

Entwicklung und Validierung einer Methode zur Homogenisierung von Infill-Strukturen 3D-gedruckter Bauteile

Frieder Pfaff, HTW Berlin, Frieder.Pfaff@Student.HTW-Berlin.de, Eser Erdem, HTW Berlin, erdeme@HTW-Berlin.de, Georg F. Gruber HTW Berlin, gruber@htw-berlin.de

Zusammenfassung: Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften 3D-gedruckter Bauteile ist aufgrund der komplexen Infill-Geometrien der Bauteile eine Herausforderung für die FEM-Simulation. Eine Vernetzung der feinen Infill-Strukturen führt schon bei kleinen Bauteilen zu einer kaum handhabbaren Elementanzahl. Diese Arbeit untersucht eine Methode zur Homogenisierung dieser Strukturen, um die Infill-Geometrien als homogenes Material zu modellieren. Die experimentelle Validierung zeigt für die Belastung in der Schichtebene eine präzise Simulation der homogenisierten Geometrien. Für Belastungen normal zur Schichtebene sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich.

Stichworte: Fused Deposition Modeling, Fused Layer Modelling, Finite-Elemente-Methode, Repräsentatives Volumenelement, Homogenisierung

1 Einleitung

Das Fused Layer Modeling (FLM) ist eines der wichtigsten Verfahren der additiven Fertigung. Bei diesem wird ein thermoplastisches Material in Form von Filament durch eine Düse aufgeschmolzen, extrudiert und das Bauteil schichtweise aufgebaut.

Aus Gründen der Material-, Gewicht- und Zeiteffizienz werden Bauteile im FLM-Prozess üblicherweise nicht massiv gefertigt. Im Inneren kommen sogenannte Infill-Strukturen zum Einsatz, die die Außenflächen stützen sollen. Diese Strukturen bestehen aus unterschiedlichen geometrischen Mustern, wie beispielsweise rechteckige Gitter oder Bienenwaben. Durch die Fertigung von nicht-massiven Bauteilen sind die genauen mechanischen Eigenschaften des Bauteils unbekannt und eine FEM-Simulation ist auf herkömmlichem Weg nicht möglich, da die Komplexität der Infill-Geometrien bzw. die resultierende Elementanzahl die Rechenkapazität konventioneller Hardware übersteigt.

Daher wird eine Methode zur Homogenisierung der Infill-Strukturen untersucht. Dafür werden aus den periodischen Mustern der Infill-Strukturen repräsentative Volumenelemente (RVEs) isoliert und von diesen die Elastizitätskenngrößen durch FEM-Analyse bestimmt. Das RVE stellt eine wiederkehrende Einheit dar, die für die makroskopischen Eigenschaften des gesamten Musters repräsentativ ist. Beim Bienenwabenmuster ist ein RVE beispielsweise eine einzelne Wabe. Durch die FEM-Analyse lassen sich anschließend die Elastizitätskenngrößen des RVEs auf ein homogenes Material übertragen, mit dem die Simulation mit stark reduzierter Elementanzahl (vgl. Abbildung 1) durchgeführt werden kann. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden lediglich Steifigkeiten im linearen Belastungsbereich untersucht, im Fokus stehen also ausschließlich lineare Elastizitätsparameter. Die Richtungsabhängigkeit des Infills kann gut mit einem orthotropen

Materialmodell abgebildet werden [1], dessen neun Elastizitätskenngrößen (drei E-Modul, drei Schubmodule und drei Querkontraktionszahlen) mithilfe der RVEs zu bestimmen sind.

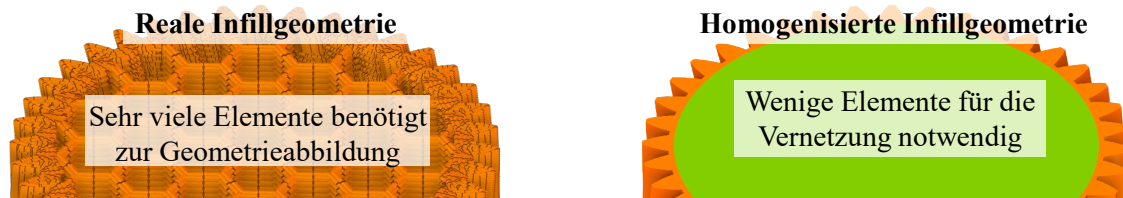


Abbildung 1: Reale vs. Homogenisierte Infillgeometrie (ohne Netzdarstellung)

2 Bestimmung der orthotropen Kenngrößen

2.1 Stand der Technik

In [2] wird eine Methode erläutert, bei der das Infill von 3D-Druckteilen über homogene orthotrope Materialmodelle abgebildet wird. Die Erstellung der Geometriemodelle der RVEs erfolgt durch manuelles Nachmodellieren gedruckter Strukturen, deren Infills mikroskopisch erfasst wurden. Dieser aufwendige manuelle Schritt, wird in der vorliegenden Arbeit durch eine automatisierte Geometrie-Extraktion aus dem G-Code umgesetzt.

2.2 Ausgewählte Infill-Geometrien

Zur Untersuchung der Homogenisierung werden vier verschiedene Infill-Geometrien untersucht. Diese sind in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Ausgewählte Infill-Geometrien für die Analyse der RVE

Füllmuster	Fülldichte [%]	Füllwinkel [°]
Geradlinig (Infill A)	30	45
Geradlinig	30	0
Bienenwaben	30	45
Gyroid	30	45

2.3 Abbildung von G-Code in CAD

Grundlage für die Erstellung von RVE Modellen unterschiedlicher Infill-Geometrien sind jeweils CAD-Geometrien der Infillvarianten. Die eigentliche Infill-Erstellung erfolgt jedoch nicht in CAD-Systemen, sondern in der Slicersoftware des 3D-Druckers. Dazu wird im vorliegenden Beitrag die kommerzielle, frei erhältliche Slicersoftware PrusaSlicer 2.9.2 verwendet. Die verwendete Slicersoftware, sowie auch andere gängige Slicer, verfügt nicht über die Möglichkeit die erstellten Infill-Strukturen als CAD-Austauschformate (wie IGS oder STEP) auszugeben. Die einzige gängige Schnittstelle zu CAD-Systemen sind Facetten-Formate wie STL oder OBJ. STL/OBJ sind für die FEM-Vernetzung

untauglich, weil sie nur facettierte Oberflächen ohne echte Geometrie- und Topologieinformation enthalten. Der Vernetzer orientiert sich dabei an den Facetten bzw. Import-Artefakten was i.d.R. zu ungenügender Netzqualität führt. Zudem scheitert die Volumenvernetzung oft, da die Geometrie topologische Lücken aufweist. Aus diesem Grund wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht dem vom Slicer erzeugten G-Code in ein gängiges CAD-Format wie STEP oder IGS zu überführen. Ähnliche Converter wurden auch in [2] und [4] entwickelt, sind aber nicht frei zugänglich.

Ausgangspunkt für die Erstellung der Infill-Geometrie im Slicer ist ein Quader mit den Maßen 15 mm x 15 mm x 10 mm. Um die Geometrie für den Export vorzubereiten, müssen einige Einstellungen in der Slicersoftware vorgenommen werden:

- Entfernen der Konturhüllen: Somit besteht die exportierte Geometrie ausschließlich aus der Infill-Struktur
- Deaktivieren der Bogenanpassung: Für die weitere Verarbeitung des G-Codes darf dieser ausschließlich aus geraden Bahnen bestehen.
- Entfernen des Start G-Codes und des Ende G-Codes
- Deaktivieren von binärem G-Code: Damit der G-Code lesbar bleibt, muss die Verwendung von binärem G-Code deaktiviert werden.

Mit einem selbst entwickelten Python-Skript werden die Bewegungsbefehle des G-Codes in Punktpaare umgewandelt und die Koordinaten der Punkte als Bahnlinien in einer TXT-Datei gespeichert. Die Syntax der TXT-Datei [5] erlaubt einen unmittelbaren Import der Kurvenzüge in Ansys SpaceClaim, das CAD-Modul von Ansys. Daraufhin erfolgt eine Volumenerzeugung durch Extrusion eines kreisförmigen Querschnitts entlang dieser Bahnlinien. Bei der gewählten Schichthöhe hat sich ein Radius von 0,27 mm als zweckmäßig erwiesen. Da der Radius die Schichthöhe überschreitet verschmelzen die Volumina, ohne dass Lücken zwischen den Strängen entstehen. Da im Folgenden Simulationen in Ansys durchgeführt werden, ist kein expliziter Export des CAD-Modells aus SpaceClaim notwendig.

2.4 RVE-Homogenisierung

Zur Homogenisierung der Infill-Strukturen wird die Methode der repräsentativen Volumelemente angewendet. Dafür wird aus dem Infill-Muster ein Volumen gewählt, welches durch eine periodische Aneinanderreihung die vollständige Struktur ergibt. Dieses Volumen stellt ein RVE dar, welches repräsentativ für die gesamte Struktur ist [2].

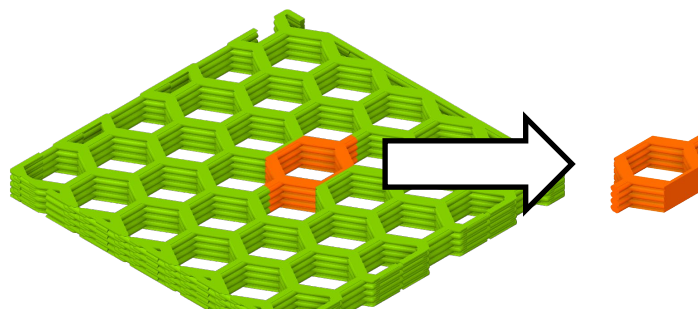


Abbildung 2: Isolieren eines RVE

In Abbildung 2 ist das Isolieren eines RVE dargestellt. Dabei wird aus dem Muster ein solches RVE isoliert und anschließend mittels FEM dessen orthotropen Elastizitätskennwerte bestimmt. Das Infill kann somit als homogene Struktur abgebildet werden (vgl. Abbildung 1 rechts), der ein orthotropes Materialmodell mit den ermittelten Elastizitätskenngrößen zugewiesen wird.

2.5 FEM-Analyse

Um die neun Materialkonstanten zu bestimmen, sind drei Zugversuche und drei Schubversuche (pure shear [6]) notwendig. Den Geometrien wird hierfür ein Werkstoff mit der Steifigkeit des verwendeten Polylactide (PLA) zugewiesen. Diese beträgt entlang der Schichten $E_{x,y} = 2784$ MPa und normal zu den Schichten $E_z = 2462$ MPa und wurde den experimentellen Zugversuchen von Prüfkörpern aus massivem Material entnommen. Die Querkontraktionszahl wird mit $\nu = 0,33$ definiert [7]. In Abbildung 3 ist exemplarisch das FE-Modell für den Zugversuch in x-Richtung mit der resultierenden Deformation dargestellt.

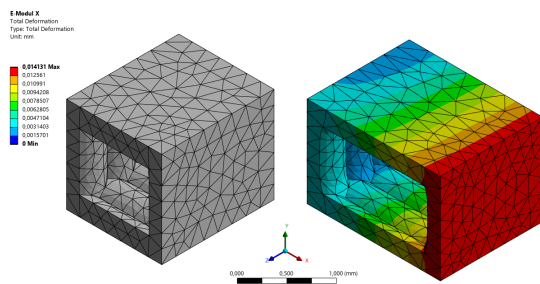


Abbildung 3: Verformung des RVEs bei Zug in x-Richtung

Alle sechs Simulationen an den RVEs werden verschiebungsgesteuert (durch Verschiebung Δl_i) ausgeführt. Die eigentlichen Verschiebungswerte können beliebig gewählt werden, da rein lineare Simulationen durchgeführt werden. Die Bestimmung der Elastizitätskenngrößen ist beispielhaft für E_z , ν_{zx} , ν_{zy} und G_{xy} in Abbildung 4 erläutert.

Zur Validierung wurden die orthotropen Elastizitätskenngrößen für ein voll gefülltes RVE in Form einer Würfelgeometrie ermittelt. Daraus ergaben sich erwartungsgemäß die korrespondierenden Elastizitätskenngrößen des zugrunde gelegten isotropen Eingangsmaterialmodells. Das beschriebene Vorgehen liefert für jedes aus Tabelle 1 untersuchte Infill einen Satz von neun orthotropen Elastizitätskenngrößen. Die für die Infillvarianten aus Tabelle 1 ermittelten orthotropen Elastizitätskenngrößen sind im Anhang in Tabelle A1 zu finden.

Zur Darstellung der Genauigkeit der beschriebenen Homogenisierungsmethode werden die Ergebnisse mit einer vereinfachten, isotropen Homogenisierungsmethode verglichen. Bei dieser wird die Steifigkeit der Infill-Muster proportional zur Füllichte angenommen und in einem isotropen Materialmodell abgebildet. Bei einer Füllichte von 30 % ergibt sich die Steifigkeit der Infill-Muster durch eine einfache Rechnung: Die Steifigkeit des Vollmaterials, bestimmt durch die Zugversuche, wird mit dem Faktor 0,3 multipliziert. Man erhält Werte von $E_{30\%;x,y} = 1641,54$ MPa für Zugbelastung entlang der Schichten und $E_{30\%;z} = 1451,82$ MPa für Zugbelastung normal zu den Schichten.

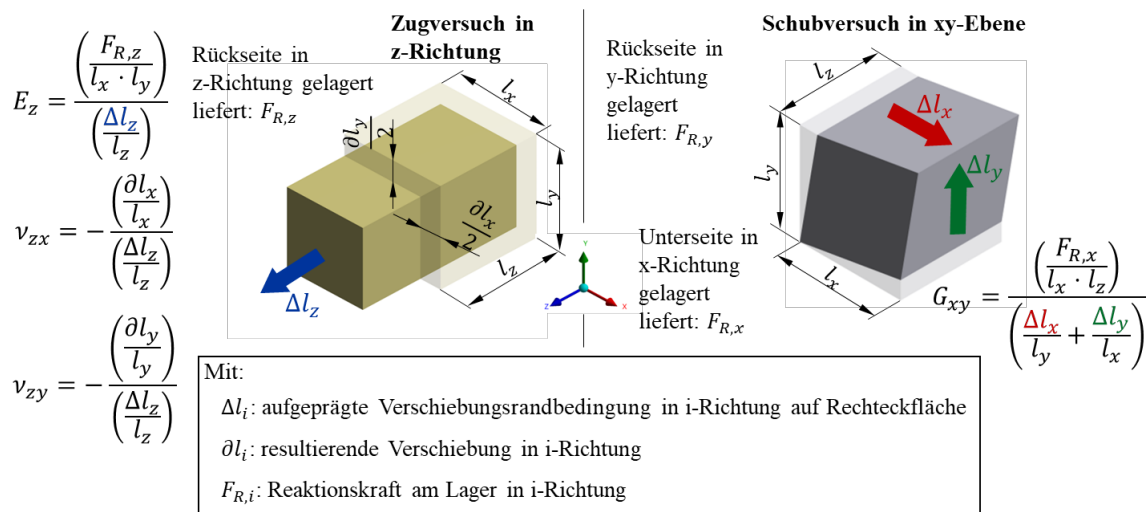


Abbildung 4: Bestimmung elastischer Größen im RVE-Zug-/Schubversuch

3 Steifigkeitsbestimmung im Experiment

Zur Bestimmung des E-Moduls für das Eingangsmaterialmodell der RVE-Simulationen, sowie zur abschließenden Validierung der Homogenisierungsergebnisse, werden Zugversuche durchgeführt.

3.1 Probekörpergeometrie und Herstellung

Als Probekörper wird der Probekörpertyp 1A aus ISO 527-2 [8] verwendet. Es wird eine Anpassung der Dicke von 4 mm auf 6 mm vorgenommen, um eine bessere Abbildung ganzer Infill-Strukturen zu erhalten bzw. den Infillanteil zu erhöhen. Als Material kommt PLA von Prusa Research zum Einsatz. Die Druckparameter sind in Tabelle 2 dargestellt. Alle nicht genannten Einstellungen werden auf den Standardeinstellungen der Software PrusaSlicer 2.9.2 belassen.

Für die Fertigung der Probekörper, die in den experimentellen Versuchen zum Einsatz kommen, wird ein Prusa Mini+ FLM-Drucker von Prusa Research verwendet. Die Fertigung der Probekörper erfolgt in zwei Orientierungen, um die Zugbelastung sowohl entlang als auch normal zur Schichtebene zu untersuchen.

Tabelle 2: Druckparameter der Probekörper

Parameter	Wert
Schichthöhe	0,2 mm
Düsendurchmesser	0,4 mm
Infill-Dichte	30 %
Anzahl vertikale Konturhüllen	2
Anzahl horizontale Konturhüllen	4

3.2 Zugversuch

Für die Durchführung der Zugversuche kommt eine Prüfmaschine von Zwick/Roell Typ BZ1-MM14740.ZW02 zum Einsatz. Die Kraftmessung erfolgt über eine integrierte Kraftmessdose, während die Dehnung durch ein Video-Extensometer erfasst wird.

Für jede Testreihe werden fünf Wiederholungsmessungen durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt. Die Parameter der Prüfung sind nach ISO 527 gewählt [8]. Um ein Rutschen zu verhindern, wird zwischen die Klemmen und den Probekörpern Schleifpapier befestigt. Die vom Extensometer erfasste Messlänge der Probekörper beträgt 75 mm. Die Vorkraft wird auf 1 N und die Prüfgeschwindigkeit für die Messungen des E-Moduls auf 1 mm/min festgelegt.

Für den virtuellen Zugversuch ist eine Aufteilung des CAD-Modells in Außenschale und Infillbereich vorzunehmen. Der Infillanteil wird hierbei als Vollmaterial modelliert (vgl. Abbildung 5) und die entsprechenden orthotropen Materialparameter zugewiesen (siehe Abschnitt 2 bzw. Tabelle A1).

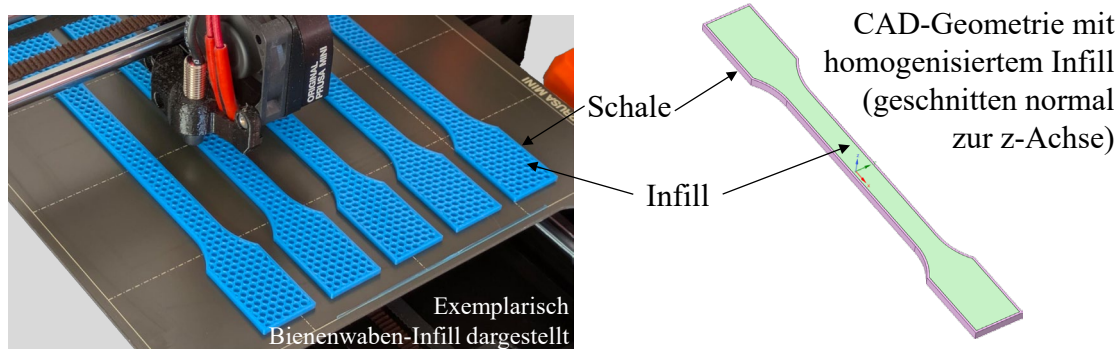


Abbildung 5: Geometriaufbereitung des Zugstabs

4 Ergebnisse

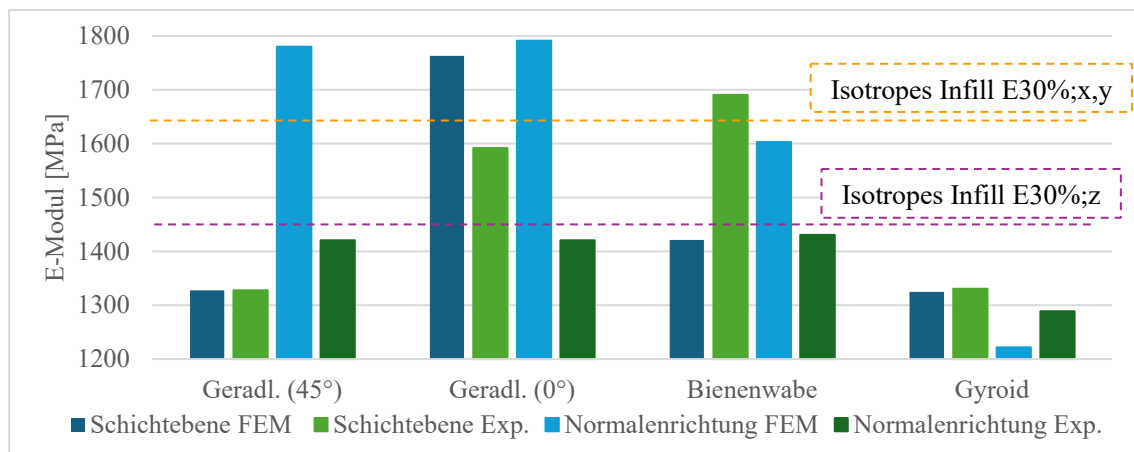


Abbildung 6: Im realen und virtuellen Zugversuch ermittelte E-Modul-Werte

Abbildung 6 und Tabelle A2 zeigen die E-Moduln, die im virtuellen (FEM) bzw. realen Zugversuche bestimmt wurden. Die Ergebnisse der realen Zugversuche ergeben sich aus

dem Durchschnitt von fünf Messwiederholungen. Über die gestrichelten Linien wird zusätzlich das Ergebnis der vereinfachten, isotropen Homogenisierungsmethode (vgl. Kapitel 2.5) dargestellt. Abgesehen von der Materialdefinition des Infills sind die Simulationsmodelle mit isotroper (gestrichelte Linie in Abbildung 6) und orthotroper Homogenisierung (hell- und dunkelblaue Balken in Abbildung 6) identisch.

5 Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen für Zugbelastung in Schichtrichtung eine insgesamt hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment, was die Validität der Homogenisierungsmethode hierfür bestätigt.

Bei Zugbelastung normal zu den Schichten treten jedoch signifikante Abweichungen auf. Es ist anzunehmen, dass in dieser Belastungsrichtung nicht das Infill-Muster, sondern die Kontaktfläche zwischen den Schichten bzw. deren Verschmelzungsqualität die Steifigkeit limitieren. Dass die vereinfachte Homogenisierung (isotropes Infill mit Skalierungsfaktor 0,3) in diesem Fall für die Geradlinig- und Bienenwaben-Muster präzisere Ergebnisse liefert, stützt diese These, da die Kontaktfläche hier proportional zur Füllichte etwa 30 % des Vollmaterials beträgt und der E-Modul anhand des Wertes aus dem Versuch in Normalenrichtung berechnet wurde. Beim in der Praxis dominierenden Gyroid-Muster hingegen führt der leichte Versatz der Extrusionsstränge zu einer verringerten Kontaktfläche, was die größere Abweichung der vereinfachten, isotropen Homogenisierung erklärt. Für das Gyroidmuster führt der Homogenisierungsansatz mittels RVE zu den besten Ergebnissen.

Vom praktischen Einsatz der vereinfachten, isotropen Homogenisierung wird abgeraten, da im Vorfeld stets entschieden werden müsste, ob die E-Modul-Skalierung anhand des Zugversuchs in Schicht- oder Normalenrichtung ($E_{30\%;x,y}$ oder $E_{30\%;z}$) erfolgen soll. Beim Homogenisierungsansatz mittels RVE entfallen jegliche Fallunterscheidungen, da das zugewiesene Materialmodell richtungsabhängig (orthotrop) ist.

In anschließenden Untersuchungen sollte die Abbildung der Geometrie durch eine Verbesserung der Darstellung der Stränge erfolgen. Es gibt bereits Untersuchungen, die eine Methode beschreiben, bei der andere Querschnitte der Stränge abgebildet werden können [2]. Hiermit lässt sich potenziell auch die Genauigkeit für Zugbelastung normal zu den Schichten verbessern.

Es besteht außerdem Optimierungspotential bei der Betrachtung der Randbereiche. Die angewandte Homogenisierungsmethode basiert ausschließlich auf RVEs aus dem Inneren der Struktur und ignoriert die Interaktion zwischen den Konturhüllen und dem Infill. Auch Ankerstrukturen, wie sie beispielsweise beim Bienenwaben-Muster vorkommen, werden nicht abgebildet.

Abschließend kann die Untersuchung von der bisher reinen linear-elastischen Steifigkeitsbetrachtung auf nichtlineare Steifigkeiten und auf Festigkeiten ausgeweitet werden.

Literatur

- [1] J. Bonada, M. M. Pastor, und I. Buj-Corral, „Influence of Infill Pattern on the Elastic Mechanical Properties of Fused Filament Fabrication (FFF) Parts through Experimental Tests and Numerical Analyses“, *Materials*, Bd. 14, Nr. 18, S. 5459, Sep. 2021, doi: 10.3390/ma14185459.
- [2] P. Ferretti, G. M. Santi, C. Leon-Cardenas, E. Fusari, G. Donnici, und L. Frizziero, „Representative Volume Element (RVE) Analysis for Mechanical Characterization of Fused Deposition Modeled Components“, *Polymers*, Bd. 13, Nr. 20, S. 3555, Okt. 2021, doi: 10.3390/polym13203555.
- [3] A. Bacciaglia, F. Falcetelli, E. Troiani, R. Di Sante, A. Liverani, und A. Ceruti, „Geometry reconstruction for additive manufacturing: From G-CODE to 3D CAD model“, *Materials Today: Proceedings*, Bd. 75, S. 16–22, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.496.
- [4] S. Rupal, K. G. Mostafa, Y. Wang und A. J. Qureshi, “A Reverse CAD Approach for Estimating Geometric and Mechanical Behavior of FDM Printed Parts”, *Procedia Manufacturing*, Bd. 34, S. 535–544, 2019. Zugriff am: 07. Oktober 2024, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.217
- [5] https://help.spaceclaim.com/2017.0.0/en/Content/Importing_and_exporting.htm
- [6] C. Thiel, J. Voss, R. J. Martin, P. Neff, “Shear, pure and simple”, *Int. J. of Nonlinear Mechanics*, Bd. 112, S- 57-75, 2019, doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2018.10.002
- [7] R. T. L. Ferreira, I. C. Amatte, T. A. Dutra, und D. Bürger, „Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers“, *Composites Part B: Engineering*, Bd. 124, S. 88–100, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.05.013.
- [8] DIN, *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen*, DIN EN ISO 527-2, Juni 2012.

Anhang

Tabelle A1: Orthotrope Parameter für untersuchte Infills

Parameter	Geradl. (45°)	Geradl. (0°)	Bienenwaben	Gyroid
E_x [MPa]	383	1103	565	412
E_y [MPa]	383	1103	565	396
E_z [MPa]	1354	1371	1064	448
G_{xy} [MPa]	473	103	205	141
G_{yz} [MPa]	349	398	283	179
G_{xz} [MPa]	349	398	283	194
ν_{xy} [-]	0,7	0,13	0,46	0,24
ν_{yz} [-]	0,08	0,23	0,14	0,26
ν_{xz} [-]	0,08	0,23	0,14	0,30

Tabelle A2: E-Module der Probekörper (mit Standardabweichung)

	E-Modul [MPa]			
	Schichtebene		Normalenrichtung	
	FEM	Exp. (σ)	FEM	Exp. (σ)
Geradl. (45°)	1328,2	1328 (29,7)	1780,2	1421 (111,57)
Geradl. (0°)	1762,9	1592 (35,36)	1791,3	1421 (111,57)
Bienenwaben	1421,4	1691 (74,13)	1602,9	1431 (57,92)
Gyroid	1325	1331 (35,68)	1222,2	1289 (55,16)