

# Realisierung eines funktional determinierten Produktentstehungsprozesses für die roboterbasierte additive Fertigung

## Realization of a functionally determined product development process for robot-based additive manufacturing

Mark Witte\*, Markus Schmitz\*, Ruben Grunau\*, Jan Wiartalla\*, Burkhard Corves\*, Mathias Hüsing\*, Wilko Natzel\*\*, Thilo Zerwas\*\*, Julius Nehring-Wirxel\*\*\*, Leif Kobbelt\*\*\*

\*RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, Eilfschornsteinstraße 18, 52062 Aachen, Deutschland

{witte, schmitzm, grunau, wiartalla, corves, huesing}@igmr.rwth-aachen.de

\*\*RWTH Aachen University, Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung, Schinkelstraße 10, 52062 Aachen, Deutschland

{wilko.natzel, thilo.zerwas}@imse.rwth-aachen.de

\*\*\*RWTH Aachen University, Visual Computing Institute, Lehrstuhl für Informatik 8, Ahornstraße 55, 52074 Aachen {nehring-wirxel, kobbelt}@cs.rwth-aachen.de

### Kurzfassung

Die additive Fertigung (AF) bietet die Möglichkeit, komplexere Geometrien als mit herkömmlichen Herstellungsverfahren zu fertigen. Das meistverbreitete Verfahren ist dabei das Fused Layer Manufacturing (FLM). Bei diesem Verfahren wird Material in parallelen Schichten aufgetragen, wodurch sich anisotrope Festigkeitseigenschaften im Bauteil ergeben. In diesem Beitrag wird das Projekt FunkDAF der RWTH Aachen vorgestellt, in dem ein vollständiger Produktentstehungsprozess bestehend aus Konstruktion, Prozessverarbeitung und Fertigung entwickelt wird. Dabei soll das FLM-Verfahren zu einer 6-dimensionalen schichtlosen AF weiterentwickelt werden. Über Ansätze des Generative Design wird in der Konstruktion ein Bauteil basierend auf Wirkflächen und Leitstützstruktur erzeugt. In der folgenden Prozessvorbereitung werden aus dem Bauteil unter Berücksichtigung von Belastungen kraftpfadoptimierte Extrusionstrajektorien für die Fertigung berechnet. In der Fertigung wird das Bauteil mit den Extrusionstrajektorien durch einen 6D-Handhabungsprozess gefertigt. In diesem Beitrag wird eine erste prototypische Implementierung der Prozesskette vorgestellt und Anforderungen an die Schnittstellen des Prozesses abgeleitet.

### Abstract

Additive manufacturing (AM) offers the possibility of producing more complex geometries than with conventional manufacturing processes. The most widely used process is fused layer manufacturing (FLM). In this process, material is applied in parallel layers, resulting in anisotropic strength properties in the component. This article presents the FunkDAF project at RWTH Aachen University, in which a complete product development process consisting of design, process processing and production is being developed. The FLM process is to be further developed into a 6-dimensional layerless AM. Generative design approaches are used to create a component based on active surfaces and a guiding support structure. In the subsequent process preparation, force-path optimised extrusion trajectories for production are calculated from the component, taking loads into account. In production, the component is manufactured with the extrusion trajectories using a 6D handling process. This article presents an initial prototype implementation of the process chain and derives requirements for the process interfaces.

## 1 Einleitung

Die Verfahren der additiven Fertigung (AF) erhöhen im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren Freiheit und Flexibilität. Jedoch bergen die verschiedenen Verfahren der AF auch neue Herausforderungen und Randbedingungen, die während der Konstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung funktionsfähiger Bauteile beachtet werden müssen. Das Fused Layer Manufacturing (FLM) wird typischerweise in einer Fertigungsstrategie realisiert, bei der das Bauteil in zueinander parallelen Schichten durch das sukzessive Hinzufügen von Material in einer vorgegebenen Aufbaurichtung erzeugt wird. Dadurch erge-

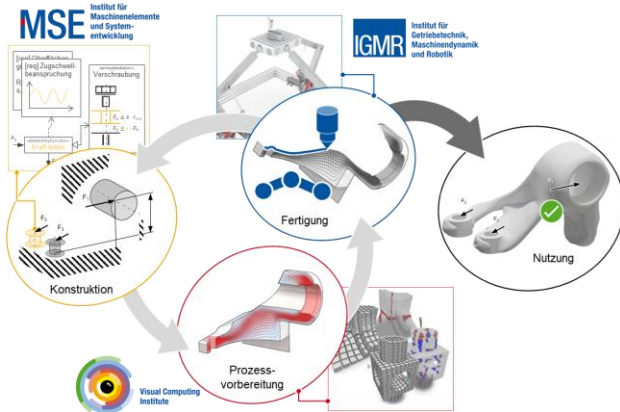
ben sich anisotrope Materialeigenschaften aufgrund niedrigerer Haftung zwischen den einzelnen Schichten, die bei Kompromissen hinsichtlich der Aufbaurichtung - beeinflusst durch Anforderungen an Wirkflächen - zu ungünstigen Spannungszuständen führen. Trotz diverser Richtlinien und Konstruktionskataloge [1–3] zur optimalen Bauteilgestaltung in der Konstruktion ist es nur in Ausnahmefällen möglich, die Bauteilanforderungen und mechanischen Eigenschaften bei Fertigungsrestriktionen einfließen zu lassen, da die Druckorientierung meist als Kompromiss zwischen den definierten Wirkflächen gewählt wird. Dieses Defizit ist exemplarisch in **Bild 1** dargestellt.





**Bild 1** Prinzipdarstellung des klassischen Produktentstehungsprozesses mit Versagen aufgrund anisotroper Material Eigenschaften

In dem vorliegenden Beitrag wird das Projekt FunkDAF des Instituts für Maschinenelemente und Systementwicklung (MSE), des Visual Computing Instituts (VCI) und des Instituts für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik (IGMR) der RWTH Aachen University vorgestellt. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist, das Potential einer funktional determinierten additiven Fertigung (FunkDAF) voll auszuschöpfen, indem ein ganzheitlicher Produktentstehungsprozess bestehend aus Konstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung entwickelt wird (vgl. **Bild 2**).



**Bild 2** Darstellung der Prozesskette für die schichtlose additive Fertigung von funktional determinierten Bauteilen

Dabei wird das FLM-Verfahren weiterentwickelt und für die 6-dimensionale schichtlose additive Fertigung nutzbar gemacht. In der Konstruktion ist die Funktion eines Bauteils durch Wirkflächen und Leit-Stütz-Strukturen modellbasiert repräsentiert. Um darauf aufbauend mit Generative Design Ansätzen lastgerechte Strukturen zu erzeugen, ist das Ziel der Prozessvorbereitung, aus der geometrischen Bauteilbeschreibung sowie unter der Berücksich-

tigung von Beanspruchungsdaten und des verwendeten Manipulators kraftpfadoptimierte Extrusionstrajektorien zu berechnen. Letztlich ist das Ziel der Fertigung, einen prototypischen 6D-Druck- und Handhabungsprozess mit einem feststehenden Druckkopf zu entwickeln, der in der Lage ist Extrusionstränge räumlich und belastungsoptimiert und -orientiert aufzutragen und das dabei entstehende Bauteil flexibel zu greifen, zu halten und zu führen.

## 2 Funktional Determinierte Additive Fertigung

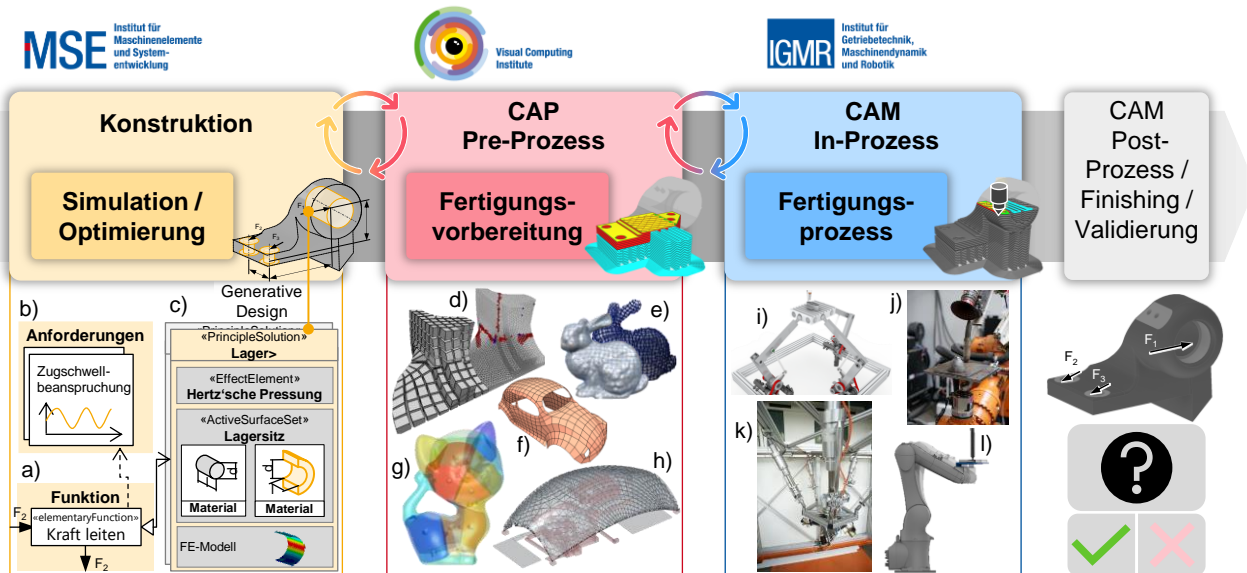
Die FunkDAF setzt Zugriff auf den Produktentstehungsprozess voraus. Entlang des in diesem Beitrag vorgestellten Gesamtprozesses greifen die Einzeldisziplinen bereits auf einen umfangreichen Stand der Technik zurück (s. **Bild 3**).

Themen der belastungsgerechten Konstruktion sowie der Maximierung der Haltbarkeit von additiv gefertigten Bauteilen sind bereits gut erforscht und bekannt (vgl. Abschnitt 2.1). Um die AF auch räumlich vollständig vom schichtweisen Aufbau zu lösen und die Pfadplanung unter Belastungs- und Roboter-(Ausführungs-)Anforderungen umzusetzen, müssen mathematische Methoden der räumlich geometrischen Repräsentation eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.2). Liegen theoretisch ausführbare Pfade bzw. Trajektorien vor, müssen diese auch tatsächlich ausgeführt werden. Der nachfolgenden Planung liegt ebenfalls eine Vielzahl von Methoden und Erfahrungen der Robotik zugrunde (vgl. Abschnitt 2.3).

### 2.1 Belastungsgerechte Konstruktion

Eine häufig genutzte Gestaltungsmethode besteht in der Aufstellung von Anforderungen und die darauffolgende Überführung in eine Funktionsstruktur. Anschließend erfolgt eine Übersetzung in Prinziplösungen, die Informationen über physikalische Effekte, Wirkflächen und Material umfassen [4]. Einzelne Wirkflächen der Prinziplösung werden durch die Leitstützstruktur zu einer funktionalen Einheit verbunden [5]. In einer CAD-Umgebung erfolgt abschließend der erfahrungsbasierte Aufbau der Bauteilgeometrie, mit dem Ziel die Fertigungsvorteile von AF-Verfahren bei komplexen Geometrien zu nutzen [6].

Neben dem erfahrungsbasierten Vorgehen werden zunehmend Ansätze zur wirkflächenbasierten Gestaltfindung vorgestellt. Diese Ansätze zielen in der Regel auf eine (teil)automatische Bauteilgestaltung durch den Einsatz von Generative Design Algorithmen ab [7].



**Bild 3** Vorarbeiten der Antragssteller für die Entwicklung eines durchgängigen interdisziplinären Gesamtprozess für die schichtlose additive Fertigung von funktional determinierten Bauteilen

Es existieren noch keine durchgängigen Lösungen, die Informationen aus nachfolgenden Prozessschritten bereits während der wirkflächenbasierten Gestaltfindung bereitstellen, um Konstruierende bei einer holistischen Bauteiloptimierung zu unterstützen. Werden beispielsweise in der Prozessvorbereitung Defizite hinsichtlich der Fertigbarkeit von Geometrien festgestellt, so muss der Konstruktionsprozess zumindest in Teilen iterativ erneut durchlaufen werden. [8]

Die fehlende Durchgängigkeit und der resultierende iterative Charakter der AF-Prozesskette erschweren eine konsequente, funktional determinierte Bauteilgestaltung. Medienbrüche zwischen Expertenmodellen und -tools verhindern heute die formalisierte Rückführung von Restriktionen aus Prozessvorbereitung und Fertigung in die Konstruktion. [9]

Für die FunkDAF ist eine durchgängige Entwicklung notwendig. Vielversprechende Ansätze zur Entwicklung eines solchen Prozesses stellt die modellbasierte Systementwicklung (MBSE) bereit, mit ihren Möglichkeiten der Vernetzung von prozessbegleitenden Expertenmodellen und -tools in einem Systemmodell. Ein solcher MBSE-Ansatz wird durch die Motego-Methode [10] bereitgestellt, welche die konventionellen Ansätze von Koller weiterentwickelt und durch den Aufbau von Modellen in der Systems Modelling Language (SysML) formalisiert und digitalisiert abbildet [11]. Motego zielt auf die modellbasierte Verknüpfung von Anforderungen und Funktionen an Wirkflächen. Außerdem wird von Motego die Einbindung von Expertenmodellen aus allen an der Entwicklung beteiligten Domänen organisiert [12,13].

In Motego werden Funktionsstrukturen in sogenannte „Solution Elements“ überführt, Bild 3 a). Die „Solution Elements“ beinhalten Informationen über physikalische Effekte, Wirkflächen und Material und erlauben die Modellierung funktionaler Wirkzusammenhänge sowie die durchgängige Verknüpfung mit CAE-Werkzeugen [10]. Die Verknüpfung erlaubt die Simulation unter Lasteinwirkung

in einem frühen Stadium der Entwicklung. Weiter können auch fertigungstechnische Einflussgrößen und Restriktionen berücksichtigt werden. Die frühe Verknüpfung der Zusammenhänge ermöglicht eine Entwicklung, in welcher aufwendige Iterationsschleifen, durch die zeitlich versetzte Betrachtung verschiedener Einflüsse im herkömmlichen Entwicklungsprozess vermieden werden.

## 2.2 Spannungsgeladete Pfadplanung

Bisher sind den Autoren keine Ansätze bekannt, bei denen die Pfadplanung durchgängig kraftpfadgerecht durchgeführt wird. Die sogenannte Multidirektionale additive Fertigung (MDAF) beinhaltet bereits eine Prozessplanung, die den rein schichtweisen Aufbau in unterschiedliche Aufbaurichtungen und unter redundanten Freiheitsgraden ermöglicht. Bei der am IGMR entwickelten Planung werden bereits Roboterinformationen berücksichtigt, um die komplexe Fertigung (hier das Lichtbogenschweißen mit exzentrischer Drahtzuführung) mit unterschiedlichen Aufbaurichtungen zu ermöglichen [14,15]. Eine Planung von belastungsoptimierten Pfaden existiert nicht. Um schichtlose Extrusionstränge - optimiert auf Kraftpfadverläufe - zu planen, müssen entsprechende funktionsrelevante Vorgaben durch das MSE aus der Konstruktion gemacht werden. Diese werden dem VCI als 3-dimensionale Information übergeben.

Am VCI wurden bereits Algorithmen entwickelt, die es ermöglichen, ein Drahtgittermodell ohne Stützstrukturen direkt im Raum zu drucken [16] (s. **Bild 3 e**). Dazu wird ein Oberflächengitter zur Pfadsegmentgenerierung erstellt und anschließend eine druckbare Reihenfolge der Segmente bestimmt. Es handelt sich hierbei um eine Vorstufe für dieses Projekt, bei der anstatt eines 3D Volumengitters zunächst noch ein 2D Oberflächengitter genutzt und ein konventioneller 2,5D Drucker eingesetzt wird. Darüber hinaus kann das VCI auf die Arbeiten von Wang et. al. [17] (s. **Bild 3 g**) zurückgreifen, durch die die Oberflächenqua-

lität beim 3D Druck verbessert wird, indem das Bauteil automatisch in verschiedene Segmente zerlegt wird, welche dann aus einer optimierten Druckrichtung mit einem 2,5D Drucker gefertigt werden. Des Weiteren existieren Vorarbeiten im Bereich des 3D Hex-Meshings [18] (s. **Bild 3 d**). Dabei wird zu einer Oberflächengeometrie ein volumetrisches Gitter erzeugt, um das Innere des Bauteils mit würfelförmigen Zellen auszufüllen. Mit der Generierung von Quad-Meshes (die 2D-Variante des 3D-Hex-Meshings auf Objektflächen) hat das VCI umfangreiche Erfahrung (z.B. [19], **Bild 3 f**), von den mathematischen Grundlagen bis in die industriellen Anwendungen unter der Beachtung diverser flexibler Nebenbedingungen. Weiterhin relevant ist die Vorarbeit von Musto et. al. [20] (s. **Bild 3 h**). Hier ist das Ziel die Erzeugung einer materialsparenden faltstruktur, die an gegebenen Lasttrajektorien ausgerichtet ist. Der Prozessablauf (FEM-Spannungsanalyse mit Kräften, adaptive Gitter-Generierung, a posteriori Evaluierung) ist ähnlich zu dem hier beschriebenen Vorhaben.

### 2.3 Multidirektionale Additive Fertigung

Die Fertigung von Kraftwirkungslinien eines expliziten Belastungsfalls, welcher über den ebenen zweidimensionalen Spannungszustand hinausgeht, ist die Abkehr von der planaren schichtweisen Fertigung und entsprechen die Einführung der MDAF als Fertigungsprozess erforderlich. **Bild 4** zeigt eine mögliche Realisierung eines solchen Prozesses.



**Bild 4** Rendering einer möglichen Umsetzung des 6-dimensionalen Fertigungsprozesses

Die MDAF erweitert die Möglichkeiten des klassischen 3D-Drucks durch die Einführung von Mehrachs-Systemen und Objektmanipulation. Dies ermöglicht den Aufbau von Bauteilen in verschiedenen Richtungen, überwindet die Beschränkungen des schichtweisen Auftrags und ermöglicht eine größere Designfreiheit in der Konstruktion. Insbesondere das Nutzen von Robotersystemen ermöglicht es, Bauteile mit komplexen Geometrien und Überhängen ohne Stützstrukturen zu fertigen. Die Technologie findet Anwendung in verschiedenen Berei-

chen wie Luft- und Raumfahrt, Medizin und Bauwesen und verspricht, durch die Integration mit anderen Fertigungsverfahren, Effizienz und Präzision der additiven Fertigungsprozesse weiter zu verbessern. Forschungen zeigen die Integration von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren in Roboterzellen zur Effizienzsteigerung und Genauigkeitsverbesserung. Innovative Ansätze umfassen beispielsweise die in-situ Photopolymerisationsprozesse [21], Anti-Gravity Additive Manufacturing [22], und additive Fertigungsprozesse, die durch mobile Roboter und Drohnen [23] unterstützt werden.

Eine Spezifizierung der MDAF stellt die reine Objektmanipulation dar, welche auch den Entwicklungen dieses Vorhabens zugrunde liegt. Dabei wird im Fertigungsprozess ausschließlich das Bauteil manipuliert, während der Druckkopf fest im Arbeitsraum positioniert ist. Dazu werden Manipulatoren mit mehr als drei Freiheitsgraden in Betracht gezogen. Im Folgenden werden einige Konfigurationen vorgestellt:

Isa et al. [24] sowie Hong et al. [25] erweitern in ihren Untersuchungen bestehende 2,5D-Drucker durch einen Zweiachs-Drehtisch, welcher als Druckbett verwendet wird. Durch die beiden zusätzlichen Freiheitsgrade besitzen beide Systeme fünf Freiheitsgrade, wodurch ein nicht-planarer Druck ermöglicht wird. Jedoch ist der Neigungswinkel des Drehtisches in beiden Varianten auf einen Bereich von  $-90^\circ$  bis  $90^\circ$  beschränkt, wodurch auch die maximale relative Auslenkung des Druckkopfes zum Druckbett begrenzt ist.

Im Rahmen einer vorangegangenen Arbeit [26] wurde am IGMR ein Aufbau mit sechs Freiheitsgraden entwickelt. Dieser besteht aus einem im Raum fixierten Druckkopf und einem durch einen 6-Achs-Roboterarm bewegten Druckbett. Diese Konfiguration erweitert sowohl den Bewegungsumfang als auch das mögliche Volumen des zu fertigenden Bauteils erheblich. Eine Beschränkung stellt hierbei allerdings mit 6 kg die maximale Traglast des verwendeten Kuka KR6 dar. Abzüglich des Gewichts von Endeffektor und Bauplatzform (2 kg) verbleiben noch 4 kg für das zu fertigende Bauteil.

Eine Kombination der oben genannten Konfigurationen stellt die Meltio Robot Cell dar [27]. Dieses marktreife Produkt der Firma Meltio kombiniert einen 6-Achs-Roboterarm mit einem 2-Achs-Drehtisch. Der Druckkopf ist hierbei am Endeffektor des Roboterarms montiert. Durch die Verwendung des Drehtisches kann eine so hohe Traglast erreicht werden, dass diese für den Anwendungsfall keine Beschränkung mehr darstellt (500 kg). Zwar ist diese Konfiguration ursprünglich für den metallischen 3D-Druck mittels Direct Energy Deposition (DED) vorgesehen. Durch die Analogie bei der Zuführung des Materials in Drahtform ist das Konzept jedoch übertragbar. Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung von 6-Achs-Robotern sowohl für das Führen des Druckkopfes als auch des Druckbetts dar. Eine solche Konfiguration wurde im Rahmen des EpoxySpacePrinter Projekts [28] an der TUHH umgesetzt. Die insgesamt 12 Freiheitsgrade ermöglichen einen signifikant erweiterten Bewegungsumfang.



Da jedoch weniger die absolute Position im Raum relevant ist, sondern vielmehr die relative Position der Endeffektoren zueinander, summieren sich entsprechende Ungenauigkeiten auf. Dadurch wird eine komplexere Bahnplanung erforderlich und das Risiko von Schwingungen, insbesondere bei hohen Traglasten, betrachtet werden.

## 2.4 Schnittstellen der Einzeldisziplinen

Die in den vorangegangenen Abschnitten eingeführten Einzeldisziplinen der Konstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung verfügen über komplexe Schnittstellen. Zum einen müssen relevante Druckinformationen nach der Er- und Verarbeitung an den nachfolgenden Prozessschritt übergeben werden, um den Druckprozess durchzuführen. Zugleich sind die Disziplinen und damit die Prozessschritte tiefgreifend miteinander verzahnt und tauschen jeweils Informationen und Funktionen mit den anderen Disziplinen aus.

So braucht bspw. die Konstruktion Informationen über das resultierende Druckvolumen, welches durch die MDAF möglich ist. Diese Information wäre beim klassischen 3D Druck in einem klassischen Portaldrucker einfach definierbar. Die nichtlinearen Zusammenhänge der angestrebten räumlichen Pfadplanung und einer redundanten Roboterkinematik lassen jedoch keine pauschale Aussage für beliebige Bauteile zu. Dieses Beispiel steht exemplarisch für die enge Verzahnung, die die Disziplinen bilateral sowie im Gesamtkonsortium kontrollieren müssen.

Kapitel 3 befasst sich daher mit einer initialen, vereinfachten Prozesskette, über welche Erkenntnisse zu den Schnittstellen-Herausforderungen gewonnen werden.

## 3 Prototyp der Prozesskette

Zu Beginn des Projekts wird eine vereinfachte Prozesskette in einem Demonstrator umgesetzt. Ziel des Demonstrators ist der Aufbau der zentralen Prozessschritte der Bauteilkonstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung sowie deren Schnittstellen untereinander. Anschließend wird die Prozesskette zum Gesamtprozess vervollständigt.

Als erstes Demonstrator-Bauteil wird ein eingespannter Kragarm verwendet, der in einem Lagersitz auf Biegung belastet wird. Mit der vereinfachten Prozesskette wird für den Kragarm eine belastungsoptimierte Bahnplanung generiert. Die einfache Geometrie des Bauteils sowie der zweidimensionale Spannungszustand ermöglichen die Fertigung auf einem konventionellen 2,5D-FDM-Drucker.

Der belastungsoptimierte Kragarm soll anschließend gefertigt und mit einem Bauteil mit konventionell geplanten Extrusionspfaden verglichen werden.

### 3.1 Konstruktion (MSE)

Für den Demonstrator wird ein funktionsorientiertes Modell des Kragarms nach dem Rahmenwerk von Jacobs et al. aufgebaut [10]. Nach diesem Rahmenwerk wird das Modell mit dem SysML-Sprachprofil Motego entwickelt. Das Modell bietet die Grundlage zur durchgängigen Verknüpfung der funktionalen Anforderungen mit allen Pro-

zessschritten. Dadurch kann domänenübergreifend zwischen Konstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung optimiert werden.

Für das Modell werden die Anforderungen an den Kragarm definiert. Anforderungen an den Kragarm sind beispielsweise Bauraum, Kontaktfläche und aufzunehmende Last. Aus den Geometrieanforderungen wird eine Startgeometrie für die Pfadplanung generiert. Anschließend wird mit den Lastanforderungen ein FE-Modell für die Startgeometrie aufgebaut. Die Spannungsverteilung des FE-Modells wird in der Prozessvorbereitung als Grundlage des ersten Bahnplanungsentwurfs verwendet.

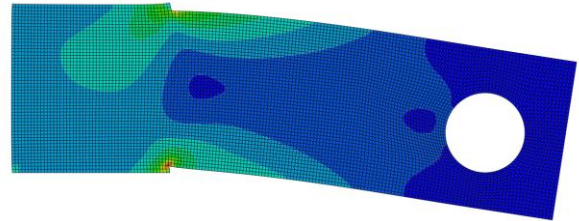


Bild 5 FEM Analyse

### 3.2 Prozessvorbereitung (VCI)

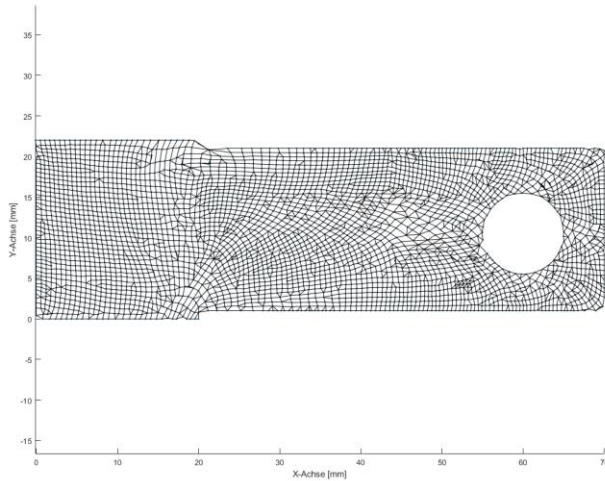
Der Spannungsverlauf wird in ein tetrahedrales Gitter in 3D, bzw. ein Dreieckgitter in 2D, überführt, dem pro Element ein Spannungstensor zugeordnet ist.

Die Gittererzeugung orientiert sich dabei an den Methoden von Wu et al. [29] und Gao et al. [30]. Zunächst wird jedem Knoten  $n_i$  des Gitters per Interpolation der Spannungen der benachbarten Elemente eine Spannung zugewiesen und dessen Eigenwertzerlegung berechnet. Die Eigenvektoren  $v_{ij}$  geben die Hauptspannungsrichtungen an, die Eigenwerte  $\lambda_{ij}$  die Magnituden der Spannungen. Lokal beschreiben die Produkte aus Eigenvektoren und Eigenwerten  $v_{ij} * \lambda_{ij}$  für jeden Knoten die gewünschte Gitterstruktur. Die Nachbarn  $N(n_i)$  von  $n_i$  sollten für ein hexahedrales Gitter möglichst nah bei  $n_i + \sum_j (v_{ij} * \lambda_{ij} * \{-1, 0, +1\})$  liegen.

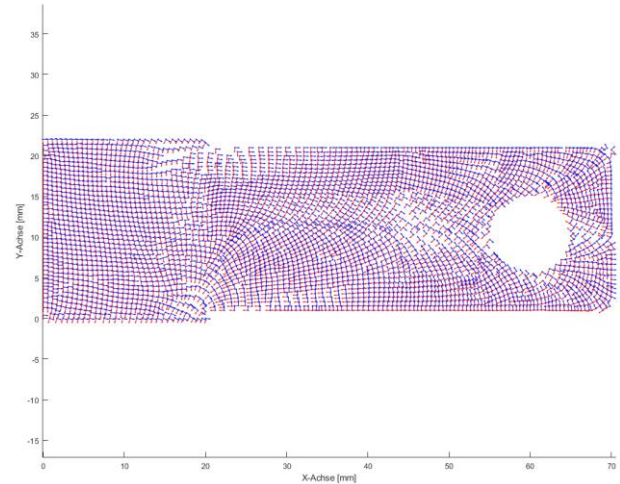
Da eine globale Lösung für dieses Problem äußerst herausfordernd ist und es für den 3-dimensionalen Fall noch keine zufriedenstellende Allgemeinlösungen gibt, kommt eine lokale Optimierung nach dem Vorbild von Wu et al. [29] zum Einsatz. Diese verschiebt die Knotenpositionen so, dass die Distanzen zu den optimalen Positionen minimiert werden.

Da dabei einige Gitterpunkte nahezu auf gleiche Positionen rücken entstehen redundante Gitterkanten. Diese werden in einem iterativen Verfahren herausgefiltert und resultieren in der finalen Gitterstruktur.

Durch die lokale Optimierung sind nicht alle resultierenden Zellen Kuboide bzw. Quads. Das Resultat ist ein sog. Hex- bzw. Quad-dominantes Gitter, das für den nächsten Schritt verwendet werden kann. Zum jetzigen Stand des Projekts wurde sich auf ein 2D Gitter als Vorstufe der 3D Gitter fokussiert. Das Gitter für den Kragarm ist in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6** Visualisierung der für den Spannungszustand optimierten Gitterstruktur



**Bild 7** Darstellung der Hauptspannungsrichtungen in den Gitterknoten

### 3.3 Fertigung (IGMR)

Die vom VCI übergebenen Daten umfassen räumliche Koordinaten, die Hauptspannungsmatrix (Eigenvektoren) und die entsprechenden Eigenwerte eines Gitters.

Die Mesh-Daten dienen zur Generierung visueller Darstellungen von Spannungsmustern und zur Erzeugung von Pfaden basierend auf den dominanten Spannungsrichtungen. Hierbei werden zunächst die Punktkoordinaten mit den zugehörigen Spannungsattributen analysiert, um die dominante Spannungsrichtung in jedem Knotenpunkt zu bestimmen.

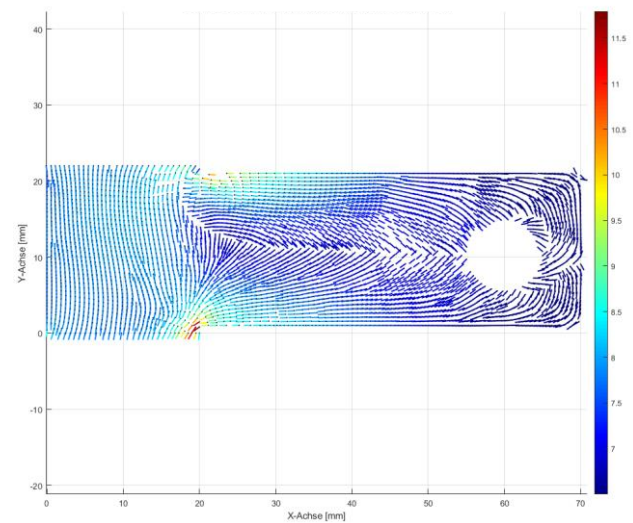
Das Erzeugen der Pfade erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Parameter wie der maximalen Entfernung zwischen den Punkten und der maximal zulässigen Winkeländerung zwischen den Verbindungslinien. Dabei werden die Pfade iterativ erstellt, indem benachbarte Punkte ausgewählt werden, die den o.g. Kriterien entsprechen.

Nach der initialen Erstellung der Pfadsegmente werden die offenen Enden mit nahegelegenen Linien verbunden. Dieser Prozess beinhaltet die Prüfung der Nähe und Winkelkompatibilität zwischen den offenen Enden und den vorhandenen Linien, um die Pfade zu verlängern. Das Ergebnis dieses Prozesses ist in **Bild 7** veranschaulicht.

Die konstruierten Pfade werden in OpenSCAD-Code umgewandelt, der weiter zur Visualisierung und Manipulation verwendet werden kann. Jedes Segment des Pfades wird dabei als einzelner Volumenkörper extrudiert. Abschließend wird der OpenSCAD-Code in das STL-Format konvertiert, um für die prototypische Fertigung des Demonstrators zunächst auf konventionelle Slicer und einen handelsüblichen 3D-Drucker zurückgreifen zu können. Aufgrund des zweidimensionalen Spannungszustandes ist eine höhere Anzahl an Freiheitsgraden in der Fertigung nicht notwendig.

## 4 Ergebnisse und Ausblick

Die vereinfachte prototypische Prozesskette konnte erfolgreich von der funktionsorientierten Bauteildefinition bis hin zur Fertigung durchlaufen werden (s. **Bild 8**). Das Fertigen eines vollständigen Kragbalkens sowie der Belastungsvergleich zu einem konventionell geslicten Balken gleicher Geometrie stellt den nächsten Schritt im Projekt dar.



**Bild 8** Visualisierung der aus den Hauptspannungen berechneten Pfadsegmente

Im weiteren Projektverlauf werden die folgenden Ziele fokussiert:

Der Konstruktionsprozess kann modellbasiert auf die durchgängige, funktional determinierte Festlegung von Wirkflächen und die konsequente Gestaltfindung mit Hilfe von Generative Design Ansätzen ausgerichtet werden. Restriktionen aus Prozessvorbereitung und Fertigung können in den modellbasierten Konstruktionsprozess eingebunden und bei der Definition von Wirkflächen und Bauteilgeometrien berücksichtigt werden.

Durch ein dreidimensionales hex-dominantes Gitter können Bauteilgeometrie und Spannungsverteilung im Bauteil so abgebildet werden, dass eine weitere Verarbeitung in der Prozessvorbereitung möglich wird. Auf Grundlage des Gitters und der Berücksichtigung von Kinematik, Dynamik und Rekonfiguration des Handhabungssystems (HHS) können schichtlose, belastungsoptimierte Extrusionspfade geplant und ausgeführt werden.

Auf Basis der Extrusionspfade kann mit Hilfe des HHS eine 6-dimensionale schichtlose Fertigung umgesetzt werden. Der redundante Freiheitsgrad des Druckprozesses wird für die Trajektorien-Optimierungen genutzt und steigert beispielsweise die Genauigkeit des Druckprozesses durch Reduktion von Gelenkbewegungen, -geschwindigkeiten und -beschleunigung.

## 6 Literatur

- [1] DIN EN ISO/ASTM 52910: Additive Fertigung - Konstruktion. Anforderungen, Richtlinien und Empfehlungen. (2020)
- [2] Kumke, M.: Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. (2018)
- [3] Lachmayer, R.; Lippert, R. B.: Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung. Springer Berlin Heidelberg. (2020)
- [4] Koller, R.; Kastrup, N. (1994): Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [5] Matthiesen, S. (2002): Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme (Forschungsberichte / MKL, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH), Bd. 6).
- [6] McKnight, M. (2017): Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer. In: KEG 2 (2), S. 176. DOI: 10.18502/keg.v2i2.612.
- [7] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M. (2021): Additive Manufacturing Technologies. Cham: Springer International Publishing.
- [8] VDMA (2020): Additive Manufacturing Kunststoff-Pulverbett Automatisierungs - Roadmap: SMART FACTORY.
- [9] Winkler, M.; Jacobs, G.; Spütz, K.; Konrad, C. (2021a): Evaluation of Parts for Additive Manufacturing utilizing System Models of AM Plants. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1097 (1), S. 12022. DOI: 10.1088/1757-899X/1097/1/012022
- [10] Jacobs, G.; Konrad, C.; Berroth, J. K.; Zerwas, T.; Höpfner, G.; Spütz, K. (2021): Function-oriented model-based product development. ISBN 978-3-030-78367-9 pre-print. In: Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (Hg.): Methodenbuch.
- [11] Drave, I.; Rumpe, B.; Wortmann, A.; Berroth, J.; Hoepfner, G.; Jacobs, G. et al. (2020): Modeling mechanical functional architectures in SysML. In: Eugene Syriani und Houari Sahraoui (Hg.): Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems. MODELS '20: ACM/IEEE 23rd International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems.
- [12] Zerwas, T.; Jacobs, G.; Spütz, K.; Höpfner, G.; Drave, I.; Berroth, J. et al. (2021): Mechanical concept development using principle solution models. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1097 (1), S. 12001. DOI: 10.1088/1757-899X/1097/1/012001
- [13] Höpfner, G.; Jacobs, G.; Zerwas, T.; Drave, I.; Berroth, J.; Guist, C. et al. (2021): Model-Based Design Workflows for Cyber-Physical Systems Applied to an Electric-Mechanical Coolant Pump. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1097 (1), S. 12004. DOI: 10.1088/1757-899X/1097/1/012004.
- [14] Schmitz, M.; Corves, B.; Hüsing, M. (2020): Multi-direktionale Additive Fertigung: Motivation, Problemstellung und Strategien im Kontext des Schweißens mit Drahtzuführung: Duisburg-Essen Publications Online, University Of Duisburg-Essen.
- [15] Schmitz, M.; Weidemann, C.; Corves, B.; Hüsing, M. (2021): Trajectory Planning Strategy for Multidirectional Wire-Arc Additive Manufacturing. In: Gentiane Venture, Jorge Solis, Yukio Takeda und Atsushi Konno (Hg.): ROMANSY 23 - Robot Design, Dynamics and Control, Bd. 601. Cham: Springer International Publishing (CISM International Centre for Mechanical Sciences), S. 467–475
- [16] Untzelmann, O.; Kobbelt, L. (2018): Near-Constant Density Wireframe Meshes for 3D Printing. In: Stephen N. Spencer (Hg.): Proceedings, SCF 2018. ACM Symposium on Computational Fabrication: Cambridge, MA, June 17-19, 2018. New York, New York: The Association for Computing Machinery, Inc.
- [17] Wang, W. M.; Zanni, C.; Kobbelt, L. (2016): Improved Surface Quality in 3D Printing by Optimizing the Printing Direction. In: Computer Graphics Forum 35 (2), S. 59–70. DOI: 10.1111/cgf.12811
- [18] Lyon, M.; Bommers, D.; Kobbelt, L. (2016): HexEx: Robust Hexahedral Mesh Extraction. In: ACM Transactions on Graphics. SIGGRAPH 2016 (35). Online verfügbar unter <https://www.graphics.rwth-aachen.de/publication/03260/>.
- [19] Lyon, M.; Campen, M.; Bommers, D.; Kobbelt, L. (2019): Parametrization Quantization with Free Boundaries for Trimmed Quad Meshing. In: ACM Transactions on Graphics. SIGGRAPH 2019 (38).
- [20] Musto, J.; Lyon, M.; Trautz, M.; Kobbelt, L. (2019): Beanspruchungsoptimierte Faltungen aus Stahl für selbsttragende Raumfaltwerke. In: Bautechnik 96 (12), S. 902–911. DOI: 10.1002/bate.201900024.
- [21] Li, Xiao; Lian, Qin; Li, Dichen; Xin, Hua; Jia, Shuhai: *Development of a Robotic Arm Based Hy-*

- drogel Additive Manufacturing System for In-Situ Printing*. In: Applied Sciences 7 (1), S.73. (2017)  
DOI: 10.3390/app7010073
- [22] LAARMAN, JORIS; Jokic, Sasa; NOVIKOV, PETR. *Anti-Gravity Additive Manufacturing*. In: Fabio Gramazio, Matthias Kohler und Silke Langenberg (Hg.): Fabricate 2014: UCL Press, S. 192–197 (2017)
- [23] Mirjan, Ammar; Augugliaro, Federico; D’Andrea, Raffaello; Gramazio, Fabio; Kohler, Matthias. *Building a Bridge with Flying Robots*. In: Dagmar Reinhardt, Rob Saunders und Jane Burry (Hg.): Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. Cham: Springer International Publishing, S. 34–47
- [24] Isa, M. A.; Lazoglu, I. *Five-axis additive manufacturing of freeform models through buildup of transition layers* In: Journal of Manufacturing Systems, 50 (2019), DOI 10.1016/j.jmsy.2018.12.002
- [25] Hong, F.; Lampret, B.; Myant, C.; Hodges, S.; Boyle, D. *5-axis multi-material 3D printing of curved electrical traces* In: Additive Manufacturing, 70 (2023), DOI 10.1016/j.addma.2023.103546
- [26] Schmitz, M.: *Roboterbasierte multidirektionale additive Fertigung für das Lichtbogenschweißen mit Drahtzuführung*. Dissertation, RWTH Aachen University, 2023, 10.18154/RWTH-2023-04994
- [27] Multistation SAS MELTIO – Engine Robot, *Additive-Manufacturing* <https://www.multistation.com/en/product/meltio-engine-robot/>
- [28] Kallai, Z.; Dammann, M.; Schueppstuhl, T. *52th International Symposium on Robotics*, December 9-10, 2020, Online-Event, Germany Berlin and Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2020, ISBN 9783800754281
- [29] Wu, J.: *Design and Optimization of Conforming Lattice Structures*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. DOI 10.1109/TVCG.2019.2938946
- [30] Gao, X.: *Robust Hex-Dominant Mesh Generation using Field-Guided Polyhedral Agglomeration*. ACM Transactions on Graphics, Vol. 36, No. 4, Article 114. DOI 10.1145/3072959.3073676



# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

In: Zehnte IFToMM D-A-CH Konferenz 2024

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/81584

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20240304-113528-1



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz (CC BY-SA 4.0) genutzt werden.