

Modellbildung anisotroper Werkstoffe in der FEM am Beispiel von Polyamid

Gabriel Fischer, Sliman Shaikheleid, Thomas Schiepp

Fakultät Mechanical and Medical Engineering, Hochschule Furtwangen University, 2021

Abstract— Die additive Fertigung von Bauteilen aus Kunststoff bietet einige Vorteile gegenüber der klassischen Fertigung durch Spritzguss. Da das Herstellungsverfahren jedoch einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Bauteiles hat, wird in dieser Untersuchung das anisotrope Verhalten von Polyamid, das durch FDM verarbeitet wird, analysiert und dem Spritzguss gegenübergestellt. Des Weiteren wird auf der Grundlage der Ermittlung von Materialkennwerten im Zugversuch ein FEM-Modell aufgebaut. Dadurch wird eine Möglichkeit zur Vorhersage der Verformungen von anisotropen, additiv gefertigten Bauteilen geschaffen.

Schlüsselworte—Anisotropie, Zugversuch, Polyamid, FDM, FEM, Schnapphaken

I. EINLEITUNG

Durch die hohe Flexibilität und der Freiheiten in der Formgebung sind additiv gefertigte Bauteile sehr verbreitet in der Herstellung von Prototypen. Schon mit einfachen und kostengünstigen Anlagen, insbesondere mit dem Verfahren des *Fused Deposition Modeling* (FDM), können technische Kunststoffe zu Funktionsbauteilen verarbeitet werden. Deshalb ist eine Substitution des Spritzgussverfahrens, das teure Werkzeuge und Anlagen benötigt, insbesondere bei kleinen Stückzahlen erstrebenswert.

Beim *Fused Deposition Modeling* werden zunächst die als 3D-CAD-Daten vorliegenden Bauteile in einem sogenannten *Slicer* in Schichten geschnitten, die später schrittweise aufgebaut werden. Hier können ebenfalls die Maschinenparameter wie Temperatur und Geschwindigkeit eingestellt werden. Der Kunststoff, in Form von Filamentsträngen, wird im Extruder aufgeschmolzen und durch eine Düse entlang den vom *Slicer*-Programm vorgegebenen Bahnen in der X-Y-Ebene extrudiert. Ist die Ebene abgeschlossen, wird die Düse um die Schichtdicke in Z-Richtung angehoben, um die nächste Schicht herzustellen.

Dabei sind jedoch die besonderen Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile im Hinblick auf die einwirkende Belastung und die Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) der Materialkennwerte zu beachten. Auch eine konstruktionsbegleitende Festigkeitsberechnung durch die Finite Elemente Methode (FEM), die heutzutage einen Standard in der Auslegung von Strukturbauteilen darstellt, ist ohne ein entsprechendes Materialmodell nicht möglich.

Es sind bereits verschiedene Ansätze bekannt, um Materialkennwerte von additiv gefertigten Bauteilen für ein FEM-Modell zu erfassen. In [1] werden zum Beispiel die einzelnen Materialstränge modelliert und als Verbund simuliert. Dies führt jedoch zu langen Rechenzeiten und einer

aufwändigen Modellvorbereitung. Ein Ansatz, der das Verhältnis aus Materialsträngen und den dazwischen liegenden Hohlräumen (*Voids*) im Querschnitt zur Berechnung von Materialkennwerten nutzt, ist in [2] dargestellt. Dabei kann jedoch nicht die Haftkraft zwischen den Strängen ermittelt werden. In dieser Arbeit wird ein Ansatz dargestellt, der auf Basis des einfachen Zugversuches ein Materialmodell zur FEM-Simulation von additiv gefertigten, anisotropen Polyamid-Bauteilen mit geringen Rechenzeiten und einfacher Anwendung erzeugt.

II. MATERIALIEN AND METHODEN

A. Messmethoden und Verfahren

Die Versuchsreihen der vorliegenden Untersuchung stellen Zug- und Biegeversuche dar, die an einer Universalprüfmaschine der Firma *ZwickRoell* durchgeführt wurden. Diese Prüfmaschine besitzt eine Kraftmessdose mit einer maximalen Belastungskraft von 20 kN und kann sowohl Druck- als auch Zugkräfte aufbringen und erfassen. Zur Bestimmung der mechanischen Materialkennwerte wurde der Zugversuch für Kunststoffe nach der Norm DIN EN ISO 527-2 gewählt, welche die Form der verwendeten Flachproben vorgibt. Gewählt wurde der in DIN EN ISO 527-2 beschriebene Probekörper vom Typ 1A. Sowohl die spritzgegossenen als auch die durch FDM hergestellten Proben wurden in dieser Form ausgeführt (*Abbildung 1*).



Abbildung 1: Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2, hergestellt durch FDM

Zur Herstellung der additiv gefertigten Proben kommt der FDM-3D-Drucker *Ultimaker S5* der Firma *Ultimaker* zum Einsatz. Beim eingesetzten Material handelt es sich um den technisch verwendbaren, thermoplastischen Kunststoff Polyamid auf der Basis von PA6 und PA66 mit dem Markennamen *Ultimaker Nylon* in der Farbe schwarz, welches ebenfalls von der Firma *Ultimaker* vertrieben wird.

Aufgrund der Verfügbarkeit wurde für die spritzgegossenen Proben Polyamid auf der Basis von PA6 der Firma BASF gewählt, das unter dem Namen *Ultramid B3S* vertrieben wird. Die typischen Materialkennwerte sind in *Tabelle 1* dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Materialzusammensetzung und -herkunft kann somit ausschließlich ein qualitativer, aber kein quantitativer Vergleich der Versuchsergebnisse erfolgen.

Tabelle 1: Typische Materialkennwerte des Polyamid-Werkstoffes Ultramid B3S der Firma BASF nach [3]

Eigenschaft	trocken	konditioniert/ luftfeucht
Dichte	1130 kg/m ³	-
E-Modul	3500 MPa	1200 MPa
Streckspannung	90 MPa	45 MPa
Streckdehnung	4%	20%
Nominelle Bruchdehnung	10%	> 50 %
Querkontraktionszahl	0,35 - 0,40	0,35 - 0,40

Es werden bei der zerstörenden Zugprobe fünf Proben je Ausprägung getestet und der Mittelwert sowie die Standardabweichung der Ergebnisse statistisch bestimmt. Bei der nicht zerstörenden Prüfung im zweiten Teil der Untersuchung werden mehrere Versuchsdurchgänge an nur einem Teil durchgeführt.

B. Probenherstellung

Bei der Herstellung der Proben ist die Strategie des Aufbringens der additiven Schichten entscheidend für die folgende Erfassung und Untersuchung der richtungsabhängigen Materialeigenschaften. Aufgrund der Vergleichsuntersuchung mit spritzgegossenen Proben, werden die Proben mit einer Füllung von 100 % hergestellt. Da bei einem FDM-Verfahren Materialstränge in geschmolzenem Zustand schichtweise aufgetragen und miteinander verschmolzen werden, entsteht bei gleicher Ausrichtung aller Schichten die in *Abbildung 2* dargestellte Materialorientierung. Für die Analyse werden die drei Hauptrichtungen den Hauptachsen X, Y und Z eines kartesischen Koordinatensystems zugewiesen.

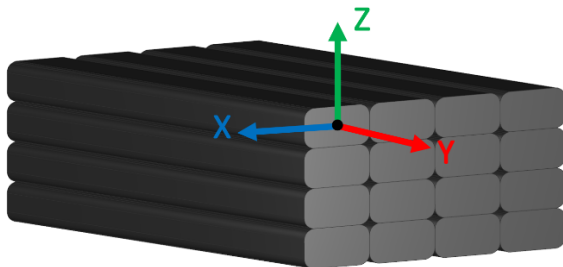


Abbildung 2: Definition des Materialkoordinatensystems

Da eine Symmetrie in drei Ebenen vorliegt, wird von einer orthotropen Anisotropie ausgegangen. Bei dieser Anisotropie kann das elastische Materialverhalten durch die Kennwerte von Elastizitätsmodul, Querkontraktionsmodul und Schubmodul der drei Hauptrichtungen beschrieben werden. Wirkt eine Belastung nicht parallel zu einer der Hauptrichtungen, kann das Materialverhalten durch die vektorielle Zerlegung auf die Hauptrichtungen beschrieben werden. [4]

Um die orthotropen Materialkennwerte im Zugversuch ermitteln zu können, werden die Zugproben, wie in *Abbildung 3* dargestellt, hergestellt. Zwei Stränge bilden die Wandung des Bauteiles (in rot und grün) und folgen der Außenkontur in der X-Y-Ebene. Die restlichen Materialanteile sind vollständig in der jeweiligen Richtung orientiert.

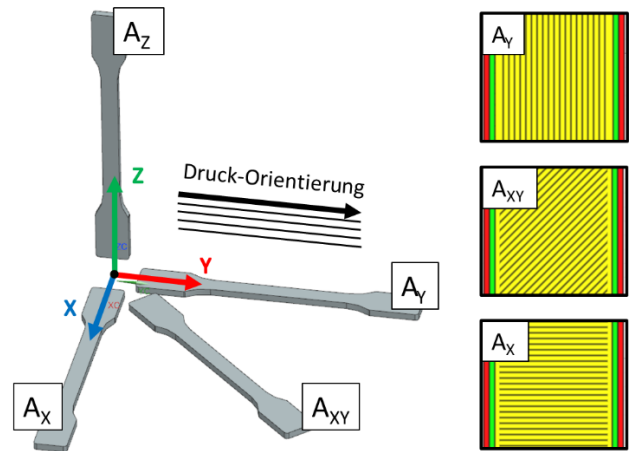


Abbildung 3: Druck-Orientierung der Zugproben

Es werden eine Schichtdicke von 0,2 mm und die Maschinenparameter, wie Extruder- und Druckbett-Temperatur sowie Geschwindigkeiten, für alle Proben als konstante Parameter eingestellt.

III. ERGEBNISSE

A. Betrachtung der Materialkennwerte

In *Abbildung 4* sind die aufgenommenen Spannungs-Dehnungs-Diagramme bis zu einer Dehnung von 30 mm dargestellt. Die Orientierungen in X- und Y-Richtung zeigen ein ähnliches Verhalten, bei dem es nach dem Streckpunkt bei ca. 4 % Dehnung zu einer Einschnürung und stationär plastischem Fließen kommt. Die Bruchdehnung liegt zwischen 30 und 200 % und weist somit eine große Streuung auf. Die Spritzguss-Proben zeigen bis zu einer Dehnung von ca. 3 % ein ähnliches Verhalten, der Streckpunkt wird jedoch erst bei einer Dehnung von 14 % erreicht. Die Bruchdehnung liegt zwischen 80 und 240 %. Die Ausrichtung in Z-Richtung weist im Gegensatz zu den anderen, sehr duktilen Proben, eine geringe Belastbarkeit und sprödes Materialverhalten auf. Bereits bei einer Dehnung von 0,5 bis 1,3 % kommt es zum Bruch und es wird kein Streckpunkt erreicht.

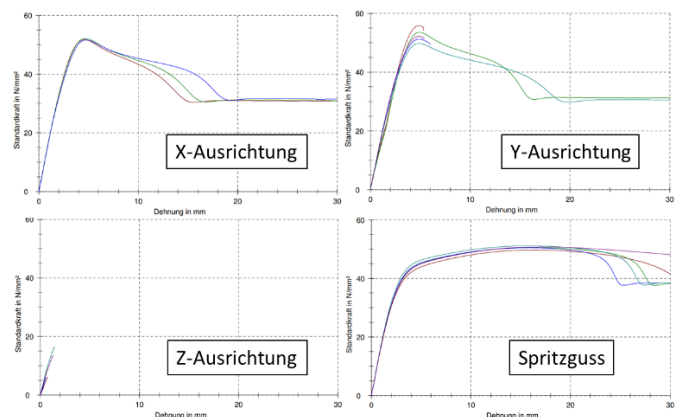


Abbildung 4: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Zugproben im Bereich von 0 bis 30 mm Dehnung

Das E-Modul wurde graphisch aus der Sekantensteigung zwischen einer Dehnung von 0,05 und 0,25 % der auf-

genommenen Kurvenverläufe ermittelt. In *Abbildung 5* sind der Mittelwert und die Standardabweichung des E-Moduls in den verschiedenen Materialorientierungen dargestellt.

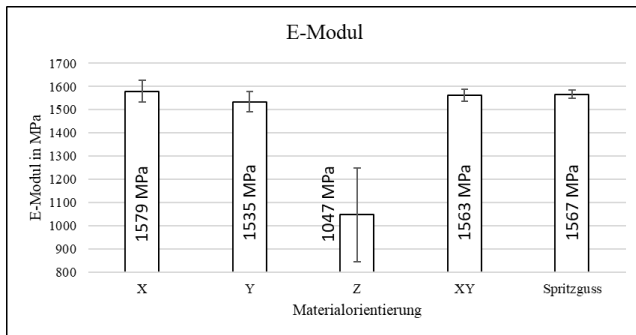


Abbildung 5: Mittelwert mit Standardabweichung des E-Moduls in den verschiedenen Materialorientierungen

Die Orientierungen in X-, Y-, und XY-Richtung sowie die isotrope Spritzgussprobe weisen ein ähnliches E-Modul auf. Der Wert in XY liegt dabei zwischen denen von X und Y, was für das orthotrope Verhalten und die Zusammensetzung aus den E-Modulen der Hauptrichtungen spricht. Das erfasste E-Modul des Spritzguss-Materials liegt über dem vom Hersteller im konditionierten Zustand angegebenen Wert von 1200 MPa. Jedoch ist der Feuchtigkeitsgehalt zum Zeitpunkt des Versuches nicht bekannt. Da der erfasste Wert zwischen den in *Tabelle 1* für den trockenen und luftfeuchten Zustand angegebenen Werten liegt, kann von einem geringeren Feuchtigkeitsgehalt der getesteten Proben ausgegangen werden. Die Probe in Z-Orientierung weist ein wesentlich geringeres E-Modul auf. Ebenfalls ist hier die Streuung der aufgenommenen Werte groß.

In *Abbildung 6* sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Streckspannung in den verschiedenen Materialorientierungen dargestellt. Dabei zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie beim E-Modul. Insbesondere die geringe Belastbarkeit in Z-Ausrichtung ist zu beachten. Sowohl beim E-Modul als auch bei der Streckspannung ist die Streuung der Werte bei den additiv gefertigten, anisotropen Proben höher als die der spritzgegossenen, isotropen Proben. Die Ursache hierfür wird in Abschnitt IV diskutiert.

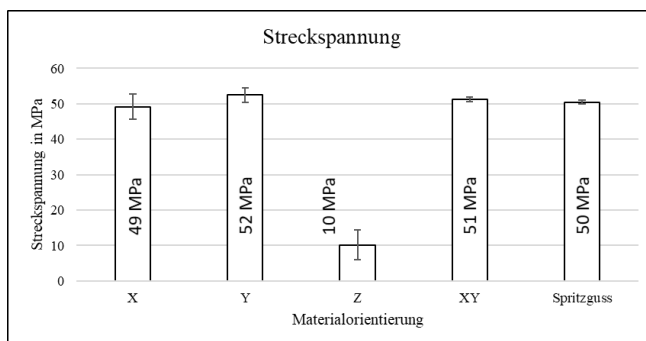


Abbildung 6: Mittelwert mit Standardabweichung der Streckspannung in den verschiedenen Materialorientierungen

B. Erzeugung des FEM-Modells

Die ermittelten Materialkennwerte werden zur Modellbildung des vorliegenden Werkstoffes in ein anisotropes Materialmodell überführt. Eingesetzt wird dabei

das Berechnungsmodell *Static Structural* der FEM-Software *ANSYS (Pennsylvania, USA)*. Dazu werden die Werte für die Dichte, die mit $1140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ vom Materialhersteller angegeben ist, und das linear elastische Verhalten als Materialdaten hinterlegt.

Wie bereits erläutert wird die orthotrope Elastizität gewählt, bei der das E-Modul E in den drei Hauptrichtungen die für X, Y und Z ermittelten Mittelwerte darstellt. Da die Querkontraktionszahl ν mit dem vorhandenen Versuchsaufbau nicht ermittelt werden konnte, wird hier auf Literaturwerte von vergleichbarem PA-Material zurückgegriffen [5]. Das Schubmodul G wurde ebenfalls nicht messtechnisch ermittelt, sondern mit der Formel:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (1)$$

berechnet, welche eigentlich bei isotropem Materialverhalten angewendet wird [2]. Somit ergeben sich für das anisotrope Materialmodell die in *Tabelle 2* dargestellten Werte.

Tabelle 2: Elastische Kennwerte des anisotropen Materialmodells

E_X	1579 MPa	ν_{XY}	0,35	G_{XY}	584 MPa
E_Y	1535 MPa	ν_{YZ}	0,35	G_{YZ}	568 MPa
E_Z	1047 MPa	ν_{XZ}	0,35	G_{XZ}	584 MPa

Durch die Angabe eines Materialkoordinatensystems für das Simulationsmodell kann die Fertigungs-Orientierung des additiv gefertigten Bauteiles eingestellt und angepasst werden.

C. Validierung des FEM-Modells

Das erstellte Materialmodell und die damit berechneten Simulationsergebnisse sollen durch einen realen Versuch validiert werden. Gewählt wurde eine typische Ausführung in der lösbaren Füge-technik von Kunststoffbauteilen, der Schnapphaken.

In *Abbildung 7* ist die untersuchte Schnapphakengeometrie dargestellt. Der Haken wirkt aufgrund des Keilwinkels und das Aufschieben des Fügepartners die Kraft auf das Element aus. Er wird im Modell weggelassen, da er einen geringen Einfluss auf die Durchbiegung hat. Ebenfalls vernachlässigt wird die parallel zum Schnapphaken wirkende Kraft. Das Modell reduziert sich somit zu einem einseitig eingespannten Biegebalken mit der Biegekraft F . Die Proben wurden in zwei Orientierungen hergestellt.

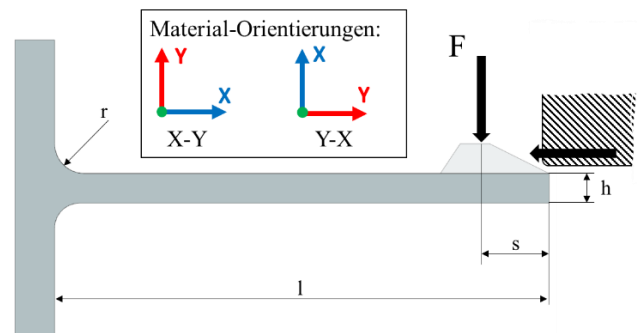


Abbildung 7: Schnapphakengeometrie; Ansicht in X-Y-Ebene; $l=100 \text{ mm}$, $s=5 \text{ mm}$, $h=6 \text{ mm}$, $r=5 \text{ mm}$, Tiefe: 25 mm

Die Biegekraft wurde sowohl in der Simulation als auch im Versuch durch einen Druckkeil aufgebracht. Vorgegeben wurde jeweils die Verschiebung des Keils in Druckrichtung. Die Kraft wurde als Reaktionskraft am Keil durch die Simulation beziehungsweise durch den Kraftaufnehmer an der Messmaschine erfasst. Daraus lässt sich ein Kraft-Weg-Diagramm für den Angriffspunkt des Keils erstellen.

In *Abbildung 8* ist das Simulationsergebnis sowie der Versuchsaufbau bei der maximalen Auslenkung dargestellt. In [6] wird für die zulässige Randfaserdehnung von Polyamid ein Wert von 2 % über lange Zeit und 3,0 - 4,0 % über kurze Zeit angegeben. Da die Verformung und das Simulationsmodell auf den elastischen Bereich beschränkt ist und auch für Langzeitbelastungen gilt, soll eine Dehnung von 2 % nicht überschritten werden. In der Simulation ergibt sich diese Dehnung bei einer Auslenkung von ca. 16 mm.

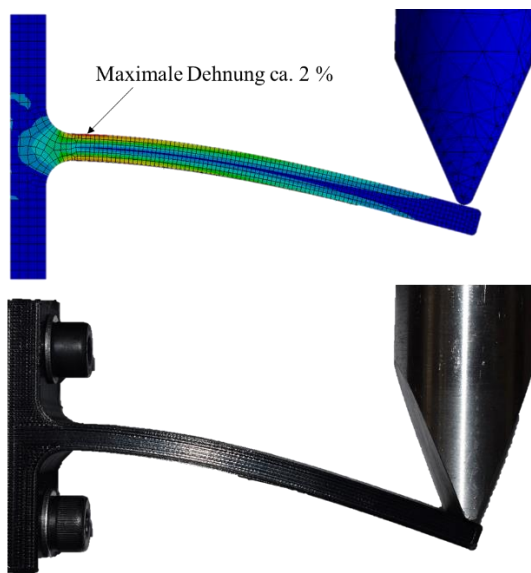


Abbildung 8: Simulationsergebnis und Versuchsaufbau bei maximaler Auslenkung des vereinfachten Schnapphakens

In *Abbildung 9* sind die Ergebnisse der Versuche in Form von Kraft-Weg-Diagrammen dargestellt. Die Ergebnisse des Realversuchs stellen den Mittelwert der in mehreren Durchgängen aufgenommenen Kräfte dar, wobei die Werte der Simulation aus einer Berechnung stammen.

Beide Kurven verlaufen nahezu linear und weichen nur geringfügig voneinander ab. Die mittlere Abweichung im betrachteten Bereich liegt bei der X-Y-Orientierung bei 4,8 %, bei der Y-X-Orientierung bei 11,5 %. Es kann beobachtet werden, dass der simulierte Kraft-Weg-Verlauf zum Teil von einem linearen Verlauf abweicht. Der Grund für diese Abweichung kann die nichtlineare Berechnung in der FEM aufgrund der Kontaktberechnung zwischen Keil und Biegeprobe sein. Durch deren Einfluss kann es zu Fehlern in den Iterationsschritten zur Lösung des Finiten Elemente Problems kommen. Aufgrund des geringen Unterschiedes des E-Moduls der beiden Hauptrichtungen X und Y zeigen die beiden Versuchsreihen ebenfalls geringe Unterschiede untereinander. Eine Berechnung des Modells mit einer Querkontraktionszahl von 0.4 zeigt eine mittlere Abweichung von 0,5 % zur Berechnung mit 0.35.

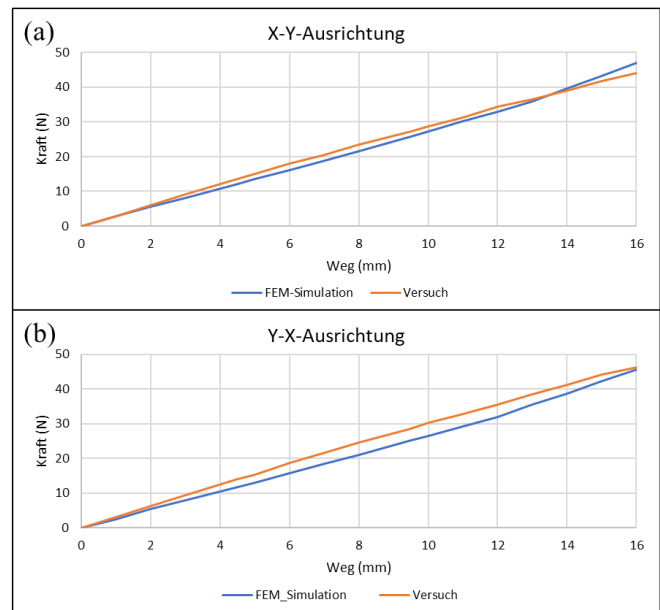


Abbildung 9: Kraft-Weg-Diagramme der Biegeversuche und -simulationen in (a) X-Y-Orientierung und (b) Y-X-Orientierung des Materials

Ein zweiter Versuch zur Validierung des gebildeten Modells wurde anhand eines Dreipunkt-Biegeversuchs durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in *Abbildung 10* dargestellt. Getestet wurden Biegebalken mit einem Sechskant- (bis 2 mm Durchbiegung) sowie einem Doppel-T-Querschnitt (bis 1,5 mm Durchbiegung). Auch hier ist nur eine geringe Abweichung zwischen Simulationsmodell und Realversuch sowie ein lineares Verhalten zu erkennen. Die mittlere Abweichung im betrachteten Bereich liegt hier beim Sechskant-Querschnitt bei 3,1 % und beim Doppel-T-Querschnitt bei 0,9 %.

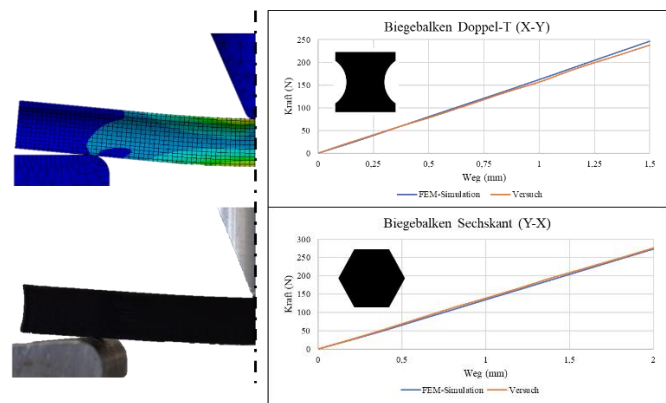


Abbildung 10: Ergebnisse der Dreipunkt-Biegeversuche aus FEM-Simulation und Versuch mit verschiedenen Biegebalken-Geometrien

Der Einfluss der Querkontraktionszahl wurde am Beispiel des Sechskantprofils ermittelt. Die Berechnung wurde mit einem Wert von 0.3, 0.35 und 0.4 und den daraus berechneten Schubmodulen durchgeführt. Über den gesamten Betrachtungsbereich ergibt sich eine mittlere Abweichung von 0,3 % zwischen 0.3 und 0.35 sowie von 0,66 % zwischen 0.3 und 0.4. In den vorliegenden Modellen kann somit ein geringer Fehlereinfluss durch die Wahl einer Querkontraktionszahl aus Literaturwerten, hier aus [5], nachgewiesen werden.

IV. DISKUSSION

Bevor nachfolgend die Ergebnisse diskutiert werden, sollen zunächst einige Fehlereinflüsse genannt werden, die eine Auswirkung auf die vorgestellten Ergebnisse haben:

- Systematische Messfehler der Universalprüfmaschine aufgrund von mangelnder Kalibrierung
- Streuung der Druckqualität der Proben durch nicht konstante Bedingungen bei der Herstellung und Fehlerstellen (z.B. mangelnde Haftung am Druckbett)
- Querkontraktionszahl und Schubmodul wurden nicht experimentell ermittelt, sondern aus Literaturwerten und einem isotropen Materialansatz gewonnen

Die Ergebnisse zeigen beim vorliegenden Material Polyamid im elastischen Bereich vergleichbare Eigenschaften von additiv gefertigten (in den Hauptrichtungen X und Y) und durch Spritzguss hergestellten Proben. Jedoch muss die geringere Belastbarkeit und Steifigkeit in der Hauptrichtung Z beachtet werden. Ursache hierfür kann eine geringe Zwischenschichthaftung sein, welche bereits in weiteren Untersuchungen festgestellt wurde. Die Haftung zwischen den einzelnen Strängen in einer Schicht in X-Richtung zeigt hingegen keinen Verlust an mechanischer Belastbarkeit und Steifigkeit im Vergleich zur Strang-Hauptrichtung in Y.

Die größere Streuung der Materialkennwerte kann zum Beispiel durch das Vorsehen von größeren Sicherheiten gegen Verformung oder Bruch kompensiert werden. Um einen quantitativen Vergleich von anisotropen und isotropen Materialeigenschaften zu ermöglichen, ist die Herstellung von Zugproben aus dem verwendeten FDM-Material *Ultimaker Nylon* durch Spritzguss und die Durchführung einer zusätzlichen Versuchsreihe erforderlich.

Wird die Orientierung der Materialstränge im FDM-Verfahren bei der Konstruktion beachtet, ist es somit möglich, Spritzgussbauteile durch additiv gefertigte Bauteile zu substituieren. Da es sich bei Polyamid um einen technischen Kunststoff handelt, ergeben sich somit viele Einsatzmöglichkeiten, zum Beispiel der Herstellung von funktionalen Prototypen oder Kleinserien.

Im zweiten Teil der Untersuchung konnte aus den ermittelten Materialdaten ein Simulationsmodell aufgebaut werden, welches das Verhalten der gefertigten Bauteile mit einer guten Genauigkeit nachbildet. Da eine Zugspannung in Z-Richtung schnell zum Bauteilversagen führen kann, wurde dies bereits in den Validierungsversuchen ausgeschlossen und auf einen Aufbau des Schnapphakens in dieser Orientierung wurde verzichtet.

V. FAZIT & AUSBLICK

In dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass allein aus den Daten eines einfachen Zugversuches, also mit wenigen Messungen und einfachen Methoden, ein Materialmodell eines anisotropen, durch FDM hergestellten Polyamid-Werkstoff generiert werden kann. Die damit erreichten Berechnungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem realen Versuchsaufbau und genügen damit der Abschätzung des Materialverhaltens.

Dabei konnten Materialorientierungen definiert werden, in denen die additiv gefertigten Proben ein vergleichbares Verhalten zu isotropen, durch Spritzguss gefertigten Proben erreichen. Diese Erkenntnisse können genutzt werden, um additiv gefertigte Bauteile beanspruchungsgerecht zu konstruieren und eine konstruktionsbegleitende Verformungs- und Festigkeitsanalyse durch die Finite-Elemente-Methode zu realisieren.

Die Übertragbarkeit der Vorgehensweise und Ergebnisse auf andere Kunststoff-Werkstoffe sowie komplexe Bauteilformen wurde nicht untersucht und kann durch weitere Versuche ermittelt werden. Eine additive Herstellung von Bauteilen in Massivbauweise, wie in dieser Untersuchung angewendet, macht diese zwar mechanisch hoch belastbar und mit Spritzguss vergleichbar, jedoch steigt dadurch die Fertigungszeit und der Materialeinsatz. Deshalb ist es ebenfalls erstrebenswert, in weiteren Versuchen den Einfluss des Füllgrades auf die mechanischen Eigenschaften und die Möglichkeit der Erstellung eines funktionalen Materialmodells zu untersuchen. Dadurch kann das Kosten-Nutzen-Verhältnis in Bezug auf den Füllgrad und damit die Wirtschaftlichkeit bewertet und optimiert werden.

Da das Langzeitverhalten unter Belastung eine wichtige Materialeigenschaft von Kunststoff darstellt, ist ebenfalls die Ermittlung des Kriechverhaltens von additiv hergestellten Bauteilen sinnvoll, um gegebenenfalls ein Materialmodell zur Vorhersage des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens bilden zu können.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Zarbakhsh J, Iravani A, Amin-Akhlagh Z (2015 - 2015) Sub-modeling Finite Element Analysis of 3D printed structures 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. IEEE, S 1–4
- [2] Lohr W, Härtel A, Reinicke T (2018) Ermittlung von Materialkennwerten für additiv gefertigte Bauteile im Kreuzverbund nach dem FDM-Verfahren zur numerischen Berechnung der Festigkeitseigenschaften. Universitätsbibliothek der Universität Siegen, Siegen
- [3] BASF (2021) Datenblatt - Ultramid B3S-PA6-BASF. <https://www.campusplastics.com/material/pdf/146341/UltramidB3S?sLg=en>. Zugegriffen: 21. Juli 2021
- [4] Altenbach H (2018) Kontinuumsmechanik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- [5] Kunz J (2011) Die Querkontraktionszahl in der Konstruktionspraxis. KUNSTOFFXTRA 1:27–30
- [6] Schüle H, Eyerer P (2020) Polymer Engineering 2. Verarbeitung, Oberflächentechnologie, Gestaltung, 2. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg