

eingereicht/handed in: 24.08.2020  
angenommen/accepted: 15.01.2021

**Alexander Kißling, M.Eng.<sup>1,2</sup>, Prof. Dr.-Ing. Thomas Seul<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Frank Beneke<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Hochschule Schmalkalden, Fakultät Maschinenbau, Labor für angewandte Kunststofftechnik (AKT)

<sup>2</sup>Georg-August-Universität Göttingen, DNPW-Abteilung Agrartechnik

## **Anwendung einer hauptnormalspannungsorientierten Füllstrategie für Fused Layer Manufacturing Strukturen**

*Konventionelle additive Fertigungsverfahren wie die Fused Layer Manufacturing (FLM)-Technologie erlauben es, beliebige Strukturen aus den unterschiedlichsten Materialien werkzeuglos in sehr kurzer Zeit zu fertigen. Daneben werden bei schichtweise arbeitenden Verfahren die fertigungstechnischen Freiheitsgrade bezogen auf die Füllstrategie und vorhandene Anisotropie kaum genutzt. In der vorliegenden Veröffentlichung soll daher eine Optimalitätsstrategie für 2,5D-FLM-Strukturen vorgestellt werden, die auf einer Hauptnormalspannungsanalyse basiert. Ziel ist es, mithilfe simulationsbasierter Methoden einen beanspruchungs- und fertigungsgerechten Strukturentwurf zu generieren. Neben der methodischen Umsetzung dienen Versuche an generischen Lochplatten mit unterschiedlichen Füllstrategien zur Validierung und ersten Bestätigung der Methode.*

## **Application of a principle normal stress oriented filling strategy for Fused Layer Manufacturing structures**

*Conventional additive manufacturing processes such as Fused Layer Manufacturing (FLM) technology make it possible to produce any structures from a wide variety of materials without tools in a very short time. In addition, layer-by-layer processes hardly make use of the technical manufacturing degrees of freedom with regard to the filling strategy and existing anisotropy. Therefore, in the present publication an optimality strategy for 2.5D-FLM structures shall be presented which is based on a principal normal stress analysis. The goal is to generate a structure design that is suitable for the requirements and production process by means of simulation-based methods. In addition to the methodical implementation, experiments on generic open hole plates with different filling strategies serve to validate and first confirm the method.*

# Anwendung einer hauptnormalspannungsorientierten Füllstrategie für Fused Layer Manufacturing Strukturen

A. Kißling, T. Seul, F. Beneke.

## 1 EINLEITUNG

Moderne additive Fertigungsverfahren wie die Fused Layer Manufacturing (FLM)-Technologie sind seit über 20 Jahren etablierter Bestandteil im Produktentwicklungsprozess zur Herstellung von Anschauungs- oder Funktionsprototypen. Vorteilhaft ist vor allem die werkzeuglose Erzeugung beliebiger Geometrien in relativ kurzer Zeit. Mit zunehmender Verbesserung der Verfahren in Bezug auf Geschwindigkeit, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der produzierten Objekte wurden sukzessive weitere Anwendungsfelder erschlossen. Daneben führte jedoch die stetige Ausweitung verarbeitbarer Materialien und Materialkombinationen zu einem Übergang von der reinen Prototypenfertigung hin zur Produktion von Endprodukten.

Unabhängig vom verarbeiteten Material bzw. der Materialkombination führt jedoch die spezifische Fertigungscharakteristik der FLM-Technologie zu einer inhomogenen Morphologie der Mesostruktur. Darin begründet ist die schon mehrfach nachgewiesene Anisotropie in Bezug auf elementare Steifigkeits- und Festigkeitskenngrößen [1-6]. Hierbei wird stets festgestellt, dass neben dem verwendeten Material oder Materialkombination die Füllstrategie in Kombination mit der Baurichtung der Objekte das bestimmende Fertigungsmerkmal zur mehr oder weniger starken Ausprägung eines richtungsabhängigen Strukturverhaltens beiträgt.

Als Füllstrategien haben sich sogenannte Rasterfüllungen mit einem alternierenden Rasterwinkel etabliert. Häufig ist dies eine  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung, welche in den meisten Slicer-Programmen eine Standardeinstellung darstellt. Im Gegensatz dazu bietet die FLM-Technologie mit der Füllstrategie, sprich die Bahn, welche die materialauftragende Düse abfährt, einen bisher weitestgehend ungenutzten Freiheitsgrad, da diese Bahn beliebig ausgestaltet sein kann.

In Bezug auf komplexe Beanspruchungs- bzw. Spannungsverläufe innerhalb eines Bauteiles stellen alternierende Rasterfüllungen nur einen Kompromiss dar, die das Potenzial der angefertigten Strukturen in Bezug auf massespezifische Leichtbauaspekte und der damit verbundenen Materialausnutzung nur sehr bedingt ausschöpfen, Bild 1.

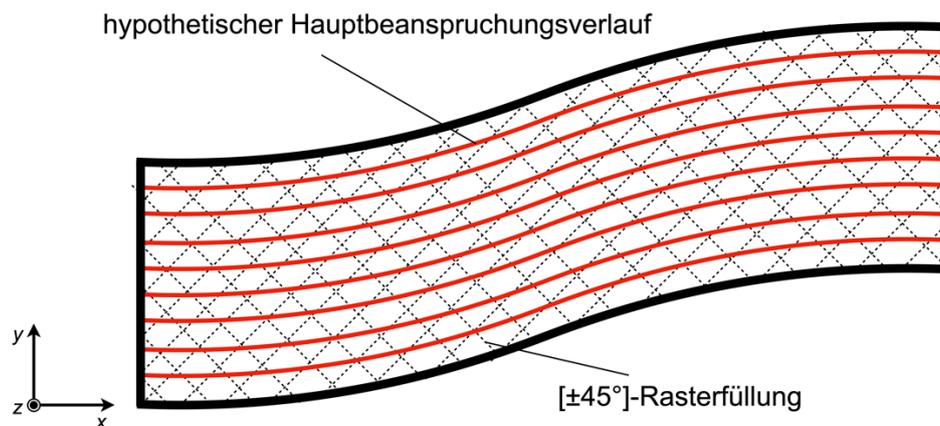


Bild 1: *hypothetischer Hauptbeanspruchungsverlauf gegenüber [±45°]-Rasterfüllung*

Mit steigendem Anisotropiegrad der zur Anwendung kommenden Materialien bzw. Materialkombinationen kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses Ungleichgewicht weiter verschlechtert, da innerhalb einer Schicht dem Hauptbeanspruchungsverlauf nicht durchgehend gefolgt werden kann. Dies kann sowohl einen negativen Einfluss auf die massenspezifische Steifigkeit als auch Festigkeit der angefertigten Struktur haben. Aus diesem Grund soll in der vorliegenden Veröffentlichung der Ansatz einer hauptnormalspannungsorientierten Füllstrategie für FLM-Strukturen untersucht und angepasst werden, da jene Spannungen extreme Zustände darstellen. Diese sind gerade bei richtungsabhängigen Materialeigenschaften von großer Bedeutung. Neben der methodischen Integration dieser Vorgehensweise in eine Simulationsumgebung sollen anhand eines kurzkohlenstofffaserverstärkten ABS generische Lochplatten mit Standardfüllstrategien angefertigt werden. Um erste Rückschlüsse auf das Potenzial dieser Vorgehensweise zu ziehen, erfolgt die Gegenüberstellung mit einer hauptnormalspannungsorientierten Füllstrategie.

## 2 STAND DER TECHNIK

Die Basis des hier zur Anwendung kommenden Ansatzes bildet die in [7] durchgeführte empirische Untersuchung natürlich vorkommender orthotroper Holzstrukturen. Es wurde beobachtet, dass diese Holzstrukturen ihre Orthotropieachsen, in dem Fall die Anordnung der Fasern, parallel zu den Hauptspannungstrajektorien ausrichten. Das heißt, die richtungsabhängigen Eigenschaften werden derart ausgenutzt, dass die Materialrichtung mit den besten Eigenschaften möglichst dem dominierenden Hauptnormalspannungsverlauf innerhalb der Tragstruktur folgt. Somit wird bei gleichbleibender Belastung die Gefahr für ein Schubversagen stark minimiert, was für die meisten orthotropen Strukturen ein Hauptgrund für Versagen darstellt. Auf

dieser Basis wurde ein numerisches Verfahren für ebene Strukturen entwickelt, welches iterativ die Materialhauptachsen an den vorliegenden Hauptnormalspannungs-zustand anpasst bzw. mit den dazugehörigen Trajektorien korrelieren lässt und im Kern auf die Arbeiten von Hyer et. al [8] zurückgeht. Dieses wird als Computer Aided Internal Optimization (CAIO) bezeichnet. Anhand eines endlos glasfaserverstärkten Kunststoffverbundes konnte aufbauend darauf bewiesen werden, dass derart optimierte Strukturen am Beispiel einer Lochplatte eine signifikant höhere Bruchlast ertragen als konventionelle unidirektionale Strukturen.

Erweitert wurde dieser Ansatz in [9] mittels einer Adaptierung auf dreidimensionale Strukturen. Damit war es auf Simulationsbasis möglich, einen räumlichen Trajektorienverlauf der Materialhauptachsen komplexer natürlicher Tragstrukturen aus Holz nachzuempfinden. Ein weiterer wesentlicher Punkt war zudem die Entwicklung einer CAM-Schnittstelle zur Übertragung berechneter Faserverläufe auf ein Fertigungssystem zur Ablage von Faserovingen, um numerisch optimierte Faserverbundstrukturen nach dem entwickelten Prinzip anfertigen zu können.

Durch die stetige Verbesserung und Automatisierung von Fertigungssystemen zur Platzierung von Endlosfasern finden diese Ansätze im Bereich der Optimierung derartiger Kunststoffverbundkonstruktionen seit Jahren eine zunehmende Verbreitung. Dabei kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen der adaptiven lokalen Platzierung einzelner unidirektionaler Fasertapes bzw. -matten [10,11] sowie der Platzierung von variabelaxialen Faserovingen [12-16]. Gerade die zuletzt genannten bieten bspw. mittels der Tailored Fiber Placement (TFP) – Technologie eine fertigungstechnische Umsetzung, die es ermöglicht, krummlinige Faserpfade in Verbindung mit einer variablen Dickenkonturierung von Faserverbundkonstruktionen zu realisieren. Im Gegensatz zur Anwendung eines Optimalitätskriteriums mittels CAIO-Ansatz existieren jedoch auch mathematische Optimierungsansätze, welche die gegebenen Designparameter einer variabelaxialen Fertigungsstrategie zur Erzeugung steifigkeits- und / oder festigkeitsoptimierter Strukturen direkt adressieren. So zeigen Khani et al. [13] in ihrer Untersuchung anhand einer Lochplatte bspw. auf, dass sowohl eine steifigkeits- als auch eine festigkeitsoptimierte Faserausrichtung signifikante Verbesserungen gegenüber einem quasi-isotropen Laminat, was den Versagensindex betrifft, erzielt werden können. Unter Einbeziehung lokaler Spannungskonzentrationen wird durch Parnas et al. [14] ein Ansatz entwickelt, welcher zusätzlich eine variable Dickenkonturierung mit beachtet. Auch die praktische Anwendung bezogen auf einen Flugzeugflügel unter Beachtung von Dickenkonturierung und variabler Faserausrichtung, wie in Groh et al. [15] dargelegt, bildet dabei einen spezifischen Optimierungsansatz hinsichtlich massenminimaler Strukturen. Direkt bezugnehmend auf die TFP-Technologie konnte durch Bittrich et al. [16] ein mathematischer Optimierer, Namens Direct Fiber Path Optimization (DFPO), entwickelt werden, mit dem sowohl das Struktursteifigkeits- als auch Festigkeitsverhalten, unter Beachtung einer realitätsnahen Abbildung der

Faserausrichtung sowie Dickenkonturierung, signifikant verbessert werden kann. Am Beispiel einer Lochplatte sowie einer Zugprobe mit vermindertem Mittenquerschnitt wird zudem aufgezeigt, dass dieser Ansatz nicht nur einem unidirektionalen Faserlayout, sondern sogar einer hauptnormalspannungsorientierten Strategie überlegen ist.

Unabhängig vom gewählten Ansatz zeigt sich daher, dass eine möglichst lokale Anpassung des Faserverlaufs, zur Steigerung der Faserlastaufnahme und somit der Materialausnutzung, eine signifikante Verbesserung der strukturellen Eigenschaften der Bauteile unter massespezifischen Leichtbauaspekten gegenüber standardisierten multiaxialen Gelegen die Folge ist. Gerade im Hinblick auf hochgradig anisotrope Faserverbundwerkstoffe wird dadurch ermöglicht, die in diesem Fall zu beachtenden fertigungsspezifischen Anforderungen in den Entwicklungs- und Auslegungsprozess zu integrieren.

Rein kinematisch betrachtet, bestehen kaum Unterschiede zwischen einer geführten ebenen Bewegung eines materialapplizierenden Werkzeuges, unabhängig davon, ob hiermit Fasertapes, Faserovinge oder thermoplastische Materialien lokal appliziert werden. Die Nutzung dieses fertigungstechnischen Freiheitsgrades, ähnlich der vorangestellten Ausführungen bezüglich endlosfaserverstärkter Kunststoffe, ist daher auch im Falle der FLM-Technologie als naheliegend anzusehen. Demgegenüber zeigt sich jedoch, dass bei der Anfertigung von FLM-Strukturen überwiegend Rasterfüllstrategien ihre Verwendung finden, obwohl ein anisotropes Materialverhalten bekannt ist, auch wenn dieses nicht mit der Ausprägung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen verglichen werden kann.

Lediglich bezogen auf den Entwurf massenminimaler FLM-Strukturen auf Basis unverstärkter Thermoplaste existieren erste Untersuchungen, welche die Trajektorien der beiden Hauptnormalspannungen im ebenen Fall als Grundlage für eine teilgefüllte Fertigungsstrategie nutzen. So wird durch Kwok et al. [17] ein Algorithmus vorgestellt, mit dem durch diskrete Balkenelemente eine sequentielle Approximation der berechneten Trajektorien erfolgt. Diese wiederum können darauf aufbauend durch ein FLM-Verfahren angefertigt werden. Ein ähnliches Vorgehen wird durch Mark Tam et al. [18] und Sales [19] vorgeschlagen. In diesem Fall dienen die ermittelten Trajektorien direkt der Erzeugung der Extrusionspfade, nur dass hierbei zusätzlich noch ein praktischer Vergleich gegenüber alternativen teilgefüllten Strategien erfolgt. Ein Ansatz zur grundsätzlichen Beurteilung des Potenzials der intralaminaren Füllstrategie bei 100-prozentigem Füllgrad gegenüber etablierten Standardfüllstrategien liegt indes nicht vor. Auf Basis des niedrigen Anisotropiegrades eines kurzfaserverstärkten Filamentes wird daher zunächst ein auf das FLM-Verfahren angepasster CAIO-Ansatz gewählt. Gerade vor dem Hintergrund der voran gestellten Untersuchungen im FLM-Bereich zeigt sich, dass im Falle einer vollgefüllten Einzelschicht die betragsmäßig größte Hauptnormalspannung als Referenzgröße zur lokalen Steuerung des Filamentverlaufs gewählt werden sollte, was in diesen Ausführungen nicht geschieht.

Bezogen auf eine vollgefüllte Einzelschicht würde dies bspw. bedeuten, schichtweise alternierend größte und kleinste Hauptnormalspannung als Steuergröße des ortsabhängigen Filamentverlaufs zu verwenden, was lokal aufgrund der wenn auch geringen Anisotropie zu einer Strukturschwächung führen würde.

### **3 HAUPTNORMALSPANNUNGSORIENTIERTE OPTIMIERUNGSSTRATEGIE BEI FLM-STRUKTUREN**

Das Ziel der zur Anwendung kommenden Vorgehensweise bildet ein methodischer Ansatz, der die fertigungstechnischen Möglichkeiten sowie Einschränkungen der FLM-Technologie für eine hauptnormalspannungsorientierte Optimalitätsstrategie berücksichtigt und mit einbezieht, und wie sich eine simulationsbasierte Umsetzung gestaltet. Daneben wird zudem aufgezeigt, welche Möglichkeiten der fertigungsseitigen Umsetzung von berechneten Füllstrategien bei einem 100 - prozentigem Füllgrad bestehen, auf deren Basis in einem ersten Schritt Zugversuche an Lochplatten durchgeführt werden. Der Fokus liegt dabei auf den resultierenden strukturellen Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften und dem sich ergebenden Potenzial gegenüber Standardfüllstrategien bei schwach anisotropen thermoplastischen Ausgangsmaterialien.

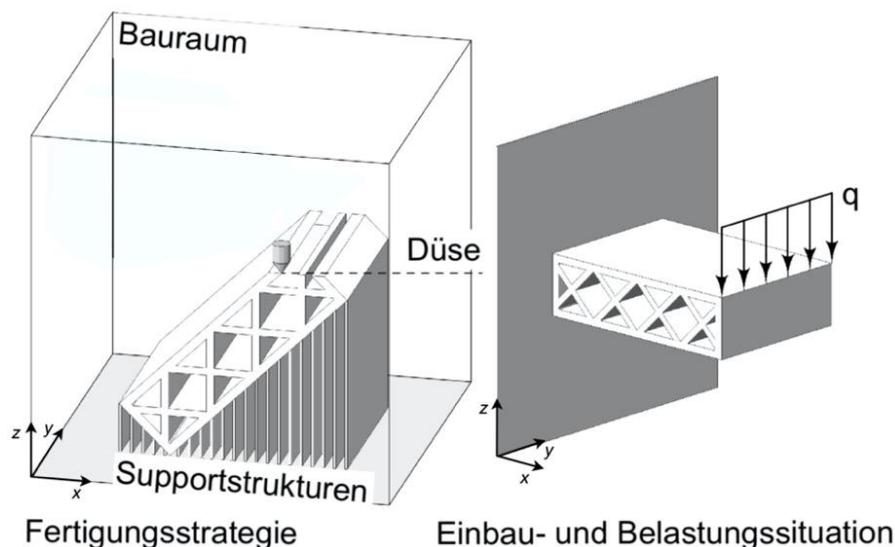
#### **3.1 Verfahrensspezifika konventioneller 2,5D-FLM-Prozesse**

Konventionelle schichtweise arbeitende FLM-Verfahren, welche aufgrund der sequentiellen Anfertigung einzelner Schichten auch als 2,5D-Verfahren bezeichnet werden, zählen mit zu den am weitesten verbreiteten Vertretern der FLM-Technologie. Als wesentlicher Vorteil im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren ist die Bandbreite verarbeitbarer Materialien bzw. Materialkombinationen in Verbindung mit der Skalierbarkeit der Anlagen anzusehen. Angefangen bei der Verarbeitung von unverstärkten oder kurzfaserverstärkten Thermoplasten besteht darüber hinaus die Möglichkeit, endlosfaserverstärkte Kunststoffverbunde sowie metallische Strukturen auf Basis einer additiven Fertigung von Grünlingen herzustellen.

Das bestimmende Fertigungsmerkmal der FLM-Technologie stellt das schichtweise Auftragen des Ausgangsmaterials durch eine CNC-gesteuerte und beheizte Düse dar. Dabei ist die Außenkontur durch die Einzelschichtinformation der anzufertigenden dreidimensionalen Struktur vorgegeben.

Als beliebig und somit variabel anzusehen sind jedoch die Füllstrategie<sup>1</sup> der Einzelschichten sowie die einmalige Festlegung der Orientierung der anzufertigenden Objekte im Bauraum. Für die Herstellung von Anschauungs- oder Funktionsprototypen spielen diese zwei Parameter eine untergeordnete Rolle. Lediglich die Bauorientierung in Verbindung mit der Einzelschichthöhe ist hierbei von größerem Interesse, da geometrische Merkmale abhängig vom erzeugten „Treppenstufeneffekt“ je nach Orientierung mehr oder weniger gut abgebildet werden können.

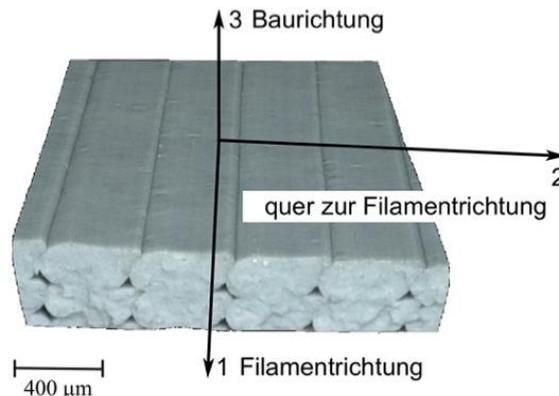
Bezogen jedoch auf ein mögliches Anwendungsszenario zur Herstellung von belasteten Strukturbauteilen bilden diese zwei vom Anwender festzulegenden Parameter jene fertigungsseitigen Stellgrößen für eine beanspruchungsgerechte Strukturoptimierung. In Bild 2 wird diese Abhängigkeit einmal exemplarisch dargestellt, wohlwissend, dass es sich hierbei um eine ungünstige Konstellation handelt. Je nach Ausprägung des richtungsabhängigen Materialverhaltens kann die Fertigungsstrategie bei vorgegebener Geometrie in Relation zur Belastungssituation von entscheidender Bedeutung sein und sollte unter Gesichtspunkten der Optimalität (Struktursteifigkeit, Versagenslast) in Betracht gezogen werden.



**Bild 2:** Relation Fertigungsspezifika / Belastungssituation von 2,5D-FLM-Strukturen

Der Grund für die Ausprägung eines richtungsabhängigen Materialverhaltens, vor allem bei unverstärkten Thermoplasten, liegt an der fertigungsspezifisch inhomogenen Morphologie der Mesostruktur, entsprechend Bild 3.

<sup>1</sup> Pfad der Düse innerhalb einer Schicht



*Bild 3: Mikroskopaufnahme einer unidirektionalen FLM-Mesostruktur mit lokalem Koordinatensystem*

Vor allem in Bezug auf Festigkeitskenngrößen macht sich dies aufgrund unterschiedlicher Kraftübertragungsflächen in den Materialhauptrichtungen bemerkbar. Mit der Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen ergibt sich zusätzlich noch ein richtungsabhängiges Verhalten bezogen auf elementare Steifigkeitskenngrößen (Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl), da bspw. bei kurzfaserverstärkten Materialien sich die eingebetteten Verstärkungsfasern in Extrusionsrichtung ausrichten und die Einzelbestandteile in sich unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen [20,21]. Konsequenterweise verstärkt sich dieser Effekt, wenn endlosfaserverstärkte Kunststoffverbunde mittels FLM-Verfahren angefertigt werden.

Hieraus lässt sich ableiten, dass mittels der Manipulation des Düsenpfades, in diesem Kontext der Füllstrategie innerhalb einer Schicht, gezielt Einfluss auf das mechanische Verhalten der Gesamtstruktur genommen werden kann. Da die mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit und / oder Festigkeit) i.d.R. in Extrusionsrichtung denen der orthogonalen Querrichtungen überlegen sind, sollte demnach das Ziel sein, diesen Pfad an die Hauptbeanspruchungsrichtung mittels geeigneter Methoden anzupassen.

### 3.2 Simulationsbasierte Umsetzung

Grundlage der hier vorgestellten Methode bildet eine Struktursimulation auf Basis der Finiten-Elemente-Methode (FEM). Essentieller Bestandteil ist in diesem Fall die Manipulation der Elementkoordinatensysteme durch die lokale Auswertung des Hauptnormalspannungszustandes und dessen korrespondierenden Richtungen.

Die materialeitige Beschreibung erfolgt hierbei anhand verschmierter linear elastischer Ersatzmodelle, die aus der Charakterisierung unidirektionaler (UD) Zugprobekörper, wie in Bild 4 dargelegt, hervorgehen. Zum einen ermöglicht diese Beschreibung, auf Basis des angestrebten variabelaxialen Extrusions-

pfades das richtungsabhängige Festigkeitsverhalten mit in die lokale Bewertung einfließen zu lassen.

Zum anderen ist ein solches UD-Ersatzmodell im Falle eines orthotropen Steifigkeitsverhaltens unabdingbar, um das Verformungsverhalten bei einer solchen Fertigungsstrategie auch korrekt abbilden zu können.

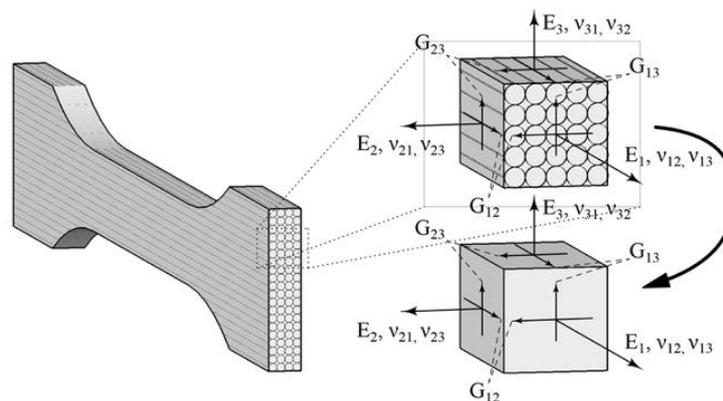


Bild 4: Unidirektionales verschmiertes Materialersatzmodell

Ausgehend von einer initialen Struktursimulation wird lokal (elementweise) der Hauptnormalspannungszustand ausgewertet. Dadurch, dass bei 2,5D-FLM-Verfahren, wie beschrieben, der Extrusionspfad lediglich in der Bauebene manipuliert werden kann und mit diesem möglichst der Hauptbeanspruchungsrichtung gefolgt werden soll, erfolgt zunächst eine Sortierung dieser Spannungen mit den korrespondierenden Richtungen. Dabei werden die Beträge der einzelnen Hauptspannungen als Bezugsgröße gewählt und für die spätere Zuordnung der Richtungen zu den Elementachsen geordnet. Konkret bedeutet dies, dass die betragsmäßig größte Hauptspannung und deren Richtung mit der Filamentlängsachse korrespondieren soll und die betragsmäßig zweitgrößte mit jener quer zur Filamentrichtung. Die betragsmäßig kleinste Hauptspannung und deren Richtung entspricht folglich der Baurichtung des UD-Ersatzmodells. Mithilfe dieser Informationen kann daran anschließend die Neuausrichtung der einzelnen Elementkoordinatensysteme durchgeführt werden.

Dieses Vorgehen wird entsprechend [7] solange iterativ durchlaufen, bis ein definierter Schwellwert der örtlichen Schubspannungsänderung erreicht wurde oder nach einer zuvor definierten Anzahl an Zyklen abgebrochen wird. In [8] wurde anhand unterschiedlicher Anisotropiegrade (Relation der unterschiedlichen E-Moduln) festgestellt, dass bereits nach vier Zyklen eine Schubspannungsreduktion von 90 % und somit möglichst optimale Annäherung an die Hauptspannungsrichtungen erreicht werden kann.

Für eine dreidimensionale Abstraktion der Struktur mittels Volumenelementen ist darüber hinaus zu beachten, dass abhängig von der Belastungssituation und Komplexität des Bauteiles räumliche Verläufe der Hauptspannungstrajektorien resultieren können. Da mittels 2,5D-FLM-Verfahren lediglich in der Bauebene

einem beliebigen Pfad gefolgt werden kann, muss anwenderseitig die Information der bevorzugten Baurichtung mit einfließen.

Konkret wird in diesem Fall vorgeschlagen, jene Achsen, welche die Filamentrichtung und quer zur Filamentrichtung der manipulierten Elementkoordinatensysteme repräsentieren, auf die bevorzugte Bauebene orthogonal zu projizieren. Dieses Vorgehen erlaubt darüber hinaus auch die numerische Ermittlung einer potenziell günstigen Baurichtung. Für eine ebene Abstrahierung mittels Shell-Elementen entfällt dieser Schritt, da durch die Wahl des Ansatzes die Baurichtung durch den Normalenvektor der Shelloberfläche schon festgelegt ist. Eine Neuausrichtung der Elementkoordinatensysteme erfolgt daher lediglich innerhalb der Shellebene. In Bild 5 ist das prinzipielle Vorgehen noch einmal dargestellt.

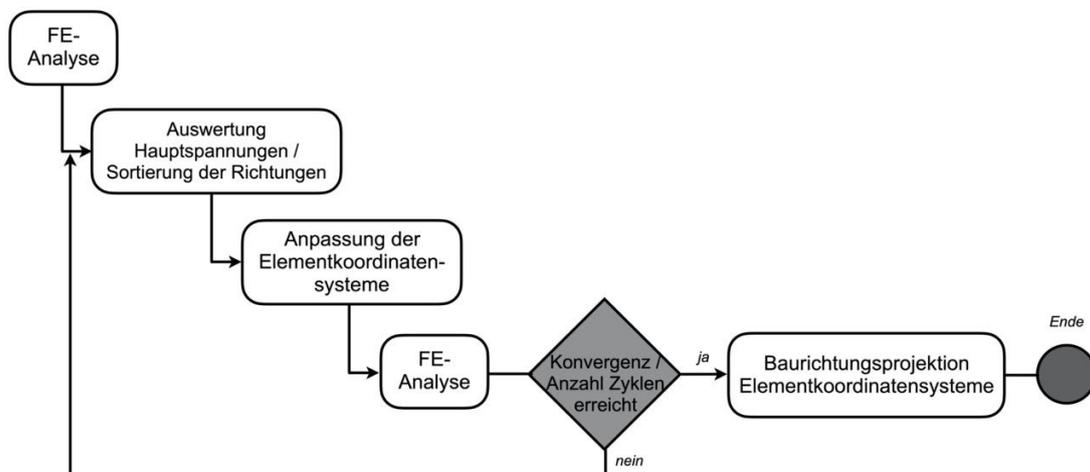
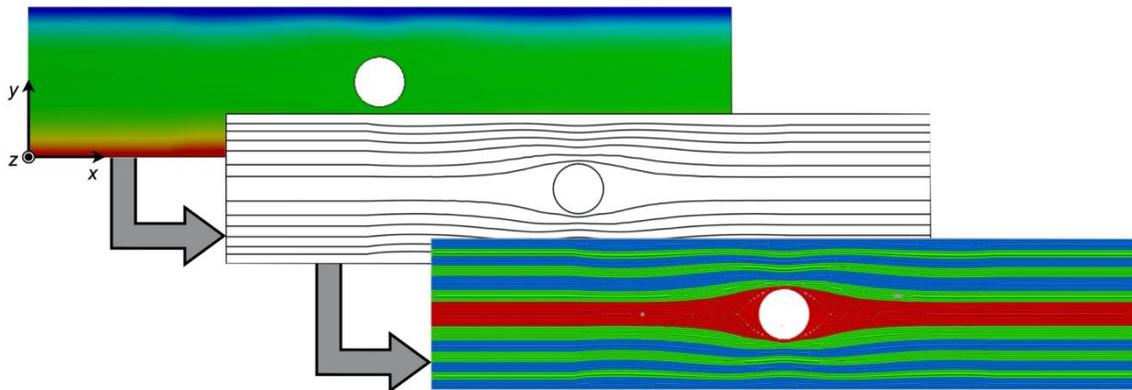


Bild 5: Iterative Abfolge zur Anpassung der Elementkoordinatensysteme an Hauptnormalspannungsrichtungen

Zur Überführung der daraus resultierenden Information über den Extrusionspfad innerhalb der Einzelschicht auf ein CAM-System zur Fertigungsvorbereitung wird der in [22] aufgeführte Ansatz verwendet. Dieser beschreibt, wie allgemeine Richtungsfelder mittels orthotroper Wärmeleitungsrechnung numerisch integriert werden können, um bspw. Hauptspannungstrajektorien zu extrahieren. Das Kernelement bildet eine thermisch stationäre Analyse der zuvor optimierten Struktur. Bei dieser werden den unterschiedlichen Richtungen der Elementkoordinatensysteme extreme Verhältnisse orthotroper Wärmeleitungs-koeffizienten zugewiesen (bspw.  $\lambda_1=10^6 \lambda_2$ ). Auf Basis der sich einstellenden Temperaturverteilung ist es möglich, die berechnete Füllstrategie aus der Extrahierung von Einzelisothermen abzuleiten. Dabei tangieren diese Isothermen die jeweiligen Richtungen der Elementkoordinatensysteme und somit auch Hauptspannungsrichtungen exakt. In einem weiteren Zwischenschritt dienen diese extrahierten Isothermen der Erstellung von Einzelkörpern in einem Computer Aided Design (CAD)-System. Diese werden innerhalb eines FLM spezifischen CAM-Systems mit der Standardfüllstrategie

„Konturfüllung“ versehen, um eine Annäherung an den berechneten Pfadverlauf zu erreichen. Zur Veranschaulichung ist dieses Vorgehen nachfolgend anhand Bild 6 vereinfachend dargestellt.



*Bild 6: Vorgehen zur Erzeugung einer hauptnormalspannungsorientierten Füllstrategie im FLM-Verfahren am Beispiel einer Lochplatte*

*Oben: thermisch stationäre Analyse (orthotrope Wärmeleitung), mitte: Extrahierung einzelner Isothermen, unten: konzentrische Füllung abgeleiteter CAD-Körper im Slicer*

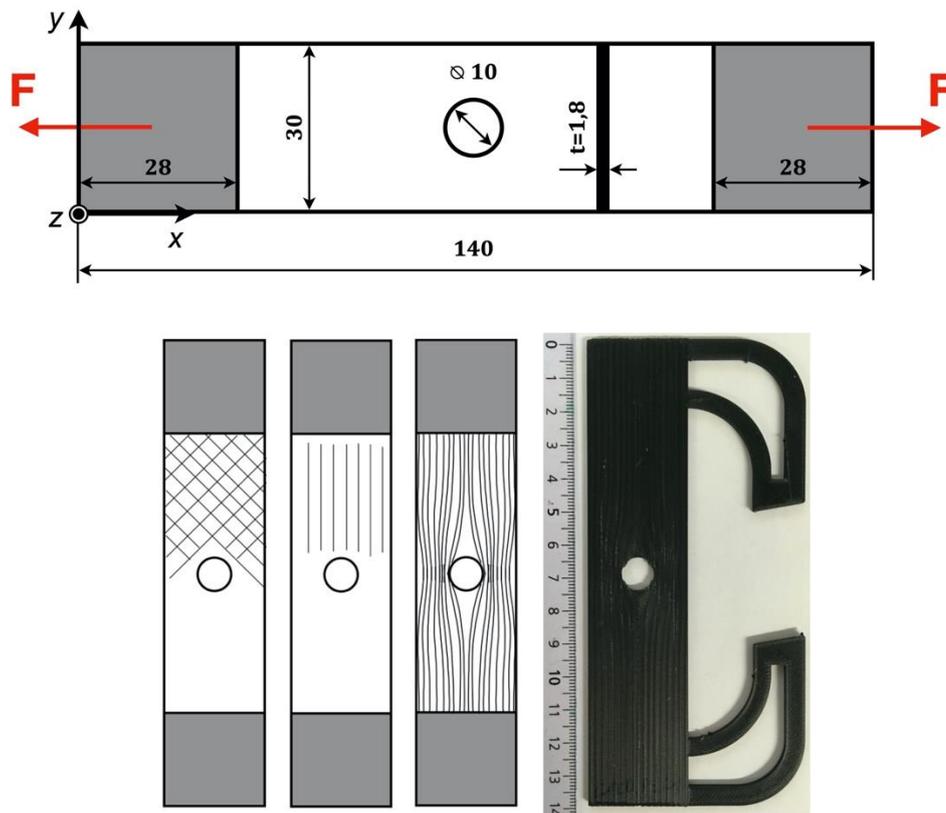
## 4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Der nachfolgend aufgeführte Zugversuch an generischen Lochplatten dient einer ersten praktischen Überführung des vorgestellten Optimierungsansatzes. Im Fokus steht der Vergleich unterschiedlicher Füllstrategien in Bezug auf das sich ergebende Steifigkeits- sowie Festigkeitsverhalten bei Verwendung eines kurzfaserverstärkten thermoplastischen Ausgangsmaterials.

### 4.1 Versuchsanordnung

Entsprechend Bild 7 werden drei unterschiedliche Konfigurationen einer Lochplatte mit jeweils fünf Einzelproben bezogen auf die Fertigungs- bzw. Füllstrategie hergestellt. Als Referenzkonfiguration wird in dem Kontext die  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung angesehen, da diese Füllstrategie in den meisten Slicer-Programmen eine Standard-Voreinstellung darstellt. Aufgrund der einfachen äußeren Lastsituation werden zudem unidirektionale Lochplatten angefertigt, bei denen alle Filamente parallel zu dieser Lastrichtung ( $[0^\circ]$ -Rasterfüllung) angeordnet sind, was in dem Zusammenhang als intuitive, nicht auf Berechnung basierende, Variante zur Optimierung der Fertigungsstrategie angesehen wird. Die dritte Konfiguration stellt die hauptnormalspannungsorientierte Variante entsprechend der in Abschnitt 3

dargestellten Ausführungen auf Basis einer ebenen Abstrahierung (Shell-Elemente) dar.



**Bild 7:** Übersicht angefertigter Lochproben mit unterschiedlichen Füllstrategien

Oben: geometrische Abmaße, unten v.l.n.r.:  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung,  $[0^\circ]$ -Rasterfüllung, hauptnormalspannungsorientierte Füllstrategie, Aufnahme einer angefertigten Probe

Zur Anfertigung der Proben wird das FLM-System „Replicator 2X“ der Firma *MakerBot* verwendet. Als entsprechendes Modul zur Fertigungsvorbereitung dient die Slicer-Software *Simplify3D*. Der FLM-spezifische Parameterdatensatz zur Anfertigung aller Proben ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Schichthöhe [mm]	0,2
Strangbreite [mm]	0,4
Außenkontur [-]	1
Füllgrad [%]	100
Düsentemperatur [°C]	220
Druckbetttemperatur [°C]	110
Extrusionsgeschwindigkeit [mm/s]	25

**Tabelle 1:** Übersicht verwendeter Fertigungsparameter

Als Ausgangsmaterial kommt ein kurzkohlenstofffaserverstärktes Acryl-Nitril-Butadien-Styrol (ABS) zum Einsatz, welches von der Firma *3DXTech* unter dem Handelsnamen „CarbonX CFR-ABS“ vertrieben wird. Auf Basis eigener Untersuchungen ergeben sich für dieses Material für ein linear elastisch verschmiertes Materialmodell die in Tabelle 2 aufgeführten orthotropen Grundelastizitätsgrößen im ebenen Spannungsfall. Diese dienen einer zusätzlichen numerischen Vergleichsrechnung zur Analyse der Struktursteifigkeit in Abhängigkeit zur Füllstrategie für kleine Verformungen. Vordringend in diesem Zusammenhang ist eine Validierung des UD-Ersatzmodells bei FLM-Strukturen zur numerischen Beschreibung des Verformungsverhaltens bei stark unterschiedlichen Füll- bzw. Fertigungsstrategien (alternierende Rasterfüllung, variabelaxialer Filamentverlauf).

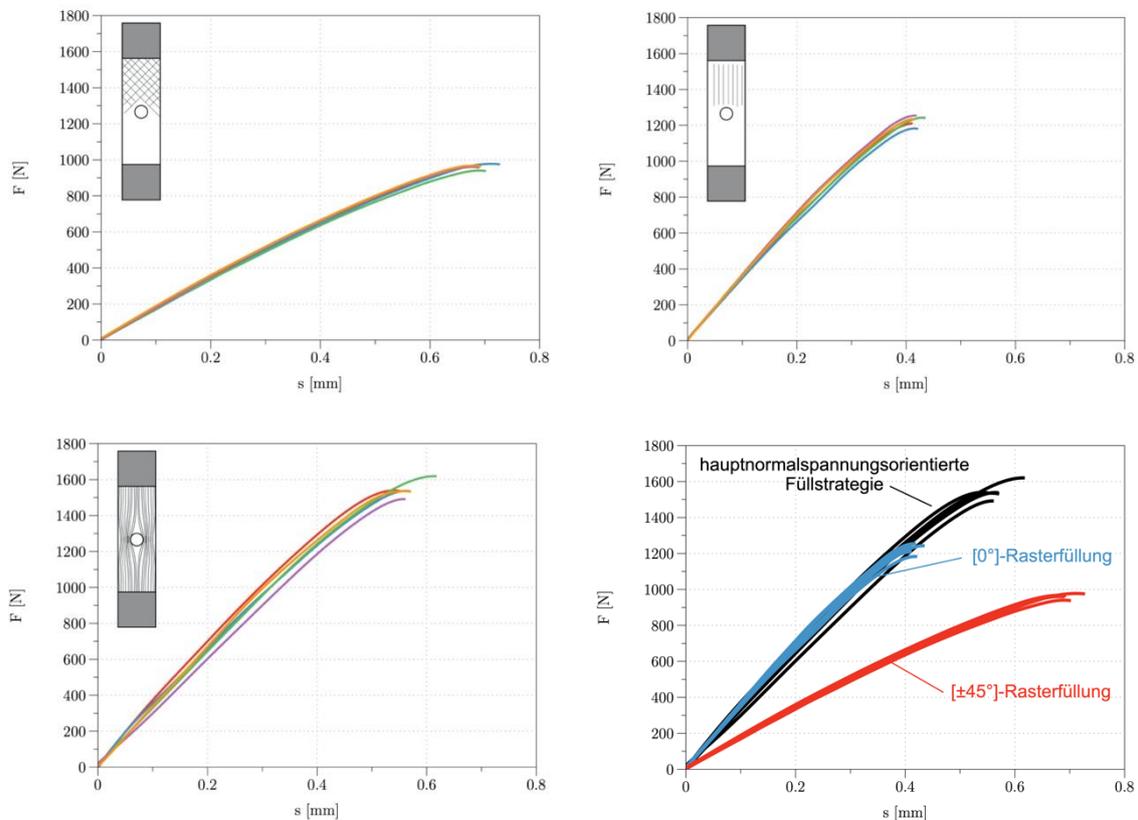
$E_1$ [MPa]	5715
$E_2$ [MPa]	2595
$\nu_{21}$ [-]	0,34
$G_{21}$ [MPa]	1051

Tabelle 2: Orthotrope Grundelastizitätsgrößen „CarbonX CFR-ABS“

Die praktische Durchführung der Zugversuche erfolgt auf einer Universalprüfmaschine BT1 der Firma *Zwick Roell*. Zur Aufzeichnung der nominellen Kraft-Verschiebungsrelation der einzelnen Lochproben kommt neben einer skalierbaren 10 kN Kraftmessdose ein optisches Messsystem namens *VideoXtens* zum Einsatz. Hintergrund ist, dass der Vergleich zur numerischen Vergleichsrechnung, bezogen auf den nominellen Traversenweg zwischen den Kraffteinleitungspunkten, eine hohe absolute Genauigkeit der Wegmessung erfordert, welche durch eine Standardmessung des Traversenweges nicht gewährleistet werden kann. Aus diesem Grund werden zusätzliche geometrische Elemente, wie in Bild 7 zu erkennen, in den Krafftleitungsbereichen mit vorgesehen, um auf diesen die für die optische Wegmessung notwendigen Messmarken anzubringen.

Alle Proben werden unter Normklimabedingungen (23 °C, 50 % rel. Luftfeuchte) konditioniert und getestet. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 % /min bezogen auf die nominelle Dehnung der Probekörper.

## 4.2 Ergebnisse



**Bild 8:** Kraft-Weg-Diagramme der unterschiedlichen Lochplattenkonfigurationen

Oben links:  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung, oben rechts:  $[0^\circ]$ -Rasterfüllung, unten links: hauptnormalspannungsorientierte Füllstrategie, unten rechts: überlagerte Kurven aller Konfigurationen

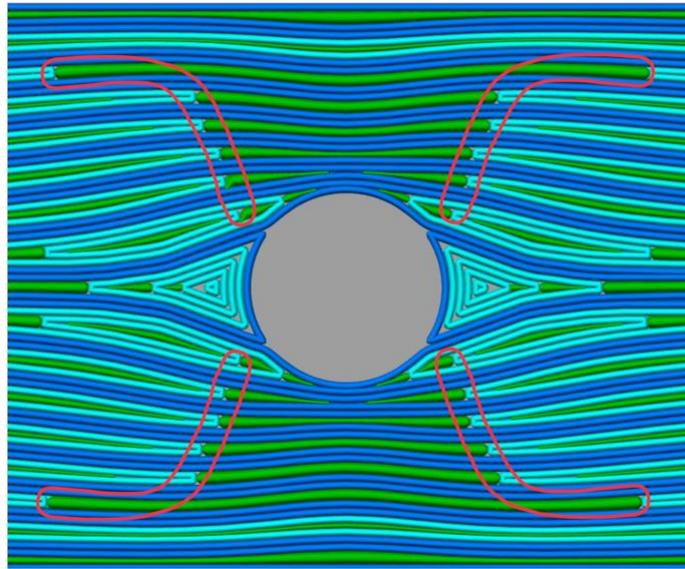
Die in Bild 8 dargestellten Diagramme zeigen die Kraft-Weg-Zusammenhänge der Zugversuche für die verschiedenen Konfigurationen der einzelnen Lochplatten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Standardfüllstrategie in Form der  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung zu einer wesentlich geringeren Struktursteifigkeit führt als die unidirektionale  $[0^\circ]$ -Rasterfüllung oder die hauptnormalspannungsorientierte Variante. Diese beiden wiederum zeigen in ihrem Struktursteifigkeitsverhalten einen sehr geringen Unterschied zueinander. Ausgehend von einer identischen Geometrie lässt sich numerisch in diesem Fall ein Unterschied von 2 % ermitteln, was in erster Näherung gut mit den realen Messungen übereinstimmt. Zu erklären ist der geringe Unterschied damit, dass der berechnete Filamentverlauf nur in wenigen Bereichen, bspw. in Zonen dominierender querkontraktionsbedingter Druckbeanspruchung, deutlich von einer unidirektionalen Füllung abweicht.

Erfolgt anhand Tabelle 3 die Gegenüberstellung der ermittelten Struktursteifigkeiten<sup>2</sup> für einen kleinen Verformungsbereich von 0 – 0,2 mm, so lässt sich feststellen, dass eine sehr gute Übereinstimmung mit den numerischen Vergleichswerten vorliegt. Durch die Verwendung eines unidirektionalen verschmierten Materialersatzmodells kann somit das Struktursteifigkeitsverhalten bei stark unterschiedlichen Füllstrategien (alternierende Rasterfüllung, variabelaxialer Filamentverlauf) numerisch gut abgebildet werden. Allerdings zeigt sich auch, dass die gemessene Struktursteifigkeit der hauptnormalspannungsorientierten Variante am stärksten von der idealisierten FE-Rechnung abweicht. Eine mögliche Erklärung hierfür wird in den fertigungsbedingten „Fehlstellen“ der berechneten Variante, entsprechend Bild 9, gesehen. Diese ergeben sich zwangsläufig bei konstanten Strangbreiten in Verbindung mit einer Konturfüllstrategie und variablen Außenkonturabständen der erstellten CAD-Grundkörper. Aufgefasst als intralaminare Nahtstellen bzw. „Fügezonen“ mit verminderten Kraftübertragungsflächen entlang der Hauptbeanspruchungsrichtung kann dies zu lokalen Steifigkeitsminderungen führen, die kumuliert über die Gesamtstruktur deren Steifigkeit herabsetzen und innerhalb der idealisierten FE-Struktur nicht erfasst werden. Vervollständigend sind zudem die per FE-Berechnung ermittelten Struktursteifigkeiten der unterschiedlichen Konfigurationen bei identischer Referenzgeometrie mit aufgeführt.

	Struktursteifigkeit $c_s$ [N/mm]			
	Messung	FE-Rechnung	Abweichung [%]	Referenzgeometrie FE-Rechnung
[±45°]- Rasterfüllung	1708 ± 41	1824	6,8	1718
[0°]-Rasterfüllung	3441 ± 98	3391	1,5	3024
Hauptspannungsorientiert	3214 ± 202	3523	9,6	3070

Tabelle 3: Vergleich der Struktursteifigkeiten von Lochplattenkonfigurationen

<sup>2</sup> basierend auf den realen geometrischen Abmaßen



*Bild 9: Fertigungsseitige Fehlstellen bei Konturfüllung am Beispiel der Lochplatten (hauptnormalspannungsorientierte Füllstrategie)*

Mit Betrachtung der Nennspannungen<sup>3</sup> im Kerbgrund bei Bruch der Proben lassen sich deutliche Unterschiede der einzelnen Konfigurationen zueinander erkennen. Den höchsten Wert mit  $\sigma_N=39,0$  MPa weist in dem Fall die hauptnormalspannungsorientierte Variante auf, gefolgt von der  $[0^\circ]$ -Rasterfüllung mit  $\sigma_N=35,1$  MPa, und mit  $\sigma_N=25,9$  MPa liegt der niedrigste Wert bei der  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung, Tabelle 4. Im Falle der  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung kann als Ursache die Kombination aus intralaminaren Schub- und Normalspannungsinteraktionen und den verminderten Kraftübertragungsflächen quer zur Filamentrichtung, entsprechend Bild 3, angesehen werden. Diese auf das Lokalsystem bezogenen Interaktionen kommen bei einer hauptnormalspannungsorientierten Füllstrategie, entsprechend einem variabelaxialen Filamentverlauf, nicht vor. Bei Betrachtung der  $[0^\circ]$ -Rasterfüllung muss erwähnt werden, dass fertigungsbedingt gerade bei dieser Füllstrategie die zylindrische Kerbe als geometrisches Feature nur gestuft mit konstanten Strangbreiten angenähert werden kann und es dadurch, wie in Bild 10 dargestellt, zu Fehlstellen im tragendem Bereich des Kerbgrundes kommt. Dies wurde bei der Bestimmung der Nennspannung berücksichtigt, sodass die Unterschiede zwischen dieser und der hauptnormalspannungs-orientierten Strategie weniger signifikant ausfallen. Dass dennoch Abweichungen bestehen, lässt sich womöglich, ähnlich der Ausführungen in [23], auf lokale Spannungsspitzen in den „Fügezonen“ zwischen den Einzelsträngen

<sup>3</sup> Verhältnis Kraft bei Bruch zu Ausgangsquerschnitt im Kerbgrund

zurückführen, welche zu einer Rissinitiierung und somit verfrühtem Versagen führen.

	Nennspannung $\sigma_N$ [MPa] im Kerbgrund bei Bruch	Steigerung zu $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung [%]
$[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung	$25,9 \pm 0,4$	-
$[0^\circ]$ -Rasterfüllung	$35,1 \pm 0,8$	35,5
Hauptspannungsorientiert	$39,0 \pm 1,1$	50,6

Tabelle 4: Vergleich der Nennspannungen im Kerbgrund bei Bruch der unterschiedlichen Lochplatten-Konfigurationen

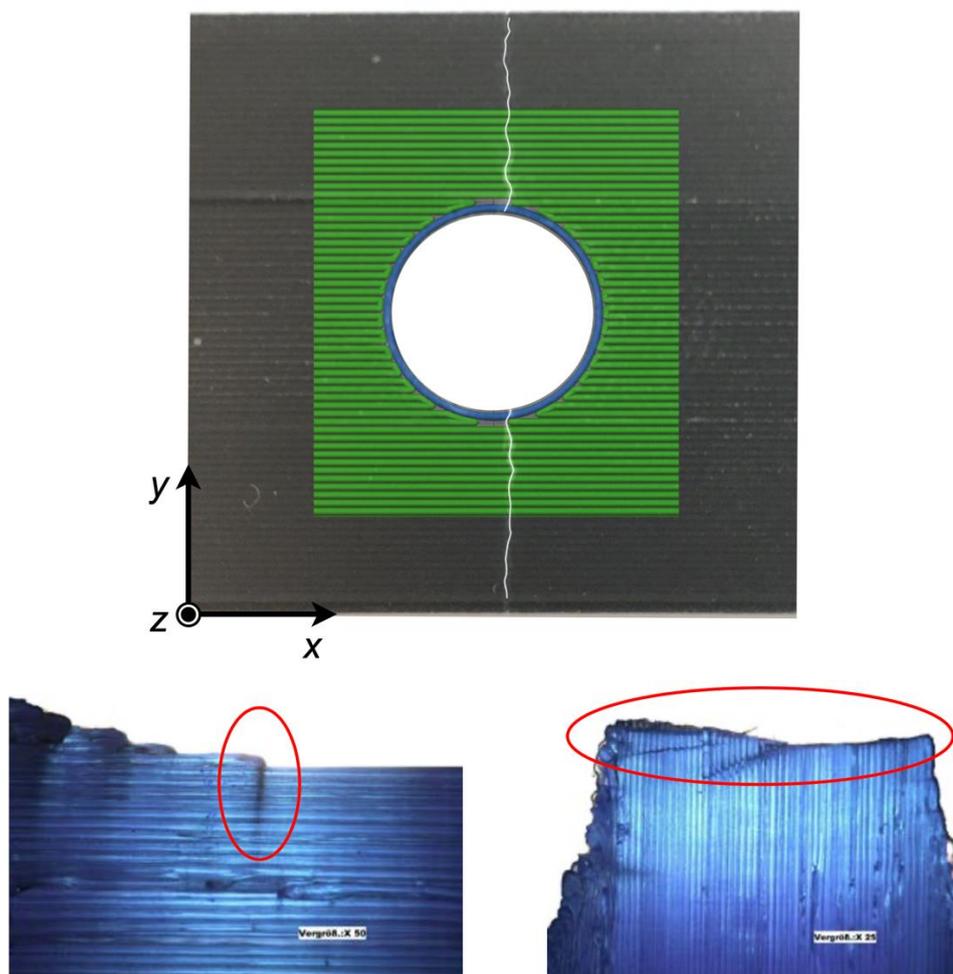


Bild 10: Rissinitiierung durch mesoskopische Kerbwirkung zwischen Einzelfilamenten aufgrund gestufter Abbildung von geometrischen Features

Oben: Rissverlauf  $[0^\circ]$ -Rasterfüllung mit überlagerter Fertigungsstrategie, unten links: Rissinitiierung einer Zugprobe mit  $[0^\circ]$ -Rasterfüllung [23], unten rechts: daraus resultierender Bruch im radialen Bereich der Probe [23]

Bezüglich einer qualitativen Analyse versagensrelevanter Spannungszustände und somit verbesserter Ergebnisinterpretation sei abschließend noch erwähnt, dass gerade die bei endlosfaserverstärkten Materialien etablierten Versagenskriterien, bspw. nach Puck, Tsai-Wu oder Cuntze, in dieser Untersuchung noch nicht mit in Betracht gezogen werden konnten. Zurückzuführen ist dies im Wesentlichen auf die noch fehlenden Parameter für das hier zur Anwendung kommende Material, weshalb die Validität derartiger Betrachtungen zum jetzigen Zeitpunkt nicht gegeben ist.

## **5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

Additiv gefertigte FLM-Strukturen weisen je nach Füllstrategie, Bauorientierung und verwendetem Ausgangsmaterial ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes anisotropes mechanisches Verhalten auf. Aus Anwendersicht besteht jedoch bei 2,5D-FLM-Verfahren mit der Manipulation der Fertigungsstrategie die Möglichkeit, auf diesen Umstand in angepasster Weise zu reagieren. Nach bisherigem Stand der Technik wird zumeist auf die Bauorientierung als Parameter zur fertigungsseitigen Anpassung von Strukturen verwiesen, bspw. in Anbetracht verminderter Festigkeiten in Aufbaurichtung. Hinsichtlich der intralaminaren Füllstrategie wird indes jedoch meist auf Standardeinstellungen des Slicers in Form einer alternierenden  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung zurückgegriffen und damit das fertigungsseitige Potenzial einer Strukturanpassung nicht voll ausgeschöpft. Da es jedoch mit derartigen Verfahren möglich ist, innerhalb der Fertigungsebene komplexe, bspw. beanspruchungsspezifizierte Füllstrategien umzusetzen, wird eine hauptnormalspannungsorientierte Anpassung dieser als Option vorgeschlagen. Hierfür wird aufgezeigt, wie mithilfe einer numerischen Struktursimulation in Verbindung mit einem verschmiertem unidirektionalen Materialersatzmodell, iterativ auf Basis von Hauptnormalspannungen und deren korrespondierenden Richtungen, eine Füllstrategie abgeleitet und bewertet werden kann. Vor dem Hintergrund eines richtungsabhängigen Materialverhaltens soll damit sichergestellt werden, dass der Filamentverlauf möglichst der lokal dominierenden Hauptnormalspannung folgt und demzufolge das materialseitige Potenzial gegenüber einer Standardfüllstrategie besser ausgeschöpft wird. Zudem wird aufgezeigt, wie auf Basis dieser numerischen Berechnung der ermittelte Filamentverlauf, durch Kombination einer thermisch stationären Analyse und der Erstellung von einzelnen CAD-Körpern, auf einen Slicer zur Anfertigung übertragen werden kann.

Zur Überprüfung des Ansatzes werden in einem ersten Schritt Lochplatten mit unterschiedlichen Füllstrategien versehen, um das strukturmechanische Potenzial dieser Vorgehensweise, sowohl numerisch als auch anhand realer Proben, überprüfen zu können. Es wird eine alternierende  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung sowie eine  $[0^\circ]$ -Rasterfüllung einer hauptnormalspannungsorientierten Füllstrategie bezüglich des Struktursteifigkeits- und Festigkeitsverhaltens gegenübergestellt. Es zeigt sich sehr deutlich, dass ein beanspruchungsorientierter Filamentverlauf wesentliche Vorteile gegenüber einer alternierenden  $[\pm 45^\circ]$ -Rasterfüllung aufweist und dies auch bei stark inhomogenen Spannungszuständen, wie sie im Bereich der Kerbe der Lochplatte vorzufinden sind. Der Vergleich mit den numerischen Werten für die Struktursteifigkeit der unterschiedlichen Konfigurationen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Jedoch besteht aufgrund fertigungstechnischer Einschränkungen bei den hauptnormalspannungsorientierten Konfigurationen noch Verbesserungspotenzial. Hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens kann eine deutliche Steigerung der Versagensnennspannungen der berechneten Varianten gegenüber einer  $[\pm 45^\circ]$ - sowie  $[0^\circ]$ -Rasterfüllung festgestellt werden.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen muss die vorgestellte Methode auf zusätzliche strukturmechanische Anwendungen ausgeweitet werden. Gerade im Hinblick auf die Allgemeingültigkeit dieses Ansatzes bei 2,5D-FLM-Bauteilen ist dies von wesentlichem Interesse. Hierzu zählen zudem auch die Analyse weiterer Ausgangsmaterialien in Verbindung mit der vorgestellten Optimalitätsstrategie, bspw. unverstärkte oder endlosfaserverstärkte Thermoplaste, die im FLM-Verfahren verarbeitet werden. Hierdurch wäre es möglich, Empfehlungen zu formulieren, ab wann ein derartiges Vorgehen einer Standardfüllstrategie, entsprechend einer Aufwand-Nutzen-Analyse, vorzuziehen ist. Von Bedeutung ist dies nach momentanem Stand vor allem in Anbetracht der fertigungsseitigen Umsetzung der berechneten Füllstrategie innerhalb des Slicers. Hierbei wäre eine Schnittstelle zur Übertragung variabelaxialer Düsenpfade mit dynamischer Anpassung der Strangbreite von großem Vorteil, um bspw. fertigungsseitige Fehlstellen zu vermeiden.

## Literatur

- [1] Rodriguez, J.F.; Thomas, J.P.; Renaud, J.E. Design of fused-deposition ABS components for stiffness and strength  
Journal of Mechanical Design 125 (2003), S. 545-551  
DOI: 10.1115/1.1582499
- [2] Kulkarni, P.; Dutta, D. Deposition strategies and resulting part stiffnesses in fused deposition modeling  
Journal of Manufacturing Science and Engineering 121 (1999), S.93-103  
DOI: 10.1115/1.2830582
- [3] Somireddy, M.; Czekanski, A. Mechanical characterization of additively manufactured parts by FE modeling of mesostructure  
Journal of Manufacturing and Materials Processing 1 (2017) 18, S. 1-21  
DOI: 10.3390/jmmp1020018
- [4] Domingo-Espin, M.; Puigoriol-Forcada, J.M.; Garcia-Granada, A.A.; et al. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts  
Materials and Design 83 (2015), S. 670-677  
DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.074
- [5] Ahn, S.; Montero, M.; Roundy, S.; et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS  
Rapid Prototyping Journal 8 (2002), S. 248-257  
DOI: 10.1108/13552540210441166
- [6] Hung, B.; Singamneni, S. Raster angle mechanics in fused deposition modeling  
Journal of Composite Materials 49 (2015), S. 363-383  
DOI: 10.1177/0021998313519153
- [7] Kriechbaum, R. Ein Verfahren zur Optimierung der Faserverläufe in Verbundwerkstoffen durch Minimierung der Schubspannungen nach Vorbildern der Natur  
Dissertation am Kernforschungszentrum Karlsruhe, Universität Karlsruhe, 1994

- [8] Reuschel, J.D. Untersuchung der Faseranordnung natürlicher Faserverbunde und Übertragung der Ergebnisse auf technische Bauteile mit der Finiten-Elemente-Methode  
Dissertation am Forschungszentrum Karlsruhe, Universität Karlsruhe, 1999
- [9] Hyer, M.W.; Lee, H.H. The use of curvilinear fiber format to improve buckling resistance of composite plates with central circular holes  
Composite Structures 18 (1991), S. 239-261  
DOI: 10.1016/0263-8223(91)90035-W
- [10] Götz, K. Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde - eine lokale Approximation  
Dissertation am Forschungszentrum Karlsruhe Universität Karlsruhe, 2000
- [11] Klein, D.; Kieser, C.; Wartzack, S. Auslegung von CFK-Strukturen – ein neuer Ansatz  
Lightweight Design 9 (2016), S. 46-51  
DOI: 10.1007/s35725-016-0049-1
- [12] Spickenheuer, A. Zur fertigungsgerechten Auslegung von Faser-Kunststoff-Verbundbauteilen für den extremen Leichtbau auf Basis des variabelaxialen Fadenablageverfahrens Tailored Fiber Placement  
Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen Technische Universität Dresden, 2013
- [13] Khani, A.; Ijsselmuiden, S.T.; Abdalla, M.M.; et al. Design of variable stiffness panels for maximum strength using lamination properties  
Composites Part B: Engineering 42 (2011), S. 546-552  
DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.11.005
- [14] Parnas, L.; Oral, S.; Ceyhan, Ü. Optimum design of composite structures with curved fiber courses  
Composites Science and Technology 63 (2003), S. 1071-1082  
DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00312-3

- [15] Groh, R.M.J.; Weaver, P.M. Mass optimization of variable angle tow, variable thickness panels with static failure and buckling constraints  
56<sup>th</sup> AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (2015), S. 1-21  
DOI: 10.2514/6.2015-0452
- [16] Bittrich, L.; Spickenheuer, A.; Almeida Jr., J.H.S.; et al. Optimizing variable-axial fiber-reinforced composite laminates: the direct fiber path optimization concept  
Mathematical Problems in Engineering 2019 (2019), S. 1-11  
DOI: 10.1155/2019/8260563
- [17] Kwok, T.H.; Li, Y.; Chen, Y. A structural topology design method based on principal stress line  
Computer-Aided Design 80 (2016), S. 19-31  
DOI: 10.1016/j.cad.2016.07.005
- [18] Mark Tam, K.M.; Mueller, C.T. Additive manufacturing along principal stress lines  
3D Printing and Additive Manufacturing 4 (2017), S. 63-81  
DOI: 10.1089/3DP.2017.0001
- [19] Sales, E.d.S. Structural design using principal stress line for toolpath-based additive manufacturing  
Masterthesis am Department of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering  
Concordia University Montreal, 2013
- [20] Tekinalp, H.L.; Kunc, V.; Velez-Garcia, G.M.; et al. Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing  
Composites Science and Technology 105 (2014), S. 144-150  
DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.10.009
- [21] Kißling, A.; Beneke, F.; Seult, T. Determination of anisotropic material properties of carbon-fiber reinforced FDM-structures for numerical simulations  
ANTEC 2017 – Proceedings of the Technical Conference and Exhibition (2017), S. 27-34

- [22] Moldenhauer, H. Die orthotrope Wärmeleitung als numerischer Integrator allgemeiner Richtungsfelder mit Anwendung zur optimalen Faserplatzierung und Krafftflussvisualisierung  
Dissertation an der Fakultät Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016
- [23] Butzke, J. Verfahrenstechnische Weiterentwicklung des Fused Layer Manufacturing zur Reduzierung der Anisotropie im Bauteil  
Dissertation an der Fakultät III  
Technische Universität Berlin, 2018

### **Bibliography**

DOI 10.3139/O999.01022021  
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics  
Technology 17 (2021) 2; page 63–86  
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG  
ISSN 1864 – 2217

**Stichworte:**

**Additive Fertigung**, Fused Layer Manufacturing, Optimierung Füllstrategie, Hauptnormalspannungen, Lochplatten

**Keywords:**

**Additive Manufacturing**, Fused Layer Manufacturing, optimization filling strategy, principal normal stresses, perforated plates

**Autor / author:**

Alexander Kißling, M.Eng. (1. Autor)  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Seul (2. Autor) ...  
Labor für angewandte Kunststofftechnik (AKT)  
Fakultät Maschinenbau  
Hochschule Schmalkalden  
Blechhammer 4-9  
98574 Schmalkalden

E-Mail: [t.seul@hs-sm.de](mailto:t.seul@hs-sm.de)  
Webseite: [www.angewandte-kunststofftechnik.de](http://www.angewandte-kunststofftechnik.de)  
Tel.: +49 (0)3683/688-2103  
Fax: +49 (0)3683/688-982103

**Herausgeber / Editors:**

Editor-in-Chief

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein  
Lehrstuhl für Kunststofftechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Am Weichselgarten 9  
91058 Erlangen  
Deutschland  
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29703  
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709  
E-Mail: [ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de](mailto:ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de)

Europa / Europe

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, verantwortlich  
Lehrstuhl für Kunststofftechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Am Weichselgarten 9  
91058 Erlangen  
Deutschland  
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29700  
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709  
E-Mail: [drummer@lkt.uni-erlangen.de](mailto:drummer@lkt.uni-erlangen.de)

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald, verantwortlich  
Polymer Engineering Center, Director  
University of Wisconsin-Madison  
1513 University Avenue  
Madison, WI 53706  
USA  
Tel.: +1 608/263 9538  
Fax: +1 608/265 2316  
E-Mail: [osswald@enr.wisc.edu](mailto:osswald@enr.wisc.edu)

**Verlag / Publisher:**

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG  
Wolfgang Beisler  
Geschäftsführer  
Kolbergerstraße 22  
D-81679 München  
Tel.: +49 (0)89/99830-0  
Fax: +49 (0)89/98480-9  
E-Mail: [info@hanser.de](mailto:info@hanser.de)

**Redaktion / Editorial Office:**

Dr.-Ing. Eva Bittmann  
Jannik Werner, M.Sc.  
E-Mail: [redaktion@kunststofftech.com](mailto:redaktion@kunststofftech.com)

**Beirat / Advisory Board:**

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter  
[www.kunststofftech.com](http://www.kunststofftech.com)