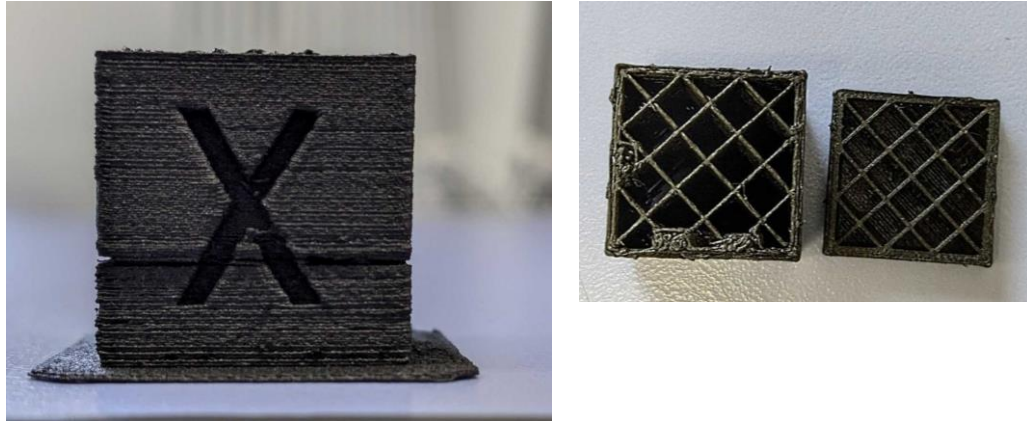


Abbildung 21: Calibration Cube PAHT CF

Diese in Abbildung 21 sichtbare Bruchstelle mit fehlendem Material kann die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils beeinflussen. Die Bruchstelle sollte im gedruckten Prüfling nicht mehr auftreten. Mithilfe eines größeren Düsendurchmessers konnte mehr Material gefördert und das Problem behoben werden. Es ergaben sich folgende Druckparameter, siehe Tabelle 4:

Tabelle 4: Druckparameter PAHT CF

Druckparameter	Ermittelter Wert
Extrusion Multiplier	0,94 %
Extrusion Width	0,55 mm
Düsendurchmesser	0,6 mm
Layer Height	0,15 mm
Düsentemperatur	270 °C
Druckbetttemperatur	90 °C
Bauraumtemperatur	50°C
Kühlung	keine
Druckgeschwindigkeit	1800 mm/min
Outline Underspeed	100 %

Um die Probleme der Temperaturwechsel bei den Testdrucken von PPS CF zu vermeiden, wurden direkt Calibration Cubes zur Bestimmung der passenden Druckparameter genutzt. Problematisch bei den ersten Calibration Cubes aus PPS CF waren Löcher in den oberen und unteren Schichten des Würfels, gezeigt in Abbildung 22. Durch die fehlende durchgängige Schichthaftung würde es zu Einschränkungen der mechanischen Eigenschaften kommen. Das Material würde an den löcherigen Stellen zuerst brechen.

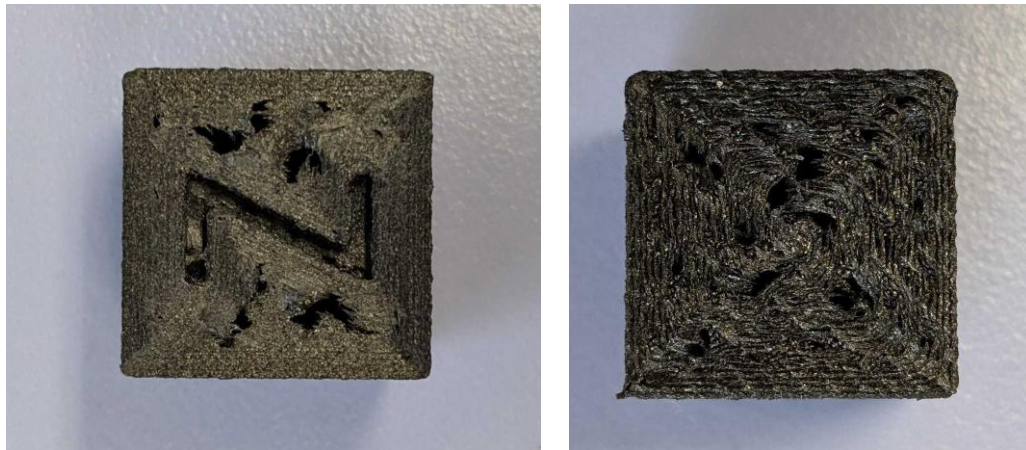


Abbildung 22: Calibration Cube PPS CF

Diese Fehler konnten durch mehrfache Anpassungen der Schichthöhe, der Fördermenge und der Geschwindigkeit behoben werden. Dazu wurden weitere Calibration Cubes gedruckt. In Tabelle 5 sind die endgültigen Druckparameter für PPS CF aufgeführt.

Tabelle 5: Druckparameter PPS CF

Druckparameter	Ermittelter Wert
Extrusion Multiplier	0,97 %
Extrusion Width	0,43 mm
Düsendurchmesser	0,6 mm
Layer Height	0,15 mm
Düsentemperatur	310 °C
Druckbetttemperatur	90 °C
Bauraumtemperatur	50°C
Kühlung	keine
Druckgeschwindigkeit	1500 mm/min
Outline Underspeed	100 %

Nach dem Ermitteln der passenden Druckparameter beider Materialien wurden jeweils 10 Biegeprüflinge mit acht Wänden und 60 % Infill in Form von Honeycombs gedruckt und nach DIN EN ISO 178 bei Raumtemperatur geprüft.

3. Ergebnisse

Neben der Ergebnisdarstellung der 3-Punkt-Biegeprüfung wurden auch eine Kosten-Nutzen-Analyse der Materialien PAHT CF und PPS CF durchgeführt.

3.1 3-Punkt-Biegeprüfung

Aus der 3-Punkt-Biegeprüfung ergeben sich als Mittelwerte aus den zehn Proben folgende Biegefestigkeiten und -steifigkeiten der Materialien, siehe Tabelle 6:

Tabelle 6: Biegefestigkeit und -steifigkeit von PAHT CF und PPS CF

Material	Biegemodul E_f [MPa]	Standardab- weichung	Biegefestig- keit σ_{fM} [MPa]	Standardab- weichung
PAHT CF	4251,7	334,441	91,2	3,825
PPS CF	3154,9	373,732	60,2	5,06

PAHT CF hat sowohl eine höhere Biegefestigkeit und -steifigkeit als PPS CF. Auch sind die Standardabweichungen der aufgezeichneten Werte bei PAHT CF geringer als bei PPS CF. Bei allen Proben kam es zu einem Bruch, beziehungsweise zu einem Anbruch der Probe. Durch den Zusatz von Fasern wird der Thermoplast zwar steifer, aber auch spröder und verliert an Elastizität, weshalb es unter zu hoher Belastung zu einem Bruch der Probe, wie in Abbildung 23 dargestellt, kommt.



Abbildung 23: Durchbrochener und angebrochener Biegeprüfling aus PPS CF

Die Verläufe der Spannungs-Dehnungs-Linie der jeweils 5. Probe aus PAHT CF und PPS CF wurden zum Vergleich in Abbildung 24 dargestellt.

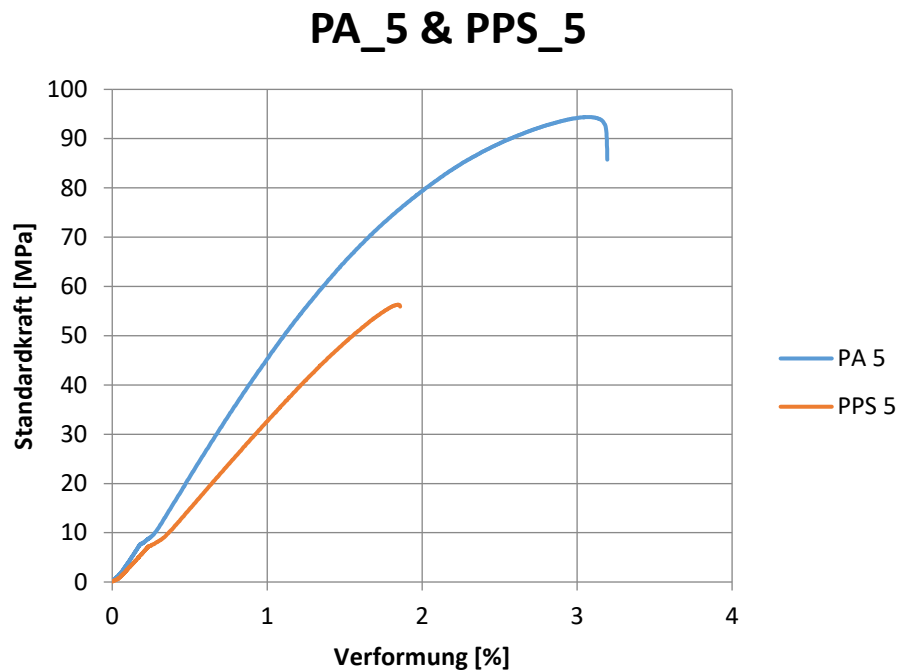


Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm PPS CF und PAHT CF

Auch hier ist der steilere Anstieg im Bereich des Biegemoduls bei PAHT CF im Vergleich zu PPS CF erkennbar. Es wird deutlich, dass PAHT CF länger der Biegebelastung ausgesetzt sein kann bevor es zum Bruch kommt.

3.2 Kosten-Nutzen-Analyse

Mithilfe des Slicers können die Druckdauer, die verbrauchte Filamentlänge, das Gewicht des Bauteils und die Materialkosten miteinander verglichen werden. Die beiden Materialien wurden anhand des Drucks eines einzelnen Biegeprüflings miteinander verglichen. Dabei wurden auch der Druck von Raft und einem Skirt, siehe Abbildung 25, mitberechnet, da gerade das Raft für eine gute Qualität und geringen Verzug der Formteile von Bedeutung ist und unabhängig von der Größe immer mitgedruckt werden sollte.

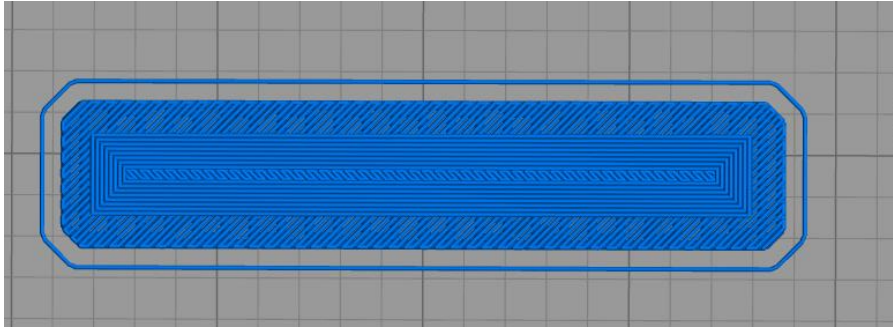


Abbildung 25: Skirt und Raft bei einem Biegeprüfling

Neben den Werten aus dem Slicer wurden auch die kurzzeitige und dauerhafte Einsatztemperatur (siehe Datenblätter im Anhang) zum Vergleich hinzugezogen. Die ermittelten mechanischen Eigenschaften sind 3.1 zu entnehmen.

Tabelle 7: Kosten-Nutzen-Analyse

Material	Druckdauer	Verbrauchtes Filament	Gewicht	Materialkosten	Kurzzeitige Einsatztemperatur	Dauerhafte Einsatztemperatur	Wärmeverformungstemperatur
PAHT CF	30 min	1704,8 mm	5,08 g	0,609 € [13]	160 °C	120°C	90°C
PPS CF	37 min	1785,0 mm	6,01 g	0,96 € [8]	240 °C	220 °C	*

* vom Hersteller nicht angegeben

Aus Tabelle 7 ist entnehmbar, dass die Druckdauer, sowie die Kosten, das Gewicht und der Materialverbrauch bei PPS CF höher sind als beim PAHT CF. Hingegen hat PPS CF höhere Einsatztemperaturen als PAHT CF.

4. Mögliche Fertigungsanwendungen

Die Verwendung von Stahl oder Aluminium als Werkstoff für die Werkzeugformen beim Thermoformen ist erst ab einer Fertigungsserie von mehreren 10 000 Produkten wirtschaftlich. Im Bereich des Prototypenbaus und von Kleinserienfertigungen werden Werkzeuge aus niedrigschmelzenden Legierungen und Kunststoffen eingesetzt. Die Herstellung von Kunststoffwerkzeugen, beispielsweise aus Polyurethan erfolgt im subtraktiven Verfahren. Andernfalls kann die Form gegossen werden. Zum Gießen der Werkzeugform aus Kunststoff wird aber erneut ein gefräster Stempel benötigt [25]. Bei beiden Herstellungsverfahren der Werkzeugformen sind mehrere Arbeitsschritte nötig, bei denen Arbeitspersonal gebunden wird. Weiterhin entsteht ein Materialverlust durch das subtraktive Fertigen der Werkzeuge. Mithilfe des 3D-Drucks im FFF-Verfahren einer Werkzeugform für das Thermoformen, könnten sowohl Material, als auch Arbeitsschritte eingespart werden. Die Fertigung des Werkzeugs erfolgt in einem Schritt und der 3D-Drucker bedarf keine dauerhafte Überwachung des Fertigungsprozesses durch eine Arbeitskraft. Weiterhin werden nicht nur durch das fehlende Abtragen des Kunststoffes, sondern auch durch den 3D-Druck von Infill, statt Vollmaterial, Gewicht und Kosten eingespart. Ebenfalls können Nachbearbeitungsschritte der Werkzeugformen, wie das Bohren von Luftkanälen oder eine Oberflächenbearbeitung eingespart werden. Die Luftkanäle für das Vakuumziehen könnten direkt in die CAD-Datei der Werkzeugform mitkonstruiert und anschließend gedruckt werden. Gleiches gilt für die Konstruktion und den 3D-Druck von Kühlkanälen. Ist die Oberfläche durch die Schichten nicht glatt genug für den Tiefziehprozess, könnten diese mithilfe des Ironings am Ende Druckprozess angepasst werden. Ebenfalls können die 3D gedruckten Werkzeugformen nach ihrer Verwendung, bei möglichem Verzug der Formen oder falschen Geometriedaten, recycelt und als neues Filament erneut verwendet werden. Einschränkungen der Herstellung von Werkzeugen für das Thermoformen von Kunststoffhalbzeugen entstehen durch die momentanen Größen der 3D-Drucker, welche kohlenstofffaserverstärkte Konstruktions- oder Hochleistungsthermo- plaste drucken können. Durch den vorausgesetzten beheizbaren Bauraum sind die Bauteilgrößen eingeschränkt.

5. Diskussion

Bei den Ergebnissen aus der 3-Punkt-Biegeprüfung weist PAHT CF bessere mechanische Eigenschaften auf, als das PPS CF, obwohl PPS CF als Hochleistungsthermoplast eigentlich bessere Eigenschaften bei gleichen Struktureinstellungen aufweisen sollte. Dies lässt sich mit den verschiedenen Extrusionsdicken der Materialien erklären. Bei PAHT CF liegt diese bei 0,55 mm, bei PPS CF nur bei 0,43 mm. Dadurch sind die Wände der Prüflinge beim PAHT CF breiter. Es entsteht mehr Fläche aus Vollmaterial, welche die Kräfte der Biegung länger aushalten kann, siehe Abbildung 26.

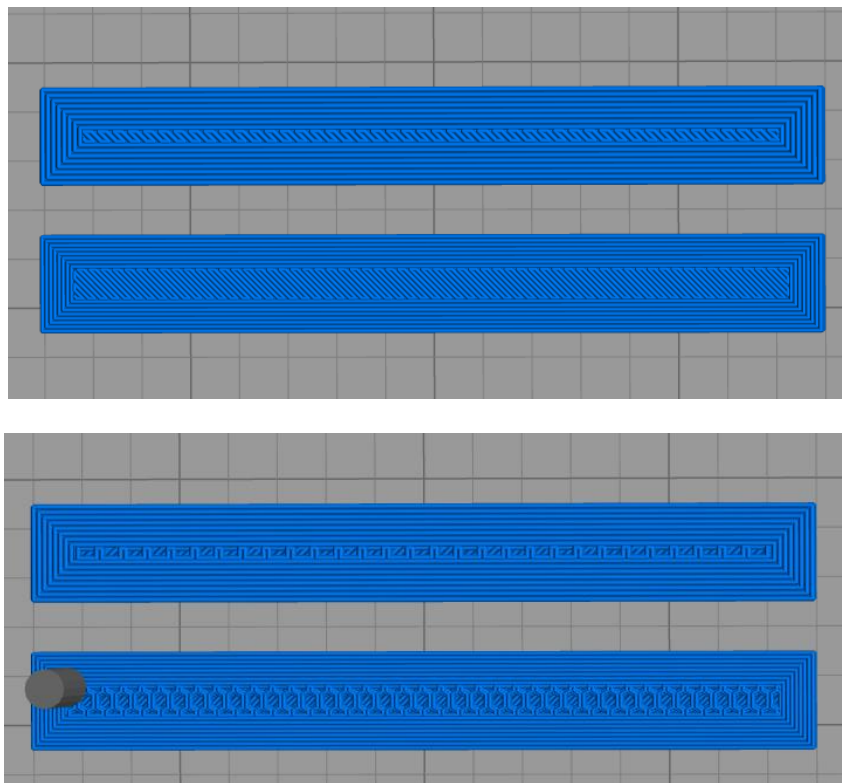


Abbildung 26: Biegeprüflinge aus PAHT CF und PPS CF im Vergleich

Dies wird deutlicher, wenn die resultierende Querschnittsfläche, auf der die Last bei einer 3 Punkt-Biegung liegt, berechnet wird. Die Berechnung erfolgte mit folgenden Formeln und ist in Abbildung 27 skizziert:

$$A_v = (H * W_A * E_{Wi}) * 2 + ((B - 2 * W_A * E_{Wi}) * L_A * L_H) * 2$$

$$A_I = (B * H - A_v) * P_i$$

$$A_G = A_I + A_v$$

Mit:

- A_v : Fläche mit Vollmaterial (Wände und Grund- und Oberfläche)
- H : Höhe der Probe (entspricht 4 mm)
- W_A : Wandanzahl
- E_{Wi} : Extrusion Width
- B : Breite der Probe (entspricht 10 mm)
- L_A : Schichtanzahl Grund- und Oberfläche (entspricht 4)
- L_H : Layer Height
- A_I : Fläche vom Infill
- P_I : Prozentualer Volumenanteil des Infills
- A_G : Gesamtquerschnittsfläche

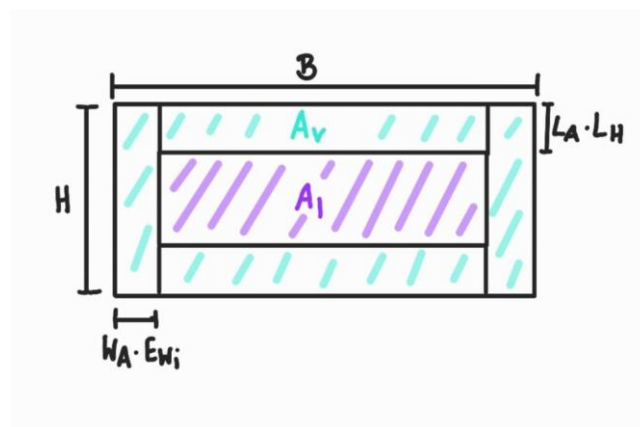


Abbildung 27: Skizze der resultierenden Querschnittsfläche

Daraus ergeben sich folgende resultierenden Flächen für die beiden Materialien:

$$\text{PPS CF: } 31,264 \text{ mm}^2 + 5,2416 \text{ mm}^2 = 36,5056 \text{ mm}^2$$

$$\text{PAHT CF: } 36,64 \text{ mm}^2 + 2,016 \text{ mm}^2 = 38,656 \text{ mm}^2$$

Durch die höhere Extrusionsdicke erhöht sich auch die gesamte resultierende Querschnittsfläche beim PAHT CF auf die die Biegebelastung wirkt. Es kann somit die These aufgestellt werden, dass die Extrusionsdicke und vor allem die daraus resultierenden breiteren Wände mehr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben, als das Material selbst.

Ob die beiden Materialien für die mechanische Belastung beim Thermoformen ausgelegt sind, hängt unter anderem von der Maschinenart, dem Verfahrensablauf und der Dicke und dem Material des Halbzeuges ab. Eine Verwendung der Materialien muss daher individuell bewertet werden. Bei der thermischen Belastung, welche durch die aufgeheizten Kunststoffhalbzeuge beim Tiefziehen entstehen, ist es frag-

lich, ob das PAHT CF eine Eigentemperatur im Werkzeug bei einer Erweichungstemperatur von 90°C (siehe Datenblatt) auf Dauer standhalten kann. Ebenfalls müssen manche Kunststoffe, welche als Werkstoffe für die Produkte des Thermoformens genutzt werden, wie PET, auf eine höhere Temperatur als 160°C, der kurzzeitigen Einsatztemperatur des PAHT CF aufgeheizt werden, bevor das eigentliche Tiefziehen beginnt. Ob der Einsatz von PAHT CF als Werkzeugmaterial möglich ist, könnten beispielsweise Langzeitbiegeversuche unter Temperatureinfluss zeigen. Diese Versuche sollten ebenfalls mit dem PPS CF durchgeführt werden, obwohl das Material durch seine höheren Einsatztemperaturen eine längere Beständigkeit verspricht. Es müssen dafür allerdings höhere Materialkosten und -verbrauch, sowie längere Herstellungszeiten als beim PAHT CF in Kauf genommen werden. Weiterhin würde die Möglichkeit bestehen beide Materialien in Kombination für die Herstellung von Thermoformen zu nutzen. Dabei kann das PAHT CF bei Werkzeugformen eingesetzt werden, welche weniger hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sind. Das PPS CF hingegen wird für den Einsatz bei höheren thermischen Belastungen verwendet. So könnten sich die beiden Materialien ergänzen und es müssten nur bei höher thermische belasteten Werkzeugformen auf das teurere und arbeitsaufwendigere PPS CF zurückgegriffen werden. Um zusätzlich festzustellen, ob die unbearbeitete Oberfläche des FFF-gedruckten Bauteils den Qualitätsanforderungen für das Tiefziehen entspricht, könnten Rauheitsprüfungen der Werkstücke durchgeführt werden. Ebenfalls könnte der Einfluss einer möglichen Oberflächenveredelung durch Ironing und damit weitere mögliche Folgen auf die Eigenschaften des Bauteils untersucht werden. Es ist zudem interessant zu untersuchen, welchen Einfluss die Modellgröße und die damit einhergehende Erhöhung der Druckdauer auf den Einfluss der Qualität des Produkts hat. Je länger ein Druck dauert, umso höher ist die Anfälligkeit für Warping oder einem möglichen Schrumpf des 3D-Drucks. Eventuell müssen Anpassungen der Druckeinstellungen bei größeren Bauteilen erfolgen. Sollte der Druck größerer Formteile gelingen, muss weiterhin eine Lösung für Modelle gefunden werden, welche zu groß für den Bauraum momentaner 3D-Drucker sind. Dazu könnten Fügetechniken, wie das Verkleben, Verkeilen oder das Verschweißen von Einzelteilen genutzt werden. Das Fügen eines Bauteils wird allerdings Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften haben, die zu berücksichtigen sind.

6. Schlussbemerkung/Fazit

Mithilfe von 3-Punkt-Biegeprüfungen von im FFF-Verfahren gedruckten Biegeprüflingen lassen sich Strukturbeziehungen für die Belastung unter Biegung bestimmen. Nach Vergleich der Biegefestigkeiten und -steifigkeiten der Strukturen wurde sich für eine Zusammensetzung von acht Wänden und einer Infill-Dichte von 60% entschieden. Diese Zusammensetzung brachten hohe mechanische Eigenschaften bei gleichzeitiger Materialeinsparung hervor. Bei der Untersuchung wurde weiterhin deutlich, dass die Anzahl der Wände eine größere Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften, als die Infill-Dichte hat. PAHT CF hat bessere mechanische Eigenschaften, was vor allem an der größeren resultierenden Querschnittsfläche durch eine höhere Extrusionsdicke liegt. In der Herstellung ist PAHT CF zudem günstiger, schneller und materialeinsparender als PAHT CF. Allerdings hat PPS CF höhere Einsatztemperaturen. Wie hoch die thermische und mechanische Belastung auf die Materialien in der Verwendung als Werkzeugform, beispielsweise im Thermoformen, sein darf, muss in weiteren Prüfungen untersucht werden. Die Verwendung von FFF-gedruckten Werkzeugformen würden im Vergleich zu momentanen Herstellungsprozessen, eine Material- und Gewichtseinsparung, die Vereinfachung des Herstellungsprozesses und eine nachhaltige Fertigung begünstigen.

Literaturverzeichnis

- [1] T. Kaffka, *3D-Druck: Praxisbuch für Einsteiger. Modellieren | Scannen | Drucken | Veredeln*. Frechen, GERMANY: mitp, 2022. Zugegriffen: 22. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tuclausthal-ebooks/detail.action?docID=6997166>
- [2] P. Fastermann, „Welche 3D-Druck-Technologien gibt es und welche Technologie eignet sich wofür?“, in *3D-Drucken: Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*, P. Fastermann, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2016, S. 27–47. doi: 10.1007/978-3-662-49866-8_5.
- [3] W. Sommer, A. Schlenker, und C.-D. Lange-Schönbeck, *Faszination 3D-Druck: alles zum Drucken, Scannen, Modellieren*. Burgthann: Markt Technik, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://claim.ub.tu-clausthal.de/id{colon}840857047>
- [4] „La importancia del tipo de relleno en impresión 3D“, Filament2Print. Zugegriffen: 30. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://filament2print.com/de/blog/filament2print.com/de/blog/importance-remplissage-impression-3d?slug=importance-remplissage-impression-3d&module=smart-blog>
- [5] L. M, „Infill: Der Schlüssel für perfekt ausbalancierte 3D-Drucke“, 3Dnatives. Zugegriffen: 30. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3dnatives.com/de/infill-im-3d-druck-260720231/>
- [6] A. Fischer, D. Achten, und M. Launhardt, *Kunststoff-Wissen für die additive Fertigung: Eigenschaften, Verarbeitung und Einsatzgebiete von Thermoplasten*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2023.
- [7] B. Z, „Wie Warping im 3D-Druck zustande kommt und was Sie dagegen tun können“, 3Dnatives. Zugegriffen: 30. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3dnatives.com/de/warping-im-3d-090120231/>
- [8] „Extrusion multiplier calibration | Prusa Knowledge Base“. Zugegriffen: 2. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://help.prusa3d.com/article/extrusion-multiplier-calibration_2257
- [9] *Simplify3D*. Zugegriffen: 4. Juli 2025. [Online Video]. Verfügbar unter: <https://www.facebook.com/simplify3d/posts/improve-your-models-surface-finish-without-slowing-down-the-entire-print-by-lowee/2433034570081209/>
- [10] „Cura: Ironing – Simply Explained“, All3DP. Zugegriffen: 30. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://all3dp.com/2/cura-ironing-3d-printing-ironing/>
- [11] „Para qué sirve el Skirt, el Brim y el Raft?“, Filament2Print. Zugegriffen: 30. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://filament2print.com/de/blog/filament2print.com/de/blog/skirt-brim-raft>
- [12] „Thermoplast“. Zugegriffen: 20. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/86-thermoplaste>
- [13] „Luvocom® 3F PAHT CF 9891 BK Filament“, 3D4Makers.com | 3D Printing Filament. Zugegriffen: 27. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3d4makers.com/de-de/products/luvocom-3f-paht-cf-9891-bk-filament>
- [14] „Luvocom® 3F PPS CF 9938 BK Filament“, 3D4Makers.com | 3D Printing Filament. Zugegriffen: 30. März 2025. [Online]. Verfügbar unter:

- <https://www.3d4makers.com/de-de/products/luvocom-3f-pps-cf-9938-bk-filament>
- [15] T. Deák, T. Czigány, M. Maršáľková, und J. Militký, „Manufacturing and testing of long basalt fiber reinforced thermoplastic matrix composites“, *Polym. Eng. Sci.*, Bd. 50, Nr. 12, S. 2448–2456, 2010, doi: 10.1002/pen.21765.
- [16] E. M. Silverman, „Effect of glass fiber length on the creep and impact resistance of reinforced thermoplastics“, *Polym. Compos.*, Bd. 8, Nr. 1, S. 8–15, 1987, doi: 10.1002/pc.750080103.
- [17] T. Flemming, G. Kress, und M. Flemming, „A new aligned short-carbon-fiber-reinforced thermoplastic prepreg“, *Adv. Compos. Mater.*, Bd. 5, Nr. 2, S. 151–159, Jan. 1996, doi: 10.1163/156855196X00068.
- [18] W. Michaeli, M. Wegener, und M. Begemann, *Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe*. München: Hanser, 1989. Zugriffen: 30. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <http://d-nb.info/891446206/04>
- [19] „Wärmeleitfähigkeit von Bauteilen flexibel gestalten mit CFK/GFK“. Zugriffen: 30. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.prk-ill.de/index.php?Waermeleitfaehigkeit-Carbon-Glasfaser#wuermeleitkoeffizient-berechnen>
- [20] C. Zhang, Y. Wang, Y. Liu, S. Qiao, und J. Zhang, „Thermal Shock Resistance of a Two-Dimensional Silicon Carbon Fiber Reinforced SiC Matrix Composite“, *Adv. Eng. Mater.*, Bd. 16, Nr. 1, S. 65–71, 2014, doi: 10.1002/adem.201300214.
- [21] P. Schwarzmann, *Thermoformen in der Praxis*, 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016.
- [22] *Nautos: DIN EN ISO 178*. Zugriffen: 15. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://nautos.de/V1F/search/item-detail/DE30080440>
- [23] „PC CF Carbon Black 1,75 mm / 1000 g“, 3DJake Deutschland. Zugriffen: 6. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3djake.de/spectrum/pc-cf-carbon-black>
- [24] C. H. Lee, F. N. B. M. Padzil, S. H. Lee, Z. M. A. Ainun, und L. C. Abdullah, „Potential for Natural Fiber Reinforcement in PLA Polymer Filaments for Fused Deposition Modeling (FDM) Additive Manufacturing: A Review“, *Polymers*, Bd. 13, Nr. 9, Art. Nr. 9, Jan. 2021, doi: 10.3390/polym13091407.
- [25] C. Frank, „Kunststoff als Werkzeugstoff für das Tiefziehen von Feinblechen“, Hannover, Hannover, 1999.
- [Online]. Verfügbar unter: https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00002456?q=dennis%20prigann

Anhang

Datenblatt 3D-Drucker



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK UND ANGEWANDTE MATERIALFORSCHUNG IFAM
INSTITUTSTEIL DRESDEN

3D-Drucker

German RepRap X500

Prinzip:

Schichtweise, additive Fertigung von dreidimensionalen Objekten auf Basis der Extrusion von thermoplastischen Filamenten.

Hersteller	German RepRap GmbH
Druckverfahren	Fused Filament Fabrication
Extrudertyp	Direct-Drive Dual-Extruder
Filamentdurchmesser	1,75 mm
Bauraumgröße (L x B x H)	500 x 400 x 475 mm
Schichtdicke	100 - 300 µm
Positioniergenauigkeit (X x Y x Z)	6 x 6 x 4 µm
Düsendurchmesser	0,25 - 0,8 mm
Düsentemperatur	max. 400 °C
Schnittstellen	USB 2.0
Temperatur Bauplattform	max. 120 °C
Temperatur Bauraum	max. 180 °C
Features	Filamentsensor (jam detection) Laser-Höhenmesssystem

Technisches Datenblatt PAHT CF

PRELIMINARY DATASHEET

LUVOCOM® 3F PAHT CF 9891 BK

LUVOCOM® 3F

Additive manufacturing solutions

High-temperature polyamide
with carbon fibers, black

Physical properties		Test method	Specimen	Units	Typical value
Specific gravity		ISO 1183-3		g/cm³	1,24
Water absorption	23°C / 24h	ISO 62	MPTS ISO 3167 A	%	<0,3
Melt flow rates (MFR)	250°C / 2,16kg	ISO 1133	pellet	g/10 min	3,4
Melt volume rate (MVR)	250°C / 2,16kg	ISO 1133	pellet	cm³/10 min	3,0
Linear mould shrinkage		DIN 16742	MPTS ISO 3167 A	%	0,3-0,5
Mechanical properties at 23°C / 50% rh					
Tensile strength	dry, @50 mm/min	ISO 527	MPTS ISO 3167 A	MPa	130
Elongation at maximum force	dry, @50 mm/min	ISO 527	MPTS ISO 3167 A	%	2
Modulus of elasticity	dry, @1 mm/min	ISO 527	MPTS ISO 3167 A	GPa	11,5
Charpy impact strength	dry	ISO 179 1eU	80x10x4mm	kJ/m²	35
Thermal properties					
Heat distortion temperature	HDT A	ISO 75	molded sample	°C	90
Continuous service temperature	20.000 h	IEC 60216	MPTS ISO 3167 A	°C	120
Service temperature	during lifetime max. 200h		MPTS ISO 3167 A	°C	160
Electrical properties					
Insulation resistance strip electrode	R25	DIN IEC 60167	MPTS ISO 3167 A	Ω	≤10²
Surface resistance	ROB	DIN IEC 60093	Ronde 60x4mm	Ω	<10²

Main features

Low influence from moisture and temperature to measures and electrical properties, compared with PA66

Technisches Datenblatt PPS CF

LUVOCOM® 3F PPS CF 9938 BK

LUVOCOM® 3F
 Additive manufacturing solutions

 Polyphenylensulfid, linear
 mit Kohlenstofffasern, schwarz

Erfüllt EN 45545

Allgemeine Eigenschaften		Prüfnorm	Prüfung an	Einheit	Typischer Wert
Dichte		ISO 1183-3		g/cm³	1,51
Wasseraufnahme	23°C / 24h	ISO 62	ISO 3167 A	%	<0,05
Verarbeitungsschwindigkeit (linear)		DIN 16742	ISO 3167 A	%	0,1-0,3
Mechanische Eigenschaften bei NK 23°C / 50% r.F.					
Zugfestigkeit	dry, @50 mm/min	ISO 527	ISO 3167 A	MPa	120
Dehnung @Fmax.	dry, @50 mm/min	ISO 527	ISO 3167 A	%	1,6
Zug-E-Modul	dry, @1 mm/min	ISO 527	ISO 3167 A	GPa	11
Biegefestigkeit	dry, @10 mm/min	ISO 178	ISO 3167 A	MPa	170
Biegedehnung @Fmax.	dry, @10 mm/min	ISO 178	ISO 3167 A	%	2,0
Biege-E-Modul	dry, @2 mm/min	ISO 178	ISO 3167 A	GPa	9
Schlagzähigkeit	dry	ISO 179 1eU	80x10x4mm	kJ/m²	22
Thermische Eigenschaften					
Dauergebrauchstemp.	20.000 h	IEC 60216	ISO 3167 A	°C	220
Gebrauchstemperatur	during lifetime max. 200h		ISO 3167 A	°C	240
Elektrische Eigenschaften					
Isolationswiderstand	strip electrode R25	DIN EN 62531-3-3	ISO 3167 A	Ω	≤10⁶
Oberflächenwiderstand	ROB	DIN EN 62531-3-2	Runde 60x4mm	Ω	<10⁶

Typische Funktionalität

Feste, steife Funktionsteile. Elektrisch leitfähig, geeignet zur dauerhaften Ableitung statisch generierter Elektrizität. Hohe Dauergebrauchstemperatur und Wärmeformbeständigkeit. Nicht entflammbar. Erfüllt EN 45545.

1/2

Unsere anwendungstechnische Beratung erfolgt nach bestem Wissen aufgrund unserer Untersuchungen und Erfahrungen; sie ist jedoch – auch im Hinblick auf etwaige Schutzrechte Dritter – unverbindlich, begründet insbesondere keine vertraglichen Pflichten unsererseits und befreit den Käufer nicht von der Prüfung unserer Ware auf ihre Eignung für seine Zwecke. Eine Beschaffenheits- oder Haltbarkeitsgarantie liegen in unseren Angaben nicht, es sei denn, sie sind ausdrücklich als solche bezeichnet.

2023071818266

Technisches Datenblatt ABS+



Devil Design Sp. J.
Zwirki i Wigury 56E
43-190 Mikolow
Poland

Product card: ABS+ filament for 3D printing.

Product description: Filament ABS+ - thermoplastic product in the form of fiber, used for 3D printing using the FFF method. Filament wound on a spool, vacuum packed with a moisture absorber. The spool contains 1 kg of net material. It can be used in all FFF printers that are not protected from external suppliers and open source structures before using. ABS+ is easily machined such as grinding, drilling or smoothing, the material is soluble in acetone.

Physical properties of the product:

Diameter of filament	1.75 mm
Dimensional tolerance of filament	+/- 0.05 mm
Roundness of filament	+/- 0.02 mm
Surface of the material	Gloss
Shrinkage of the material	Large
Product weight	1.0 kg net, 1.36 kg gross
Spool - material	Transparent polycarbonate
Weight of the empty spool	~250 g
The diameter of the spool	200 mm
Width of spool	~70 mm
Diameter of mounting hole	62 mm
Packaging	Printed cardboard
Package size	~206x206x80 mm
Vacuum packing	Yes
Moisture absorber	Yes



Suggested printing parameters:

Hotend	230-240°C
Heated bed	90-100°C
Cooling the printout	Not recommended

Due to the structural differences of printers, the above figures should be considered as guidelines and the corresponding values must be determined experimentally.