

Konzept einer CAE-Methode zur systematischen Auslegung beanspruchungsgerechter, kurzfaserverstärkter AM-Fachwerksknoten für hochoptimierte Fachwerke

Concept of a CAE-based method for the optimisation and systematic design of lightweight short fibre reinforced, additively manufactured nodes for highly optimised truss systems

Michael Jäger^{1*}, Harald Völkl¹, Sandro Wartzack¹

¹ Engineering Design, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

* Korrespondierender Autor:

Michael Jäger
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Martensstraße 9
91058 Erlangen
Telefon: +49 9131 85-23215
Mail: jaeger@mfk.fau.de

Abstract

Trusses represent an economical, rigid and effective lightweight construction method. However, the connecting parts (nodes) between the struts are a design challenge, especially in highly optimized trusses. Several struts with different geometries (diameter, cross-sections) must be connected at any spatial angle in one point in a manner that is suitable for the load. The use of fibre-reinforced materials for the struts is common practice, for the nodes, metals are usually used. However, these do not exploit the full lightweight construction potential of the truss. The proposed method allows the design of truss nodes using fibre-reinforced materials and additive manufacturing, while taking into account the geometric boundary conditions of the connection points for the struts.

Keywords

Structural optimization, CFRP truss, lightweight design, short fibre reinforced plastics

1. Fachwerke als effektive Leichtbauweise

Fachwerke stellen eine wirtschaftliche, steife und effektive Leichtbauweise dar [1, 2]. Verbindungsteile zwischen den Streben – sogenannte Knoten – sind jedoch gerade bei hochoptimierten Fachwerken eine konstruktionstechnische Herausforderung: Mehrere Streben mit unterschiedlichen Geometrien (Durchmesser, Querschnittsform) müssen unter beliebigen Raumwinkeln in einem Punkt belastungsgerecht verbunden werden. Die Verwendung von faserverstärkten Materialien für die Streben ist hierbei gängige Praxis und bei diversen Herstellern kommerziell verfügbar. Für die Knoten werden jedoch meist Metalle (Aluminium, Titan etc.) verwendet, welche spanend oder urformend, selten additiv gefertigt werden. Diese schöpfen nicht das volle Leichtbaupotential der Fachwerksknoten aus, wie es mit additiv gefertigten faserverstärkten Materialien möglich wäre.

2. Forschungsproblem und Forschungsziel

Im vorliegenden Beitrag wird eine CAE-Methode zur systematischen Erzeugung geometrisch komplizierter Fachwerksknoten entwickelt und vorgestellt. Die hohen Gestaltungsfreiheiten, die durch additive Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing, AM) ermöglicht werden [3], prädestinieren die additive Fertigung für die Herstellung der Knoten. Speziell das Verfahren Fused Layer Modelling (FLM) ermöglicht ein besonders hohes Leichtbaupotenzial. Hiermit können faserverstärkte Materialien verarbeitet werden, die eine Steigerung der Steifigkeit und Festigkeit des erzeugten Bauteils um ein Vielfaches [4] gegenüber unverstärktem Filament ermöglichen. Damit einher geht jedoch die Herausforderung, dass die erzeugten Faser-Kunststoff-Verbundbauteile (FKV-Bauteile) hoch anisotrope Eigenschaften aufweisen, Orthotropiegrade (Längs-zu-Quereigenschaften in Steifigkeit und Festigkeit) liegen hierbei im Bereich von 2-5 in der Druckebene und bis zu 10 [5] in Schichtaufbauichtung.

Somit ist das Forschungsziel gegeben: Wie lassen sich Fachwerks-, Optimierungs- und Verfahrensanforderungen für Knoten in hochoptimierten Fachwerken vereinen? Welches Leichtbaupotenzial kann damit ausgeschöpft werden – etwa im Vergleich zu rein isotropen Knoten?

3. Stand der Forschung und Technik

3.1. Fachwerksoptimierung

Bei der Topologieoptimierung (TO) von Fachwerken handelt es sich um eine diskrete Strukturoptimierungsaufgabe [6]. In der Regel wird hierbei von einer Grundstruktur (*engl. ground structure*) mit festen Punkten – und damit fest definierten Winkeln zwischen den Streben – ausgegangen, siehe Bild 1. Der Aufbau der Grundstruktur hat hierbei erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der Optimierung [7].

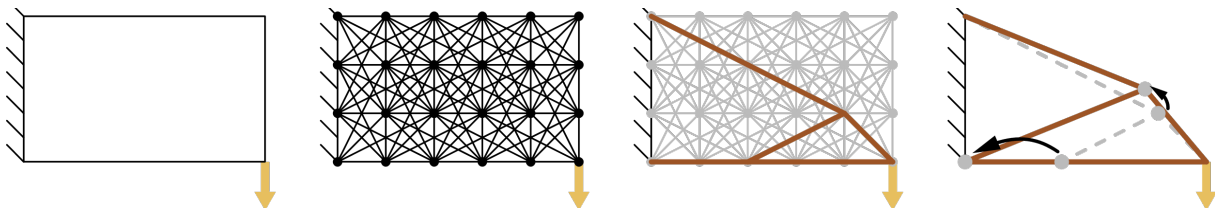


Bild 1: Beispiel - Grundstruktur, Querschnittsoptimierung der Streben, Lageoptimierung der Knoten

Eine feinere Grundstruktur führt i.d.R. auch zu einem besseren Ergebnis [6], resultiert jedoch in einer deutlich höheren Anzahl an potentiellen Streben [8] und somit deutlich höherem Berechnungsaufwand. Durch eine nachgelagerte Optimierung der Lage der Knotenpunkte,

siehe Bild 1 rechts, kann ein sehr effizientes Design gefunden werden [7], ohne dass die Verwendung einer sehr feinen Grundstruktur notwendig ist. Dies resultiert jedoch in beliebigen Winkeln zwischen den Streben des Fachwerks, vor allem im dreidimensionalen Raum.

3.2. Kraftflussgerechte Bauteile durch Additive Fertigung

Fachwerksknoten unterliegen multiaxialen Spannungszuständen, die aus der geometrischen Anordnung der Anbindungsstellen und der dort vorherrschenden Belastungsart resultieren. Je nach Verwendung des Fachwerks kann die Beanspruchung innerhalb der Fachwerksknoten hoch sein, was die Randbedingungen für die Materialauswahl und damit auch die Fertigungsart vorgibt. Besonders geeignet für hohe Beanspruchungen sind einerseits Metalle wie Stahl und Aluminium, andererseits Faser-Kunststoff-Verbunde [9]. Letztere weisen eine besonders hohe massespezifische Steifigkeit und Festigkeit und damit ein besonders hohes Leichtbaupotenzial auf. Betrachtet man die komplizierte Geometrie optimierter Fachwerke (Kapitel 3.1), erscheint zudem AM als geeignete Fertigungstechnologie aufgrund ausgeprägter Designfreiheiten [3]. Ein Zusammenbringen von FKV und AM gelingt mittels verschiedener Verfahren [10]:

- **Laminated Object Manufacturing** (LOM), sequenziellem Ablegen und Verbinden von ausgeschnittenen Halbzeugschichten – etwa unidirektionalen Prepregs;
- **Stereolithografie** (SL), mit lokalem Aushärten von faserverstärkten Photopolymerharz;
- **Lasersintern** (LS), mit lokalem Aushärten von faserverstärktem Polymerpulver; und
- **Fused Layer Modelling** (FLM), dem schichtweisen Ablegen einzelner Extrusionsstränge („beads“) aus einer Kunststoff-Extrusionsdüse unter Verwendung von faserverstärktem Filament.

Besonders vorteilhaft erscheint hierbei das FLM-Verfahren, da es eine gezielte lokale Ausrichtung der Fasern mit über 90 % in Extrusionsstrangrichtung [4] erlaubt. Eine solche Ausrichtung ermöglicht eine sehr gute Ausnutzung der hohen Orthotropiegrade des kurzfaserverstärkten Materials in der Größenordnung von 2-5 in Längs- zu Quersteifigkeit und -festigkeit in der Druckebene [5]. Gezielte Ausrichtung ist bei den anderen Verfahren schwierig – so erlauben unidirektionale Prepregs bei LOM zunächst nur schichtweise Anpassung der Faserorientierung; Stereolithografie benötigt zur Ausrichtung Ultraschall und zeigt Probleme aufgrund der Lichtundurchlässigkeit von Kohlefasern (unausgehärtete Bereiche). Lasersintern weist vor allem lange Prozesszeiten und die Notwendigkeit zur Vorbehandlung der Fasern für eine gleichmäßige Verteilung im Pulver auf. [10]

Bild 2 zeigt den FLM-Prozess während des Drucks eines Bauteils aus PETG-CF20 (mit 20 Gewichtsprozent Kurzkohlefaser verstärktes PETG-Filament) und das Maschinenkoordinatensystem, auf welches im Folgenden Bezug genommen wird.



Bild 2: Druckerachsrichtungen am Raise3D Pro2 Plus beim Druck von kurzfaserverstärktem Filament.

Die Verwendung von sowohl Kurz- als auch Endlosfasern bei FLM ist möglich, wobei in der vorliegenden Arbeit auf Kurzfasern zurückgegriffen wird. Der Einsatz kurzfaserverstärkten Filaments erfordert nur geringe Umbauten an bestehenden FLM-Druckern, Filamente und Drucker sind weithin verfügbar. Jedoch werden auch bereits mit Endlosfasern erste AM-Maschinen vertrieben [11–13]. Von Nachteil ist der sehr hohe Orthotropiegrad zwischen E-Moduln und Festigkeiten in XY-Ebene (Druckebene) und Z-Richtung (entlang der Druckerhochachse) – beispielsweise eine zehnfach reduzierte Festigkeit zwischen den Schichten bei 13 Gewichtsprozent ABS-CF gegenüber in der Druckebene belasteten Proben in [14]). Dies erfordert besondere Berücksichtigung im Sinne eines restriktiven *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) [15].

Solche Berücksichtigung erfolgt beispielsweise durch **Baurichtungsoptimierung** [16–20], die jedoch bisher hauptsächlich für verschiedene Zwecke wie die Vermeidung häufiger Materialwechsel, den effizienten Druck mehrerer Bauteile und Stützstrukturminimierung eingesetzt wird. Im Ansatz dieser Arbeit wird dagegen eine Baurichtungsorientierung vorgenommen, die möglichst ebenen Krafftfluss bevorzugt und damit den Einfluss der schlechteren Zwischenschichtfestigkeiten und -steifigkeiten minimieren soll.

Weitere Berücksichtigung der Orthotropie wird durch simultane Gesamtgestalt- und Mikrostrukturoptimierung ermöglicht [21–27]. So lassen sich optimierte Materialorientierungen finden, also die Basis für spätere Infill-Extrusionspfade. Gleichzeitig erfolgt die Optimierung der Außengeometrie wie bei einer konventionellen **Topologieoptimierung**, nur unter *gleichzeitiger* Berücksichtigung der lokalen Orthotropie. Die Nutzung dieser Verfahren erlaubt eine Gestaltfindung für die hier angestrebten krafftflussgerechten Fachwerksknoten.

3.3. Strukturmechanische Berechnung der Knoten

Bei der Auslegung der Knoten muss zwischen Berechnungsmethoden der AM-Optimierung des Bauraums und der Anschlussstellen unterschieden werden. Da die Anschlussstellen keinen direkten Einfluss auf die zu übertragenden Lasten des Knotens haben, können diese unabhängig von der eigentlichen Optimierung ausgelegt und auch ggfs. nachträglich ausgetauscht werden.

3.3.1. FLM-gefertigte Fachwerksknoten

Die aus einer AM-Optimierung entstehenden Bauteile (Kapitel 3.2) sind aufgrund ihrer weitgehend freien Formgebung, des idealerweise lastpfadoptimierten Infills und der orthotropen Materialeigenschaften aufwändig in der Simulation. Verschiedene Ansätze zur Simulation wurden vorgeschlagen und zusammengefasst in [10]:

- Die Anwendung von Berechnungstheorien aus dem Spritzguss mit **kurzfaserverstärkten** Polymeren wie der Modified Rule of Mixture (MROM);
- Die Anwendung von Berechnungstheorien für endlosfaserverstärkte Lamine, insbesondere der **Klassischen Laminattheorie** (CLT), was besondere Vorteile bei der Berücksichtigung der Leerstellendichte mit sich bringt [28]; und
- **Finite-Elemente**-basierte Methoden mit homogenisierten Materialmodellen oder Einheitszellen-Ansätzen.

Der ausgeprägte Einfluss von FLM-Fertigungsparametern auf die mechanischen Eigenschaften, beispielsweise gezeigt in [29], stellt zudem besondere Anforderungen an FE-Materialmodelle hinsichtlich der Betrachtung von Steifigkeit und Festigkeit. Eine experimentelle Bestimmung des Materialmodells für bestimmte Parameterkombinationen und insbesondere Fasergewichtsanteile wird häufig vorgenommen [5, 30–32].

3.3.2. Gestaltung der Knotenanbindung

Für die kraftflussgerechte Verbindung der Fachwerksknoten mit den Streben bieten sich aufgrund der dünnwandigen Strebengeometrie geschlossene Überlappungsverbindungen an. Denkbare Wirkmechanismen zur Kraft- bzw. Momentübertragung zwischen AM-gefertigten Knoten und aus Endlosfaser gewickelten CFK-Streben sind unter anderem:

- **Klebeverbindungen** unter Verwendung des Punktinjektionsverfahrens am Ringspalt, welches eine signifikant höhere Lastübertragung ermöglicht, als Klebstoffauftrag und anschließendes axiales Fügen [33, 34];
- **Nietverbindungen;**
- Eine **Hybridlösung** von Klebeverbindung mit nachträglich eingebrachten Nieten, welche sowohl die Traglast der Verbindung um bis zu 70% erhöht [35], als auch eine um bis zu Faktor 3 erhöhte Ermüdungsfestigkeit aufweist [36].

Entsprechend dem verwendeten Fügeverfahren sind unterschiedliche geometrische Anforderungen an die Überlappverbindung zu stellen. Bei Klebeverbindungen müssen geeignet dimensionierte Klebespalte und Zentrierflächen vorgesehen werden, bei Nietverbindungen die Nietlöcher und bei der Hybridverbindung muss die Einbringung der Nietlöcher auch nach dem Kleben möglich sein.

4. Überblick über die Anforderungen und Umsetzung der Methode zur systematischen Auslegung von Fachwerksknoten

Bild 3 zeigt einen Überblick über die vorgeschlagene Methode zur Gestaltung der Fachwerksknoten. Es lassen sich aus dem Stand der Technik drei Anforderungskategorien identifizieren:

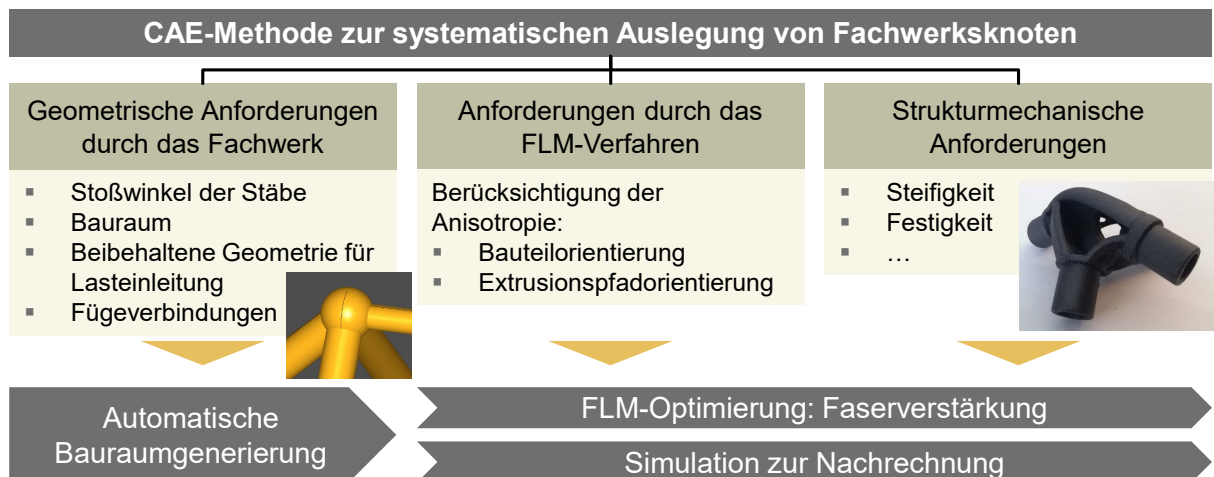


Bild 3: Aufbau der vorgeschlagenen Methode

- **Geometrische Anforderungen durch die Fachwerkgeometrie**, etwa Stoßwinkel und Anzahl der Streben; verbleibender Bauraum zwischen den Streben; beizubehaltende Geometrie für Fügeverbindungen an den Lasteinleitungspunkten in den Knoten;
- **Verfahrensbedingte Anforderungen**, die sich einerseits aus den anisotropen Bauteileigenschaften ergeben, wie sie durch die Ausrichtung der Kurzfasern im FLM-Druckkopf und den schichtweisen Aufbau entstehen; und andererseits die Verfahrensanforderungen, die sich aus der maximal möglichen Druckauflösung ergeben, etwa minimale Wandstärken;

- Und die **strukturmechanischen Anforderungen**, die sich aus der Belastung des Tragwerks ergeben – hierbei dürfen die Knoten und Knotenanbindungen in Steifigkeit und Festigkeit nicht versagen.

Die Anforderungen sollen durch entsprechende Ableitungs- und Optimierungsmethoden erfüllt werden. Eine automatische Bauraum- und Anschlussgeometriegenerierung liefert die Grundlage für eine Bauteil-Orientierungsoptimierung, um die schwache Zwischenschichtenhaftung im FLM-Druck zu berücksichtigen. Die Orientierung, Geometrien und Lasten der beiden Schritte bilden die Basis für die nachfolgende TO mit orthotropem Materialmodell, aus welcher die finale Knotenaußengeometrie abgeleitet wird. Der innere Verlauf der Extrusionspfade für das kurzfaserverstärkte Material („Infill“) wird ausgehend von der optimierten Materialorientierung bestmöglich mit Slicer-Software approximiert.

4.1. Geometrische Anforderungen durch das Fachwerk

Die durch die Fachwerksoptimierung (Kapitel 3.1) festgelegten geometrischen Anforderungen, wie die Position der Knoten, Anzahl der Streben am jeweiligen Knoten und die Stoßwinkel, werden durch die Anforderungen aus der Wahl der Streben ergänzt. Im vorliegenden Fall werden die Streben aus gewickelten, endlosfaserverstärkten kreiszylindrischen CFK-Rohren ausgeführt. Als Anschlussgeometrie wird der Innendurchmesser der Rohre gewählt. Somit muss an den jeweiligen Anschlusspunkten an den Knoten eine kreiszylindrische Fläche berücksichtigt werden. Je nach verwendetem Fügeverfahren (Kapitel 3.3.2) ergeben sich hier unterschiedliche Anschlussgeometrien, welche nach der TO der Knoten, siehe Kapitel 4.2, weiterhin vorhanden sein müssen. Diese sind beispielhaft in Bild 4 dargestellt.

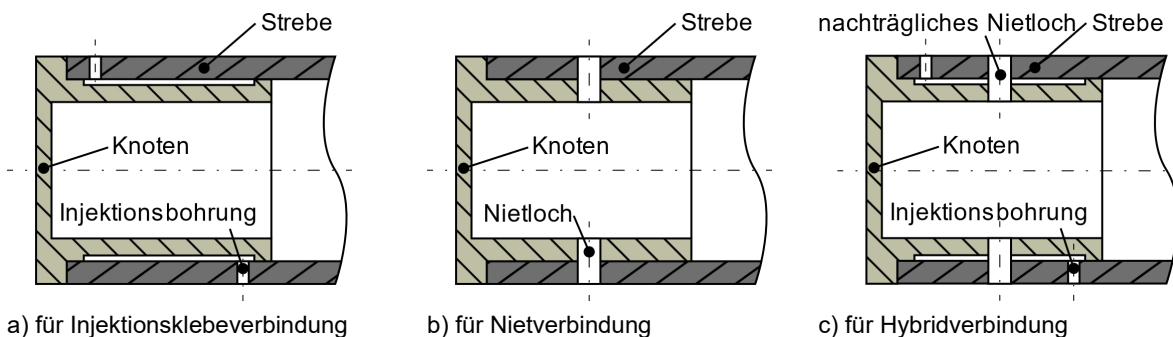


Bild 4: Anschlussgeometrie

4.2. Baurichtungs- und Topologieoptimierungsansatz für FLM-Verfahren

Bild 5 gibt einen Überblick über die Baurichtungs- und Topologieoptimierung mit orthotropem Materialmodell, welche die oben geschilderten Anforderungen für kurzfaserverstärkte FLM-Bauteile – Ausnutzung des vorteilhaften Orthotropiegrades in Extrusionsrichtung, Vermeidung von hoher Beanspruchung quer dazu unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Fertigungsanforderungen – integrieren soll.

Die **Baurichtungsoptimierung** dient dazu, den Kraftfluss (Hauptnormalspannungstrajektorien) möglichst in die Druckebene zu bringen. Beide Baurichtungen in Bild 5 erlauben eine Fertigung ohne Stützstruktur, jedoch bietet die Anordnung im Bild unten eine Aufnahme der Biegebeanspruchung innerhalb und nicht zwischen den Schichten. Das Vorgehen hierfür erfolgt durch Lösung eines mathematischen Optimierungsproblems, welches den Differenzwinkel zwischen Drucker-z-Achse und den Hauptspannungstrajektorien möglichst nahe 90° einstellt, indem die z-Achse variiert wird.

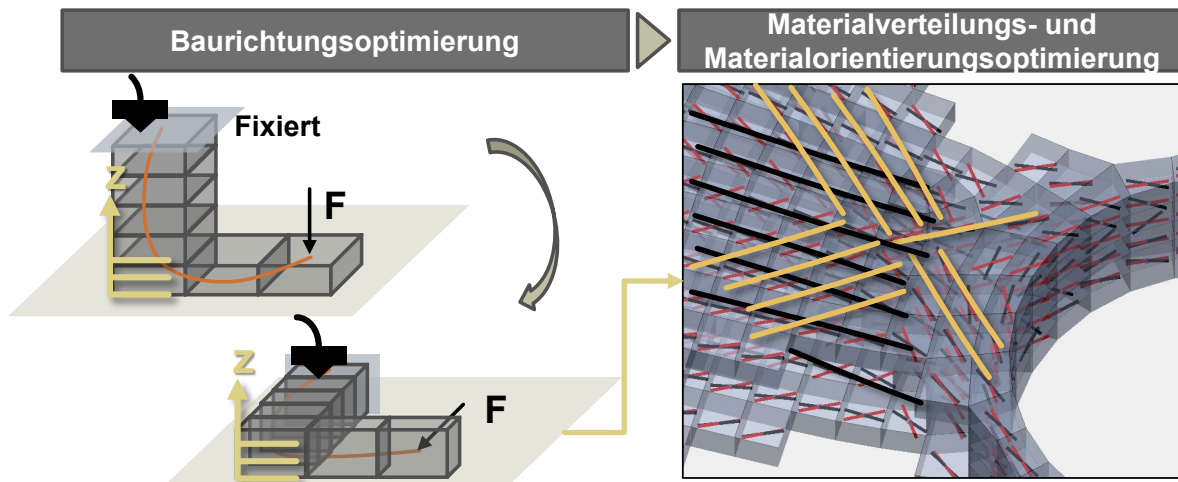


Bild 5: Baurichtungs- und Topologieoptimierung

Die **Materialverteilungs- und Materialorientierungsoptimierung** erfolgt mit einer erweiterten Version des TO-Algorithmus aus [26]. Eine schichtweise Materialorientierungsoptimierung mit Projektion der Hauptnormalspannungstrajektorien in die Druckebene, schwarze und rote Pfeile in Bild 5 rechts, ermöglicht die Berücksichtigung der verringerten Steifigkeit in Querrichtungen. Die diskreten Materialorientierungen können später zu Extrusionspfaden zusammengefasst werden, angedeutet durch gelbe und schwarze Linien. Die Materialverteilung erfolgt unter Berücksichtigung mehrerer Lastfälle nach dem Prinzip des lokal maximalen Lastfalls wie in [37] beschrieben. Eine homogene Dehnenergie-dichte-Verteilung wird angestrebt.

5. Ergebnisse und Diskussion

Das vorgeschlagene Vorgehen soll anhand eines exemplarischen Fachwerkknotens durchgeführt werden. Hierbei erfolgt die Ableitung eines Bauraums; die Optimierung unter Berücksichtigung von Anschlussgeometrie- und Fertigungsrandbedingungen; die Rückführung der Geometrie in CAD; und abschließend der FLM-Druck des Knotens unter Verwendung von kurzfaserverstärktem PETG-CF20-Filament. Der so erzeugte Knoten kann als Prüfobjekt für spätere experimentelle Untersuchungen dienen. Aus der Anwendung der Methode werden Verbesserungs- und Erweiterungspotenziale abgeleitet.

5.1. Überführung in Bauraumgeometrie und FLM-Optimierung

Aus der Fachwerksoptimierung werden lokale Kräfteinleitungen und ein kugelförmiger Bauraum gewonnen. Informationen über anliegende Kräfte liegen ebenfalls vor. Aus diesen Eingaben wird unter Nutzung eines entsprechenden FLM-Materialmodells durch die TO ein Designvorschlag generiert, der dann in CAD-Geometrie rückgeführt werden kann. Bild 6 zeigt den Optimierungsprozess.

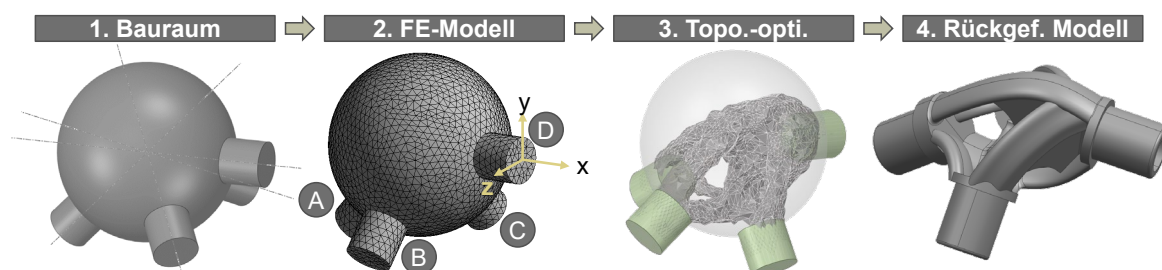


Bild 6: Optimierung des Fachwerkknotens

Der Bauraum enthält Achsen der Kräfteinleitungen, die sich in einem Punkt schneiden (Bild 6, Schritt 1). Die Kräfteinleitungen sind hier noch als einfache Zylinder modelliert und werden später durch die ausmodellierten Zapfen ersetzt. Für diesen Knoten werden an den Zylindern A, B, C und D in einem FE-Modell die aus dem Fachwerk entstehenden Kräfte simuliert eingeleitet, Schritt 2. Das entstehende FE-Modell wird der **TO** mit FLM-FKV-Materialmodell unter Berücksichtigung einer vorab erfolgten **Baurichtungsoptimierung** übergeben, hieraus entsteht das optimierte Bauteil, Schritt 3. Am Ende folgt eine, hier manuelle, Rückführung in CAD-Geometrie, die in Schritt 4 dargestellt ist.

Die Baurichtungsoptimierung ergibt als Baurichtung (Drucker-z-Achse) die in Schritt 2 dargestellte z-Achse (der Knoten „liegt auf der Seite“). Entsprechend wird in der Slicer-Software die Orientierung des Bauteils eingestellt. Als Infill-Muster wird „Concentric“, also eine regelmäßige Verschiebung der Konturen nach innen gewählt, da dessen Verläufe die Hauptspannungsverläufe gut annähern können. Die Druckvorbereitung mit Hauptspannungsverläufen zum Vergleich und das gedruckte Bauteil zeigt Bild 7.

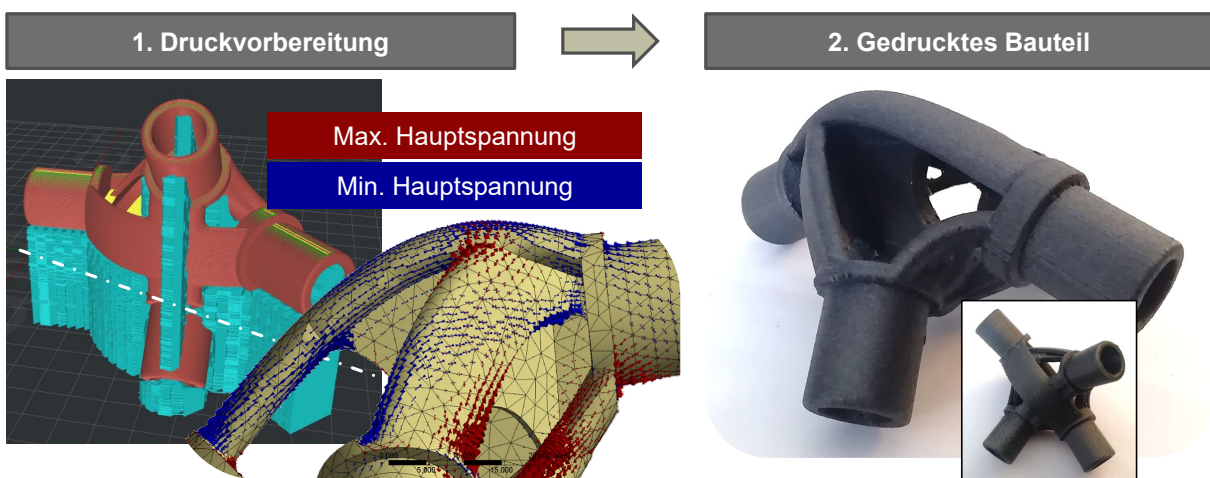


Bild 7: Von der Druckvorbereitung zum Bauteil

5.2. Verbesserungs- und Erweiterungspotenzial der Knotenanbindungen

Im Folgenden soll die Überlappklebeverbindung nach Bild 4a genauer betrachtet werden. Ausgehend nach SCHÜRMANN ist das Steifigkeitsverhältnis der Füge­teile $\psi = (E_1 t_1) / (E_2 t_2)$ und das Schubmodul des Klebers für die Ausbildung von Spannungsspitzen an der Klebestelle entscheidend [36]. In Bild 8 ist der Schichtaufbau von Zapfen D (Bild 6) im Schnitt dargestellt. Da das Material einen sehr großen Orthotropiegrad ausweist (siehe Kapitel 3.2), variiert die Steifigkeit der Zapfenwandung über den Umfang sehr stark.

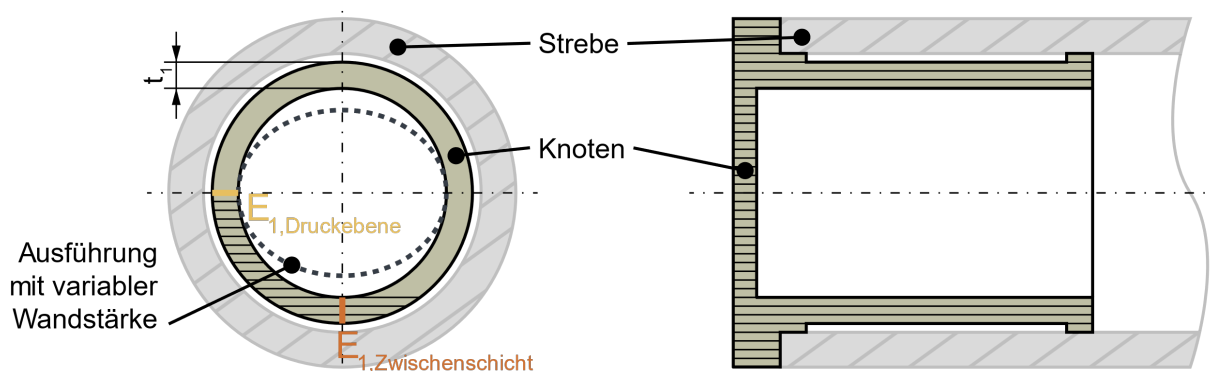


Bild 8: Idee zur Anpassung des Steifigkeitsverhältnisses der Füge­teile zur Minimierung von Spannungsspitzen

Um zu beurteilen, inwieweit diese lokale Steifigkeitsänderung lokale Spannungsspitzen erzeugt und zu vorzeitigem Bauteilversagen bzw. zum Versagen der Fügeverbindung führen, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Zur Verringerung der Spannungsspitzen wird ein lokales Anpassen der Wandstärke vorgeschlagen, jedoch fehlen bisher geeignete Methoden, um die lokale Wandsteifigkeit für beliebige Raumwinkel (z.B. Zapfen B aus Bild 6) unter Beachtung der Druckpfade und der Zwischenschichthaftung ermitteln zu können.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ein neuer Ansatz zur kraftflussgerechten Auslegung von additiv gefertigten FKV-Fachwerkknoten wurde vorgeschlagen. Dieser integriert die Fachwerkoptimierung; eine davon ausgehende Bauraumgenerierung und Lastableitung für die Knoten, welche wiederum als Ausgangspunkt für eine FLM-gerechte Baurichtungs- und die Orthotropie beachtende Topologieoptimierung dienen; und die möglichst steife und feste Ausgestaltung von Klebeverbindungen zwischen den gewickelten CFK-Rohren und den kurzfaserverstärkten Knoten. Offene Forschungsfragen betreffen unter anderem die detaillierte Gestaltung der Anbindungsstellen, etwa als Kleb-, Niet- oder Hybridverbindung mit variabler Wanddicke; die Gesamtberechnung eines solchen Fachwerks mit der Interaktion von Rohren, Klebeverbindungen und FKV-Knoten. Auch die Robustheit solcher Fachwerke sowie die präzise Nachrechnung von FLM-Knoten bedürfen intensiver Forschung.

Danksagung

Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Fördernummer ZF4222610PO8.

Literaturverzeichnis

- [1] PASTERNAK, Hartmut ; HOCH, Hans-Ullrich ; FÜG, Dieter: *Stahltragwerke im Industriebau*. [Elektronische Ressource]. Hoboken, NJ, Berlin : Wiley; Ernst, 2010
- [2] KLEIN, D.: *Ein simulationsbasierter Ansatz für die beanspruchungsgerechte Auslegung endlosfaserverstärkter Faserverbundstrukturen*. Erlangen-Nürnberg, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Ph.D. thesis. 2017
- [3] THOMPSON, Mary Kathryn ; MORONI, Giovanni ; VANEKER, Tom ; FADEL, Georges ; CAMPBELL, R. Ian ; GIBSON, Ian ; BERNARD, Alain ; SCHULZ, Joachim ; GRAF, Patricia ; AHUJA, Bhrihu ; MARTINA, Filomeno: *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*. In: *CIRP Annals* 65 (2016), Nr. 2, S. 737–760
- [4] TEKINALP, Halil L. ; KUNC, Vlastimil ; VELEZ-GARCIA, Gregorio M. ; DUTY, Chad E. ; LOVE, Lonnie J. ; NASKAR, Amit K. ; BLUE, Craig A. ; OZCAN, Soydan: *Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing*. In: *Composites Science and Technology* 105 (2014), S. 144–150
- [5] BRENKEN, Bastian ; BAROCIO, Eduardo ; FAVALORO, Anthony ; KUNC, Vlastimil ; PIPES, R. Byron: *Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review*. In: *Additive Manufacturing* 21 (2018), S. 1–16
- [6] PFEIFFER, Friedrich ; RAMMERSTORFER, Franz G. ; GUAZZELLI, Elisabeth ; SCHREFLER, Bernhard ; SERAFINI, Paolo ; ROZVANY, George I. N. ; LEWIŃSKI, Tomasz: *Topology Optimization in Structural and Continuum Mechanics*. Vienna : Springer Vienna, 2014 (549)
- [7] BENDSØE, M. P. ; BEN-TAL, A. ; ZOWE, J.: *Optimization methods for truss geometry and topology design*. In: *Structural Optimization* 7 (1994), Nr. 3, S. 141–159
- [8] PRITCHARD, T. ; GILBERT, M. ; TYAS, A.: *Plastic Layout Optimization of Large-Scale Frameworks Subject to Multiple Load Cases, Member Self-Weight and with Joint Length Penalties*. In: , 2005
- [9] KLEIN, Bernd: *Leichtbau-Konstruktion : Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 9., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2011. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012
- [10] PARANDOSH, Pedram ; LIN, Dong: *A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites*. In: *Composite Structures* 182 (2017), S. 36–53
- [11] ANISOPRINT SARL: *Stop metal thinking > Start anisoprinting*. URL <https://anisoprint.com/> – Überprüfungsdatum 2020-06-23
- [12] MARKFORGED, Inc.: *Mark Two Desktop Printer*. URL <https://markforged.com/mark-two/> – Überprüfungsdatum 2020-01-03

- [13] 9T LABS: *9T Labs | Digital Composite Production*. URL <https://www.9tlabs.com/> – Überprüfungsdatum 2020-06-23
- [14] LOVE, Lonnie J. ; KUNC, Vlastamil ; RIOS, Orlando ; DUTY, Chad E. ; ELLIOTT, Amelia M. ; POST, Brian K. ; SMITH, Rachel J. ; BLUE, Craig A.: *The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing*. In: *Journal of Materials Research* 29 (2014), Nr. 17, S. 1893–1898
- [15] KUMKE, Martin: *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- [16] ULU, Erva ; KORKMAZ, Emrullah ; YAY, Kubilay ; BURAK OZDOGANLAR, O. ; BURAK KARA, Levent: *Enhancing the Structural Performance of Additively Manufactured Objects Through Build Orientation Optimization*. In: *Journal of Mechanical Design* 137 (2015), Nr. 11, S. 111410
- [17] ZHANG, Yicha ; BACKER, Wout de ; HARIK, Ramy ; BERNARD, Alain: *Build Orientation Determination for Multi-material Deposition Additive Manufacturing with Continuous Fibers*. In: *Procedia CIRP* 50 (2016), S. 414–419
- [18] ZWIER, Marijn P. ; WITS, Wessel W.: *Design for Additive Manufacturing: Automated Build Orientation Selection and Optimization*. In: *Procedia CIRP* 55 (2016), S. 128–133
- [19] MI, Sheng-li ; WU, Xiao-yue ; ZENG, Long: *Optimal build orientation based on material changes for FGM parts*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94 (2018), 5-8, S. 1933–1946
- [20] ZHANG, Yicha ; BERNARD, Alain ; HARIK, Ramy ; KARUNAKARAN, K. P.: *Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing*. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 28 (2017), Nr. 6, S. 1393–1407
- [21] CHARLES DAPOGNY ; RAFAEL ESTEVEZ ; ALEXIS FAURE ; GEORGIOS MICHAILIDIS: *Shape and topology optimization considering anisotropic features induced by additive manufacturing processes*
- [22] JIANG, D. ; SMITH, E.: *Topology optimization for 3d material distribution and orientation in additive manufacturing*. In: *Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference*, 2017, S. 2236–2249
- [23] MIRZENDEHDEL, A. ; RANKOUHI, B. ; SURESH, K.: *Topology Optimization of Anisotropic Components for Additive Manufacturing*. In: *Simulation for Additive Manufacturing*, 2017
- [24] ROBERT M. HOGLUND, DOUGLAS SMITH: *Non-isotropic Material Distribution Topology Optimization for Fused Deposition Modeling Products*. In: *Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium : An Additive Manufacturing Conference*, 2015, S. 888–903
- [25] ZEGARD, Tomás ; PAULINO, Glaucio H.: *Bridging topology optimization and additive manufacturing*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 53 (2016), Nr. 1, S. 175–192
- [26] VÖLKL, Harald ; KLEIN, Daniel ; FRANZ, Michael ; WARTZACK, Sandro: *An efficient bionic topology optimization method for transversely isotropic materials*. In: *Composite Structures* 204 (2018), S. 359–367
- [27] NOMURA, T. ; DEDE, Ercan M. ; MATSUMORI, T. ; KAWAMOTO, A.: *Simultaneous Optimization of Topology and Orientation of Anisotropic Material using Isoparametric Projection Method*. In: Qing Li, Grant P. Steven and Zhongpu (Leo) Zhang (Eds) (Hrsg.): *Proceedings of the 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2015, S. 728–733
- [28] LI, L. ; SUN, Q. ; BELLEHUMEUR, C. ; GU, P.: *Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties*. In: *Journal of Manufacturing Processes* 4 (2002), Nr. 2, S. 129–141
- [29] EUJIN PEI ; LANZOTTI, Antonio ; GRASSO, Marzio ; STAIANO, Gabriele ; MARTORELLI, Massimo: *The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer*. In: *Rapid Prototyping Journal* 21 (2015), Nr. 5, S. 604–617
- [30] AHN, Sung-Hoon ; MONTERO, Michael ; ODELL, Dan ; ROUNDY, Shad ; WRIGHT, Paul K.: *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. In: *Rapid Prototyping Journal* 8 (2002), Nr. 4, S. 248–257
- [31] BELLINI, Anna ; GÜÇERİ, Selçuk: *Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling*. In: *Rapid Prototyping Journal* 9 (2003), Nr. 4, S. 252–264
- [32] KOVAN V. ; TEZEL, T. ; CAMURLU H.E. ; TOPAL E.S.: *Effect of printing parameters on mechanical properties of 3D printed PLA/carbon fibre composites*. In: *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations*. 4 (2018), Nr. 4, S. 126–128
- [33] SIEBERT, Marc: *Untersuchung der mechanischen Eigenschaften injektionsgefügter Rundsteckverbindungen*. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2006. Aachen : Shaker, 2006 (Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel)
- [34] ALBIEZ, Matthias Friedrich: *Zur statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Karlsruher Institut für Technologie. Dissertation. 2016.
- [35] PRAMANIK, A. ; BASAK, A. K. ; DONG, Y. ; SARKER, P. K. ; UDDIN, M. S. ; LITTLEFAIR, G. ; DIXIT, A. R. ; CHATTOPADHYAYA, S.: *Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review*. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 101 (2017), S. 1–29
- [36] SCHÜRMANN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (VDI-Buch)
- [37] HARZHEIM, Lothar: *Strukturoptimierung : Grundlagen und Anwendungen*. 1. Aufl. Frankfurt am Main : Deutsch, 2008