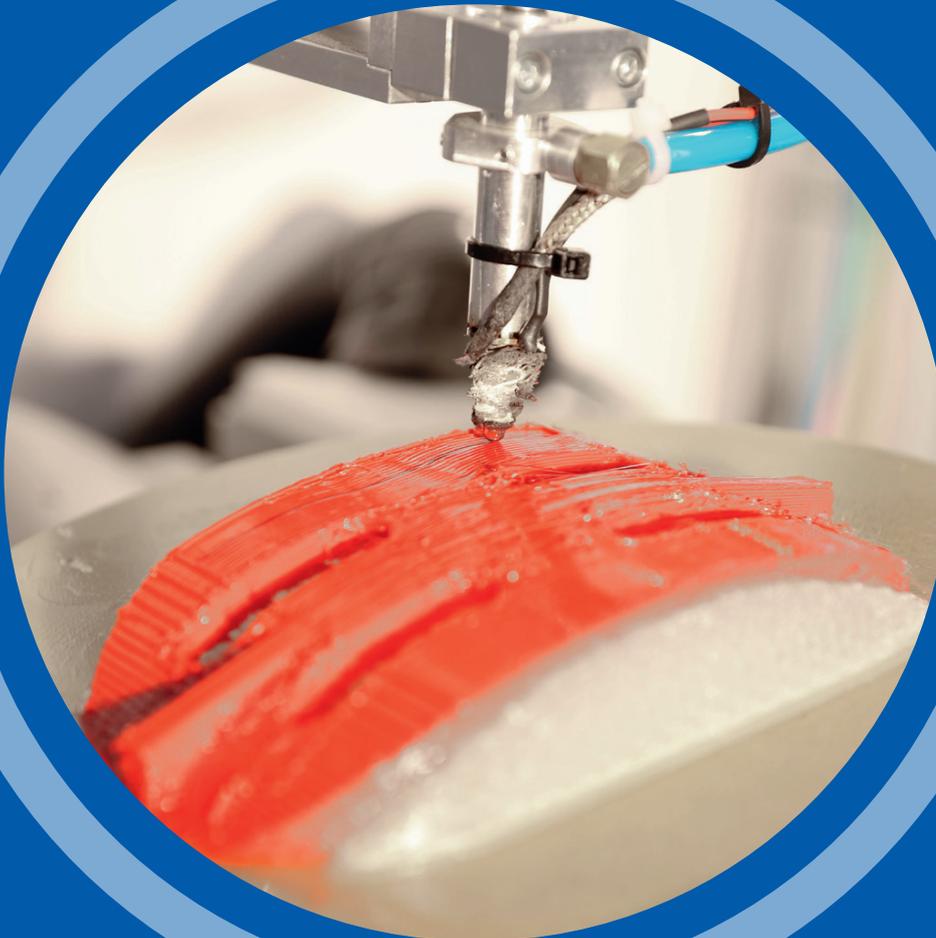


Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau

Frederik Wulle

Untersuchung der belastungsgerechten Bahnplanung für das mehrachsige Schmelzschichtverfahren für Bauteile mit Zugspannungen



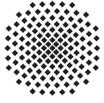
stuttgarter
maschinenbau
interdisziplinär und vielfältig



Universität Stuttgart

Institut für Steuerungstechnik
der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen (ISW)





Universität Stuttgart



Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau

Band 15

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel
Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
Jun.-Prof. Dr. rer. nat. Andreas Wortmann

Frederik Wulle

**Untersuchung der belastungsgerechten Bahn-
planung für das mehrachsige Schmelzschicht-
verfahren für Bauteile mit Zugspannungen**

Fraunhofer Verlag

Kontaktadresse:

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen ISW
Seidenstr. 36
70174 Stuttgart
info@isw.uni-stuttgart.de
<https://www.isw.uni-stuttgart.de>

Titelbild: © Frederik Wulle

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

ISSN: 2750-655X

ISBN: 978-3-8396-1901-8

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2022

Druck und Weiterverarbeitung: Fraunhofer-Druckerei, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2023

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Geleitwort

Die deutsche Wirtschaft ist weltweit bekannt für ihren Anlagen- und Maschinenbau. Dabei ist die Universität Stuttgart mit ihren beiden Maschinenbau fakultäten – unter deren Dach sich 42 Institute befinden – die größte universitäre Einrichtung für den Maschinenbau in Deutschland. Unsere wissenschaftliche Exzellenz stützt sich dabei auf unsere zahlreichen Promovierenden und ihre hervorragenden Dissertationen. Viele dieser Dissertationen entstehen in lokaler, nationaler und internationaler Zusammenarbeit mit renommierten Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, der Fraunhofer-Gesellschaft und der Max-Planck-Gesellschaft. Dabei reicht das inhaltliche Spektrum der Dissertationen von Biotechnik, Energietechnik, Fahrzeugtechnik, Kybernetik und Systemtechnik, Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Produktionstechnik bis hin zur Verfahrenstechnik und stützt sich auf die sechs Forschungsschwerpunkte Advanced Systems Engineering, Autonome Produktion, Software-Defined Manufacturing, Resiliente Versorgung, Biointelligenz und Dekarbonisierung der Industrie. Die Ergebnisse aus den Dissertationen zielen darauf ab, kunden-, produkt-, prozess- und mitarbeiterorientierte Technologie zielgerichtet und zeitnah zu entwickeln und anzuwenden.

Viele der im Rahmen der Forschungsarbeiten an den Instituten entstandenen Dissertationen werden in diesen »Beiträgen zum Stuttgarter Maschinenbau« veröffentlicht. Die beiden Fakultäten des Stuttgarter Maschinenbaus wünschen den Promovierenden, dass ihre Dissertationen aus dem Bereich des Maschinenbaus in der breiten Fachwelt als maßgebliche Beiträge wahrgenommen werden und so den Wissensstand auf ein neues Niveau heben.

Für den Stuttgarter Maschinenbau



Stefan Weihe
Prodekan Fakultät 4



Oliver Riedel
Prodekan Fakultät 7

Vorwort der Herausgeber

Innerhalb der Reihe »Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau« berichtet das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen an der Universität Stuttgart (ISW) über seine Forschungsergebnisse. Das Institut beschäftigt sich in vielfältiger Form mit Steuerungs- und Automatisierungstechnik sowie dem Einsatz von modernen Methoden des Informationsmanagements. Dabei stehen Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Entwicklung in einem stetigen Austausch, wodurch ein kontinuierlicher Technologietransfer in die Praxis sichergestellt wird.

Die am ISW entstandenen Dissertationen werden damit unter erweitertem Namen und inzwischen in vierter Generation in der bewährten Konzeption, die der Gründer des ISW Prof. Stute und sein Nachfolger Prof. Pritschow 1972 begonnen haben, durch die heutige Institutsleitung fortgesetzt.

Herrn Frederik Wulle M.Sc. möchten wir für die geleistete Arbeit danken, dem Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in sein Angebot und der Druckerei für die saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.



Alexander Verl



Oliver Riedel

Untersuchung der belastungsgerechten Bahnplanung für das mehrachsige Schmelzschichtverfahren für Bauteile mit Zugspannungen

**Investigation on load-capable path planning for multi-axis
fused filament fabrication for parts with tensile stresses**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Frederik Julian Alexander Wulle, M.Sc.

aus Sindelfingen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers

Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2022

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

2023

„Hier gibt es keine Geheimnisse.
Was Sie hier erfahren, können Sie gerne mitnehmen.“

Frei Otto

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart.

Herrn Prof. Alexander Verl gebührt mein Dank für das Vertrauen und die Gestaltungsfreiheit, die ich am ISW erhalten habe, sowie für die Betreuung meiner Promotion als Doktorvater. Bei Herrn Prof. Jan Knippers möchte ich mich für die thematische Prägung meiner Arbeit durch den SFB/TRR141 „Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ sowie für die Übernahme des Mitberichts bedanken.

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Karl-Heinz Wurst. Er hat mich über meine gesamte ISW-Zeit hinweg fachlich beraten und unterstützt. Nicht zuletzt durch die konstruktive Korrektur meiner Dissertation hat er zum Gelingen meiner Promotion beigetragen. Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Peter Zahn für das Korrekturlesen des Manuskripts.

Durch die kollegiale Zusammenarbeit und gegenseitige Unterstützung aller ISW-Kollegen war die Zeit am Institut eine sehr schöne und bereichernde. Dadurch habe ich die Kompetenz und Motivation erhalten, die es zu einer Promotion benötigt. Ich bin stolz ein Teil der ISW-Familie zu sein. Danke an alle ISW-Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und besonders meiner Gruppe 5.

In meiner Forschungsarbeit haben mich viele Studierende im Rahmen derer studentischen Arbeiten und Hiwi-Tätigkeiten unterstützt. Dazu danke ich besonders Jenin Gerlach, Tobias Herczeg, Till Hielscher, Lars Schäfer, Silas Schlenk, Tobias Tandler und Veit Wörner.

Den vielen Forschungskollegen innerhalb und außerhalb der Universität Stuttgart, mit denen ich meine Arbeit diskutiert habe, sei gedankt.

Privat danke ich meiner Familie insbesondere meinen Eltern, die mich in meiner Ausbildung stets unterstützt und gefördert haben. Bei meiner Frau Hanna Reim bedanke ich mich für die entgegengebrachte Geduld und die immerwährende Unterstützung sowie die Korrekturen der Arbeit.

Stuttgart, 29.01.2023

Frederik Wulle

Kurzfassung

Additive Fertigungstechnologien haben sich in den letzten 10 Jahren von einer Nischenanwendung für Rapid Prototyping zu einer technologischen und wirtschaftlich bedeutenden Industrie entwickelt. Um die Produktivität dieser Technologien weiter zu steigern, wird an Methoden zur Optimierung der Prozesskette im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren (Markenname *Fused Deposition Modeling*) geforscht, welche aufgrund der prozesstechnischen Freiheiten großes Potenzial in sich birgt. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung entwickelt mit dem Ziel, Bauteile im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren mit höherer Belastbarkeit herzustellen. Mechanische Grundlage ist hierbei, dass gedruckte Bauteile in Richtung der Orientierung der Extrusionsraupen einer höheren Zugbeanspruchung standhalten können als in andere Belastungsrichtungen. Eine Zusammenfassung der aktuellen Forschung und Technik weist auf, dass noch keine Lösungen für Prozessketten mit dieser Zielsetzung vorhanden sind. Die entwickelte Methode ermöglicht eine belastungsgerechte Bahnplanung auf Grundlage definierter Belastungsfälle im Hinblick auf anisotropes Werkstoffverhalten, auf eine lokale Spannungsmaxima-orientierte Festigkeitssteigerung sowie für eine Anwendbarkeit auf komplexe Bauteilgeometrien. Hierzu werden CAD-Geometrien in einzelne Subvolumen unterteilt, deren Spannungszustand mittels einer gemeinsamen Hauptspannungstrajektorie beschrieben werden können. Entlang dieser Trajektorien verlaufen die Bahnen und somit die Vorzugsrichtung des gedruckten Werkstoffs. Zur Ermittlung der Trajektorien und der Subvolumen wurden verschiedene Verfahren herangezogen und bewertet. Die Validierung der Bahnplanungsmethode erfolgte durch eine linear-elastische, anisotrope Bauteilsimulation und durch experimentelle Bauteilprüfungen. Hierfür wurden vier Referenzbauteile – zwei Bauteile akademischer Art und zwei Bauteile einer personalisierten Skolioseorthese – definiert, die mittels einer mehrachsigen Sonderkinematik, ausgerüstet mit einem speziell entwickelten Druckkopf, hergestellt wurden. In der mechanischen Validierung konnten durchschnittliche Festigkeitssteigerungen von 12,5 % nachgewiesen werden. Als eine der wichtigsten Erkenntnisse wird beschrieben, dass die maximale Festigkeitssteigerung von 48 % bei Zugproben sich nicht direkt auf beliebige Bauteile übertragen lässt. Dies ist zum einen darin begründet, dass die konventionelle Bahnplanung meist kein Minimum der Festigkeit erzielt und dass die maximale Festigkeit nur da effektiv genutzt werden kann, wo die durch Ausrichtung der Bahnen verbundene höhere Steifigkeit sich nicht maßgeblich auf den Spannungsverlauf auswirkt. Die entwickelte Methode kann nun zur Festigkeitssteigerung von Bauteilen eingesetzt werden.

Short summary

In the last 10 years, Additive Manufacturing technologies have developed from a niche application for rapid prototyping to a technologically and economically significant industry. In order to further increase the productivity of these technologies, research is being conducted to optimize the process chain in the multi-axis fused filament fabrication process (brand name *Fused Deposition Modeling*), which holds great potential due to the process-technical freedoms. Within the scope of this work, a method for load-capable path planning was developed with the aim of producing parts with higher load-bearing capacity using the multi-axis fused filament fabrication. The underlying mechanical basis is that printed parts can withstand higher tensile stresses in the direction of the orientation of the extrusion beads than in other load directions. A summary of the current state of research and technology shows that there are still no solutions for process chains with this objective. The developed method enables a load-capable path planning on the basis of defined load cases with regard to anisotropic material behavior, to a local stress maxima-oriented strength increase as well as to applicability to complex part geometries. CAD geometries are divided into individual subvolumes, whose stress state can be described with a common main stress trajectory. The paths and thus the preferred direction of the printed beads are oriented along these trajectories. Various methods are used and evaluated to determine the trajectories and the subvolumes. In order to validate the path planning method, a linear-elastic, anisotropic part simulation and a mechanical validation were conducted. For this purpose, four reference parts – two academic parts and two parts of a personalized scoliosis orthosis – have been defined and produced using a special multi-axis kinematics operating with a developed printing head. In the mechanical validation, average strength increases of 12.5 % were verified. One of the most important findings is that the maximum strength improvements of 48 % of tensile specimens cannot be directly transferred onto individual parts. On the one hand, this is related to the fact that conventional path planning usually does not achieve minimum strength properties and that the maximum strength can only be effectively utilized where the associated higher stiffness based on the alignment of the paths does not have a significant effect on the stress distribution. The developed method can now be used to increase the strength of parts.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Kurzfassung	VI
Short summary	VII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XXI
Symbolverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Stand der Technik	5
2.1 Grundlagen der Additiven Fertigung.....	5
2.1.1 Überblick über Additive Fertigungsverfahren.....	6
2.1.2 Prozessbeschreibung und Eigenschaften des Schmelzschichtverfahrens.....	13
2.2 Prozesskette im Schmelzschichtverfahren.....	25
2.2.1 CAD.....	26
2.2.2 CAM-Bahnplanung	28
2.2.3 Maschinen- und Anlagentechnik für das Schmelzschichtverfahren.....	37
2.2.4 Steuerungstechnik für das Schmelzschichtverfahren	38
2.3 Beanspruchungsgerechte Bauteilherstellung im Schmelzschichtverfahren	39
2.3.1 Topologieoptimierung im Schmelzschichtverfahren.....	40

2.3.2	Methoden der endostrukturellen Optimierung.....	42
2.4	Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse sowie Defizite.....	45
3	Konzept zur belastungsgerechten Bahnplanung.....	47
3.1	Ableiten der fertigungstechnischen Randbedingungen.....	47
3.2	Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung.....	49
3.2.1	FE-Modellierung und Simulation	53
3.2.2	Ermittlung von Hauptspannungstrajektorien	55
3.2.3	Ermittlung von Subvolumen	62
3.2.4	Mehrachsige belastungsgerechte Einzelbahnplanung.....	64
3.2.5	Ansätze zum kollisionsfreien, mehrachsigen Schmelzschichtverfahren	66
3.2.6	FE-Modellierung endostrukturell optimierter Bauteile.....	68
3.3	Zusammenfassung der konzeptionellen Arbeit.....	71
4	Implementierung und Parametrierung der Bahnplanungsmethode	73
4.1	Systemarchitektur.....	73
4.2	FE-Modellierung und Simulation	75
4.2.1	Initiale isotrope statisch-mechanische Bauteilsimulation.....	75
4.2.2	Endostrukturelle transversal-isotrope statisch-mechanische Bauteilsimulation..	76
4.3	Implementierung der Trajektoriensuche und Subvolumenermittlung	77
4.4	Realisierung des CL-Slicings und der Einzelbahnplanung.....	84
4.5	Postprozessing bei der Bahnplanung	85
4.6	Mehrachsige CNC-Druckanlage	86
4.6.1	8-achsige Sonderkinematik	86
4.6.2	Druckkopfsystem	89
4.6.3	Steuerung der Druckanlage.....	91
4.6.4	Fertigung von Bauteilen an der Druckanlage	92

4.7	Zusammenfassung zum Kapitel Implementierung und Parametrierung	93
5	Simulative und experimentelle Validierung.....	95
5.1	Referenzbauteile	95
5.2	Untersuchungsmethoden zur Validierung	99
5.3	Das ebene L-Profil.....	100
5.4	Das gekrümmte L-Profil.....	107
5.5	Das Orthesenpad.....	111
5.6	Der lumbale Hebel.....	120
5.7	Kritische Reflexion der Methode und wissenschaftstheoretische Einbettung.....	126
6	Zusammenfassung und Ausblick	129
7	Anhang.....	131
A.1	Zugversuche mit verschiedenen Orientierungen	131
A.2	Kompressionsversuche	132
A.3	Extruder mit Endlosfaserintegration.....	133
	Literaturverzeichnis	135
	Lebenslauf	161

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ACP	Ansys Composite PrepPost
APT	Automatically Programmed Tool
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAIO	Computer Aided Internal Optimisation
CL	Curved Layer
CNC / NC	Computerized Numerical Control / Numerical Control
CS	Cold Spray
DED	Directed Energy Deposition
DfAM	Design for Additive Manufacturing
DLP	Direct Light Processing
EBDM	Electron Beam Direct Melting
EBF³	Electron Beam Freeform Fabrication
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FE / FEM	Finite Elemente / Finite-Elemente-Methode
FFF	Fused Filament Fabrication
FLM	Fused Layer Modeling
ISW	Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart
LA	Auftragschweißen mit koaxialer / schräger Drahtzuführung
LBM /SLM	Laser Beam Melting / Selective Laser Melting
LLM	Layer Laminate Manufacturing

LS / SLS	Laser Sintering / Selective Laser Sintering
MAG	Metall-Aktivgas-Schweißen
MIG	Metall-Inertgas-Schweißen
NURBS	Non-uniform rational B-Spline
PA	Polyamid
PC	Polycarbonate
PEEK	Polyetheretherketon
PJM / MJM	Poly Jet Modeling / Multi Jet Modeling
PLA	Poly lactide
PPS	Polyphenylensulfid
SL	Stereolithografie
SMS	Selective Mask Sintering
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TcCOM	TwinCAT Component Object Modul – echtzeitfähiges Software-Modul
TCP	Tool Center Point
TPE	Thermoplastische Elastomere
UV	Ultraviolettes Licht
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
3DP	Binder Jetting

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Umsatz der Endprodukte, die durch Additive Fertigung hergestellt wurden (Wohlers et al. 2021).....	1
Abbildung 1-2: Vergleich der Stückkosten bei konventioneller und Additiver Fertigung als Funktionen von Bauteilkomplexität und Losgröße nach (Klahn et al. 2021).....	3
Abbildung 1-3: Schematischer Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2-1: Klassifikation der Additiven Fertigungsverfahren nach dem Materialfluss (Schmelzschichtverfahren in rotem Strichverlauf)	8
Abbildung 2-2: Drei Typen der Extrusionsverfahren: filament-geführte Extrusion (links); Schneckenextrusion (Mitte); Spritzen-Kolben-Extrusion (rechts) (nach (Gleadall et al. 2018))	9
Abbildung 2-3: Funktionsprinzip des Schmelzschichtverfahrens	14
Abbildung 2-4: Plastografische Skizze von gedruckten Extrusionsraupen mit (teil-) kristallinen und amorphen Bereichen.....	17
Abbildung 2-5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Zugproben aus PLA.....	19
Abbildung 2-6: Entwicklung der Prozessführung: 3-achsiges Fräsen (a1); Mehrachsfräsen (a2); planares Drucken (b1); Mehrachsdrucken (b2).....	24
Abbildung 2-7: Digitale Prozesskette im Schmelzschichtverfahren	26
Abbildung 2-8: Ebenes Slicing einer tessellierten Geometrie.....	32
Abbildung 2-9: Selbstschneidende Flächen beim Curved-Layer-Slicing (Wolf 2018)	34
Abbildung 2-10: Einzelbahnplanung mit NURBS-Flächen	36
Abbildung 2-11: Konventionelle 3-achsige Desktop-Anlage (links); 6-achs-Knickarmroboter und feststehender Druckkopf (rechts).....	37
Abbildung 2-12: Arten der Strukturoptimierung: Modell und Belastungsfall (links); Topologieoptimierung (Mitte); endostrukturelle Optimierung (rechts).....	39
Abbildung 2-13: Topologisch optimierte Schalenstruktur aus faserverstärktem Beton.....	41

Abbildung 3-1:	Methode zur belastungsgerechten mehrachsigen Bahnplanung.....	52
Abbildung 3-2:	Hauptachsentransformation eines infinitesimalen Elementes	56
Abbildung 3-3:	Runge-Kutta-Interpolationsverfahren zur Ermittlung von Hauptspannungstrajektorien	58
Abbildung 3-4:	Hauptspannungstrajektoriensuche nach Beyer.....	60
Abbildung 3-5:	Schematische Darstellung des Nearest-Neighbor-Suchalgorithmus (Ü = Überprüfung des Elements; S = Suche neuer Nachbarelemente)	63
Abbildung 3-6:	Slicingbeispiel: Bauteil mit Slicingfläche (links); einzelne Schichten (rechts).....	65
Abbildung 3-7:	Reduktionsmethoden in der online Auftragssimulation (Wörner 2018).....	67
Abbildung 4-1:	Verarbeitungskette der belastungsgerechten Bahnplanung.....	74
Abbildung 4-2:	Transversal-isotrope Simulation eines Zugstabes: Vernetzung und Randbedingungen (oben); Zugspannungen bei Längsbahnen (Mitte); Zugspannungen bei Querbahnen mit Außenbahnen (unten)	76
Abbildung 4-3:	Vereinfachtes Klassendiagramm für die Trajektorien- und Subvolumensuche	77
Abbildung 4-4:	Ausrichtung der Hauptspannungsvektoren: lokale Suche um den roten Knoten im roten Suchbereich und Umorientierung der grünen Vektoren (links); Trajektoriensuche mit globaler in violett und lokaler Ausrichtung in rot (rechts).....	79
Abbildung 4-5:	Vereinfachtes Klassendiagramm der Trajektoriensuche	80
Abbildung 4-6:	Modifikationsverfahren für die Runge-Kutta-Trajektoriensuche: Projektionsverfahren (links); Orientierungs-Modifikationsverfahren (rechts).....	81
Abbildung 4-7:	Hauptspannungstrajektorien mit Runge-Kutta- und Beyer-Verfahren.....	81

Abbildung 4-8: Beispiele für die Subvolumensuche mit FE-Modell (oben links), zwei ermittelten Hauptspannungstrajektorien (oben rechts) sowie die Subvolumen der direkten Zuweisung (unten links) und des Nearest-Neighbor-Algorithmus (unten rechts); (Subvolumen sind aus visuellen Gründen auseinander verschoben)	83
Abbildung 4-9: CL-Slicing (links) und Einzelbahnplanung (rechts) eines Beispielbauteils	84
Abbildung 4-10: 8-achsige Sonderkinematik: Gesamtanlage mit Human-Machine-Interface (links); Achsen in blau mit Werkstückkoordinatensystem (rechts).....	87
Abbildung 4-11: Speziell schlanker Druckkopf für kleinen Kollisionsraum: CAD (links); realer Druckkopf im Druckprozess (rechts)	90
Abbildung 4-12: Steuerungsarchitektur der 8-achsigen Druckanlage.....	91
Abbildung 5-1: Akademische Referenzbauteile: ebenes L-Profil (links); gekrümmtes L-Profil (rechts).....	96
Abbildung 5-2: Skolioseorthese des Modells TriaC II [Quelle: Sporlastic GMBH] (links); Demonstrator für personalisierte Skolioseorthopädie (rechts)	97
Abbildung 5-3: Orthesenpad (links) und lumbaler Hebel (rechts) einer personalisierten Skolioseorthese	98
Abbildung 5-4: Mehrachsiger Druck des Orthesenpads (links); Zug-Druck-Kombiprüfmaschine an der Materialprüfanstalt Stuttgart (rechts)	100
Abbildung 5-5: Isotrope FE-Simulation des ebenen L-Profiles: Vernetzung und Randbedingungen (links); Simulationsergebnis der ersten Hauptspannung (rechts)	101
Abbildung 5-6: Hauptspannungstrajektorie des ebenen L-Profiles	102
Abbildung 5-7: Modellierung (oben) und Simulation (unten) der transversal-isotropen Eigenschaften; X-Y-Kreuzgelege (links); Trajektorienorientierung (rechts).....	103

Abbildung 5-8: Gedruckte ebene L-Profile: konventionell (links); belastungsgerecht (rechts).....	104
Abbildung 5-9: Kraft-Weg-Diagramm des Testbauteil (ebenes L-Profil).....	105
Abbildung 5-10: Bruchverhalten der ebenen L-Profile	106
Abbildung 5-11: Simulationsergebnis der ersten Hauptspannung des isotropen gekrümmten L-Profils (links); Hauptspannungstrajektorie (rechts).....	108
Abbildung 5-12: Gekrümmte Slicingfläche des gekrümmten L-Profils (links); konventionelles, 3-achsiges Slicing und Stützstruktur (rechts).....	109
Abbildung 5-13: Kraft-Weg-Diagramm des Testbauteils (gekrümmtes L-Profil)	110
Abbildung 5-14: Bruchverhalten der gekrümmten L-Profile	111
Abbildung 5-15: Isotrope FE-Simulation des Orthesenpads: Vernetzung und Randbedingungen (oben); Simulationsergebnis der ersten Hauptspannung (unten).....	112
Abbildung 5-16: Hauptspannungstrajektorien T_a bis T_g mit Startpunkten $P_{0,a}$ bis $P_{0,h}$ im Orthesenpad	114
Abbildung 5-17: Subvolumensuche beim Orthesenpad: Lösungsgeometrien aus Suchalgorithmus (oben); manuelle Nachkonstruktion der Subvolumen (unten).....	115
Abbildung 5-18: Slicingfläche für das CL-Slicing beim Orthesenpad	116
Abbildung 5-19: Gedrucktes Orthesenpad: belastungsgerechte Bahnplanung (oben); konventionelle Bahnplanung (unten).....	117
Abbildung 5-20: Kraft-Weg-Diagramm des Testbauteils Orthesenpad	118
Abbildung 5-21: Bruchverhalten beim Orthesenpad: belastungsgerechte Bahnplanung (oben); konventionell Bahnplanung (unten).....	119
Abbildung 5-22: Isotrope FE-Simulation des lumbalen Hebels: Ergebnis der ersten Hauptspannung beim Belastungsfall 1 (oben) und beim Belastungsfall 2 (unten).....	120

Abbildung 5-23: Hauptspannungstrajektorien T_a bis T_c mit Startpunkten $P_{0,a}$ bis $P_{0,c}$ im lumbalen Hebel	121
Abbildung 5-24: Subvolumensuche beim lumbalen Hebel: Ergebnisse aus Suchalgorithmus (oben); Nachkonstruktion der Subvolumen (unten).....	122
Abbildung 5-25: Kraft-Weg-Diagramm des Testbauteils lumbaler Hebel mit Biegebelastung in Z-Richtung.....	124
Abbildung 5-26: Bruchverhalten beim lumbalen Hebel: belastungsgerechte Bahnplanung (oben); konventionelle Bahnplanung (unten)	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Druckparameter für Zugprüfkörper.....	19
Tabelle 2-2: Ermittelte mechanische Eigenschaften der Zugprüfkörper.....	20
Tabelle 2-3: Vergleich richtungsabhängiger Bauteilfestigkeiten von gedruckten Proben.....	20
Tabelle 2-4: Veröffentlichte Ansätze zum Mehrachsdruck zur Reduzierung des Stufeneffektes und zur Einsparung von Stützstrukturen	25
Tabelle 2-5: Tabelle der Eigenschaften unterschiedlicher Dateiformate	28
Tabelle 2-6: Validierungstabelle der publizierten endostrukturellen Optimierungsmethoden	44
Tabelle 3-1: Grundbelastungsfälle und Potenzial zur Festigkeitsoptimierung durch Bahnplanungsmethoden (die Vorzugsrichtung ist blau dargestellt)	49
Tabelle 3-2: Methodischer Vergleich zwischen den Hauptspannungstrajektorienalgorithmen	61
Tabelle 3-3: Methodischer Vergleich zwischen den Subvolumensuchalgorithmen	64
Tabelle 4-1: Variablenimport von RST-Dateien (n = Anzahl Knoten; e = Anzahl Elemente)	78
Tabelle 4-2: Beispiel zum Vorgehen bei Subvolumensuche mit Nachbarelementliste.....	82
Tabelle 4-3: Achsen der 8-achsigen Sonderkinematik und deren Arbeitsbereiche.....	88
Tabelle 4-4: Verwendete Druckparameter bei Druckvorgängen.....	92
Tabelle 5-1: Bahnstrategien für das ebene L-Profil mit Druckdauer	104
Tabelle 5-2: Vergleich der Festigkeit und Steifigkeit beim ebenen L-Profil	106
Tabelle 5-3: Vergleich der Festigkeit und Steifigkeit beim gekrümmten L-Profil	110
Tabelle 5-4: Vergleich der Festigkeit und Steifigkeit beim Orthesenpad	118
Tabelle 5-5: Vergleich der Festigkeit und Steifigkeit beim lumbalen Hebel.....	124

Symbolverzeichnis

Lateinische Großbuchstaben

A_{Ext}	[m ²]	Querschnittsfläche der Düse
$B2$	[°]	Achswert von B2 im transformierten Werkstückkoordinatensystem
$C2$	[°]	Achswert von C2 im transformierten Werkstückkoordinatensystem
$\bar{\underline{C}}$		Steifigkeitsmatrix
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
E_i	[-]	Hilfspunkte zur Trajektoriensuche
F_{Fil}	[N]	Förderkraft des Filamentvorschubs
F	[N]	Kraft
\bar{F}	[N]	Kraftvektor
G	[MPa]	Schubmodul
H_S		Slicingfläche
L_{Tz}	[m]	Abstand zwischen der Rotationsachse der B2-Achse und der Tischoberfläche
M_t	[Nm]	Drehmoment Motor
M_b	[Nm]	Biegemoment
M_i		Achswert des Antriebs i im Weltkoordinatensystem
P		Punkt im Koordinatensystem
\bar{P}	[m]	Ortsvektor des Punktes P
Q_{ein}	[J]	Wärmezufuhr
R_m	[MPa]	Zugfestigkeit
R_{Reib}	[N]	Reibkraft
S	[-]	Sicherheitsbeiwert
S_{abw}		Empirische Standardabweichung
T		Trajektorie
V		Volumen einer Geometrie
V_l		Subvolumen l , als Untermenge des gesamten Volumens
\dot{V}_{Ext}	[m ³ /s]	Extrudierter Volumenstrom
$\bar{\underline{Z}}$		Nachgiebigkeitsmatrix

Lateinische Kleinbuchstaben

a	[m/s ²]	Beschleunigung
a_n	[-]	Polynomkoeffizient
a_l	[-]	Zugehörigkeitsfaktor für Spannungsrichtung zum Subvolumen l
b_{Abst}	[m]	Abstand zweier abgelegter Raupen
b_{Ext}	[m]	Breite der extrudierten Raupe
b_l	[-]	Zugehörigkeitsfaktor für niedere Spannung zum Subvolumen l
c_i	[N ⁻¹]	Steifigkeitswert
$d_{\text{Düse}}$	[m]	Durchmesser der Düse
d_{Fil}	[m]	Durchmesser des Filaments
d_l	[-]	Zugehörigkeitsfaktor für Entfernung zur Trajektorie zum Subvolumen l
\overline{dp}_i	[m]	Schrittvektor im Runge-Kutta-Interpolationsverfahren
$d_{\text{Rän}}$	[m]	Nenndurchmesser des Rändels
e	[-]	Anzahl Elemente
e_i	[-]	Diskretes i -tes Element
\bar{e}_i		Einheitsvektor in i -Richtung
f		Zielfunktion
f_σ	[-]	Richtungsänderungsfaktor der Trajektoriensuche
g		Randbedingungen
h_{Ext}	[m]	Höhe der extrudierten Raupe
n	[-]	Anzahl Knoten
\bar{n}		Normalenvektor
q	[-]	Anzahl Proben
\bar{r}_B		Vektor des Bauteilrisses
\bar{r}_g		Position eines CAD-Bauteils
\bar{s}_i		Normalisierte Richtungsvektoren der i -ten Hauptspannungen
\bar{u}		Verschiebungsvektor
u, w	[-]	Koordinaten im Parameterraum
v_{Bahn}	[m/s]	Bahngeschwindigkeit
$v_{\text{Ext,m}}$	[m/s]	Mittlere Extrusionsgeschwindigkeit
v_{Fil}	[m/s]	Fördergeschwindigkeit des Filaments
\bar{w}_s		Aufbaurichtung einer Slicingfläche

Griechische Großbuchstaben

Δ_E	[m]	Abstand zwischen Hilfspunkten
Δ_s	[m]	Schrittweite im Interpolationsverfahren
Δ_t	[s]	Zeitschrittweite
Δ_θ	[°]	Extrapolationsgröße des Polarwinkels
Δ_ψ	[°]	Extrapolationsgrößen des Azimutwinkels
$\bar{\phi}_0$		Vektor der Startrichtung des Interpolationsverfahrens
$\bar{\phi}_g$		Orientierungsvektor eines (Sub-)Volumens im Koordinatensystem
$\bar{\phi}_i$		Oberflächennormalen am Punkt i

Griechische Kleinbuchstaben

α	[°]	Winkel zwischen zwei Vektoren
α_z, α_b	[-]	Kerbwirkungszahlen für Zug und Biegung
γ_a	[-]	Zugehörigkeitsparameter für Spannungsrichtung
γ_d	[-]	Zugehörigkeitsparameter für Abstand zur Trajektorie
δR_m	[%]	Relative Differenz der Zugfestigkeiten
ε	[-]	Dehnung
ϵ	[-]	Translatorische Verzerrung
$\bar{\underline{\varepsilon}}$		Verzerrungstensor
$\eta_{\max,l}$	[-]	Maximaler Zugehörigkeitswert der Subvolumen l
θ	[-]	Polarwinkel
ϑ_{BR}	[K]	Bauraumtemperatur
ϑ_{Heiz}	[K]	Heiztemperatur
ϑ_{Glas}	[K]	Glasübergangstemperatur (Kunststoff)
ϑ_{Krist}	[K]	Kristallisationstemperatur (Kunststoff)
$\vartheta_{Schmelz}$	[K]	Schmelztemperatur (Kunststoff)
λ	[MPa]	Lamé-Konstante
μ		Mittelwerte
ν	[-]	Querkontraktionszahl
ξ	[-]	Trajektorienvariable
ξ^*	[-]	Koordinate der Trajektorienvariablen, die zum betrachteten Element den kürzesten Abstand hat

ρ	[m]	Krümmungsradius der Trajektorie
ρ_{tol}	[m]	Grenzwert des Krümmungsradius
$\bar{\rho}$	[-]	Elementdichte
σ	[MPa]	Spannung
σ_{comp}	[MPa]	Spannung in einem Verbundwerkstoff
σ_f	[MPa]	Faserspannung
$\bar{\sigma}_H$	[MPa]	Spannungstensor im Hauptachsensystem
σ_i	[MPa]	Normalspannung in i -Richtung oder i -te Hauptspannung
σ_m	[MPa]	Matrixspannung
$\sigma_{t/c}$	[MPa]	Normalspannungen in den Schnittflächen (t für Zug, c für Druck)
σ_{zul}	[MPa]	Zulässige Maximalspannung
$\bar{\sigma}$	[MPa]	Spannungstensor
τ	[MPa]	Schubspannungen
φ_f	[-]	Volumetrischer Faseranteil
φ_m	[-]	Volumetrischer Matrixanteil
χ_1, χ_2	[-]	Fasereffizienzfaktoren
ψ	[°]	Azimutwinkel
$\omega_{\text{Rän}}$	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit des Rändelrads

1 Einleitung

Die Anforderungen an Bauteile hinsichtlich Individualisierbarkeit und schneller Verfügbarkeit werden im industriellen Kontext wie auch im Privatbereich zunehmend größer. Daher steigt der Druck auf die Produktionsbranche, Kundenwünschen gerecht zu werden und gleichzeitig wettbewerbsfähig zu bleiben. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, ergänzen in zunehmendem Maße moderne Fertigungsmethoden die Produktionslandschaft. Hierbei weist die Additive Fertigung entscheidende Vorteile bei der schnellen Produktion von Bauteilen kleiner Losgröße auf. Insbesondere im Zusammenhang mit personalisierten Produkten, die sich durch einen hohen Grad an Geometrievariation auszeichnen, ermöglicht die Additive Fertigung kostengünstige Lösungen. Die Anwendungen dieser Technologien reichen von hochwertigen Titankomponenten für die Luftfahrt und Medizintechnik bis hin zu Prototypen im Hobbybereich (Ngo et al. 2018). Die diversen Technologien der Additiven Fertigung weisen, prozesstechnisch betrachtet, Gemeinsamkeiten beim additiven Materialauftrag sowie der Materialverfestigung auf und bieten die revolutionäre Möglichkeit, Bauteile unabhängig von ihrer geometrischen Komplexität herstellen zu können (Breuninger et al. 2013). Diese Vorteile, verbunden mit einer stetigen Entwicklung hin zu etablierten Fertigungstechnologien, führten zum rasanten Anstieg des Marktanteils der Additiven Fertigung (siehe Abbildung 1-1), dennoch sind deren Potenziale noch längst nicht ausgeschöpft.

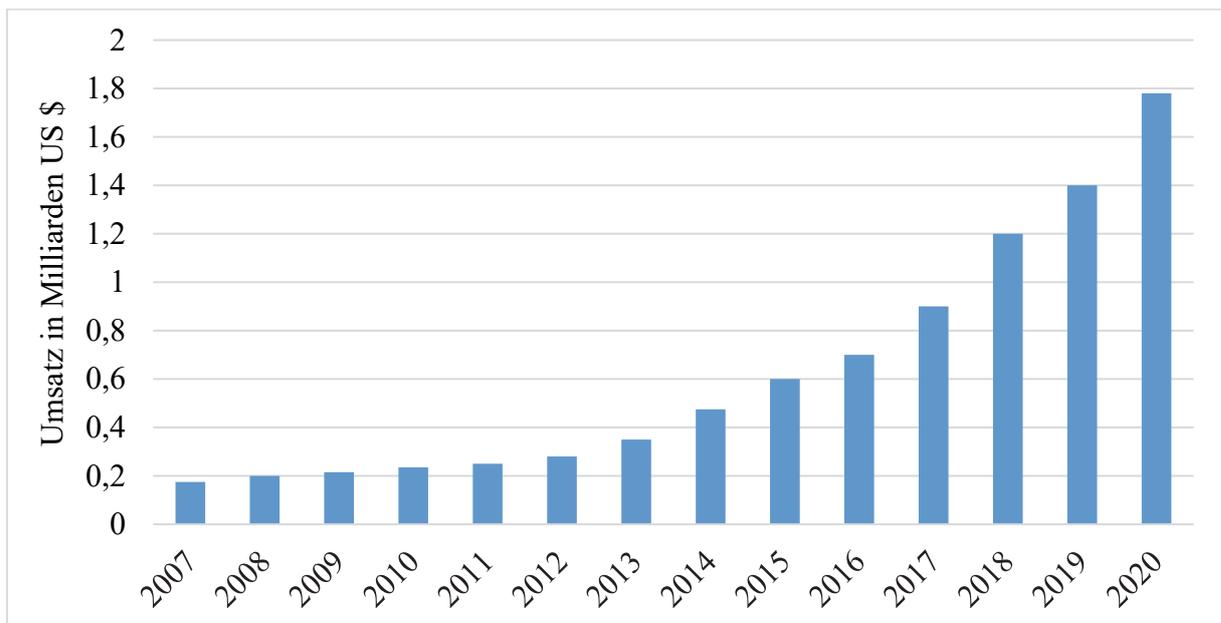


Abbildung 1-1: Umsatz der Endprodukte, die durch Additive Fertigung hergestellt wurden (Wohlers et al. 2021)

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Methoden zur effizienten Nutzung der konstruktiven Freiheiten, welche durch die Additive Fertigung geschaffen worden sind, stellen kein abgeschlossenes Forschungsgebiet dar. An robusten Prozessketten und an ausschöpfender Prozess- und Materialienvielfalt wird intensiv geforscht. Die zukünftige sozioökonomische Rolle der Additiven Fertigung im Jahre 2030 wird in (Jiang et al. 2017) prognostiziert. Darin wird beschrieben, dass diese Technologien im Ersatzteilmarkt wie auch im Konsumbereich zunehmend Einsatz finden werden, aber dafür zwingend sowohl eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften als auch angepasste Konstruktionsmethoden erforderlich sind. Suboptimale mechanische Eigenschaften und anisotropes Verhalten gedruckter Bauteile begrenzen deshalb aktuell noch das Potenzial des großflächigen Einsatzes dieser Technologien (Ngo et al. 2018). Ein Defizit hierbei liegt in prozessorientierten Bahnplanungssystemen, die hinsichtlich Optimierung der Festigkeitseigenschaften eines Bauteils nicht vorhanden oder nicht robust einsetzbar sind und dadurch das gesamte Potenzial der Festigkeitsoptimierung aktuell nicht gehoben wird. Das führt dazu, dass Funktionsbauteile, die eine definierte mechanische Belastbarkeit haben müssen, lediglich einen Anteil von 25,2 % aufweisen, wohingegen 31,5 % der additiv gefertigten Bauteile Endverbraucherteile sind (Wohlers et al. 2021).

Dem gegenüber bietet die Additive Fertigung ein mächtiges Alleinstellungsmerkmal: die freie Gestaltung von inneren Strukturen durch den Druck- oder Laminierungsprozess (Janssen 2020). Ergänzend können durch eine geeignete Prozessführung Bauteile mit höherer Festigkeit hergestellt werden, also größere Lasten ertragen, bevor sie versagen. Hierbei wird die mechanische Eigenschaft genutzt, dass gedrucktes Material in Richtung der Prozessbewegung in der Regel eine höhere Festigkeit aufweist als orthogonal dazu. Es ist deshalb vorteilhaft, die Werkstofforientierung mit höherer Festigkeit in Richtung der auftretenden mechanischen Spannungen zu orientieren. Diese endostrukturelle Optimierungsmethode bedient sich der beschriebenen anisotropen Eigenschaft und kann umso effizienter eingesetzt werden, je exakter die Werkstofforientierung der maximalen Festigkeit dem Spannungsverlauf folgt.

Im Hinblick auf Funktionsbauteile bietet das sogenannte Schmelzschichtverfahren den Vorteil, dass es eine kostengünstige Technologie ist, die einfach in der Handhabung und Prozessführung ist. Insbesondere kann dieses Verfahren nicht nur als ebener, sondern auch als räumlicher

Druckprozess realisiert werden. Konventionelle Fertigungsanlagen für das Schmelzschicht besitzen prozessbedingte Limitierungen, welche lediglich eine endostrukturelle Optimierung im ebenen Fall erlauben. Die Weiterentwicklung zum mehrachsigen Schmelzschichtverfahren ermöglicht das räumliche Drucken mittels gekrümmter Bahnen. In dieser Arbeit wird der Begriff *Mehrachsigkeit* verwendet, mit Bezug auf eine kinematische Bewegung mit drei kartesischen translatorischen Achsen und mindestens einer weiteren rotatorischen Achse. Es existiert zum aktuellen Zeitpunkt jedoch noch keine durchgängige kommerzielle oder forschungsbezogene effiziente Methode, die Bahnen entlang der auftretenden Spannungen positioniert und damit Bauteile hinsichtlich definierter Belastungsfälle festigkeitsoptimiert fertigbar sind.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Grundlagen zu schaffen, damit Funktionsbauteile durch eine belastungsgerechte Auslegung der Prozesskette im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren mit höherer Festigkeit hergestellt werden können, im Vergleich zur konventionellen ebenen Variante des Verfahrens. Ein Funktionsbauteil ist hierbei gekennzeichnet durch eine eindeutige Geometrie, die nicht modifiziert wird, und bestimmte Festigkeitsanforderungen, um einen oder mehrere definierte Belastungsfälle ertragen zu können. Für die Untersuchung hinsichtlich der belastungsgerechten Gestaltung dieser Prozesskette soll eine Methode entwickelt und anhand von Referenzbauteilen validiert werden. Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf Bauteilen niederer Stückzahl, die additiv gefertigt werden (siehe Abbildung 1-2), wodurch keine Konkurrenz zu spritzgegossenen Bauteilen existiert. Dadurch soll ermöglicht werden, die Vorteile des Schmelzschichtverfahrens mit der Erfüllung mechanischer Anforderungen zu kombinieren.

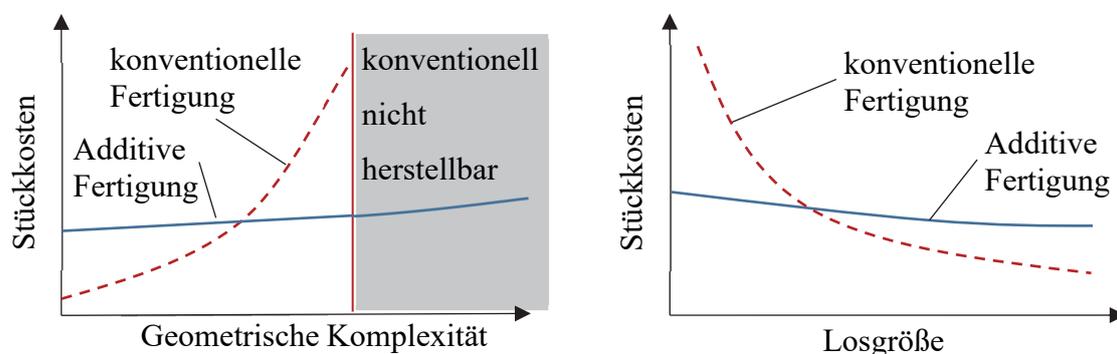


Abbildung 1-2: Vergleich der Stückkosten bei konventioneller und Additiver Fertigung als Funktionen von Bauteilkomplexität und Losgröße nach (Klahn et al. 2021)

1.3 Aufbau der Arbeit

Im nun folgenden Kapitel wird das Themenfeld der Additiven Fertigung detailliert beschrieben. Hierbei wird insbesondere auf das Schmelzschichtverfahren und die Möglichkeiten zur belastungsgerechten Fertigung eingegangen. Aus diesen Erkenntnissen werden dann im Rahmen eines Konzeptes Anforderungen definiert für die nachfolgende Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung. Die entwickelte Methode sowie deren Teilfunktionen werden erläutert (Kapitel 3). Darauf folgend wird deren Implementierung, sowie die Entwicklung und die Anwendung mit einer mehrachsigen Druckanlage beschrieben (Kapitel 4). Um die Methode zu validieren, werden vier Referenzbauteile experimentell und simulativ untersucht. Zudem werden die Ergebnisse der Validierung diskutiert und die Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung kritisch reflektiert (Kapitel 5). Abschließend folgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsansätze (Kapitel 6). Der schematische Aufbau der Arbeit ist nachfolgend skizziert.

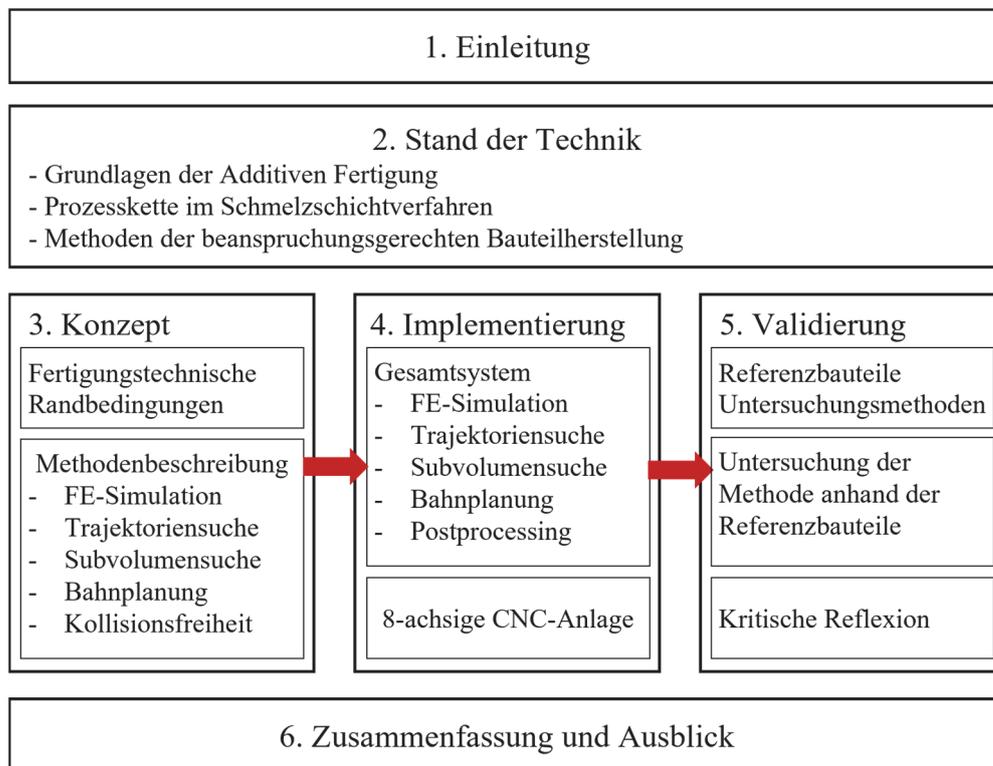


Abbildung 1-3: Schematischer Aufbau der Arbeit

2 Stand der Technik

Um den Forschungsbereich und den technologischen Stand der Technik und der Forschung einordnen zu können, werden in diesem Kapitel die relevanten Themengebiete gegliedert und erläutert. Im Kontext der wissenschaftlichen Fragestellung dieser Arbeit betrifft das die allgemeine Technologie des betrachteten Schmelzschichtverfahrens und die speziellen Forschungsansätze zur Festigkeitssteigerung, sowie deren Optimierungspotenzial. Daher gliedert sich dieses Kapitel in drei Bereiche mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden:

- Grundlagen der Additive Fertigung
- Prozesskette im Schmelzschichtverfahren
- Beanspruchungsgerechte Bauteilherstellung im Schmelzschichtverfahren

2.1 Grundlagen der Additiven Fertigung

Die Norm DIN 8580 teilt die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen ein, wobei es sich bei der Additive Fertigung um urformende Verfahren handelt (Berger et al. 2013). Die Begriffe Additive Fertigung (englisch Additive Manufacturing) oder Generative Fertigung und die damit assoziierte Technologie besitzen zahlreiche terminologische Variationen, die sich auf spezifische Eigenschaften von Verfahren und Verwendungen beziehen. Populärwissenschaftlich verbreitet ist der Terminus *3D-Druck* aufgrund des eindeutig räumlichen Charakters. Darüber hinaus sind Begriffe wie *Rapid-Prototyping*, *-Tooling* und *-Manufacturing* bekannt. Allgemein ist die Additive Fertigung definiert als ein Verfahren zur Verbindung von Materialien in der Herstellung von räumlichen Körpern aus 3D-Modelldaten, normalerweise Schicht auf Schicht, im Gegensatz zu subtraktiven und formativen Herstellungsverfahren (Norm ISO/ASTM 52900:2015).

Die Erfindung der *Stereolithografie* durch Charles W. Hull (Berger et al. 2013) im Jahre 1982 gilt als technologischer Beginn der Additiven Fertigung, neben weiteren historisch bedeutenden Vorläufern. Ein weiterer Meilenstein auf diesem Gebiet war die patentierte Erfindung des Schmelzschichtverfahrens durch S. Scott Crump (Crump 1989) mit der englischen Bezeichnung *Fused Layer Modeling* (FLM) oder *Fused Filament Fabrication* (FFF), das unter dem Markennamen *Fused Deposition Modeling* (FDM) bekannt wurde. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieses Verfahren unter dem deutschen Begriff *Schmelzschichtverfahren* geführt. Durch

die Beendigung des Schutzrechts und der Entwicklung günstiger Desktop-Drucker ist ab 2008 ein Trend um diese Fertigungstechnologie entstanden.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Additiven Fertigungsverfahren erläutert und verfahrenstechnisch gegliedert. Dabei werden insbesondere die verschiedenen Wirkprinzipien und die zu verarbeitenden Werkstoffe beschrieben. Im Anschluss wird im Speziellen auf das Schmelzschichtverfahren eingegangen und die zugehörige Prozesskette vom *Computer-Aided Design* (CAD) bis zum gefertigten Bauteil im Unterkapitel 2.2 beschrieben.

2.1.1 Überblick über Additive Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren sind gekennzeichnet durch das Fertigungsprinzip des Auf- und Aneinanderfügens von Volumeninkrementen (auch als Voxel bezeichnet). Dieser Ablauf geschieht meist schichtweise, er kann bahngesteuert erfolgen und findet in der Regel automatisiert statt (Gebhardt 2013). Durch diese Methode können Bauteile mit komplexer Geometrie aus unterschiedlichen Werkstoffen aufgebaut werden. Im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsverfahren zeichnet sich die Additive Fertigung dadurch aus, dass sie als werkzeugloses Verfahren beschrieben wird (obwohl ein Druckkopf selbst als Werkzeug angesehen werden kann). Dies bedeutet, dass die Verfahren für jede zu fertigende Bauteilgeometrie, die im Rahmen der fertigungstechnischen Randbedingungen herstellbar ist, dieselbe Hardware benötigen, also keine bauteilabhängige Anpassung der Fertigungsmittel notwendig ist.

Ausgehend von den ursprünglichen Additiven Fertigungsverfahren wie der *Stereolithografie*, wurden zahlreiche Verfahren entwickelt, die sich im industriellen Einsatz etabliert haben. Diese Verfahren unterscheiden sich in multikriterieller Weise voneinander, beispielsweise durch Fertigungsprinzip, den verwendeten Materialtyp, die Zustandsform des Materials vor dem Prozess, den Temperaturbereich bei der Verarbeitung, die Nachbehandlung, die Verschmelzungs- oder Aushärtmethode sowie Art und Fluss der Materialzufuhr (Williams et al. 2011). Strukturelle Einordnungen und Klassifizierungen der Verfahren wurden zahlreich publiziert. Grundsätzlich lassen sich alle Additive Fertigungsverfahren in zwei Hauptkategorien unterteilen. Diese sind entsprechend der Materialförderungsart definiert als:

- Pulver- und Flüssigkeitsbett oder Laminat-Verfahren
- Freiformverfahren

Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst eine etablierte Klassifizierung der Additiven Fertigungsverfahren erläutert. Im Anschluss wird im Hinblick auf den Materialfluss, der von besonderer steuerungstechnischer Bedeutung ist, eine weitere Klassifizierung präsentiert, welche im Rahmen dieser Arbeit erstellt worden ist. Darauf aufbauend werden die Prinzipie der verbreitetsten Verfahren kurz skizziert. Abschließend erfolgt ein kurzer Vergleich der Verfahren sowie eine Auflistung der eingesetzten Werkstoffe.

Seit 2015 gibt es eine offizielle technologisch-terminologische Normung der Additiven Fertigung nach (Norm DIN EN ISO/ASTM 52900), welche diese in folgende Kategorien unterteilt:

1. Freistrahl-Bindemittelauftrag (englisch Binder Jetting)
2. Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (englisch Directed Energy Deposition)
3. Materialextrusion (englisch Material Extrusion)
4. Freistrahl-Materialauftrag (englisch Material Jetting)
5. Pulverbettbasiertes Schmelzen (englisch Powder Bed Fusion)
6. Schichtlaminierung (englisch Sheet Lamination)
7. Badbasierte Photopolymerisation (englisch Vat Photopolymerization)

Die meisten bekannten Additiven Fertigungsverfahren lassen sich in diese Kategorien einordnen (Wohlers et al. 2021). Für eine Differenzierung der Verfahren mit einheitlichen Prozesscharakteristika zu Forschungszwecken ist diese Gliederung nur bedingt sinnvoll, da diese Kategorien die Verfahren nicht hinsichtlich prozessspezifischer Einflussparameter differenzieren.

Von entscheidender steuerungstechnischer Relevanz ist der Materialfluss in den additiven Prozessen. Dies ist nicht zuletzt darin begründet, dass die Erzeugung der mechanisch-technologischen Eigenschaften eines herzustellenden Bauteils im Bauprozess geschieht und diese durch die Bewegungsführung beeinflusst werden (Gebhardt 2013). Deshalb wurde die Klassifikation nach Abbildung 2-1 erstellt, die Verfahren in die Art der Materialzuführung unterteilt. Hierbei gibt es die Hauptkategorien des *schichtweisen* und *punktweisen Materialauftrags*, wobei letzteres im oder in der Nähe des Tool Center Points (TCP) geschieht. Die Hauptkategorie *Schichtweise Materialzufuhr* ist in der Regel zeitlich und örtlich asynchron zum Bearbeitungsprozess, kann jedoch bei entsprechender Prozessautomatisierung zeitlich synchron und örtlich asynchron zum Prozess erfolgen (bspw. Schichtauftrag durch Rakel beim Pulverbett-Verfahren).

Diese Hauptkategorien sind deshalb steuerungstechnisch getrennt zu betrachten, da bei der *TCP-anhängigen Materialförderung* während des Prozesses die Materialmenge, der Volumenstrom und deren zeitliche Kopplung mit der TCP-Bewegung beeinflusst werden kann. Dies ist bei der *schichtweisen Materialförderung* nicht der Fall. Des Weiteren ist bei der Hauptkategorie der *schichtweisen Materialförderung* die Aufbaurichtung ausschließlich eben und während des Bearbeitungsprozesses nicht änderbar. Dadurch werden gekrümmte Schichten oder kontinuierliches Drucken von gekrümmten Materialsträngen im Raum als nicht herstellbar angesehen. Eine Kreuzung der beiden Hauptkategorien stellt das Binder-Jetting-Verfahren dar. Hierbei erfolgt die Aufbringung des Primärwerkstoffs schichtweise, das zur Bindung aktivierende Medium wird hingegen TCP-geführt aufgetragen. In Abbildung 2-1 ist das Schmelzschichtverfahren im roten Strichverlauf zu finden. Im Folgenden werden die für das weitere Verständnis relevanten Einzelverfahren kurz skizziert.

Materialextrusion: Prozesse der Kategorie *Materialextrusion* dosieren selektiv Material durch eine Düse (Gebhardt 2013). Aktuell gibt es nach (Gleadall et al. 2018) drei verschiedene Extrusionsverfahren: Filament-gefördert, Schneckenextrudiert, und Spritzen-Kolben-Extrusion, welche in der Abbildung 2-2 skizziert sind.

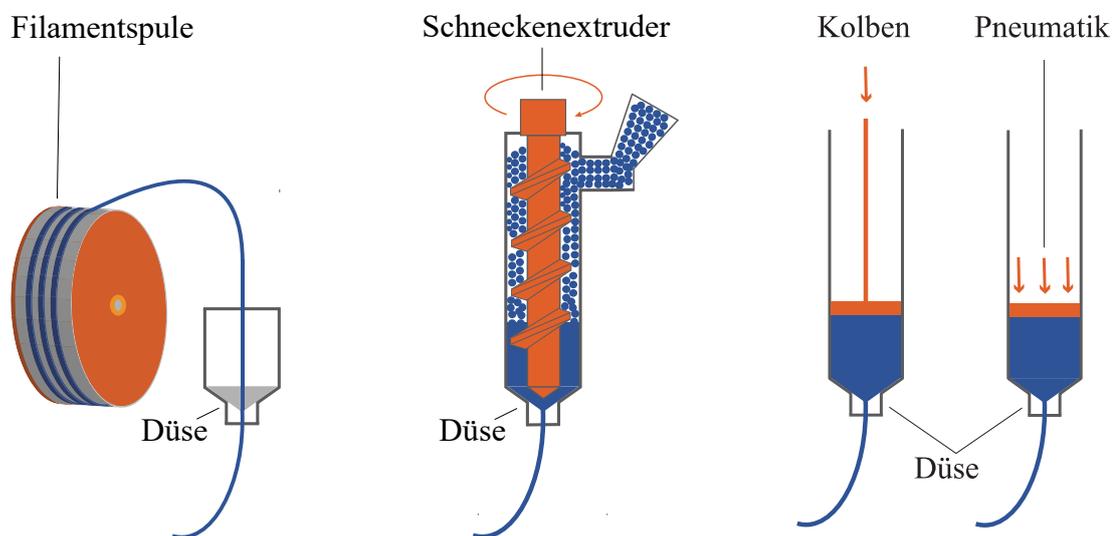


Abbildung 2-2: Drei Typen der Extrusionsverfahren: filament-geförderte Extrusion (links); Schneckenextrusion (Mitte); Spritzen-Kolben-Extrusion (rechts) (nach (Gleadall et al. 2018))

In der vorliegenden Arbeit wird aufgrund der verbreiteten Anwendung der Typ *Filament-geförderte Extrusion* betrachtet. Dieses Verfahren, das im Abschnitt 2.1.2 im Detail erläutert wird, hat nach (Ngo et al. 2018) folgende Eigenschaften:

- Geringe Anschaffungs- und Betriebskosten, geringe Komplexität
- Hohe Aufbauraten, Multi-Material-Bauteile möglich, moderate Konturgenauigkeit
- Moderate Auflösung (0,05 mm – 0,2 mm), d.h. diskrete Geometrieapproximation
- Richtungsabhängige mechanische Eigenschaften

Lichtbogenschweißen: Ausgehend von konventionellen Schweißverfahren wie *MIG* und *MAG* hat sich das Formschweißen oder auch das sogenannte *Wire-Arc-Additive-Manufacturing*-Verfahren (WAAM) etabliert. Bei diesem Freiformverfahren werden Metalldrähte durch einen Lichtbogen geschmolzen und meist roboterbasiert (auch mehrachsig) abgelegt. Das Verfahren wird neben dem Fertigen von kompletten Bauteilen auch zum Auftragschweißen auf eine bestehende Komponente verwendet (Wohlers et al. 2021). Die Prozessführung ist aufgrund des Funkenprinzips geometrisch nicht sehr exakt und hat folgende Eigenschaften:

- Moderate Anschaffungs- und geringe Betriebskosten
- Hohe Aufbauraten, Multi-Material-Bauteile möglich
- Geringe Auflösung (0,25 mm), geringe Konturgenauigkeit
- Gute mechanische Eigenschaften

Laserauftragschweißprozess: Im Gegensatz zum WAAM-Verfahren, kann beim *Laserauftragschweißen* sowohl mit zugeführtem Draht (laterale oder koaxiale Zuführung) oder mit Metallpulver gearbeitet werden. Durch die separate Steuerbarkeit des Laserfokus, der Materialzufuhr und des Bahnverlaufes kann der Prozess geometrisch präzisere Bauteile fertigen. Die Eigenschaften des Verfahrens sind:

- Hohe Anschaffungs- und moderate Betriebskosten
- Hohe Aufbauraten, Multi-Material-Bauteile möglich
- Geringe Auflösung (0,25 mm), moderate Konturgenauigkeit
- Gute mechanische Eigenschaften

Stereolithografie: Bei der *Stereolithografie* (SL) wird Material selektiv ausgehärtet. Auf schichtweise aufgetragene Harz- oder Monomerlösungen triggert ein ultraviolettes Licht (UV) eine Kettenreaktion, welche das Material aushärten lässt. Die UV-reaktiven Monomere werden zu Polymerketten konvertiert (Radikalisierung genannt). Bei dieser Polymerisation wird das Harz im Bereich des Lichtstrahls fest und verbindet sich mit den bereits ausgehärteten Bereichen des zu fertigenden Bauteils (Ngo et al. 2018). Die SL besitzt folgende Eigenschaften:

- Moderate Anschaffungs- und geringe Betriebskosten
- Geringe Aufbauraten
- Hohe Auflösung (0,01 mm), hohe Konturgenauigkeit
- Moderate mechanische Eigenschaften

Selektives Lasersintern und Laserschmelzen: Bei den selektiven Laserverfahren wird durch die gezielte Bestrahlung Material in ausgewählten Bereichen eines Pulverbetts verschmolzen. Dabei schmilzt das Pulver und verfestigt sich bei der anschließenden Abkühlung. Das schichtweise Auftragen des Materials erfolgt mit einer Rakel. Hierbei ist meist der Terminus *Sintern* bezogen auf die Bearbeitung mit Kunststoffpulver und *Schmelzen* (englisch Melting) auf Metallverfahren (Wohlers et al. 2021). Die Eigenschaften dieser Verfahren sind:

- Moderate bis hohe Anschaffungs- und hohe Betriebskosten
- Geringe Aufbauraten
- Hohe Auflösung (0,08 mm – 0,25 mm), hohe Konturgenauigkeit
- Aufwändiges Pulverhandling sowie Prozessvor- und -nachbereitung

Schichtlaminiierung: Bei diesem Verfahren werden einzelne Papierschichten, Platten oder Bleche miteinander verleimt. Die einzelnen Lagen werden in einem vorangegangenen Prozessschritt auf eine bestimmte Geometrie geformt, damit im geschichteten Gesamtbauteil die gewünschte Bauteilgeometrie entsteht oder diese im Prozess auf die richtige Größe geschnitten wird. Die Klasse der Verfahren hat die untenstehenden Charakteristika (Ngo et al. 2018):

- Moderate Anschaffungs- und moderate Betriebskosten
- Variable Aufbauraten vom Materialtyp abhängig
- Multi-Material-Schichtbauteile möglich
- Geringe Konturgenauigkeit und geringe geometrische Komplexität

Unabhängig vom gewählten Verfahren sind die größten Herausforderungen der Additiven Fertigung nach (Ngo et al. 2018) folgende:

- Hohlraum bzw. Lunkerbildung
- Anisotrope Mikrostrukturen und mechanische Eigenschaften
- Geometrische Differenz zwischen CAD-Geometrie und gefertigtem Bauteil
- Schichtbildung

Ein gemeinsames Merkmal additiv hergestellter Bauteile ist ihre anisotropen Werkstoffeigenschaften, die sich aus dem Entwurfs- und Herstellungsprozess ergeben (Zhang et al. 2017). Diese ist in der vorliegenden Arbeit von zentraler Bedeutung. Da Freiformverfahren, wie das Schmelzschichtverfahren oder Laser-Auftragsschweißen, im Vergleich zu pulverbett- oder flüssigkeitsbasierten Verfahren größere geometrische Freiheiten der räumlichen Prozessführung erlauben, bieten diese Potenzial für eine methodische, fertigungsbasierende Festigkeitsoptimierung (Gebhardt 2013). Die Möglichkeit zur Optimierung der Orientierung der anisotropen Struktur in unterschiedliche gekrümmte Richtungen innerhalb eines Bauteils ist ausschließlich bei diesen Verfahren vorhanden.

Werkstoffe in der Additiven Fertigung: Es kommen in der Additiven Fertigung Metalle, Polymere, Keramiken, Beton und Biomaterialien als Werkstoffe zum Einsatz. Eine Übersicht der Werkstoffe ist in (Bourell et al. 2017) und in (Ngo et al. 2018) dargestellt. Metalle wie Stahl sowie Legierungen aus Aluminium, Titan, Kupfer und Nickel werden typischerweise als Draht oder in Pulverform verwendet. Gedruckte Bauteile aus Metall haben ähnliche oder sogar teilweise bessere Festigkeiten als konventionell gefertigte Bauteile (Ngo et al. 2018). Polymere sind die am mengenmäßig häufigsten verwendeten Materialien in der Additiven Fertigung. Diese umfassen thermoplastische Filamente, reaktive Monomere, Harze oder Pulver (Ngo et al. 2018). Heute existieren extrudierbare Materialien, die sich durch Umweltbedingungen (Zeit, Temperatur, Feuchtigkeit etc.) in ihrer Form ändern. Diese Änderung kann im Design gezielt verwendet und durch den Herstellungsprozess beeinflusst werden. Diese Methode wird als sogenannter *4D-Druck* bezeichnet (Cheng et al. 2021). Die Additive Fertigung ist zu einer der wichtigsten Verfahrensarten zur Herstellung von Keramikbauteilen geworden. Hierbei werden Keramiken meist gedruckt und anschließend gegläht oder gesintert. Beton wird heute meist nur in Extrusionsverfahren wie dem *Contour Crafting* verwendet (Khoshnevis 2004). Biomaterialien werden für die Herstellung von künstlichem Gewebe (Bioprinting, Tissue Engineering) verwendet. Hierbei handelt es sich häufig um Gelatine, in der Zellkulturen gelöst sind.

Die Entwicklung der Werkstoffe für die Additive Fertigung ist ein ausgeprägtes Forschungsfeld, wodurch es häufig zu Neuentwicklungen kommt. Diese ist meist in Symbiose mit der Weiterentwicklung der Prozesse oder deren Adaption in neue Anwendungsgebiete.

Fazit: In diesem Abschnitt wurde ein allgemeiner Überblick über die Additiven Fertigungsverfahren gegeben. Hierbei wurde erläutert welche Klassifizierungen es für die Verfahren gibt. Da

für steuerungstechnische Fragestellungen bestehende Klassifizierungen nicht ausreichen, wurde eine neue Strukturierung präsentiert, mit dem Fokus auf die Steuerung des Materialflusses und der Prozessführung. Neben einer Beschreibung einzelner etablierter Verfahren wurde ein Vergleich herangezogen, der aufzeigt, dass in Freiformverfahren das größte Potenzial zur Festigkeitsoptimierung hinsichtlich der gezielten Ausnutzung der bauteilbezogenen Anisotropie liegt. Abschließend wurden die in der Additiven Fertigung verwendeten Materialien erläutert. Im folgenden Abschnitt wird speziell das Schmelzschichtverfahren vertieft.

2.1.2 Prozessbeschreibung und Eigenschaften des Schmelzschichtverfahrens

Das Schmelzschichtverfahren ist eines der bekanntesten Additiven Fertigungsverfahren in der allgemeinen und fachbezogenen Öffentlichkeit. Mit diesem Verfahren können Bauteile mit mittlerer bis hoher geometrischer Präzision in relativ geringer Prozessdauer hergestellt werden. Da in der vorliegenden Arbeit der Fokus auf der belastungsgerechten Bahnplanung für dieses Verfahren liegt, werden im Folgenden der Prozess, die Werkstoffe, die Festigkeitseigenschaften und prozesstechnische Weiterentwicklungen näher erläutert.

2.1.2.1 Prozess

Bei diesem Verfahren wird ein Filament, meist bestehend aus Kunststoff, aufgeschmolzen und raupenförmig extrudiert. Das extrudierte Material verschmilzt miteinander, wodurch ein räumliches Bauteil entsteht. In Abbildung 2-3 ist ein typischer Druckkopf des Schmelzschichtverfahrens dargestellt. Das Filament als Ausgangshalbzeug dieses Verfahrens wird durch einen vorangegangenen Extrusionsprozess hergestellt. Kommerziell verbreitet sind Filamente mit einem Durchmesser d_{Fil} von 1,75 mm und 2,85 mm, die auf Spulen bereitgestellt werden können. Im Prozess wird das Filament durch ein einseitig oder beidseitig angetriebenes Rändelradpaar taktil gefördert. Die Rändelräder sind in der Regel durch eine Normalkraft in Richtung des Filaments gegeneinander gespannt. Das angetriebene Rändelrad mit dem Nenndurchmesser $d_{\text{Rän}}$ wird meist durch einen Schrittmotor oder Servomotor direkt oder über ein Getriebe aktiviert und treibt dieses mit einem Drehmoment $M_{\text{t,Rän}}$ und der Winkelgeschwindigkeit $\omega_{\text{Rän}}$ an.

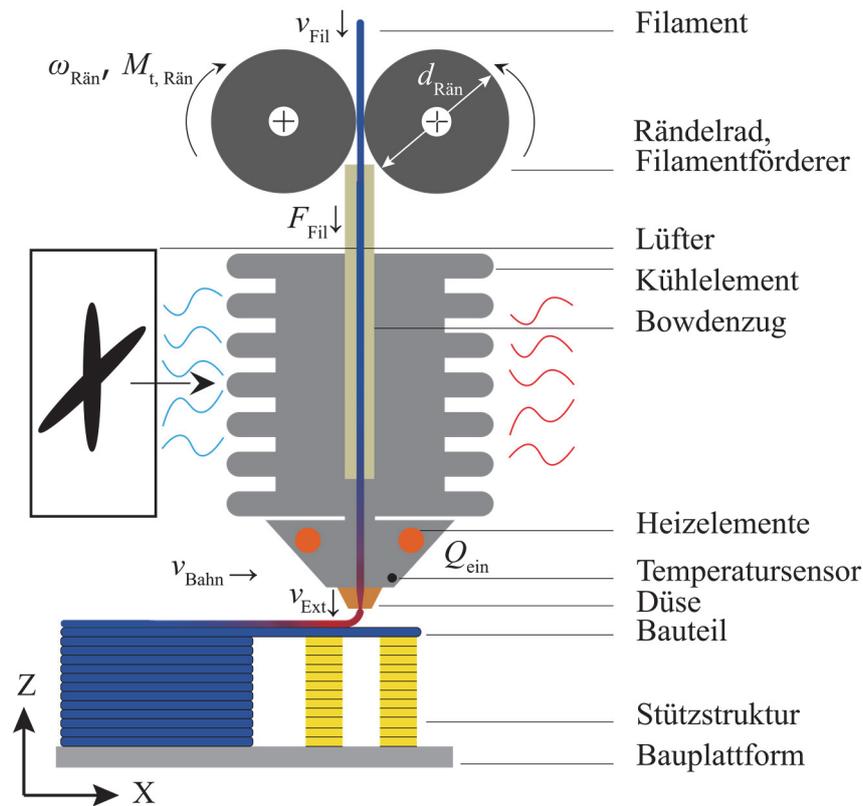


Abbildung 2-3: Funktionsprinzip des Schmelzschichtverfahrens

Die Geschwindigkeit des Filaments v_{Fil} lässt sich berechnen mit:

$$v_{\text{Fil}}(t) = \pi \omega_{\text{Rän}}(t) d_{\text{Rän}} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Durch Trägheitskräfte des Filaments und der Spule sowie Reibkräfte und Widerstandskräfte im Düsenbereich kann es zu Schlupf zwischen dem angetriebenen Rändelrad und Filament kommen. Dieser Schlupf kann anhand eines nicht angetriebenen Rändelrades gemessen und regelungstechnisch kompensiert werden. Die wirkende Extrusionskraft des Filaments auf den Düsenbereich in der schlupffreien Aktuierung kann berechnet werden mit:

$$F_{\text{Fil}}(t) = M_t(t) \frac{d_{\text{Rän}}}{2} - R_{\text{Reib}} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Das geförderte Filament durchläuft das Kühlelement (englisch *Cold End*) und wird dabei in einem Bowdenzug geführt. Die aktive Kühlung des Kühlelements, meist in Form eines Ventilators und Kühlrippen für eine vergrößerte Konvektionsfläche, ist erforderlich, da sonst der Wärmefluss das Kühlelement aufheizen würde. Im Fortlauf des Filaments ergibt sich ein thermomechanischer Vorgang, bei dem das Halbzeug in einer möglichst kleinen Wärmeeinflusszone zur Teilschmelze gebracht wird. Das Material wird in der Wärmeeinflusszone durch die

Wärmezufuhr Q_{ein} auf ein Niveau zwischen der Glasübergangstemperatur ϑ_{Glas} und der Schmelztemperatur $\vartheta_{\text{Schmelz}}$ erhitzt und geht dabei in eine teilweise flüssige Phase über. Bei größerer Wärmeeinflusszone würde das Filament auch vor dem Eintritt in den Heizblock viskoelastisch werden und dadurch wäre das Ausfließverhalten schlechter steuerbar. Durch das weiter zugeführte Material entsteht ein Druck in der Schmelzkammer, der die Schmelze durch die Düse presst. Das Druckgefälle zwischen Kammer und Umgebung bewirkt das Fließen der Schmelze. Mit dem Vorschub des Filaments kann so der Druck innerhalb der Düse und damit der Ausfluss beeinflusst werden. Nachdem das Material die Düse verlassen hat, entsteht durch eine Relativbewegung zwischen dem Druckkopf und der Bauplattform eine abgelegte Extrusionsraupe.

Der Heizblock besteht aus einem massiven Teil, der als Wärmespeicher dient, einem elektrischen Heizelement und einem Temperatursensor zur Regelung der Heiztemperatur ϑ_{Heiz} . Die Düse ist im Heizblock verschraubt. Das Hohlprofil, in dem das Filament vom Bowdenzug bis zur Düse verläuft, ist in der Regel zylindrisch und wird innerhalb der Düse konisch bis auf den Düsendurchmesser $d_{\text{Düse}}$ reduziert. In (Löffler et al. 2019) wird ein Druckkopf mit einer Düse mit nicht zylindrischem Querschnitt beschrieben, welcher durch eine Rotation um die Z-Achse eine variable Spurbreite ermöglicht (dieser Ansatz wird im Weiteren jedoch nicht betrachtet). Im gewöhnlichen schichtförmigen Drucken wird der zu extrudierende Volumenstrom \dot{V}_{Ext} bestimmt, mit dem gewünschten Raupenquerschnitt A_{Ext} und der Relativgeschwindigkeit zwischen Düse und Bauplattform, die als Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} bezeichnet wird, durch:

$$\dot{V}_{\text{Ext}}(t) = A_{\text{Ext}} v_{\text{Bahn}}(t) = \frac{\pi}{4} d_{\text{Düse}}^2 v_{\text{Ext,m}}(t) \quad \text{Gl. 2-3}$$

mit der gemittelten Extrusionsgeschwindigkeit $v_{\text{Ext,m}}$. Damit ergibt sich im kontinuierlichen Betrieb eine anzutreibende Fördergeschwindigkeit des Filaments von:

$$v_{\text{Fil}}(t) = \frac{A_{\text{Ext}}}{\frac{\pi}{4} d_{\text{Fil}}^2} v_{\text{Bahn}}(t) \quad \text{Gl. 2-4}$$

Im Schmelzschichtverfahren wird häufig der Modus zwischen Drucken und nicht Drucken (bei Traversen) gewechselt und die Bahngeschwindigkeit kann variieren. Um die Kontinuitätsbedingung nach Gl. 2-4 zu erhalten, muss der Volumenstrom variieren und dementsprechend kommt es zur instationären Strömung. Wie dieses Problem gelöst werden kann, wird im Abschnitt 2.2.4 beschrieben. Das viskose, teilflüssige Extrudat hat beim Verlassen der Düse einen kreisförmigen Querschnitt. Dieser wird beim Raupenablegen sowohl durch Abknicken – und

damit verbundenen mechanischen Kräften von der Düse auf das Extrudat – als auch durch die Gravitation zu einem teilelliptischen Querschnitt mit der Breite b_{Ext} und der Höhe h_{Ext} verformt. Die abgelegten Raupen haben einen Abstand zueinander, der als b_{Abst} bezeichnet wird. Durch den Abkühlvorgang zur Bauraumtemperatur ϑ_{BR} erfolgt die Verfestigung des Materials durch Wärmeabgabe an die Umgebung. Beim Kontakt des extrudierenden Materials mit den bereits gedruckten Raupen entstehen Verschmelzungszonen im Randbereich der Raupen, wodurch das Volumen des Bauteils inkrementell vergrößert wird. Insbesondere die Verbindungen benachbarter Schichten sind von entscheidender Bedeutung für die mechanische Belastbarkeit. Das Extrudat alleine kann die geometrische Stabilität ohne eine Stützwirkung der Bauplattform oder bereits gedruckter Raupen nicht beibehalten, da die Gravitationskraft die Raupen verformen würde. Raupen sind deshalb nur bis zu einem Überhangswinkel von 45° druckbar (Martha 2015). Bei größerem Überhangswinkel ist das Drucken von Stützstrukturen notwendig. Diese können entweder aus dem gleichen Werkstoff bestehen wie das Bauteil selbst oder aus speziellem Stützmaterial, das beispielsweise wasserlöslich sein kann. Diese Stützstrukturen müssen nach Fertigstellung des Druckvorgangs vom Bauteil entfernt oder freigespült werden.

2.1.2.2 Werkstoffe

Für das Schmelzschichtverfahren kann grundsätzlich eine Reihe von Werkstoffen eingesetzt werden, die jedoch bestimmte Grundeigenschaften besitzen müssen. Zum einen muss der Werkstoff schnell und lokal aufgeschmolzen und in einen viskosen Aggregatzustand gebracht werden können. Zum andern muss der Werkstoff nach dem Extrusionsprozess schnell konsolidieren und während des Erstarrungsprozesses soll die Form und Lage der Extrusionsraupe sich unter den Bauraumbedingungen möglichst nicht ändern. Die Viskosität des Kunststoffes darf jedoch nicht zu hoch sein, damit die abzulegenden Raupen mit den darunterliegenden Schichten verschmelzen und möglichst feste Verschmelzungen zwischen Raupen entstehen. Eine über Raupengrenzen hinweg resultierende Kristallisation des erstarrten Kunststoffes wäre zwar wünschenswert, da dadurch isotrope Bauteileigenschaften entstehen würden; sie wurde jedoch bisher nicht erzielt (siehe nächster Abschnitt). Im Schmelzschichtverfahren haben sich einige thermoplastische Werkstoffe etabliert, vor allem die Gruppe der Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polylactide (PLA) (Ngo et al. 2018). Thermoplaste können beliebig oft aufgeschmolzen und wiederverwendet werden, solange die kritische Zersetzungstemperatur nicht überschritten wird (Gebhardt 2013). PLA ist ein Kunststoff, der sowohl biobasiert ist als auch industriell kompostiert werden kann (Oksman et al. 2003). Auch andere Biokunststoffe aus Holz oder

Milchsäuremischungen können eingesetzt werden (Ottnad 2014). Die Bandbreite an Kunststoffen für das Schmelzschichtverfahren nimmt stark zu. Es werden beispielsweise Polymere eingesetzt wie Polycarbonate (PC) oder Polyphenylensulfid (PPS) und für höhere Festigkeiten und Steifigkeiten werden die Werkstoffe Polyamid (PA), Polyetheretherketon (PEEK) und gefüllte Polymere verwendet. Für flexible, dehnbare gedruckte Bauteile kommen verschiedene thermoplastische Elastomere (TPE) zum Einsatz (Bonten 2016). Das Verfahren kann neben einem einzelnen Werkstoff auch Materialkompositionen in einem Druckprozess erzeugen. In (Garland et al. 2015) wird dargestellt, wie mit einem Zweikomponentendruckkopf gradierte Bauteile in einem Prozess hergestellt werden können. Diese Werkstoffe für Freiraumverfahren werden als Filament durch einen vorangegangenen Extrusionsprozess hergestellt.

2.1.2.3 Thermomechanische Vorgänge und mechanische Eigenschaften

Im Gegensatz zu spritzgegossenen Kunststoffbauteilen, die meist im Erstarrungsprozess ein räumlich ausbreitendes Kristallwachstum aufweisen, liegen in additiv gefertigten Bauteilen Kristalle bei (teil-) kristallinen Kunststoffen entlang der Extrusionsraupen vor. Zwischen den Raupen existieren amorphe Schmelzzonen. Dieses Strukturverhalten ist beispielhaft anhand zweier gedruckter Raupen, die in X-Richtung abgelegt wurden, in Abbildung 2-4 skizziert.

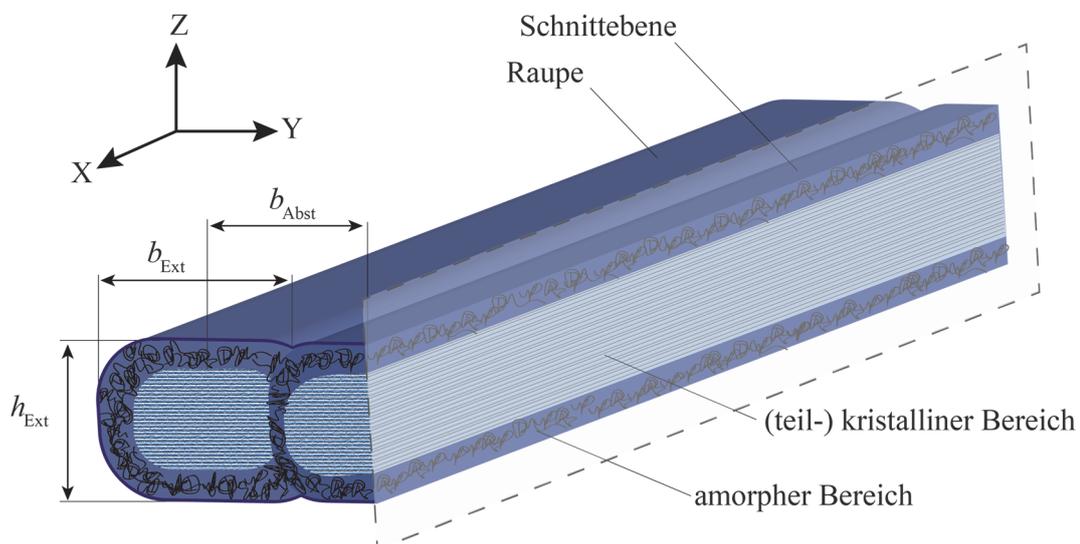


Abbildung 2-4: Plastografische Skizze von gedruckten Extrusionsraupen mit (teil-) kristallinen und amorphen Bereichen

Diese mechanischen Eigenschaften werden durch den Extrusionsvorgang bedingt. In der Realität verhalten sich Kunststoffschmelzen visko-elastisch, das bedeutet, dass die Schmelze durch

die von der Extrusionskraft F_{Fil} hervorgerufenen Spannungszustand zum Fließen gezwungen wird und sie sich in Folge der Spannung elastisch verformt. Durch das visko-elastische Verhalten bauen sich die Spannungen nicht proportional zur Deformations- bzw. Schergeschwindigkeit ab. Infolge der Querschnittsverengung in der Düse zwingt zusätzlich der Widerstand der Kanalwand die Schmelze unter Druck zu einer Deformation, die sich teilweise in einer elastischen Dehnung der Molekülketten auswirkt. Thermodynamisch resultiert aus dieser Dehnung und ihrer darauffolgenden Orientierung der Makromoleküle eine Abnahme der Entropie (entropieelastischer Einlaufdruckverlust) (Bonten 2016). Dadurch entsteht beispielsweise die Aufweitung des Materials nach der Extrusion, da die eingespeicherte Deformationsenergie eine Rückorientierung der Molekülketten bewirkt (Hoffmann 1996). Dieses Verhalten resultiert aus Verschlaufungen zwischen den Polymerketten, die bei der Erstarrung Ausgangspunkte für Kristallwachstum sind (Menges 2002). Bei einer Abkühlung ab der Kristallisationstemperatur beginnt der Kunststoff sich zu verfestigen. Der Verfestigungsvorgang ist meist nach etwa 2 s abgeschlossen (Kubalak et al. 2019), wobei es bei PLA auch zur langsamen, späten Nachkristallisation kommen kann. Durch den Extrusionsvorgang einzelner aneinander liegender Raupen kommt es zur erneuten Aufwärmung der nächstgedruckten Raupen. Hierbei treten Interdiffusion und teilweise Verschlaufung der Polymerketten auf, jedoch gibt es keine gemeinsame Kristallisation über mehrere Raupen hinweg, sondern lediglich Schweißnähte mit amorphen Zonen, deren Festigkeit rein auf Adhäsionskräften beruht (Bonten 2016). Durch diese teilkristalline Struktur der gedruckten Raupen resultieren richtungsabhängige Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften. Die ausgeprägte raupenstrukturelle Anisotropie wird verstärkt durch prozessabhängige Lufteinschlüsse zwischen den Raupen und Schichten (Popescu et al. 2018). Letztere wurden in der Studie von (Rezayat et al. 2015) als entscheidend für die Festigkeit definiert.

Um mechanische Eigenschaften zu prüfen, können zerstörungsbehaftete Analyseverfahren, wie beispielsweise der Zugversuch, angewandt werden. Die Richtungsabhängigkeit der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften wurden in diversen experimentellen Untersuchungen analysiert. Um für die vorliegende Arbeit eine Grundlage zu schaffen, wurde mit dem Werkstoff und der Anlagentechnik, die später verwendet wurden, Prüfkörper gedruckt und getestet. Dazu wurden Zugproben aus PLA des Typs 1A nach Norm (Norm DIN EN ISO 527-2) (siehe Geometrie der Proben in Abbildung 4-2) mit den in Tabelle 2-1 gelisteten Druckparametern hergestellt.

Tabelle 2-1: Druckparameter für Zugprüfkörper

Material	Filamentdurchmesser d_{Fil}	Düsendurchmesser $d_{\text{Düse}}$	Raupenbreite b_{Ext}	Raupenhöhe h_{Ext}
PLA	1,75 mm	0,25 mm	0,25 mm	0,2 mm

Jeweils drei Prüfkörper wurden in unterschiedlichen Bahnrichtungen gedruckt; in Zugrichtung (im Folgenden Vorzugrichtung genannt) orientierte mäandernde Bahnen und quer zur Zugrichtung (normal zur Vorzugrichtung) orientierte mäandernde Bahnen. Bei Letzteren wurden drei Konturaußenbahnen jedoch aus Haftungs- und Stabilitätsgründen ebenfalls konturparallel und somit in Zugrichtung orientiert, deren Auswirkungen in der Ermittlung der mechanischen Kennwerte eliminiert worden sind. Der Prüfprozess lief dehnungsgeregelt bei 20 °C ab. In Abbildung 2-5 ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm zweier repräsentativer Proben dargestellt sowie die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Prüfreihe. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Proben einen ausgeprägten linear-elastischen Bereich aufweisen, der ab 1,3 % Dehnung in einen plastischen Bereich übergeht, und es zum Bruch kommt. Sowohl der Elastizitätsmodul (E-Modul) als auch die Zugfestigkeit der Probentypen sind unterschiedlich, jedoch weicht die Bruchdehnung nicht voneinander ab. Die Standardabweichung ist geringer als 10 %.

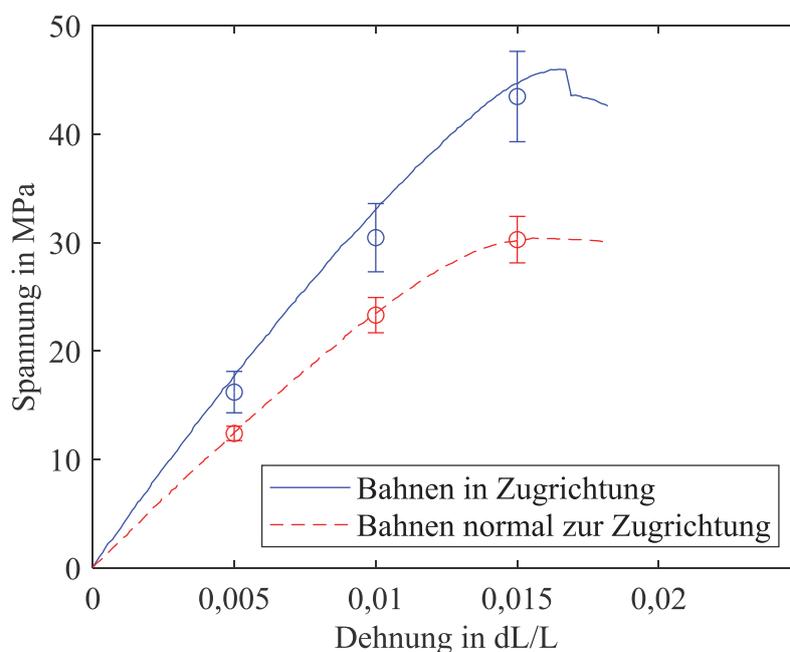


Abbildung 2-5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Zugproben aus PLA

2.1 Grundlagen der Additiven Fertigung

Aus diesen Versuchen konnten die richtungsabhängigen Bauteilkennwerte ermittelt werden, welche in Tabelle 2-2 gelistet sind. Hierbei ist die Zugfestigkeit in Raupenorientierung als $R_{m,t,f}$ (t für Tension und f für Faser) und die Zugfestigkeit orthogonal zur Raupenorientierung $R_{m,t,m}$ (m für Matrix) bezeichnet. Dies gilt für die E-Module analog.

Tabelle 2-2: Ermittelte mechanische Eigenschaften der Zugprüfkörper

E_f -Modul	E_m -Modul	$R_{m,t,f}$	$R_{m,t,m}$
3.067 MPa	2.133 MPa	46 MPa	31 MPa

Die beiden identifizierten Zugfestigkeitswerte unterscheiden sich mit 48 % relativer Differenz bezogen auf die der Matrix, definiert mit $\delta R_m = (R_{m,t,f} - R_{m,t,m})/R_{m,t,m}$. In der Literatur finden sich zahlreiche Arbeiten, die dieses Phänomen bestätigen (siehe Tabelle 2-3), deren Ergebnisse sich jedoch aufgrund unterschiedlicher Prozessparameter und Materialspezifikationen quantitativ unterscheiden. Eine weitere Übersicht ist in (Cuan-Urquizo et al. 2019) gelistet. Die Zugfestigkeit von gedrucktem PLA in Vorzugsrichtung ist vergleichbar mit der Festigkeit von spritzgegossen PLA-Bauteilen. Für spritzgegossene Bauteile gibt (Zhao et al. 2013) eine Zugfestigkeit von 45 MPa an, welche sogar leicht geringer ist als die Zugproben aus Tabelle 2-2.

Tabelle 2-3: Vergleich richtungsabhängiger Bauteilfestigkeiten von gedruckten Proben

Quelle	Material	$\sigma_{t,f}$	$\sigma_{t,m}$	$\delta\sigma$
(Wauthle et al. 2015)	PLA	39 MPa	31 MPa	+26 %
(Ferreira et al. 2017)	PLA	56 MPa	37 MPa	+51 %
(Wulle et al. 2019b)	PLA	46 MPa	31 MPa	+48 %
(Ahn et al. 2002)	ABS	22 MPa	13 MPa	+70 %
(Rezayat et al. 2015)	ABS P430	33 MPa	26 MPa	+27 %
(Kubalak et al. 2019)	ABS	21 MPa	7 MPa	+200 %

Eine Untersuchung zur Festigkeit von Gelegen ist im Anhang A.1 dargestellt. Festigkeitseigenschaften sind auch für dynamische Beanspruchungen richtungsabhängig, jedoch ist die Differenz weniger groß (Jami et al. 2013). Diese Anisotropie ist bei metallischen, additiv gefertigten Bauteilen geringer ausgeprägt, sowohl beim *Selektiven Lasersintern* (Croccolo et al. 2016) als auch beim *Auftragschweißen* (Hassel et al. 2020).

Die Druckfestigkeiten schmelzgeschichteter Bauteile sind meist größer als die Zugfestigkeit (Ahn et al. 2002). In einem Druckversuch, der im Rahmen dieser Arbeit stattgefunden hat, wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 30 mm gedruckt und geprüft (siehe Anhang A.2). Die Druckfestigkeit dieser PLA-Prüfkörper war bei 65 MPa und nahezu unabhängig von der Richtung. Damit ist die Druckfestigkeit deutlich größer als die Zugfestigkeit von gedruckten PLA-Bauteilen. Durch plastografische Analysen von gedruckten Kunststoffraupen ist bewiesen worden, dass die Strukturmechanik im Raupenverlauf eine transversale Isotropie aufweist. Die transversale Isotropie stellt einen Spezialfall der Orthotropie dar, der wiederum eine Untermenge der Anisotropie ist. Die mechanische Beschreibung dieser Festigkeitseigenschaften wird im Abschnitt 3.2.6 vorgenommen.

Neben der Raupenorientierung haben noch weitere Druckparameter, wie die Bauteilorientierung, Bauraumtemperatur und Bahngeschwindigkeit, einen Einfluss auf die Bauteileigenschaften (Chacón et al. 2017). Eine empirische Studie über deren Abhängigkeiten wurde in (Sood et al. 2010) und simulativ in (Alafaghani et al. 2017) durchgeführt.

Es gibt weitere Methoden, mit denen sich die Strukturmechanik untersuchen lässt. Mit zerstörenden bildgebenden Verfahren wie der Transmissionselektronenmikroskopie können Kristallstrukturen erkannt werden (Grewell et al. 2003). Zerstörungsfreie Methoden wie Ultraschalltechnik oder Computertomografie können beispielsweise in Bauteilen Lunker, Delaminationen oder andere Defekte detektieren.

Fazit: In diesem Abschnitt wurden die richtungsabhängigen Eigenschaften von gedruckten Bauteilen erläutert. Hierbei muss betont werden, dass die Orientierung der Extrusionsraupen durch die Bahnplanung vorgegeben wird. Ergo ist die Bahnplanung von entscheidender Bedeutung für die Festigkeitseigenschaften gedruckter Bauteile; die Untersuchung hierzu bildet daher einen Schwerpunkt dieser Arbeit.

2.1.2.4 Faserverstärktes Schmelzschichtverfahren

Um die Festigkeit von Komponenten, die im Schmelzschichtverfahren hergestellt werden, zu erhöhen, sind Verfahren zur Faserintegration in den letzten Jahren entstanden. Allgemein lässt sich nach (van de Werken et al. 2020) die Spannung in einem Verbundwerkstoff berechnen mit:

$$\sigma_{\text{comp}} = \chi_1 \chi_2 \sigma_f \varphi_f + \sigma_m \varphi_m \quad \text{Gl. 2-5}$$

wobei σ_f die Faserspannung und σ_m die Matrixspannung, φ_f der volumetrische Faseranteil und φ_m der reziproke Matrixanteil ist. χ_1 und χ_2 sind Fasereffizienzfaktoren, die die Länge einer Einzelfaser und die Reibung berücksichtigen. Da die Zugfestigkeit der Faser größer ist als die der Matrix, hat ein Bauteil umso höhere Festigkeit, je mehr Faseranteil es hat. Hierbei müssen jedoch eine gute Verarbeitbarkeit und eine gute Faser-Matrix-Bindung gegeben sein. Die Faserdruckprozesse werden anhand der Art der Faser unterschieden (Plocher et al. 2018).

Zum einen gibt es Kurzfasern, die als kurze Faserstücke im Filament eingearbeitet sind und in der extrudierten Raupe meist ungerichtet vorliegen (Ferreira et al. 2017). Bei Filamenten mit Kurzfasern werden in der Extrusion die Fasern partiell entlang der Druckrichtung ausgerichtet. Hierbei kommt es zu einer Verstärkung der Anisotropie (Domm 2020). In (Ferreira et al. 2017) wurde gezeigt, dass durch Zugabe von Kurzfasern in PLA-Filamenten die Steifigkeit um das 2,2-fach gesteigert werden kann, jedoch die Festigkeit nahezu identisch zum reinen PLA ist. Der Faseranteil bei den Prozessen mit Kurzfasern ist meist nur bei 5-30 vol.% (Parandoush et al. 2017).

Zum anderen gibt es kontinuierliche Fasern oder die Endlosfaserintegration. Für die Einbringung einer Endlosfaser gibt es drei verschiedene Möglichkeiten: als Hybridwerkstoff im thermoplastischen Filament imprägniert (Markforged 2021), als Zuführung im Druckkopf während des Prozesses oder als Einlegeoperation zwischen den Schichten (Domm 2020). Die Verstärkung mit Fasern (bspw. Kohlenstofffaser, Glasfaser, Lignin, Aramid) erfordert eine Handhabung und Düsenführung derart, dass die Faser um einen Mindestradius abgelenkt wird, um die Gefahr des Faserbruchs zu vermeiden. Die Faser muss im gedruckten Bauteil gestreckt bzw. vorgespannt in der Matrix liegen (Zukunftspreis 2018). Faserverstärkte Bauteile haben meist eine vielfach höhere Festigkeit und Steifigkeit im Vergleich zu reinen thermoplastischen Bauteilen (Parandoush et al. 2017). Die Herausforderungen des faserverstärkten Schmelzschichtverfahrens sind die Auswirkung der Fasern auf die Auflösung, die Agglomerat-Bildung, die

heterogene Verbundformulierung, die Verstopfung der Druckköpfe, ein schwacher Faser-Matrix-Verbund und die Verlängerung der Druckzeit (Kalsoom et al. 2016).

Die Verarbeitung von Endlosfasern ist eine nichttriviale Aufgabe, die vermehrt als Ziel gesetzt worden ist (Fischer et al. 2013). Hybridfilamente sind dabei die einfacheren Systeme, bei denen ein mechanisches Trennen bei Druckunterbrechung erforderlich ist. Eine Vorrichtung für den ebenen Druckvorgang hat (Markforged 2021) im US-amerikanischen Wirtschaftsraum patentiert (Patentnummer: US 9,694,544). Die düseninterne Imprägnierung kann durch vorverarbeitete Fasergarne erfolgen. Hierbei kann nach (Matsuzaki et al. 2016) eine Zugfestigkeit bis 200 MPa erreicht werden (bezogen auf PLA mit 46 MPa). Eine wissenschaftliche Entwicklung und Analyse des Verfahrens sowie die Definition prozesstechnischer Rahmenbedingungen für eine Automatisierung wurden in (Domm 2020) publiziert. Aufgrund des fehlenden Imprägnierungsdrucks kann es beim Einlegeprozess zur schlechten Anhaftung von Matrix und Fasern kommen (Domm 2020). Das Herstellen von gekrümmten Schichten ist jedoch aufwändiger. Die Faserintegration kann die Festigkeit von Bauteilen entscheidend vergrößern. Dazu muss jedoch gegeben sein, dass die Fasern entlang der auftretenden Zugspannungen liegen. Dies ist insbesondere für mehrachsige Spannungszustände eine ungelöste Aufgabe für die Bahnplanung.

2.1.2.5 Mehrachsiges Schmelzschichtverfahren

Das mehrachsige Schmelzschichtverfahren baut auf dem klassischen schichtbasierten 3-achsigen Verfahren auf (siehe Abschnitt 2.1.2.1) und nutzt zusätzliche kinematische Freiheitsgrade. Auf der Grundlage von programmiertechnischen, steuerungstechnischen und kinematischen Kenntnissen in der Robotertechnik und der fünfachsigen Fräsbearbeitung wurde bereits 2016 das mehrachsige Drucken am ISW entwickelt (Zukunftspreis 2018) (siehe Entwicklungsschritte analog zum Fräsen in Abbildung 2-6). In den vergangenen Jahren wurden an zahlreichen Forschungsstätten Mehrachssysteme aufgebaut und die entsprechenden Druckkopftechnologien weiterentwickelt. Die verwendeten Kinematiken sind meist 3-achsige Anlagen, die um einen Dreh-Schwenktisch erweitert wurden, oder Roboter, die entweder einen Druckkopf führen oder die Bauplattform um einen ortsfesten Druckkopf bewegen. Es gibt auch kommerzielle Hersteller, die diese Systeme anbieten, wie (HAGE3D 2021) und (Hans Weber 2021).

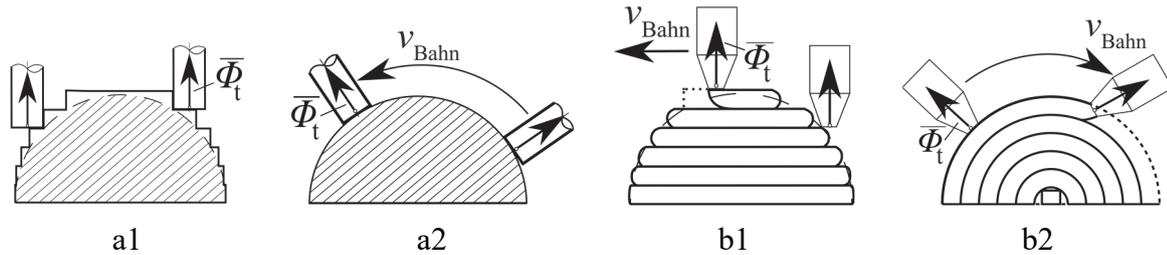


Abbildung 2-6: Entwicklung der Prozessführung: 3-achsiges Fräsen (a1); Mehrachsfräsen (a2); planares Drucken (b1); Mehrachsdrucken (b2)

Durch diese Bewegungsfreiheiten wird das Freiform-Schmelzschichtverfahren ermöglicht, denn somit können gekrümmte Bahnen im Raum kollisionsfrei druckbar gemacht werden. Das Mehrachsdrucken kann wesentliche Einschränkungen des konventionellen Prozesses überwinden, wodurch nach (Nayyeri et al. 2022) die folgenden Optimierungspotenziale ermöglicht werden:

- I. Reduzierung des Stufeneffektes
- II. Einsparung von Stützstrukturen bei Überhängen
- III. Optimierung der Festigkeit durch Orientierung der prozessinduzierten Anisotropie entsprechend der Beanspruchung

Der Stufeneffekt entsteht durch die Diskretisierung einer Kontur in einzelne Schichten mit konstanter Schichthöhe, und zwar dann, wenn die Aufbaurichtung (meist Z-Richtung) nicht parallel oder orthogonal zur Kontur verläuft. Im Mehrachsdruck können hingegen gekrümmte Flächen und damit auch konturparallele Bahnen gedruckt werden. Mithilfe des Freiformflächen-Deck-schichtdrucks entlang der Oberflächenkontur kann der Stufeneffekt minimiert werden, was eine deutliche Verbesserung der Oberflächengüte mit sich bringt. Wie in Abbildung 2-3 zu sehen, ist es notwendig, Stützstrukturen zu drucken, wenn eine Raupe in Gravitationsrichtung keine Stützwirkung durch die darunterliegenden Schichten erfährt. Beim Mehrachsdruck kann die Orientierung des Bauteils so geführt werden, dass die bisherige gedruckte Bauteilgeometrie in Gravitationsrichtung umorientiert wird (vergleichbar mit der Strategie beim Auftragschweißen durch Einhaltung der Wannelage). Durch die Ausrichtung der Bahnen in Richtung der Spannungsverläufe kann die Festigkeit durch die gerichtete Anisotropie optimiert werden. Aktuelle Entwicklungen zu den ersten beiden Optimierungspotenzialen werden in Tabelle 2-4 gelistet.

Tabelle 2-4: Veröffentlichte Ansätze zum Mehrachsdruck zur Reduzierung des Stufeneffektes und zur Einsparung von Stützstrukturen

Potenzial I: Reduzierung des Stufeneffektes	Potenzial II: Einsparung von Stützstrukturen
(Isa et al. 2019)	(Kubalak et al. 2019).
(Castelli et al. 2019)	(Wulle et al. 2017)
(Hildebrand et al. 2013)	(Vanek et al. 2014)
(Thrimurthulu et al. 2004)	(Dai et al. 2018)

Auf das dritte Potenzial – die Ausrichtung der Bahnen in Richtung der Spannungsverläufe – wird im Abschnitt 2.3.2 genauer eingegangen. Die Konzepte und Umsetzungen dieser drei Ziele sind gekoppelt an die Bahnplanungsmethoden, die im folgenden Unterkapitel vorgestellt werden.

Fazit: In diesem Unterkapitel wurde ein Überblick über die Additiven Fertigungsverfahren gegeben, mit dem Schwerpunkt auf das Schmelzschichtverfahren. Neben der Prozessbeschreibung wurden die Auswirkungen von Prozessparametern auf die Bauteileigenschaften diskutiert. Es wurde eine Einführung in die Weiterentwicklung des Mehrachsdruckens gegeben. Im nächsten Unterkapitel wird die digitale Prozesskette vom CAD bis zum gedruckten Bauteil erläutert.

2.2 Prozesskette im Schmelzschichtverfahren

Die digitale Prozesskette im Schmelzschichtverfahren wurde ursprünglich von der *Stereolithografie* übernommen. Hierbei wird zunächst ein Bauteil mittels CAD konstruiert oder gescannt. Nachfolgend wird im *Computer-Aided Manufacturing (CAM)* die Geometrie untergliedert in Subvolumen, eventuell notwendige Stützstrukturen werden generiert und das sogenannte *Slicing* (deutsch Schneiden) teilt das Bauteil in einzelne Schichten auf. Im Gegensatz zu anderen Additiven Fertigungsverfahren kann aufgrund der Mehrachsbearbeitung neben planarem auch gekrümmtes Slicing (englisch Curved Layer) von Interesse sein. Auf jeder Schicht werden die einzelnen zu druckenden Bahnen geplant. Diese Bahnen werden zur Weiterverwendung in der Steuerung über Ansatzfunktionen und Stützpunkte beschrieben und sequenziert. Danach wer-

den in einem Postprocessing / Nachbearbeitungsschritt Ablauf- und Technologiefunktionen ergänzt. Danach werden die Bahnen als Fertigungsdaten in einem Austauschformat, meist ein NC-Programm, bereitgestellt. Der Ablauf der Prozesskette ist in Abbildung 2-7 skizziert.

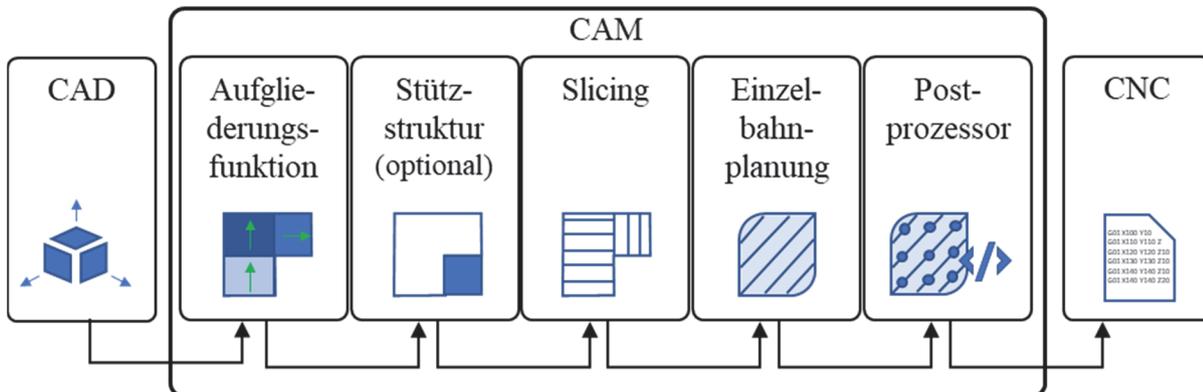


Abbildung 2-7: Digitale Prozesskette im Schmelzschichtverfahren

Es existieren generische Softwarelösungen für diese digitale Prozesskette mit planarem Slicing wie bspw. *Skeinforge*, (Cura 2021), (IceSL 2022) oder (Slic3r 2021). Des Weiteren gibt es Bahnplanungssoftware für gekrümmtes Slicing wie (Siemens NX 2021), (Esprit CAM 2021) oder dedizierte CAM-Kerne (ModuleWorks 2021). Eine generische Lösung für die Nutzung der drei Potenziale des Mehrachsdrucks existiert jedoch noch nicht. Damit ist es das Ziel, in der Weiterentwicklung der Prozesskette für das mehrachsige Schmelzschichtverfahren eine Methodik zu entwickeln, die auf den bisherigen Funktionen aufsetzt und eine generische Lösung schafft. In der vorliegenden Arbeit wird dabei insbesondere die Festigkeitsoptimierung betrachtet. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Prozessschritte erläutert.

2.2.1 CAD

Ausgangspunkt für die Additive Fertigung ist die Bauteilbeschreibung als CAD-Geometrie. Im Folgenden werden zunächst die Freiheiten der Konstruktion von additiv zu fertigen Geometrien erläutert und danach wird auf übliche Dateiformate eingegangen.

2.2.1.1 Additives Design

Bauteile, die mit subtraktiven Verfahren zu fertigen sind, werden in der Regel nach bestimmten Fertigungs- und Montagekriterien konstruiert, die bspw. in der VDI 2223-Richtlinie definiert worden sind (Fleischer 2019). Mit den konstruktiven Freiheiten, die durch die Additive Fertigung entstanden sind, aber auch in Anbetracht der fertigungstechnischen Randbedingungen der

jeweiligen Verfahren, ist ein Umdenken in der Konstruktionspraxis erforderlich. Diese Freiheiten werden gezielt für Entwicklungsprozesse und -methoden im Kontext des Begriffs *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) beschrieben. Nach (Thompson et al. 2016) wurde dieser Begriff sehr häufig verwendet, ohne dass eine konkrete Definition dafür vorlag. Konstruktive Anforderungen, Richtlinien und Empfehlungen des DfAM werden in der Norm (Norm DIN EN ISO/ASTM 52910) definiert. (Gibson et al. 2015) beschreibt DfAM als die Ausschöpfung der Produktleistung durch die Synthese von Formen, Größen, hierarchischen Strukturen und Materialzusammensetzungen, abhängig von den technologischen Möglichkeiten. Es ergeben sich die folgenden Fähigkeiten:

- Formkomplexität: Prinzipiell ist es möglich, jede Form herzustellen.
- Hierarchische Komplexität: Merkmale können mit Formkomplexität über mehrere Größenskalen hinweg gestaltet werden.
- Funktionale Komplexität: Mehrere Funktionen sind in einem Bauteil realisierbar.
- Werkstoffkomplexität: Punkt- oder schichtweise kann ein Bauteil aus einzelnen Werkstoffen oder aus einer Kombination von Werkstoffen hergestellt werden.

Diese Fähigkeiten können entweder als wissensbasierte Richtlinie dem Konstrukteur helfen oder auch als Optimierungsverfahren verwendet werden. Dazu zählen die Bauteilgrößenoptimierung, die Formoptimierung und die Topologieoptimierung (siehe Abschnitt 2.3.1). Es fehlt in der Betrachtung jedoch die Belastungskomplexität, deren Lösung sich diese Arbeit widmet. Existierende Software mit Erweiterungsmodulen für die Additive Fertigung gibt es beispielsweise in *Dassault Systèmes CATIA*, *Autodesk Inventor* und *Siemens NX* (Gao et al. 2015). Fehlend bei den genannten Lösungen ist jedoch die Optimierung der Festigkeit eines Bauteils unter Verwendung der Herstellungsparameter wie der Bahnplanung.

2.2.1.2 Dateiformate

In der Additiven Fertigung hat sich das STL-Format etabliert, das ursprünglich die *Stereolithografie* entwickelt worden ist (Gibson et al. 2015). Dieses Format basiert auf der Oberflächentriangulation einer Geometrie. Das bedeutet, dass die Kontur mittels Oberflächendreiecke durch Eckpunkte (englisch *Vertices*) und Facetten (englisch *Facets*) approximiert wird. Da dieses Format nicht in der Lage ist, exakte Freiformgeometrien zu repräsentieren und auch keine Metainformationen beinhaltet, wurden in den letzten drei Jahrzehnten zahlreiche Dateiformate entwickelt oder bereits entwickelte Formate für den Einsatz in der Additiven Fertigung verwendet.

Beispielsweise stellt das AMF-Format eine Erweiterung des STL-Formates dar, bei dem zum einen Material- und Textureigenschaften sowie Farben hinterlegt werden können. Zum anderen können gebogene Dreieckskanten beschrieben werden, wodurch ein Objekt präziser approximiert wird. Ebenfalls verwendet wird das konventionelle STEP-Format, das nach der ISO 10303-23 ein definiertes Dateiformat für 3D-CAD-Objekte ist. Zur Geometrierepräsentation werden *Non-uniform rational B-Splines* (NURBS) verwendet. Eine strukturierte Übersicht der Formate und deren Eigenschaften ist in (Qin et al. 2019) beschrieben. In Tabelle 2-5 sind wesentliche Eigenschaften der Formate STL, AMF und STEP (Version 214) gegenübergestellt.

Tabelle 2-5: Tabelle der Eigenschaften unterschiedlicher Dateiformate

	STL	AMF	STEP
Geometrierepräsentation	Oberflächen-triangulation	Oberflächen-triangulation	NURBS-Geometrie
Geometrische Genauigkeit	Gering	Moderat	Hoch
Feature-basierte Beschreibung	Nein	Nein	Ja
Redundanz	Hoch	Moderat	Gering
Codierung	Binär / ASCII	XML-basiert, Binär / ASCII	XML-basiert, Binär / ASCII

Durch STEP-NC, als Ergänzung zu STEP, können geometrische Features direkt an die Anlagensteuerung übergeben werden, wodurch kein Datenverlust in der Bahndiskretisierung entsteht. Ein Datenmodell dieses Standards ist in (Bonnard et al. 2018) beschrieben. Es existiert jedoch zum aktuellen Zeitpunkt kein Format, mit welchem die Raupenorientierung vorgeben werden kann.

2.2.2 CAM-Bahnplanung

In diesem Abschnitt steht die *geometrisch-orientierte* Bahnplanung im Vordergrund. Die *technologisch-orientierte* Bahnplanung wird im Abschnitt 2.3.2 diskutiert. Um ein CAD-Bauteil fertigen zu können, müssen aus Geometrieinformationen maschinenlesbare Fertigungsanweisungen abgeleitet werden. Dies wird in der Regel in Form eines NC-Programms realisiert. In einem solchen Programm für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen sind textuelle Anweisungen, wie beispielsweise Linearbewegungen oder Extrusionsbefehle, beschrieben (Norm DIN 66025-1:1983-01).

Es ist das Grundprinzip der Additiven Fertigung, Material hinzuzufügen. Deshalb müssen die Fertigungsanweisungen so aufgebaut sein, dass einzelne Bahnen definiert werden, aus denen in akkumulierter Form die Bauteilgeometrie resultiert. CAM-Systeme für ebene Flächen werden häufig aufgrund des Schichtprinzips als sogenannte *Slicer* bezeichnet. Hier werden Schichten in einem Bauteil als Flächen im dreidimensionalen Raum dargestellt. Auf diesen Flächen wird eine Abfolge von Einzelbahnen definiert. Ebene Bahnplanungsverfahren zielen auf eine rein planare Bearbeitung (auch 2,5D genannt) ab, wohingegen mehrachsige Verfahren (auch 5D genannt) eine Freiform-Bearbeitung ermöglichen. Die Bahnplanung im planaren Raum ist eher einfach, wohingegen diese im mehrachsigen Raum deutlich komplexer ist. In einer wissenschaftlichen Analyse zu einem mehrachsigen CAM für eine Freiform-Bearbeitung definiert (Campocasso et al. 2018) die notwendigen CAM-Prozessschritte wie folgt:

1. Topologische Untergliederung der Bauteilgeometrie in einzelne, elementare Subvolumen (Features)
2. Computergestützte, globale Werkstückpositionierung und -orientierung
3. Druckstrategie einzelner Subvolumen
4. Automatisierte Bahnplanung der zu druckenden Bahnen mit konstanter Schichthöhe
5. Automatische Berechnung der Aufbaurichtung einzelner Subvolumen
6. Optimierung der lokalen Werkzeugorientierung

Des Weiteren kann der CAM-Prozess mit Prozessmodellen wie der Modellierung der Extrusionsdynamik gekoppelt werden, um ein besseres Druckergebnis zu erzielen. Für eine belastungsgerechte Bahnplanung müssen Simulations-Schnittstellen geschaffen werden, die eine Vorgabe der Bahnausrichtungen ermöglichen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Einzel-funktionen der CAM-Systeme für das ebene und mehrachsige Schmelzschichtverfahren erläutert.

2.2.2.1 Aufgliederungsfunktionen

Eine geometrische Aufgliederung des CAD-Bauteils in Subvolumen wird dann eingesetzt, wenn diese Subvolumen mit unterschiedlichen Orientierungen oder Bahnstrategien gedruckt werden sollen. Speziell für den Mehrachsdruck ist dieses Vorgehen sinnvoll, da die einzelnen Subvolumen unterschiedlich orientiert werden können (Murtezaoglu et al. 2018). Diese Subvolumen bestehen in der Regel aus sogenannten geometrischen Features oder Primitiven, die im Falle eines STEP-Formates direkt aus der CAD-Geometrie abgeleitet werden können oder aus

einer triangulierten Geometrie rekonstruiert werden müssen. (Zhao et al. 2020) gibt eine Übersicht über diese Ansätze und definiert ein Vorgehen für eine Bauteiluntergliederung und Sequenzierung mit unterschiedlichen Ansätzen. Eine Herausforderung dieser Aufgliederungsfunktion ist es, eine geeignete Reihenfolge für das Abarbeiten der Geometrien zu finden, bei der eine Zugänglichkeit und Kollisionsfreiheit in der Fertigung gewährleistet ist. In (Hildebrand et al. 2013) wird ein Voxel-basierter Ansatz für eine Bauteiluntergliederung präsentiert, mit dem Ziel, den Stufeneffekt zu minimieren. Das CAD-Bauteil wird hierbei durch eine Separierung eines Hüllkörpers um das Bauteilinnere aufgegliedert. Dies hat den Vorteil, dass die innere Subgeometrie eben und die äußere Hülle konturparallel gedruckt werden kann, wodurch der Stufeneffekt minimiert wird.

Bei gegebener Untergliederung eines CAD-Bauteils müssen die Position \bar{r}_g und Orientierung $\bar{\phi}_g$ der jeweiligen (Sub-) Geometrie, eine Slicingfläche H_s und deren Aufbaurichtung \bar{w}_s definiert werden, bevor die Stützstrukturen generiert werden können und ein Bauteil in Schichten unterteilt werden kann. Die Orientierung eines Bauteils im Raum wird meist durch den CAM-Benutzer festgelegt, kann aber auch automatisiert erfolgen. Nach (Taufik et al. 2013) hat die Orientierung des Bauteils und die Aufbaurichtung auf folgende Eigenschaften Auswirkungen: Oberflächenqualität, geometrische Genauigkeit, Volumen der Stützstrukturen, Festigkeiten und Fertigungsdauer. In (Eiliat et al. 2019) wird eine umfängliche Erläuterung zur Beeinflussung der Orientierung auf bestimmte Fertigungseigenschaften, wie die Minimierung ungewollter Hohlvolume, beschrieben. Eine Methode zur automatisierten Orientierung eines Bauteils und Festlegung der Aufbaurichtung ist in (Thrimurthulu et al. 2004) erläutert, mit dem Ziel einer möglichst guten Oberflächenqualität und Minimierung der Fertigungsdauer. Analog dazu wird in (Luo et al. 2016) die Bauteilorientierung derart definiert, dass die Abweichung von Soll- und Ist-Volumen minimiert wird. Es existieren zahlreiche weitere Ansätze zur Optimierung einer Bauteilorientierung. Nach festgelegter Orientierung eines Bauteils muss die Aufbaurichtung \bar{w}_s definiert werden. Im planaren Slicing ist diese normal zur Slicingfläche H_s . Abweichend dazu wird in (Nguyen et al. 2018) ein Algorithmus präsentiert, der die Aufbaurichtung \bar{w}_s entlang einer dreidimensionalen Kurve definiert, in der das Bauteil in einzelne Schichten unterteilt wird.

Fazit: Da die Orientierung des zu druckenden Bauteils und die Aufbaurichtung neben der Einzelbahnplanung wesentlichen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften hat, muss eine Lösung gefunden werden, wie diese aus der belastungsgerechten Bahnplanung ermittelt werden kann.

2.2.2.2 Stützstrukturen

Die Generierung von Stützstrukturen ist aufgrund der in Abschnitt 2.1.2 genannten Prozessanforderungen bei Überhängen erforderlich. Die Geometrie der Stützstrukturen wird durch die Detektion von Überhängen und der Projektion der Überhangsfläche auf darunterliegende Komponenten (Bauteil oder Plattform) generiert. Da das Drucken von Stützstrukturen Druckzeit benötigt, das Material im Anschluss entfernt und recycelt werden muss und die Oberflächenqualität des Bauteils an der Kontaktstelle geringer ist, werden Verfahren zur Stützstrukturreduktion erforscht und verwendet (Wulle et al. 2017). Um die Notwendigkeit oder das Ausmaß an Stützstrukturen zu minimieren, existieren Ansätze basierend auf einer optimalen Orientierung des zu druckenden Bauteils auf der Bauplattform. Die Minimierung der Stützstrukturen durch die Generierung von Subvolumen mit unterschiedlicher Aufbaurichtung und mit 5-achsiger Kinematik wurden in (Murtezaoglu et al. 2018) präsentiert. Darin wird ein Algorithmus zur Ermittlung geeigneter Ebenen für Aufgliederungsoperationen der Bauteilgeometrie vorgestellt. Ein Voxelbasierter Ansatz, bei dem Schichten entlang variablen Richtungen erstellt werden, wird in (Dai et al. 2018) erläutert. Diese Methodik beruht auf schichtförmigem Wachstum entlang von Oberflächen konvexer Subvolumen. Aus den schalenartig aufgebauten Subvolumen werden dann gekrümmte Schichten generiert. Bei diesem Ansatz wird Kollisionsfreiheit in der Fertigung zwischen Druckkopf und Bauteil gewährleistet. Eine anschließende Minimierung des Volumens an restlichem Stützmaterial durch Baumstrukturen ist in (Vanek et al. 2014) gezeigt.

2.2.2.3 Ebenes und räumliches Slicing

Es existieren Methoden für planares und gekrümmtes Slicing sowie spezielle Methoden, welche in (Nayyeri et al. 2022) analysiert und verglichen werden. Auf diese Ansätze wird im Folgenden separat eingegangen.

Beim planaren Slicing wird eine ebene Slicingfläche H_s definiert, welche das CAD-Bauteil schneidet. Bei einer indirekten Schichterzeugung werden Schnittpunkte der Schnittebenen mit der tesselierten Geometrie berechnet (siehe Abbildung 2-8). Für die nächste Schicht wird die Slicingfläche H_s in die Aufbaurichtung \bar{w}_s verschoben und der Iterationszyklus läuft so lange ab, bis die Außenmaße des Objektes in Richtung \bar{w}_s erreicht sind. Um die Integrität einer Bauteilkontur nicht zu verletzen, dürfen nur die obersten Kanten der Materialschichten die Bauteilkontur berühren. Hierdurch und durch die diskrete Schichthöhe h_{Ext} über der gesamten Schicht

entsteht der beschriebene Stufeneffekt. Eine Übersicht über das hier genannte sowie weitere ebene Slicing-Verfahren wird in (Martha 2015) gegeben.

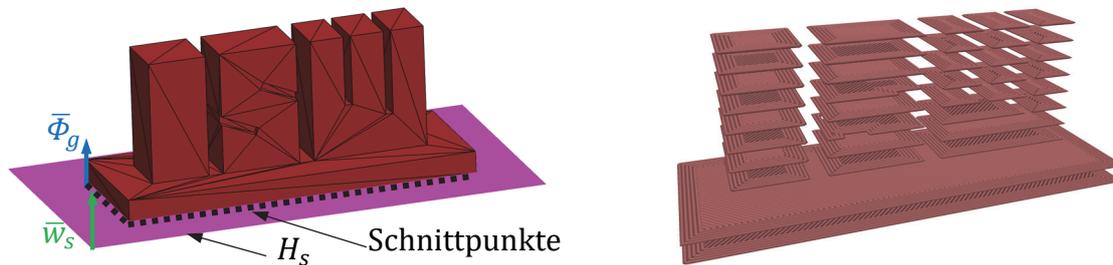


Abbildung 2-8: Ebenes Slicing einer tessellierten Geometrie

Bei einer direkten Schichterzeugung werden die Schichtdaten direkt aus der generischen CAD-Geometrie berechnet. Dies hat den Vorteil, dass die Geometriebeschreibung nicht approximiert wird (Gohari et al. 2018), jedoch sind die Verfahren deutlich komplexer, da Probleme wie nicht-mannigfaltige Flächenbildung entstehen können. Das erste Beispiel hierfür hat (Jamieson et al. 1995) mit Hilfe von *Parasolid*-CAD-Modellen präsentiert. In (Hope et al. 1997) wird beschrieben, wie auf Grundlage einer NURBS-Geometrie (IGES-Format) Schichten berechnet werden können. Als Erweiterung zum ebenen Slicing mit konstanten Schichthöhen bietet das sogenannte *Adaptive Slicing* die Möglichkeit, die Schichthöhe innerhalb eines Subvolumens anzupassen, um somit bspw. den Stufeneffekt zu verringern. (Zhao et al. 2000) hat dazu eine Methode aufgestellt und (Li et al. 2016) untersucht die Auswirkung von *Adaptive Slicing* auf die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächengüte. Die Restriktionen des ebenen Slicings können einem beliebig geformten Spannungsverlauf jedoch nicht folgen, weshalb im nächsten Schritt das gekrümmte Slicing betrachtet wird.

Das Slicing mit gekrümmten Flächen ist unter dem englischen Begriff *Curved-Layer-Slicing* (kurz CL-Slicing) bekannt. Hierbei orientiert sich das Slicing an einer gekrümmten Fläche H_s , die eine Konturfläche sein kann, aber nicht notwendigerweise sein muss. Anhand der ersten Schicht wird eine weitere Schicht berechnet, die direkt auf der ursprünglichen Schicht liegt. Auch hier wird eine Iteration bis zur Grenze des betrachteten (Sub-)Volumens durchgeführt. Methoden dieser Art können in zwei verschiedene Kategorien eingeteilt werden, welche im Folgenden näher beschrieben werden:

- Vektorverfahren auf tessellierten Flächen
- NURBS-basierte Verfahren

Aufgrund geometrischer Eigenschaften kann je nach Methode die Slicingfläche $H_{s,i}$ und die Aufbaurichtung $\bar{w}_{s,i}$ in jeder i -ten Schicht angepasst werden. Die trivialsten Slicing-Methoden sind Vektorverfahren auf tesselierten Flächen wie das *Vertical Surface Offsetting* (Wulle et al. 2022). Bei dieser Methode werden Schichten ermittelt, indem der Ortsvektor jedes i -ten Punktes der k -ten Schicht um den konstanten Vektor \bar{w}_s versetzt wird:

$$\bar{P}_{i,k+1} = \bar{P}_{i,k} + \bar{w}_s \quad , \text{ mit } |\bar{w}_s| = h_{\text{Ext}} \quad \text{Gl. 2-6}$$

Sind alle tesselierten Punkte einer Schicht versetzt, kann aus der gewonnenen neuen Punktwolke die nächste Schicht interpoliert werden. Dieser Vorgang kann so lange wiederholt werden, bis alle notwendigen Schichten berechnet sind. Die Methode kann jedoch nur bei einfach gekrümmten Flächen angewandt werden. Eine Erweiterung stellen hierbei zwei und vier Vektorkreuzproduktmethoden dar, welche in (Singamneni et al. 2012) erläutert werden. Beim sogenannten *Surface Offsetting* wird eine Projektion der oberflächenbeschreibenden Polygone ins Bauteilinnere vorgenommen. An jeder Ecke eines Polygons wird der Normalenvektor mit denen der benachbarten Polygone kombiniert (Huang et al. 2012). Diese Methode ist für das Berechnen von konturparallelen Schichten geeignet und somit für das Bedrucken von Oberflächen. Das Grundproblem dieser Methoden ist, dass die durch die Tessellierung entstandenen Geometriefehler verstärkt werden können und dass äquidistante Schichthöhen zwischen den Schichten nicht überall gewährleistet werden können.

Moderne NURBS-basierte CL-Slicingmethoden basieren auf einer parametrischen Funktion anstelle einer Punktwolke. Für die Grundlagen einer Beschreibung von NURBS-Flächen sei auf (Piegl 1995) verwiesen. (Chakraborty et al. 2008) hat eine Methode entwickelt, mit der Slicingflächen entlang ihres lokalen Normalenvektors versetzt werden können:

$$\bar{P}_{k+1}(u, v) = \bar{P}_k(u, v) + h_{\text{Ext}} \bar{n}(u, v) \quad \text{Gl. 2-7}$$

mit \bar{P}_k als parametrisiertem Oberflächenpunkt mit den Koordinaten u und v im Parameterraum. Der Normalenvektor \bar{n} wird durch die partiellen Ableitungen \bar{P}_u und \bar{P}_v berechnet mit:

$$\bar{n}(u, v) = \frac{\bar{P}_u(u, v) \times \bar{P}_v(u, v)}{|\bar{P}_u(u, v) \times \bar{P}_v(u, v)|} \quad , \text{ mit } \bar{P}_u = \frac{\partial \bar{P}}{\partial u} \quad ; \quad \bar{P}_v = \frac{\partial \bar{P}}{\partial v} \quad \text{Gl. 2-8}$$

Durch diese parametrisierte Flächenbeschreibung können neben der eigentlichen Schichtberechnung auch die später berechneten Bahnkurven ermittelt werden. Das Offsetting von NURBS-Flächen wird bereits häufig eingesetzt und kann geometrisch exakte Ergebnisse erzielen (Piegl et al. 1999), jedoch gibt es bei bestimmten Flächenausprägungen Probleme, wie

bspw. selbstschneidende Flächen (siehe Abbildung 2-9). Diesen Problemen wird in Softwarelösungen mit Fallabfragen und lokalen Ausgleichsflächen entgegengewirkt.

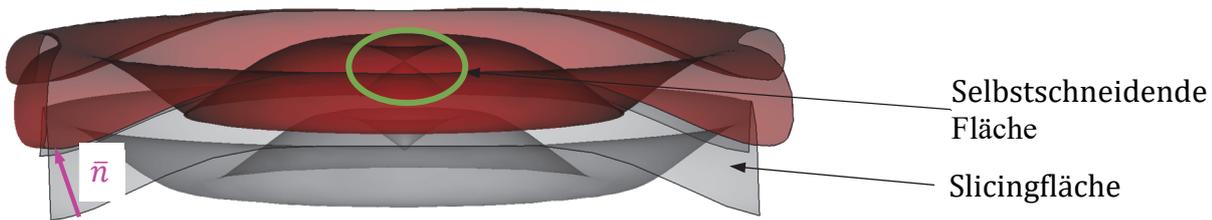


Abbildung 2-9: Selbstschneidende Flächen beim Curved-Layer-Slicing (Wolf 2018)

Die NURBS-basierten CL-Slicingmethoden sind sehr gut geeignet für die Schichtung in nahezu beliebig gekrümmten Flächen und somit auch zur Orientierung dieser Flächen entsprechend von Spannungsverläufen.

Neben den beschriebenen Methoden kann für einfache Geometrien das Slicing und die Einzelbahnplanung auch mit planaren Methoden durchgeführt werden, indem die gekrümmte Geometrie in den planaren Raum transformiert wird und anschließend die Bahninformationen wieder in den gekrümmten Raum rücktransformiert werden. Beispiele sind hierfür das Slicing von rotationssymmetrischen Bauteilen in (Zhao et al. 2018) oder Slicing basierend auf einer allgemeinen Zylindertransformation (Coupek et al. 2018).

Nach einer Methode von (Dai et al. 2018) werden gekrümmte Schichten aus konvexen Hüllen mit einem globalen Suchalgorithmus ermittelt. Hierbei werden geometrische Randbedingungen definiert, wie die geometrische Integrität eines Bauteils, Erreichbarkeit einzelner Schichten und die Ausdehnung einer Schicht in Bezug auf die vorherige. Da eine globale Suche allein zu unstrukturiert wäre, wird der Raum, den das Bauteil einnimmt, in ein Voxel-Gitter diskretisiert. Es wird angenommen, dass zwei benachbarte Voxel entweder in einer Schicht oder in direkt benachbarten Schichten liegen müssen. Der von einer Grundfläche anwachsende *Greedy*-Suchalgorithmus arbeitet mit einer sogenannten konvexen Front, wodurch eine Zugänglichkeit der Bahnen auf den Schichten gewährleistet wird.

Fazit: Um die Extrusionspfade parallel zu beliebigen Spannungen auszurichten, ist es notwendig, die Slicingfläche beliebig im Raum zu krümmen. Erst darin können die Raupen in der optimalen Orientierung abgelegt werden. Es existieren also für eine mögliche belastungsgerechte Bahnplanung notwendige Slicingverfahren.

2.2.2.4 Einzelbahnplanung

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie einzelne Bahnen auf Schichten generiert werden können. Dazu werden auf den Schichten in der Regel zur besseren Oberflächengüte Außenkonturbahnen (meist 2-3 Stück) ermittelt, welche die Außenkontur darstellen und um den Bahnabstand b_{Abst} versetzt sind. Neben diesen sogenannten Konturbahnen werden die bauteilinneren bzw. schichtinneren Bereiche meist separat behandelt. Hierbei werden häufig bestimmte Formmuster verwendet. Einzelbahnen mit größerem Bahnabstand ($b_{\text{Abst}} > b_{\text{Ext}}$) sind hierbei üblich und werden als *Infill* (Füllstruktur) bezeichnet. Wie bei den Slicingmethoden gibt es auch hier Verfahren, die auf diskreten tesselierten Flächen und auf parametrischen NURBS-Flächen aufbauen.

Aus der tesselierten Fläche werden Konturpunkte durch einen Schnitt der Slicingfläche mit den Außenflächen der Bauteilgeometrie berechnet (Venuvinod 2004). Eine Überprüfung von innen- und außenliegenden Seiten kann durch eine weitere schichtbezogene Strahluntersuchung vorgenommen werden (Volpato et al. 2013). Die Liste der Schnittpunkte wird nach einer sogenannten *Head-to-Tail*-Suche sortiert, wodurch eine geschlossene Kontur an Außenschnittpunkten entsteht (Choi et al. 2002). Durch eine Linearinterpolation dieser Punkte resultieren zusammenhängende Bahnen, welche ins Bauteilinnere versetzt werden können. Der schichtinnere Bereich kann nun mit einem bestimmten Infill-Muster geplant werden. Das hier eingesetzte sogenannte *Hatching* kann beliebig komplex realisiert werden. (Adams et al. 2018) hat verschiedene Ansätze analysiert und deren Auswirkungen auf die Festigkeit von Zugprüfkörper untersucht (jedoch keine Spannungstrajektorien betrachtet). In (Jin et al. 2014) werden Infill-Muster auf deren Effizienz in Hinblick auf die Druckdauer und die Fertigungspräzision erforscht. In der Regel werden schichtübergreifende Kreuzmuster verwendet, die anhand einer Leitkurve oder Leitachse ausgerichtet werden.

Bei NURBS-Flächen können die Außenkanten direkt über Schnittoperationen bestimmt werden. (Gálvez et al. 2014) beschreibt eine Methode, wie äquidistante, parallele Bahnen im Parameterraum berechnet werden können. Hierbei werden differential-geometrische Anfangswertprobleme beschrieben, die mittels Integrationsverfahren für gewöhnliche Differenzialgleichungen numerisch gelöst werden können. Alternativ wird in (Jin et al. 2017) eine Leitkurve in den euklidischen Raum transformiert und dort parallel versetzt. In Abbildung 2-10 ist das Resultat einer Einzelbahnplanung skizziert. Hierbei erfolgt die Bahnberechnung anhand einer Leitkurve.

Der Normalenvektor \bar{n} , der im Slicing bestimmt wird, wird zur Ausrichtung des Druckkopfes verwendet ($\bar{n} := \bar{\Phi}_t$).

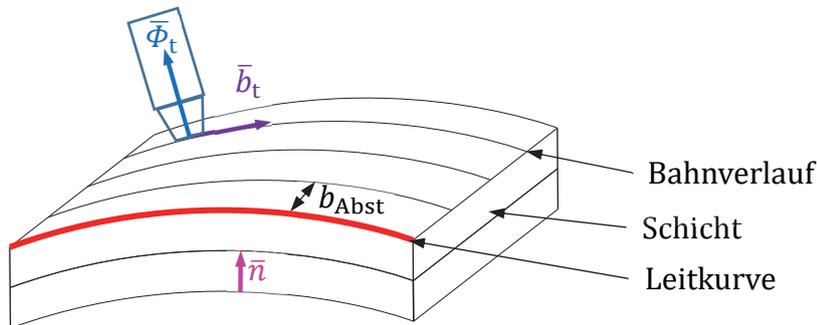


Abbildung 2-10: Einzelbahnplanung mit NURBS-Flächen

Zusätzlich zur Bahnplanung müssen Verfahrbewegungen zwischen den Bahnen, also Traversen, bestimmt werden. Zur weiteren Verwendung der Bahninformationen müssen diese mit linearen oder Spline-Ansatzfunktionen, wie bspw. *B*- oder *Akima*-Spline, interpoliert werden, die auf der Anlagensteuerung rekonstruiert werden.

2.2.2.5 Postprozessor und Export

In einem Postprozessor-Schritt werden die Bahnbeschreibungen adaptiert und als NC-Programm exportiert. Hierbei können Änderungen des Bahnverlaufes vorgenommen werden, wie bspw. Überschleifen von Bahnen oder Orientierungen, und es werden prozessspezifische Befehle definiert (bspw. Extrusion ein / aus). Des Weiteren müssen für eine NC-Programmierung die Bahnen auf eine spezifische Achskonfiguration der zu verwendenden Anlage angepasst werden. Die Orientierung $\bar{\Phi}_g$ an einem betrachteten Bahnpunkt muss auf die Achslage übertragen werden. Hierbei muss festgelegt werden, ob dabei das Bauteil oder der Druckkopf rotiert werden soll. Durch eine Transformation wird dann die Orientierung $\bar{\Phi}_t$ auf die anlagenspezifischen Rotationsachsen transformiert. Der Export der Bahnplanung erfolgt in der Regel als textuelles NC-Programm.

Fazit: Allgemein ist festzuhalten, dass der aktuelle Stand der CAM-Entwicklungen im Bereich der Schmelzschichtverfahren die notwendigen Eigenschaften und Funktionen für eine belastungsgerechte Bahnplanung bereithält, diese jedoch noch nicht effektiv eingesetzt werden.

2.2.3 Maschinen- und Anlagentechnik für das Schmelzschichtverfahren

Maschinentypen für das Schmelzschichtverfahren sind prinzipiell ähnlich zu konventionellen Kinematiken. (Wakimoto et al. 2018) teilt diese in die Kategorien kartesische, polare, Delta- und robotische Kinematiken ein. Die Genauigkeitsanforderungen sind abhängig von der zu erzielenden geometrischen Auflösung, jedoch sind Genauigkeitsbereiche unter 0,05 mm in der Regel nicht gefordert. Durch geringe Prozesskräfte und eine moderate Bearbeitungsdynamik sind die Steifigkeitsanforderungen einer Maschine deutlich geringer als in der Zerspanung (Kampker et al. 2019). Die Bauräume reichen von Miniaturanwendungen ($< 1 \text{ cm}^3$) bis zu 1 m^3 . Die Anlagen werden dabei meist als sogenannte *Stand-Alone*-Anlagen konzipiert (Gebhardt 2014). Die Kosten einer Anlage reichen dabei von 100 € im Hobbybereich über halbprofessionelle Desktopanwendungen (siehe Abbildung 2-11 links) bis hin zu vollautomatischen Anlagen. Aufgrund der Flexibilität und der räumlichen Bewegungsführung werden Knickarmroboter zunehmend eingesetzt. Hierbei wird zwischen Robotern, die den Druckkopf führen, und jenen, die den Werkstücktisch bewegen, differenziert (siehe Abbildung 2-11 rechts).

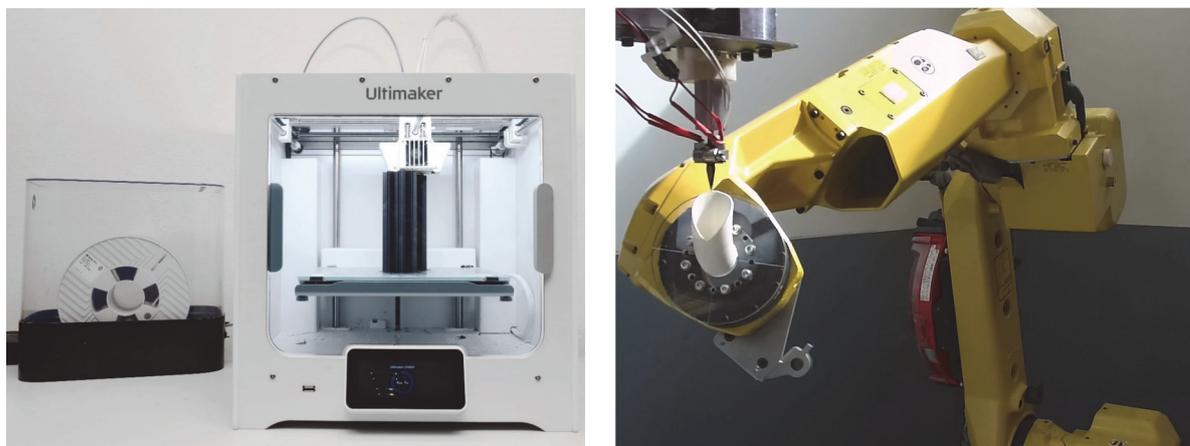


Abbildung 2-11: Konventionelle 3-achsige Desktop-Anlage (links); 6-achs-Knickarmroboter und feststehender Druckkopf (rechts)

Eine robotergeführte Anwendung ist in (Kubalak et al. 2019) erläutert mit dem Ziel, eine Festigkeitssteigerung durch das konturparallele Drucken von Bauteilhüllen zu erzielen. Eine gleichbleibende absolute Genauigkeit in verschiedenen Achslagen ist hierbei jedoch schlechter als die geforderten 0,1 mm bei 0,5 mm Schichthöhe (Wu et al. 2017). Eine Anlage im Mehrachsereich mit offenen Soft- und Hardwaresystemen ist kommerziell nicht erhältlich und muss deshalb im Rahmen dieser Arbeit für experimentelle Untersuchungen entwickelt werden.

2.2.4 Steuerungstechnik für das Schmelzschichtverfahren

Bei Steuerungsarchitekturen für Maschinen im Schmelzschichtverfahren wird unterschieden zwischen hobbymäßigen Community-Systemen und industriellen Steuerungssystemen. Bei Community-Systemen werden häufig Open-Source-Algorithmen verwendet, die bspw. auf einem *Arduino* ausgeführt werden. Diese haben eine direkte CAM-Anbindung und kommunizieren mit Schrittmotortreibern und weiteren Signalen. Die Bahnsteuerung wird typischerweise als *Motion Control* ausgeführt. Es können hiermit jedoch keine bahngesteuerte mehrachsige Bewegung geplant oder komplexe modellbasierte Druckanwendungen gesteuert werden.

Die Schnittstellen für industrielle Steuerungssysteme sind in der Regel NC-Programme nach (Norm DIN 66025-1:1983-01). Die *Computerized Numerical Control* (CNC) dekodiert das Programm und führt eine Online-Bahnrekonstruktion durch, welche die Dynamik von Achsen berücksichtigt (Pritschow 2006). Hierbei können auch mehrachsige Achsverbünde in einem Kanal geführt werden. Die berechneten Bahnen werden im Echtzeittakt (meist 1-5 ms) interpoliert und als Achssollwerte auf die Achsumrichter übertragen, welche die Antriebe positionsgeregelt führen. Hierbei werden Dynamikgrenzen von Maschinen eingehalten und konstante Bahngeschwindigkeiten angestrebt. Die Druckkopfsteuerung erfolgt in einer angebundenen Logiksteuerung. Durch die Kopplung von Bewegungsführung und Extrusion können komplexere Steuerungsfunktionen zum Einsatz kommen, um die Prozessqualität zu verbessern. Somit kann die Anpassung des Volumenstroms an die Bahngeschwindigkeit vorgenommen werden, wodurch konstante Raupenquerschnitte erzielt werden sollen. Das viskose Verhalten der Extrusion verursacht Prozess- und Bauteilqualitätsminderungen, die bei Geschwindigkeitsänderungen wie Anfahr- und Stopp-Phasen der Extrusion auftreten. Durch eine modellprädiktive Vorsteuerung und Bahnplanung auf Basis einer Dynamikmodellierung des Kunststoffes im Extruder kann der Volumenstrom jedoch vorgesteuert werden (Ertay et al. 2018). Darüber hinaus können Prozessregelungs- und -steuerungsverfahren angewandt werden, wie die lernende kamerabasierte Extrusionssteuerung (Jin et al. 2019). Aufgrund der genannten Eigenschaften und einer möglichen Professionalisierung wird in dieser Arbeit ein industrielles Steuerungssystem eingesetzt.

Die Auftragssimulation des Druckprozesses ist ein aktuelles Forschungsthema. Diese kann entweder in einer virtuellen Inbetriebnahme zur Vorabsicherung bspw. zur Kollisionsvermeidung im Mehrachsprozess (Wörner 2018) oder für eine Bauteilmodellierung verwendet werden, wie zur fluiddynamischen Simulation (Comminal et al. 2018).

2.3 Beanspruchungsgerechte Bauteilherstellung im Schmelzschichtverfahren

Das Schmelzschichtverfahren hat die Eigenschaft, die innere und äußere Struktur eines Bauteils nahezu frei definieren zu können. Diese Freiheit lässt sich dazu verwenden, Bauteile leichter herzustellen, als diese im konventionellen Spritzgussverfahren nur sehr aufwändig oder gar nicht fertigbar wären. In Bezug auf die in Abbildung 2-7 beschriebene Prozesskette betrachtet dieses Unterkapitel Optimierungspotenziale in den Bereichen CAD und CAM und geht von konstanten Druckeigenschaften hinsichtlich der Festigkeit von gedruckten Strukturen aus (vgl. mit (Fuhrmann 2018)). Die Relevanz der beiden Betrachtungen unterstreicht (Plocher et al. 2019) insofern, dass das DfAM und die Strukturoptimierung entscheidend für die erfolgreiche Gestaltung der zukünftigen Branche der Additiven Fertigung sein wird. Die äußeren Bauteilabmessungen werden hierbei nicht verändert, im Gegensatz zur Formoptimierung (Bletzinger et al. 2001), sondern als gegeben angenommen. Die Strukturoptimierung lässt sich in die Topologieoptimierung und die Optimierung der endostrukturellen, also inneren, Gestalt (altgriechisch endo = innerhalb / innen) aufteilen (Liu et al. 2018a). Diese beiden Varianten sind in Abbildung 2-12 skizziert. Dargestellt sind ein Biegebalken mit eingepprägter Last sowie die beiden Arten der effizienten Nutzung von Material und struktureller Orientierung von anisotropem Material.

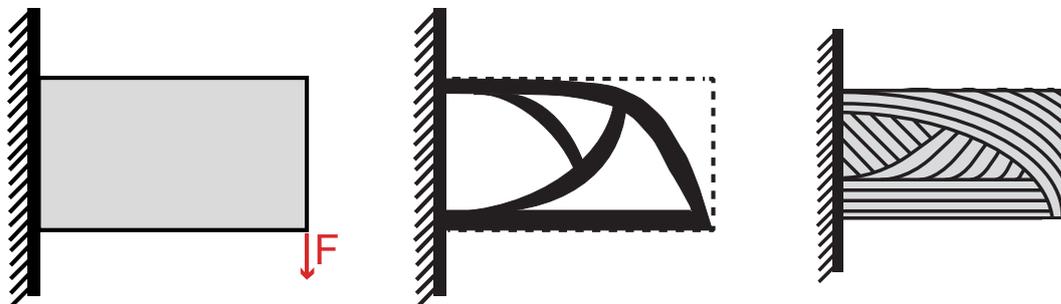


Abbildung 2-12: Arten der Strukturoptimierung: Modell und Belastungsfall (links); Topologieoptimierung (Mitte); endostrukturelle Optimierung (rechts)

Die Topologieoptimierung strebt als CAD-Nachbereitung eine diskrete Volumenverteilung mit isobarer Spannungsverteilung im Bauteil an (Bendsøe et al. 2004). Bei der endostrukturellen Optimierung wird im CAM-Schritt das Füllen des Bauteilvolumens so geplant, dass die eingepprägte Last besser ertragen wird oder das Bauteil weniger Masse hat. Bei beiden Methoden wird der Belastungsfall initial durch eine Simulation mit angenommenem isotropen Materialeigenschaften begonnen (Plocher et al. 2019). Im Folgenden werden die Ansätze und Anwendungen der beiden Methoden erläutert.

2.3.1 Topologieoptimierung im Schmelzschichtverfahren

Die Topologieoptimierung ist als Strukturrevolution durch die Additive Fertigung effektiv zur Anwendung gekommen (Liu et al. 2018a). (Deaton et al. 2014) unterscheidet die folgenden Methoden der Topologieoptimierung:

- Dichtebasierte Methoden
- Hard-kill-Methoden, einschließlich Evolutionäre Strukturoptimierung
- Randwertmethoden
- Bionische oder bioinspirierte Methoden

Meist kommen für die Topologieoptimierung dichtebasierte Methoden zum Einsatz (Deaton et al. 2014). Hierbei werden Ansatzfunktionen definiert, die diskrete durch kontinuierliche Verteilungsvariablen ersetzen. Dabei werden mit einem iterativen Algorithmus mechanische Simulationen durchgeführt und die Materialdichte jedes Elements interpretiert (Helfesrieder et al. 2020). Anschließend werden Bestrafungsmethoden für mittlere Dichten angewandt, mit dem Ziel, eine Festkörper-Leerraum-Lösung zu forcieren. Die mathematische Grundlage eines dichtebasierten Topologieoptimierungsproblems enthält eine Zielfunktion, Einschränkungen und eine diskretisierte Darstellung des mechanischen Systems. Eine allgemeine Formulierung, die auf der linearen statischen Finite-Elemente-Analyse basiert, kann wie folgt angegeben werden:

$$\begin{aligned} \min: & f(\bar{\rho}, \bar{u}) \\ \text{Bedingung: } & \bar{\bar{C}}_{\text{ges}}(\bar{\rho}) \bar{u} = \bar{F}(\bar{\rho}) \\ & g(\bar{\rho}, \bar{u}) \leq 0, 0 \leq \bar{\rho} \leq 1 \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-9}$$

mit der zu minimierenden Zielfunktion f , dem Vektor der Elementdichte $\bar{\rho}$, dem Verschiebungsvektor \bar{u} , der Steifigkeitsmatrix $\bar{\bar{C}}_{\text{ges}}$, dem Kraftvektor \bar{F} und den Randbedingungen g .

Hard-kill-Methoden der Topologieoptimierung arbeiten nach dem Prinzip des schrittweisen Entfernens oder Hinzufügens einer endlichen Materialmenge. Die Auswahl des zu entfernenden oder hinzuzufügenden Materials basiert auf heuristischen Kriterien, die bspw. auf Sensitivitätsinformationen beruhen können. Die bekannteste *Hard-Kill*-Methode der Topologieoptimierung ist die *Evolutionäre Strukturoptimierung* (Deaton et al. 2014).

Randwertmethoden sind jüngere Entwicklungen in der strukturellen und multidisziplinären Topologieoptimierung, die sich aus der Formoptimierung entwickelt haben. Hierbei werden durch

die *Niveaumengenmethode* strukturelle Grenzen einer Kontur definiert, ohne dass die Geometrie parametrisiert werden muss (van Dijk et al. 2013).

Bei bionischen oder bioinspirierten Ansätzen werden aus der Biologie Konstruktionsprinzipien methodisch analysiert und auf technische Anwendungen übertragen (Teufelhart 2016; Knippers et al. 2019). Dabei werden evolutionär entwickelte, bewährte Leichtbauweisen für äquivalente technische Aufgaben in der Bauteilkonstruktion umgesetzt. Ein Beispiel ist der in Abbildung 2-13 gezeigte Pavillon, der aus einer porösen, 30 mm dicken Betonschale besteht und dessen Strukturgradierung von einem Seeigelstachel übertragen wurde.



Abbildung 2-13: Topologisch optimierte Schalenstruktur aus faserverstärktem Beton

Eine mathematische Lösung der Topologieoptimierung wird meist in einem weiteren Interpretationsschritt in einfachere oder besser fertigbare Geometrien vereinfacht (Liu et al. 2018a). Die meisten Topologieoptimierungsmethoden basieren auf der Annahme isotroper Materialeigenschaften (Stava et al. 2012; Panetta et al. 2015; Allaire et al. 2019). Auf das Problem, dass diese Herangehensweise nicht die tatsächliche anisotrope Werkstoffeigenschaften widerspiegelt, hat (Brackett et al. 2011) aufmerksam gemacht. (Nomura et al. 2015) hat einen Ansatz für die anisotrope Topologieoptimierung gegeben, jedoch ohne die Bahnplanung zu berücksichtigen. Für einzelne, beispielhafte Bauteile (wie eine Knochenstruktur) gibt es bereits Lösungen für eine raupenorientierte anisotrope Topologieoptimierung (Wu et al. 2018; Dapogny et al. 2019).

Fazit: Die großen Fertigungsfreiheiten des mehrachsigen Schmelzschichtverfahrens werden bislang nur unzureichend genutzt. Ansätze hierfür sind in (Kubalak et al. 2021) zu finden, wobei die Bahnplanung hier nicht weitergehend analysiert wird.

2.3.2 Methoden der endostrukturellen Optimierung

Die aktuelle Entwicklung der endostrukturellen Optimierungsmethoden lässt sich in zwei Kategorien einteilen:

- Interne Gitterstrukturen (englisch Latticing)
- Spannungsorientierte Struktur- und Bahnplanung

Beide Gruppen beginnen mit einer FE-Simulation mit einem isotropen Materialansatz (Stava et al. 2012; Rezayat et al. 2015). Die meisten publizierten Ansätze zur strukturellen Optimierung basieren auf einem schichtbezogenen Infill. Bei der konventionellen Bahnplanung hat das Infill eine regelmäßige Struktur, deren Geometrie und Füllgrad (0-100 %) vom Benutzer in der Slicing-Software ausgewählt wird. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass ein höherer Füllgrad zu einer höheren Bauteilfestigkeit führt (Wu et al. 2018). Prinzipiell können Gitterstrukturen auf einfachen geometrischen Ansätzen wie *Greedy tiling*, *Honeycomb* oder der *Hilvert-Kurve* aufgebaut werden (Adams et al. 2018). Um ein Objekt mit räumlich variierenden elastischen Eigenschaften zu erzeugen, unterteilt der Ansatz von (Schumacher et al. 2015) das Innere eines Bauteils in Mikrostrukturen und verwendet einen effizienten Algorithmus zur Auswahl kompatibler Infill-Strukturen für einzelne Zellen. Einen ähnlichen Ansatz zeigt (Panetta et al. 2015) auf Grundlage festgelegter kubischer Strukturen mit dem Ziel, isotrope Bauteileigenschaften zu erzeugen. (Thillaithevan et al. 2021) zeigt, wie diese kubischen Gitterstrukturen über einen Topologieoptimierungsansatz ermittelt werden können. (Daynes et al. 2019) stellt dar, wie zusätzlich zu einer topologisch optimierten Bauteilgeometrie spannungsorientierte Infill-Strukturen zur Verbesserung der Festigkeit und gleichzeitig zur Verbesserung des Stützeffektes beitragen können. Eine Brücke zur Topologieoptimierung schlägt (Wu et al. 2018) mit einer an festen Konturbreiten ausgelegten Infill-Optimierung durch die Ausrichtung der inneren Struktur entlang der ersten und zweiten Hauptspannung. Diese Methode wird anhand eines Femurs gezeigt, jedoch wird keine experimentelle Validierung durchgeführt. Diese Gitter-Infill-Methoden werden für eine planare schichtbasierte Bahnplanung für eine 3-achsige Druckanwendung verwendet und nutzen die freie Orientierung der Bahnen nicht aus.

Methoden der spannungsorientierten Bahnplanung machen sich die Anisotropie von gedruckten Raupen zunutze, in dem die strukturelle Ausrichtung der Raupen beanspruchungsgerecht orientiert ist. Auf dieses Optimierungspotenzial hat (Liu et al. 2016) aufmerksam gemacht und

angemerkt, dass bis dato noch keine geeignete Lösung dafür realisiert worden sei. Die Methoden hierfür verwenden Hauptspannungstrajektorien, also Kurven, in denen ausschließlich Normalspannungen herrschen. Im Gegensatz zu Methoden, die im Faserverbund-Bereich eingesetzt werden, wie *Tailored Fiber Placement* oder *Computer Aided Internal Optimisation (CAIO)*, muss eine derartige Bahnplanung auch nicht-schalenförmige Geometrien spannungsgerecht gestalten können. Anwendungsbezogen lassen sich diese spannungsorientierten Bahnplanungsmethoden in ebene, sequenziell mehrachsige und simultan mehrachsige Bahnprofile aufteilen.

In (Plocher et al. 2018) wird eine Methode präsentiert, die für eine topologisch optimierte Form kontinuierliche Bahnen bestimmt, unter Nutzung einer Mittelachse eines Subvolumens (Medial-Achstransformation). Dieses Verfahren zeigt bei einfachen Beispielbauteilen eine Festigkeitssteigerung gegenüber einer konventionellen Bahnplanung von ca. 20 %, ist jedoch nur auf ebene Probleme anwendbar. Eine ähnliche Methode mit nach innen versetzten Konturbahnen einzelner Schichten stellt (Liu et al. 2018b) dar. (Chen et al. 2021) zeigt eine Vektorfeld-basierte Methode zur ebenen Bahnplanung für das endlosfaserverstärkte Schmelzschichtverfahren anhand von drei Bauteilen und vergleicht diese mit der konturparallelen Bahnplanung. Die hier gezeigten Ergebnisse der Referenzbauteile unterscheiden sich deutlich, jedoch ist eine Festigkeitssteigerung zu erkennen. Weitere Untersuchungen an faserverstärkten Bauteilen sind in (Wirth et al. 2020; Wang et al. 2021) dargestellt, wobei hier explizit auf die Notwendigkeit von größeren Kurvenradien eingegangen wird, um Faserbruch zu vermeiden. (Voelkl et al. 2020) hat für ebene oder schalenförmige Bauteile die *CAIO*-Methode für mehrlagige faserverstärkte Bauteile numerisch untersucht. Diese Methode lässt sich jedoch nicht direkt auf komplexe 3D-Bauteile mit beliebigen Spannungsverläufen übertragen.

Eine Untersuchung zum sequenziellen Mehrachsdruck ist in (Kubalak et al. 2019) dargestellt. Hier wird eine Unterteilung eines Bauteils in einzelne Subvolumen skizziert, jedoch wird kein vollständiges Bahnplanungsverfahren vorgestellt, das auf beliebige Geometrien anwendbar wäre. Hierbei wird die Notwendigkeit eines simultanen Mehrachsdrucks hervorgehoben.

Ansätze zur endostrukturellen Optimierung im simultanen mehrachsigen Schmelzschichtverfahren sind nur in geringer Zahl publiziert worden. Ein methodischer Ansatz zur Festigkeitssteigerung durch das mehrachsige Drucken von Bauteilhüllen wird in (Kubalak et al. 2018) vorgestellt. Einfache rotationssymmetrische Bauteile können mit spiralenförmigen Bahnplanungsansätzen von (Avdeev et al. 2019) mit dem Ergebnis höherer Festigkeit gedruckt werden.

In (Singamneni et al. 2012) werden leicht gekrümmte Schalenbauteile mit CL-Slicingmethoden geplant und mit einer 3-achsigen Kinematik gedruckt. In einer Referenzbauteiluntersuchung konnten Festigkeitssteigerungen von ca. 40 % nachgewiesen werden. (Tam et al. 2017) beschreibt eine effektive Methode zur Planung von Bahnen entlang der ersten und zweiten Hauptspannung. Der Fokus liegt jedoch nur auf schalenförmigen Geometrien. Eine vollständige belastungsgerechte, mehrachsige Bahnplanungssoftware stellt (Fang et al. 2020) dar. Bei dieser Vektorfeld-basierten Methode werden Iso-Spannungsflächen im Bauteil mit einem globalen Suchalgorithmus ermittelt. Auf den ermittelten Flächen werden dann Iso-Spannungskurven als Bahnvorgabe verwendet. Die hier gezeigten Referenzbauteile haben ausschließlich glatte Konturen. Die Schichtberechnung kann bei großen Spannungsgradienten instabil werden. Des Weiteren wird keine richtungsabhängige Steifigkeit des gedruckten Materials berücksichtigt, welche jedoch vielfach nachgewiesen wurde. Somit kann keine beschriebene Methode den effektiven Einsatz des Mehrachsdrucks mit der anfangs definierten Zielstellung ermöglichen (siehe Tabelle 2-6).

Tabelle 2-6: Validierungstabelle der publizierten endostrukturellen Optimierungsmethoden

<ul style="list-style-type: none">  = erfüllt /vorhanden  = teilweise erfüllt /vorhanden  = nicht erfüllt /vorhanden 	(Plocher et al. 2018)	(Liu et al. 2018b)	(Chen et al. 2021)	(Khurana et al. 2020)	(Kubalak et al. 2019)	(Kubalak et al. 2018)	(Avdeev et al. 2019)	(Zhang et al. 2020)	(Huang et al. 2015)	(Tam et al. 2017)	(Fang et al. 2020)
Betrachtung anisotrope Festigkeit											
Betrachtung anisotrope Steifigkeit											
Betrachtung 3D-Spannungsverläufe											
Druckbarkeit komplexer Bauteile											
Mehrachsiges Verfahren											
Mechanische Validierung											
Lokale Festigkeitsoptimierung											

In einer vorangegangenen Publikation (Wulle et al. 2019b) wurde ein weiterer Ansatz zur spannungsorientierten Struktur- und Bahnplanung veröffentlicht, auf dem in dieser Arbeit aufgebaut wird.

2.4 Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse sowie Defizite

Durch die technologischen Errungenschaften in der Additiven Fertigung können Bauteile mit komplexer Geometrie in geringer Losgröße kostengünstig hergestellt werden. Trotzdem werden Funktionsbauteile häufig nicht additiv gefertigt, da sie nicht immer ausreichende Festigkeit besitzen. Analysen zum Schmelzschichtverfahren haben gezeigt, dass die Festigkeitseigenschaften von gedruckten Bauteilen eine ausgeprägte transversale Isotropie aufweisen. Bedingt durch den schichtweisen Aufbau eines Bauteils ergeben sich somit geringe Festigkeitseigenschaften orthogonal zum Raupenverlauf, die zu Delamination führen können. Auf Grundlage der bisherigen CAM-Prozesskette wird eine belastungsgerechte Herstellung des Bauteils signifikant eingeschränkt.

Mit der Entwicklung des mehrachsigen Schmelzschichtverfahrens stehen sowohl prozesstechnische als auch planungstechnische Lösungen für eine Optimierung der Festigkeitseigenschaften zur Verfügung. Methoden der Topologieoptimierung können das anisotrope Werkstoffverhalten abbilden, jedoch fehlt hier eine direkte Schnittstelle zur Bahngenerierung voluminöser Bauteile, um die Extrusionsraupen in Spannungsrichtung zu legen. Endostrukturelle Optimierungsansätze hingegen nutzen den anisotropen Charakter des Verfahrens, um die inneren Werkstoffeigenschaften in Bauteilen zu optimieren. Der im Folgenden detaillierte Ansatz nutzt hingegen eine direkte Freiform-Bahnplanung. Die Kopplung der endostrukturellen Optimierung mit dem gekrümmtem Slicing und einer Druckkinematik mit mehr als drei Freiheitsgraden legen das Potenzial einer gesamtheitlichen Festigkeitsoptimierung von Bauteilen mit Zugspannungen offen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die wissenschaftliche Fragestellung diskutiert, wie **Bauteile durch eine belastungsgerechte Auslegung der Prozesskette im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren mit höherer Festigkeit hergestellt werden können, im Vergleich zur konventionellen ebenen Variante des Verfahrens**. Dafür muss eine geeignete CAM-Prozesskette mit Bahnplanungsstrategien entwickelt werden, unter Verwendung von statischen Simulationsdaten zur Optimierung der Gesamtbauteilfestigkeit. In diesem Kontext soll insbesondere eine robuste Systemlösung für beliebige Bauteilgeometrien unter Beachtung fertigungstechnischer Randbedingungen als Ziel gesetzt werden. Hierzu sollen Werkstoffe mit transversal-isotropen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften für die Herstellung von Bauteilen mit komplexen Geometrien betrachtet werden, die definierte Belastungsfälle haben und räumliche Spannungsverläufe sowie mehrere Spannungsspitzen haben können.

3 Konzept zur belastungsgerechten Bahnplanung

Um das Potenzial einer belastungsgerechten Bahnplanung im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren nutzen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine entsprechende Methode entwickelt und validiert. Deren Ziel ist es, unter Berücksichtigung vorgegebener Belastungsfälle Bauteile mit höherer Festigkeit herstellen zu können, im Vergleich zum konventionellen, ebenen Schmelzschichtverfahren. Die Methode baut auf der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Prozesskette auf und ergänzt diese um eine belastungsorientierte Bahnplanung unter Zuhilfenahme von mechanischen Simulationsdaten. Die Methode wurde mit Schwerpunkt auf die Fertigbarkeit eines Bauteils und Effektivität bzw. Robustheit entwickelt und hat keinen Anspruch auf theoretische mechanische Optima einzelner Primitivbeispiele, die nicht oder schwer fertigbar wären. In Abschnitt 3.1 werden zunächst die fertigungstechnischen Randbedingungen des mehrachsigen Schmelzschichtverfahrens definiert. Im Anschluss wird die Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung im Abschnitt 3.2 präsentiert und die im Fokus stehenden Bauteilarten und berücksichtigten Spannungszustände erläutert. Weitergehend wird das Vorgehensmodell der Methode erläutert und auf deren Teilfunktionen, wie die FE-Simulation, die Hauptspannungstrajektorienermittlung, die Subvolumengenerierung, der die sowie auf kollisionsfreie Planungsansätze eingegangen. Die Implementierung und Parametrierung der genannten Teilkomponenten werden in Kapitel 4 beschrieben.

3.1 Ableiten der fertigungstechnischen Randbedingungen

Das Schmelzschichtverfahren ist ein Additives Fertigungsverfahren, das komplexe Geometrien fertigen kann (siehe Abschnitt 2.1.2). Die fertigen Bauteilgeometrien sind jedoch nicht unendlich vielfältig, da es definierbare Randbedingungen gibt, die es einzuhalten gilt, um zu gewährleisten, dass der Druckprozess stabil verläuft und die Bauteilqualität nicht sinkt. Hierzu gehören Randbedingungen, die die Bauteil- und Bahngeometrie betreffen, sowie prozessbedingte Einschränkungen. In den nachfolgenden Abschnitten werden diese Randbedingungen im Hinblick auf das mehrachsige, belastungsgerechte Schmelzschichtverfahren genauer erläutert.

Geometrische Randbedingungen: Grundsätzlich können Bauteilgeometrien gedruckt werden, die sich in Einzelraupen diskretisieren lassen. Die kleinste geometrische Auflösung ist hierbei bedingt durch die Raupenhöhe h_{Ext} und -breite b_{Ext} . Eine weitere restriktive Bedingung ist die

kollisionsfreie Bewegung des Druckkopfes. Es ist in der Bahnplanung zu vermeiden, dass der Druckkopf in Kollision mit der Bauplattform oder der bereits gedruckten Bauteilgeometrie gerät. Während die Kollisionsvermeidung zwischen Druckkopf und Bauplattform trivial zu lösen ist (transformierte Z-Position des TCPs \geq Z-Position der Bauplattform), ist diese zwischen Druckkopf und der bereits gedruckten Bauteilgeometrie eine komplexe Aufgabe. Dies gilt sowohl für Druckbahnen wie auch für Traversen (Bewegung ohne Extrusion).

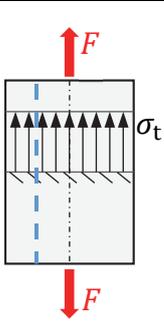
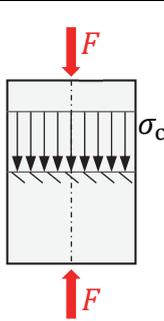
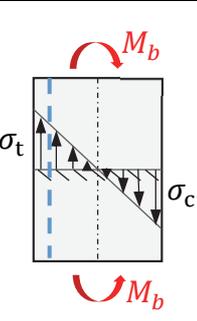
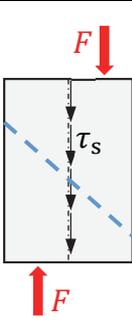
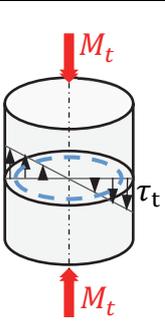
Prozessbedingte Randbedingungen: Es gibt einige prozessbedingte Einschränkungen, die bei der Bahnplanung berücksichtigt werden müssen. Um gleichbleibende Raupenqualitäten zu gewährleisten, gilt es grundsätzlich möglichst konstante Druckbedingungen zu schaffen. Das Drucken von einzelnen, nicht zusammenhängenden Voxeln ist aufgrund der trägen Extrusionsdynamik ungünstig (Bellini et al. 2004). Für konstante Druckbedingungen muss gewährleistet werden, dass die Extrusionsgeschwindigkeit möglichst konstant bleibt. Durch die Bedingung nach Gl. 2-4 muss dafür auch die Bahngeschwindigkeit möglichst konstant gehalten werden. Das Ablegen von Extrusionsraupen muss auf gedruckter Struktur bzw. der Bauplattform erfolgen oder in einem Überhang bis zu einem Grenzwinkel von ca. 45° (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Es ist jedoch für konstante Druckqualitäten erforderlich, dass der Extrusionsvorgang in Wannanlage erfolgt. Dies bedeutet, dass die Orientierung der aktuell bedruckten Bauteiloberfläche normal zur Waagrechten steht und somit keine Prozessänderungen durch die Gravitation auftreten (Isa et al. 2019). Für eine verbesserte Homogenität des Bauteils und Vermeidung von Luftporen ist es vorteilhaft, Materialraupen parallel verlaufend oder als Kreuzgelege und gebündelt zu drucken. Für die Umgebungsbedingungen gilt, dass die Druckkopftemperatur und die Druckbetttemperatur konstant gehalten werden sollen, damit unterschiedliche Materialeigenschaften und das Lösen des Bauteils von der Plattform durch Verbiegung in Folge von schichtweiser Schwingung (*Warping*) vermieden werden. Aus den genannten fertigungstechnischen Randbedingungen entstehen zusammengefasst folgende Forderungen an die mehrachsige Bahnplanung:

- C^2 -stetige Bahnen bzw. glatte Bahnverläufe sowie äquidistante Bahnen
- Vermeiden von kurzen Bahnsegmenten
- Vermeidung von Kollisionen
- Drucken von zusammenhängenden Druckbereichen mit parallelverlaufenden Extrusionsraupen in Wannanlage

3.2 Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung

Das Ziel der entwickelten Methode ist es, die Festigkeit von gedruckten Bauteilen durch eine belastungsgerechte Bahnplanung zu verbessern. Es handelt sich hierbei um ein Vorgehensmodell zur effektiven Festigkeitssteigerung und unterliegt nicht dem Anspruch, eine optimale Bauteilfestigkeit durch Modellansätze oder multikriterielle Optimierungen zu erzielen. Dadurch soll die statisch ertragbare Last bei einem oder mehreren definierten Belastungsfällen größer sein als beim konventionellen, 3-achsigen Schmelzschichtverfahren mit ebener Bahnplanung. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die statische Bruchlast der mittels dieser Bahnplanungsmethode gefertigten Bauteile höher ist als die der konventionell gedruckten Bauteile. Grundsätzlich grenzt sich diese Methode von der binär-volumetrischen Topologieoptimierung ab und erhält die Integrität der Bauteilgeometrie. Hingegen wird durch endostrukturelle Optimierung die innere Werkstofforientierung so definiert, dass die Vorzugsrichtung des gedruckten Werkstoffs in Spannungsrichtung verläuft. Bauteile werden massiv gedruckt und mit massiven, konventionell gedruckten Bauteilen verglichen. Grundsätzlich werden in der Methode massive Strukturbauteile berücksichtigt, die nicht ausschließlich schalenförmig sein müssen, in Erweiterung zu bestehenden Optimierungsverfahren (vgl. Faser-Verbund-Methoden). Um zu demonstrieren, bei welchen Belastungsfällen eine mögliche verbesserte Bahnplanung zur Festigkeitssteigerung beitragen kann, sind in Tabelle 3-1 die Grundbelastungsfälle und die daraus hervorgerufenen Spannungen aufgeführt. Hierbei wird ein rein elastischer Körper betrachtet.

Tabelle 3-1: Grundbelastungsfälle und Potenzial zur Festigkeitsoptimierung durch Bahnplanungsmethoden (die Vorzugsrichtung ist blau dargestellt)

Zug	Druck	Biegung	Schub	Torsion
				
Optimierbar	Nicht optimierbar	σ_t -Bereich optimierbar	Bedingt optimierbar	Bedingt optimierbar

Durch Zugkräfte werden in einem Bauteil Zugspannungen hervorgerufen, sowie Druckspannungen durch Druckkräfte. Bei einer Biegebelastung treten Zug- und Druckspannungsbereiche auf, die durch eine neutrale Faser getrennt werden. Schub durch Querkraft oder Torsionsbelastung bewirken Schubspannungen im Bauteil. Diese Schubspannungen führen zu Normalspannungen in gedrehter Schnittfläche, die ebenfalls das Bauteil zerstören können. Die genannten Belastungsfälle bewirken in bestimmten Schnittflächen ausschließlich Normalspannungen, die als $\sigma_{t/c}$ (t für Zug, c für Druck) bezeichnet werden. Um im statischen Fall Bauteilversagen zu vermeiden, dürfen Normalspannungen maximal so groß sein, wie die zulässige Spannung σ_{zul} , die sich aus der Zugfestigkeit des Werkstoffs $R_{m,t/c}$ ermitteln lässt. Diese Bedingung ist in folgender Ungleichung beschrieben, welche einen Sicherheitsbeiwert S berücksichtigt.

$$\sigma \leq \sigma_{zul} \quad \text{mit} \quad \sigma_{zul} = R_{m,t/c} / S \quad \text{Gl. 3-1}$$

Aufgrund der Tatsache, dass bei additiv gefertigten Bauteilen die Druckfestigkeit größer ist als die Zugfestigkeit (siehe Abschnitt 2.1.2.3), führen in der Regel Zugspannungen im Bauteil zum Versagen. Bei zug- und biegebelasteten Bauteilen ist R_m in Zugspannungsrichtung die festigkeitsbegrenzende Größe und abhängig von der Orientierung der Raupen. Bauteilversagen tritt ein, falls folgende Ungleichung nicht erfüllt ist.

$$1 \leq \max \left(\frac{\sigma_{t,f}}{R_{m,f}} ; \frac{\sigma_{t,m}}{R_{m,m}} \right) , \quad \text{mit} \quad R_{m,f} > R_{m,m} \quad \text{Gl. 3-2}$$

Daher ist das Ziel der Bahnplanung, die Ausrichtung einzelner Bahnen und somit das maximale $R_{m,z}$ in die maximal beanspruchte Zugspannungsrichtung zu orientieren. Grundsätzlich können diese Belastungsfälle auch in Kombination auftreten, wie es in technischen Bauteilen meist der Fall ist (z.B. Biegung und Torsion eines dezentral belasteten Balkens). In der allgemeinen Beschreibung des Spannungszustandes kann mittels Hauptspannungsanalyse die maximale Zugspannungsrichtung $\bar{s}_{1,i}$ an jedem Punkt i im Bauteil mit dem Spannungsbetrag $\sigma_{1,i}$ berechnet werden. Die Theorie und Berechnungsgrundlage der Hauptspannungen werden in Abschnitt 3.2.2 erläutert und es wird insbesondere darauf eingegangen, wie zusammenhängende Hauptspannungstrajektorien berechnet werden können. Für die Beschreibung der belastungsgerechten Bahnplanungsmethode werden im Folgenden die Größen $\sigma_{1,i}$ und $\bar{s}_{1,i}$ verwendet, da diese maßgeblich für eine Zugspannungsorientierung sind. Bei mehrachsigen Spannungszuständen wird die Normalspannungshypothese herangezogen, das bedeutet, dass die maximale

Zugspannung dominant ist und entscheidend für das Versagen ist. Die Methode betrachtet Bauteile mit Spannungszuständen, die eben oder räumlich sein können. Hydrostatische Spannungszustände sowie Spannungswirbel werden nicht betrachtet. Kraftangriffspunkte oder Bereiche mit großen Spannungsgradienten sind gesondert zu betrachten.

Das Vorgehensmodell der belastungsgerechten Bahnplanungsmethode beginnt mit folgenden Ausgangsinformationen: CAD-Bauteil, Belastungsfall und den Werkstoffkennwerten gedruckter Bahnen (siehe Abbildung 3-1). Darauf aufbauend wird ein FE-Modell erstellt. Als Werkstoffparameter werden zunächst initiale isotrope Eigenschaften postuliert. Der Spannungszustand, der im Bauteil aufgrund des Belastungsfalls herrscht, wird durch eine statisch-mechanische FE-Simulation berechnet. Aus den Spannungstensoren der Knoten und Elementen werden durch die Hauptachsentransformation die Hauptspannungen berechnet. Um zusammenhängende Kurven in Zugspannungsrichtung zu erhalten, werden Hauptspannungstrajektorien ermittelt. Eine Hauptspannungstrajektorie wird ausgehend von dem Punkt $P_{\sigma_1, \max}$ der maximalen ersten Hauptspannung im betrachteten Bereich gesucht. Die beidseitigen Startrichtungen geben die Vektoren $\bar{s}_{1, P_{\sigma_1, \max}}$ und $-\bar{s}_{1, P_{\sigma_1, \max}}$ vor. Im Falle von mehreren spannungsdominierenden Bereichen, wenn z.B. an mehreren Stellen im Bauteil getrennt voneinander Spannungsspitzen auftreten, werden weitere Trajektorien gesucht. Für beliebige Spannungszustände können einzelne, verteilte Trajektorien, die unabhängig voneinander im Raum liegen, nicht als Bahnvorgabe verwendet werden, da hierbei keine Kollisionsfreiheit gewährleistet werden kann. Deshalb werden nach der Methode Subvolumen im Bauteil definiert, in denen eine dominierende Hauptspannungstrajektorie näherungsweise die Spannungsverläufe im jeweiligen Subvolumen beschreibt. Das bedeutet, dass die Spannungsorientierung aller Knoten und Elemente in einem Subvolumen unter definierten Abweichungstoleranzen durch eine Leittrajektorie definiert wird. Durch einen solchen Homogenisierungsansatz werden Subvolumen V_l ermittelt, die das Gesamtvolumen in l Teile aufgliedern. Für jedes Subvolumen werden einzelne Slicingflächen definiert. Diese Flächen werden auf Grundlage der Leittrajektorie und einer weiteren geometrischen Randbedingung aufgespannt. Hierzu wird in glatten Spannungsverläufen eine weitere, um einen Abstand versetzte Hauptspannungstrajektorie verwendet (hieraus resultieren beliebig gekrümmte Flächen). Ansonsten wird ein fester Vektor, wie die zweite Hauptspannungsrichtung am Startpunkt der Trajektorie, ausgewählt (hieraus resultieren einfach gekrümmte oder ebene Flächen). Die Aufbaurichtung \bar{w}_s wird dabei gleichgesetzt mit der dritten Hauptspan-

nung oder einer Konturnormalen, in der geringe Zugspannungen herrschen. In der Einzelbahnplanung werden die Subvolumen entsprechend der Slicingfläche geschichtet und auf Grundlage der Leittrajektorien werden einzelne mäandrierende parallele Bahnen berechnet. Die Kollisionskontrolle ist hierbei in der Einzelbahnplanung und Sequenzierung realisiert.

Da durch die Ausrichtung nicht nur die Festigkeit, sondern auch die Steifigkeit steigt, kann dies zu einer weiteren Konzentration von möglichen Spannungsspitzen führen. Um die Vergrößerung der Spannungskonzentration bei großen Spannungsgradienten durch höhere Steifigkeiten abzuschwächen, ist ein Kreuzgelege aus abwechselnd Leittrajektorie-orientierten und orthogonal dazu liegenden Bahnen sinnvoll und wird in der Bahnplanungsmethode betrachtet. In Abbildung 3-1 ist die Methode und ihre Integration in die bestehende Prozesskette dargestellt.

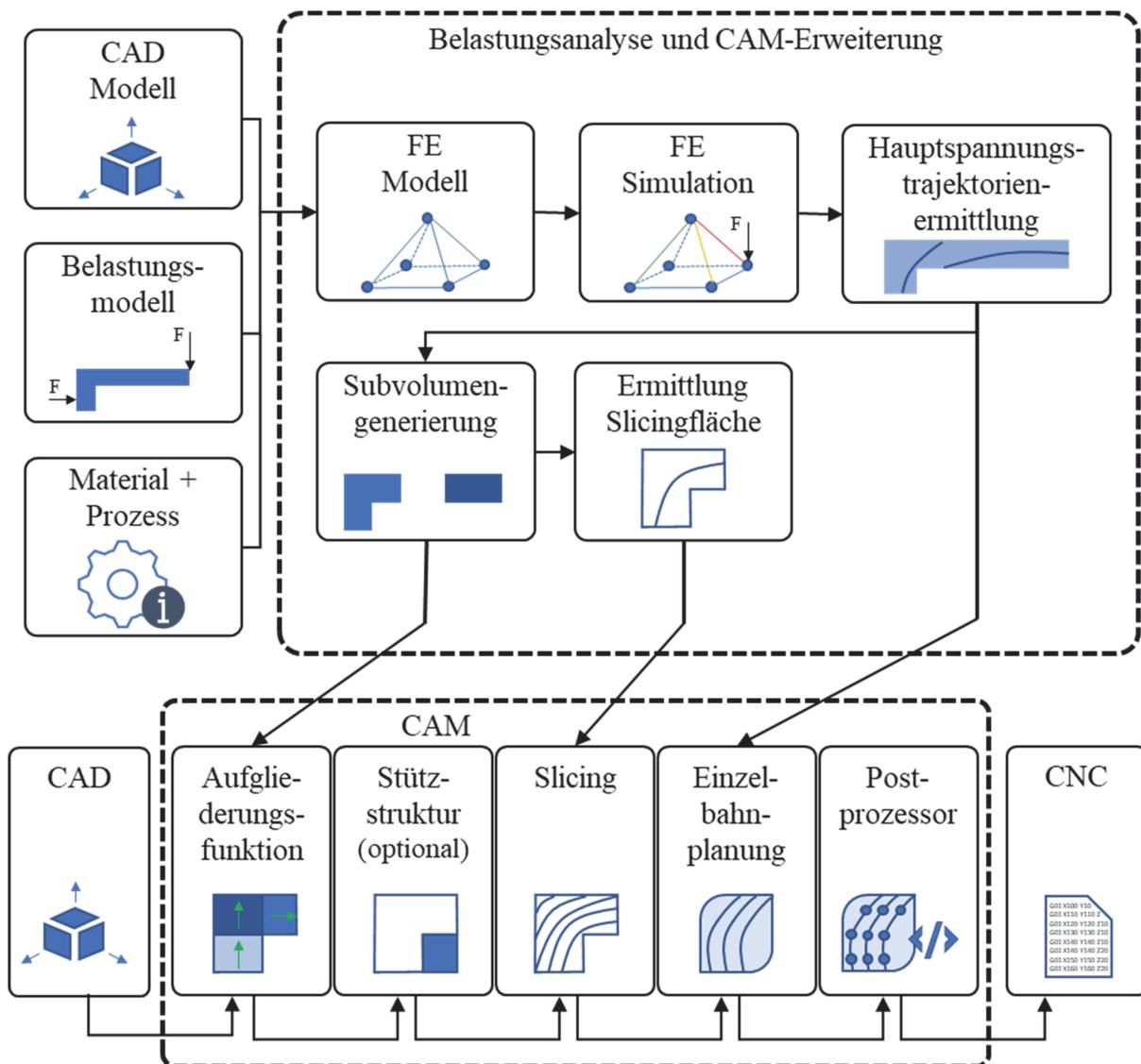


Abbildung 3-1: Methode zur belastungsgerechten mehrachsigen Bahnplanung

Es können auch mehrere Belastungsfälle betrachtet werden, falls sich die jeweiligen Bereiche maximaler Spannung nicht überdecken. Hierbei wird die Belastungsanalyse auf Grundlage von superpositionierten Spannungstensenoren der einzelnen Simulationsergebnissen durchgeführt.

Die Methode berücksichtigt sowohl anisotrope Festigkeiten und anisotrope Steifigkeiten, als auch die Druckbarkeit komplexer Bauteile mit räumlichen Spannungsverläufen. Die Freiheiten des mehrachsigen Schmelzschichtverfahrens werden im Freiformdruck gezielt genutzt. Bei dieser Methode entstehen in Bereichen hoher Zugbeanspruchung durch die Ausrichtung der Bahnen höhere Festigkeiten, zu dem können auch mehrere hochbelastete Bereiche mit unterschiedlichen Spannungsrichtungen verbessert werden. Im Weiteren wird beschrieben wie die Teilfunktionen umgesetzt werden und welche Berechnungsverfahren dazu eingesetzt werden.

3.2.1 FE-Modellierung und Simulation

In der Teilfunktion *FE-Modellierung und Simulation* werden die mechanischen Spannungen, die in einem Bauteil unter eingprägter Last auftreten, berechnet. Die FE-Simulation dient der numerischen Berechnung für kontinuierliche Festkörper, bei der ein Bauteil näherungsweise in einzelne, endlich viele Subelemente (die Finiten Elemente) diskretisiert wird. Die Teilschritte der FE-Modellierung und Simulation sind:

- Präprozessor
 - Geometrieaufbereitung
 - Definition eines Elementtyps
 - Definition der Werkstoffparameter
 - Vernetzen des Bauteils durch ein FE-Netz
 - Definition von Randbedingungen, wie äußere Lasten und Einspannungen
- Lösen des Problems mit einem Solver
- Auswertung der Ergebnisse mit einem Postprozessor

Auf Ausführungen zu Grundlagen der FEM wird hier verzichtet und auf (Klein 2015) verwiesen. Relevant für diese Prozesskette ist, dass die CAD-Geometrie eines Bauteils V_{ges} in diskrete Elemente e_i unterteilt wird.

$$V_{\text{ges}} = \{ \sum_{i=1}^N e_i \mid N \in \mathbb{N} \} \quad \text{Gl. 3-3}$$

Dazu werden klassische Elementtypen wie Tetraeder und Hexaeder verwendet. Den Elementen wird ein linear-elastisches Werkstoffverhalten zugewiesen, welches das reale Werkstoffverhalten mit einer Beanspruchung bis zur Streckgrenze approximiert. Plastisches Verhalten kann ansatzweise, wie in (Takahashi et al. 2010) dargestellt, abgebildet werden, es wird hier jedoch nicht betrachtet, da ein exaktes plastisches Verformen und die damit verbundene Spannungszustandsänderungen sehr komplex sind und im Hinblick auf eine Dauerverwendung eines Bauteils vermieden werden sollten. Ein Elementtyp wird durch Ansatzfunktionen definiert, die den Zusammenhang zwischen Verschiebung und der daraus resultierenden Kraft beschreiben. Die Steifigkeitsmatrix \bar{C}_i des Elementes i kann durch den Elementansatz aufgestellt werden. Die Gesamtsteifigkeitsmatrix \bar{C}_{ges} eines Bauteils wird durch Assemblierung der Steifigkeitsmatrizen aller Elemente konstruiert. Die statisch-mechanische Grundgleichung ist:

$$\bar{F} = \bar{C}_{\text{ges}} \cdot \bar{u} \quad \text{Gl. 3-4}$$

mit dem Kraftvektor \bar{F} und dem Verschiebungsvektor \bar{u} , welche in der FE-Simulation gelöst wird. Aus der gesuchten Größe \bar{u} kann die Spannung mittels *Hook'scher* Gleichung berechnet werden. Im eindimensionalen Fall kann die Spannung berechnet werden entsprechend:

$$\sigma = E \varepsilon \quad \text{Gl. 3-5}$$

mit der Dehnung ε . Allgemein kann der Spannungszustand $\bar{\sigma}$ anhand eines infinitesimalen würfelförmigen Elementes beschrieben werden, an dem Schnittkräfte angreifen. Daraus resultieren auf den Schnittflächen Normalspannungen σ_i und Schubspannungen $\tau_{i,j}$ mit den Koordinatenrichtungen i und j . Die Normalspannungen stehen senkrecht auf den Schnittflächen und die Schubspannungen sind durch zwei Indizes gekennzeichnet. Hierbei steht der erste Index für die Lage der Schnittfläche anhand dessen Normalenvektors und der zweite Index für die Wirkrichtung. Der Spannungstensor ist eine symmetrische Matrix, bei der die zugeordneten Schubspannungen gleich groß sind (Götz et al. 2020). Dieser hat die folgende Form:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 3-6}$$

Aufgrund der Symmetrie kann der Spannungszustand durch die *Voigtsche* Notation mit sechs Spannungswerten vereinfacht dargestellt werden.

Da zu Beginn der Prozesskette die Orientierung der Bahnen und der Slicingfläche nicht festgelegt sind, wird eine initiale, isotrope FE-Simulation durchgeführt. Dadurch ist ein nur approximierter Verlauf der Spannung in einem Bauteil repräsentiert. Die anisotropen Eigenschaften werden hierbei nicht berücksichtigt und es werden die Steifigkeitseigenschaften quer zur Vorzugsrichtung $R_{t,m}$ und E_m verwendet. Die für die weitere Bahnplanungsmethode relevanten Daten sind im Spannungstensor $\underline{\underline{\sigma}}$ der Knoten und jedes Elemente beschrieben.

3.2.2 Ermittlung von Hauptspannungstrajektorien

Spannungstrajektorien geben den Verlauf von Spannungen in einem Bauteil an. Diese können durch ein polarisationsoptisches Verfahren sichtbar gemacht werden (Föppl et al. 2019). Hauptspannungstrajektorien unterscheiden sich zu Iso-Spannungskurven, die lediglich Kurven konstanter Spannung angeben. Hauptspannungstrajektorien sind deshalb von Interesse, da diese die Lastorientierung und -verteilung in einem Bauteil beschreiben können. Insbesondere sind Zugspannungstrajektorien für die belastungsgerechte Bahnplanung relevant, da die maximale Zugfestigkeit am Punkt der maximalen Zugbeanspruchung vorhanden sein muss, um die Bauteilfestigkeit zu vergrößern. Um diese berechnen zu können, müssen zunächst die notwendigen Hauptspannungen, also die Richtung der extremen Normalspannungen in einem Punkt, berechnet werden. Dazu wird im folgenden Abschnitt erläutert, wie aus dem Spannungstensor die Hauptspannungen berechnet werden können. Da die Hauptspannungstrajektorien Leitkurven für die Einzelbahnplanung darstellen, werden die Anforderungen an deren Berechnungsmethoden gestellt und zwei Methoden der numerischen Trajektorienberechnung vorgestellt.

Die Hauptspannungen werden mit σ_1 , σ_2 und σ_3 gekennzeichnet und deren normalisierten Richtungsvektoren mit \bar{s}_1 , \bar{s}_2 und \bar{s}_3 beschrieben. Hierbei gilt, ausgenommen des hydrostatischen Spannungsfalls, folgendes:

$$\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3 \text{ und } \bar{s}_1 \perp \bar{s}_2 \perp \bar{s}_3, \text{ mit } \bar{s} \in \mathbb{R}^{1 \times 3} \text{ und } \sigma \in \mathbb{R} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Die Hauptspannungen und deren Richtungsvektoren werden über eine Hauptachsentransformation bestimmt, in denen diejenigen Schnittflächen gesucht werden, in denen Schubspannungen verschwinden. Dies führt zu dem Eigenwertproblem:

$$\underline{\underline{\sigma}} \bar{s} - \sigma \cdot \bar{s} = [\underline{\underline{\sigma}} - \sigma \cdot \bar{E}] \bar{s} = \bar{0} \quad \text{Gl. 3-8}$$

Die nichttriviale Lösung ($\bar{s} \neq 0$) wird berechnet durch Nullsetzung der Säkulargleichung. Der Spannungszustand im Hauptachsensystem ist somit:

$$\bar{\underline{\sigma}}_H = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 3-9}$$

In dem betrachteten Punkt der Spannungsanalyse existieren nun drei senkrecht zueinanderstehende Schnittebenen, in denen die Normalspannungen als Hauptspannungen ihren Extremwert haben. Die Hauptachsentransformation eines infinitesimalen Elementes ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

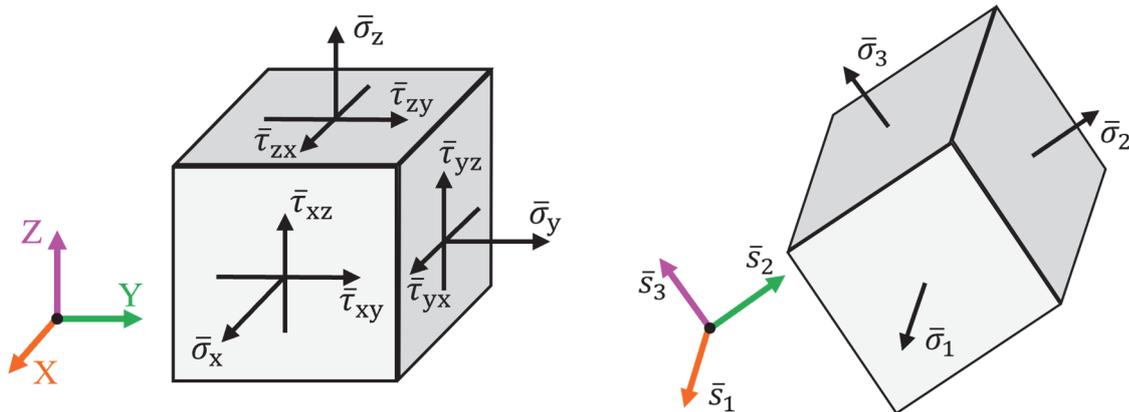


Abbildung 3-2: Hauptachsentransformation eines infinitesimalen Elementes

Die Hauptachsentransformation wird an jedem Knoten und Element durchgeführt. Die Spannungsverläufe sind im ermittelten Vektorfeld nicht zwangsläufig homogen, da die Eigenvektoren, die mit der Hauptachsentransformation berechnet werden, nicht eindeutig bestimmt werden können. Zugspannungen können deshalb entweder in positive oder negative Richtung zeigen. Das kann dazu führen, dass benachbarte Knoten, die gleichgerichtete erste Hauptspannungen aufweisen, entgegengerichtete \bar{s}_1 -Vektoren besitzen. Um ein homogenes Vektorfeld berechnen zu können, können ausgewählte Hauptspannungsvektoren gedreht werden. Hierzu wird der Winkel zwischen \bar{s}_1 -Vektoren zweier benachbarter Knoten i und $i + 1$ berechnet mit:

$$\alpha = \arccos(\bar{s}_{1,i} \cdot \bar{s}_{1,i+1}) \quad \text{Gl. 3-10}$$

Falls α größer ist als 90° , ist eine Drehung der Hauptspannungen beim Knoten $i + 1$ vorzunehmen. Die Drehung führt zu folgender Vektorenumkehr:

$$\bar{s}_{1,i+1,\text{neu}} = -\bar{s}_{1,i+1}, \quad \bar{s}_{2,i+1,\text{neu}} = -\bar{s}_{2,i+1} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Der \bar{s}_3 -Vektor behält seine Richtung, damit das resultierende Koordinatensystem ein Rechtssystem bleibt. Der hier anschaulich dargestellte Winkelvergleich wird numerisch effizienter mit einem Skalarprodukt durchgeführt.

Nachdem die Hauptspannungen berechnet und homogenisiert wurden, können die Hauptspannungstrajektorien bestimmt werden. Da diese als Leitkurve für die Einzelbahnplanung dienen, müssen diese Trajektorien auch die geforderten fertigungstechnischen Randbedingungen erfüllen. Die Trajektorien müssen im höchstbelasteten Bereich den Spannungsverlauf exakt abbilden und gleichzeitig krümmungsstetige, glatte Kurvenverläufe erzeugen. Es ist deshalb erforderlich, dass die Trajektorien kontinuierlich im Bauteil verlaufen können. Das führt zur Forderung, dass die vorliegenden Hauptspannungen und deren Richtungen an jedem Punkt P_i des Vektorfeldes berechnet bzw. ausgewertet werden können.

$$\begin{aligned}\sigma_{1/2/3} |_{P_i} &= f(\bar{\sigma}_{\text{ges}}, P_i) \\ \bar{s}_{1/2/3} |_{P_i} &= f(\bar{\sigma}_{\text{ges}}, P_i)\end{aligned}\tag{Gl. 3-12}$$

Im Folgenden werden zwei Methoden zur Berechnung der Hauptspannungstrajektorien vorgestellt und abschließend deren Eigenschaften verglichen.

3.2.2.1 Hauptspannungstrajektorien mit Runge-Kutta-Interpolation

Eine bewährte Methode zur Trajektorienermittlung in einem Vektorfeld ist das explizite 4-stufige *Runge-Kutta*-Verfahren 4. Ordnung. Dieses wird meist zur Lösung von Anfangswertproblemen bei gewöhnlichen Differenzialgleichungen eingesetzt. Zur Trajektorienermittlung wird im Interpolationsverfahren anstelle der Zeitvariablen Δ_t das skalare Trajektorieninkrement Δ_s als Schrittgröße verwendet (Kelly et al. 2011). Zur Darstellung des Algorithmus wird hierbei lediglich die erste Hauptspannung betrachtet. Auf Grundlage eines normalisierten Vektorfeldes beginnt die iterative Trajektorien suche an einem Startpunkt P_0 . Der folgende Iterationspunkt P_1 wird durch die Berechnung der Vektoren \overline{dp}_1 bis \overline{dp}_4 bestimmt nach:

$$\overline{dp}_1 = \bar{s}_1 |_{\bar{p}_0} \Delta_s \tag{Gl. 3-13}$$

$$\overline{dp}_2 = \bar{s}_1 |_{\bar{p}_0 + \frac{1}{2}\overline{dp}_1} \Delta_s \tag{Gl. 3-14}$$

$$\overline{dp}_3 = \bar{s}_1 |_{\bar{p}_0 + \frac{1}{2}\overline{dp}_2} \Delta_s \tag{Gl. 3-15}$$

$$\overline{dp}_4 = \overline{s}_1|_{\overline{p}_0+\overline{dp}_3} \Delta_s \quad \text{Gl. 3-16}$$

$$\overline{P}_1 = \overline{P}_0 + \frac{1}{6}(\overline{dp}_1 + 2 \overline{dp}_2 + 2 \overline{dp}_3 + \overline{dp}_4) \quad \text{Gl. 3-17}$$

Da die gewichtete Summenfunktion der Einzelvektoren \overline{dp}_1 bis \overline{dp}_4 den Verlauf der Trajektorie im Inkrement $0-1$ vorgibt, wird dieser als Einzelschrittvektor definiert mit:

$$\overline{dp}_{1-4} = \frac{1}{6}(\overline{dp}_1 + 2 \overline{dp}_2 + 2 \overline{dp}_3 + \overline{dp}_4) \quad \text{Gl. 3-18}$$

Dieser Einzelschrittvektor wird im Kapitel 4 erneut betrachtet. Dort wird eine Modifikation dieses Vektors vorgenommen, um den Verlauf der Trajektorie nach bestimmten Kriterien anzupassen. Diese Modifikationskriterien sind fertigungstechnisch oder planungstechnisch begründet. In Abbildung 3-3 ist das Interpolationsverfahren anhand eines zweidimensionalen Elements dargestellt.

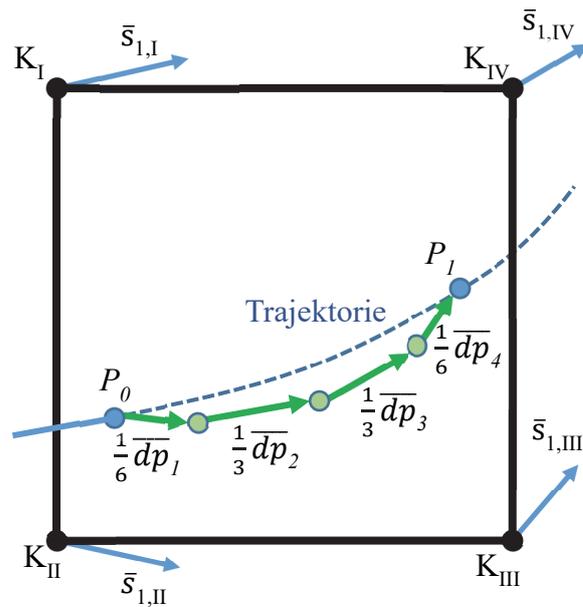


Abbildung 3-3: Runge-Kutta-Interpolationsverfahren zur Ermittlung von Hauptspannungstrajektorien

Der iterative Trajektorienalgorithmus kann so lange fortgesetzt werden, bis ein Abbruchkriterium, wie das Erreichen der Konturfläche eines Bauteils oder eine bestimmte Länge, erreicht wird. Insbesondere bei Torsion und in leicht belasteten Bereichen können Trajektorien zu Wirbeln werden, die nicht als Leitkurven für die Bahnplanung von Interesse sind. Das hier angewandte Verfahren arbeitet mit einer fest vorgegebenen Schrittweite Δ_s . Diese muss so gewählt

werden, dass das Interpolationsverfahren konvergent bleibt. Eine Erweiterung hierbei wäre eine Schrittweitensteuerung mit variabler Schrittweite (siehe (van der Houwen et al. 1990)), die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wird. Eine gesamte Trajektorie kann als Interpolation mit einer Ansatzfunktion dritter oder höherer Ordnung zwischen den ermittelten Iterationspunkten beschrieben werden. Beispielhaft kann eine lineare Interpolation der Trajektorie T_j entlang der Trajektorienvariablen ξ beschrieben werden mit:

$$T_j(\xi) = \sum_{k=1}^N T_{j,k}(\xi) \quad \text{Gl. 3-19}$$

$$T_{j,k}(\xi) = \begin{cases} \frac{\xi}{\Delta_s} P_{k+1} + \frac{1-\xi}{\Delta_s} P_k, & \xi \in [k \Delta_s, (k+1)\Delta_s) \\ 0, & \xi \in [k \Delta_s, (k+1)\Delta_s) \end{cases} \quad \text{Gl. 3-20}$$

Für eine krümmungsstetige Trajektorie sind jedoch Splines höherer Ordnung notwendig. Dazu ist ein kubischer Spline, das bedeutet ein Polynomansatz dritten Grades, mit den Polynomkoeffizienten a_n für alle Trajektorieninkremente anzusetzen.

$$T_j(\xi) = \sum_{n=0}^3 a_{k,n} \xi^n \quad \text{Gl. 3-21}$$

Für die C^2 -Stetigkeit muss die Trajektorie zweimal stetig differenzierbar sein. Dabei müssen die erste und zweite Ableitung an den Iterationspunkten übereinstimmen, als:

$$\frac{\partial T_{j,k}}{\partial \xi}(\xi_i) = \frac{\partial T_{j,k+1}}{\partial \xi}(\xi_i) \quad \text{und} \quad \frac{\partial^2 T_{j,k}}{\partial \xi^2}(\xi_i) = \frac{\partial^2 T_{j,k+1}}{\partial \xi^2}(\xi_i) \quad \text{Gl. 3-22}$$

Mit Hilfe dieser Bedingungen und den Anfangs- und Endbedingungen des Splines kann ein lineares Gleichungssystem aufgestellt und gelöst werden. Eine zusammenhängende Hauptspannungstrajektorie kann somit beschrieben werden.

3.2.2.2 Hauptspannungstrajektorien nach Beyer-Verfahren

Eine weitere Methode zur Ermittlung von Hauptspannungstrajektorien wurde in (Beyer 2015) publiziert. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Methode auf dreidimensionale Probleme angewandt. Bei der Methode wird gewährleistet, dass die Trajektorie in ihren Stützpunkten dem

tatsächlichen Verlauf der Hauptspannung exakt folgt. Der Trajektorienalgorithmus beginnt in einem Startpunkt P_0 , an dem die Startrichtung durch die Hauptspannung ausgewertet wird:

$$\bar{\phi}_0 = \bar{s}_{1,0} \quad \text{Gl. 3-23}$$

Der nächste Trajektorienstützpunkt in positiver Richtung kann im eindimensionalen Spannungsfall durch Extrapolation mit der Schrittweite Δ_s gefunden werden mit:

$$\bar{P}_1 = \bar{P}_0 + \bar{\phi}_0 \Delta_s \quad \text{Gl. 3-24}$$

Bei gekrümmten Spannungsverläufen ist dies jedoch nicht zulässig. Deshalb wird der Punkt P_1 auf der in Abbildung 3-4 dargestellten Kugeloberfläche extrapoliert. Dazu werden zunächst der Polarwinkel θ_0 und der Azimutwinkel ψ_0 bestimmt mit:

$$\theta_0 = \arccos(\bar{\phi}_0 \cdot \bar{e}_z)$$

$$\psi_0 = \arctan\left(\frac{\bar{\phi}_0 \cdot \bar{e}_y}{\bar{\phi}_0 \cdot \bar{e}_x}\right) \text{ mit } \bar{\phi}_0 \cdot \bar{e}_x \neq 0 \quad \text{Gl. 3-25}$$

Die berechneten Kugelwinkel werden um eine Extrapolationsgrößen Δ_θ und Δ_ψ variiert zu:

$$(\theta_0 - \Delta_\theta) \leq \tilde{\theta}_0 \leq (\theta_0 + \Delta_\theta)$$

$$(\psi_0 - \Delta_\psi) \leq \tilde{\psi}_0 \leq (\psi_0 + \Delta_\psi) \quad \text{Gl. 3-26}$$

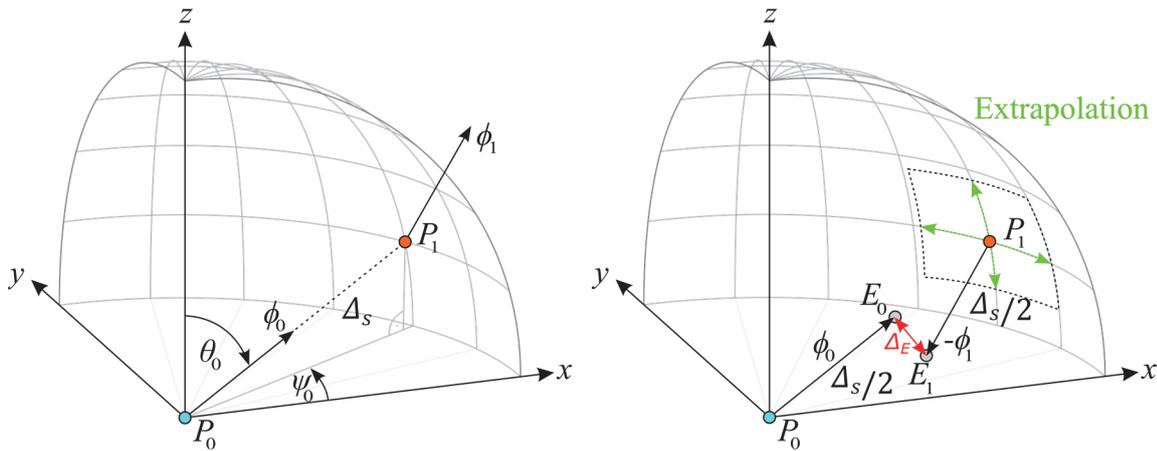


Abbildung 3-4: Hauptspannungstrajektoriensuche nach Beyer

An dem variierenden Punkt \tilde{P}_1 wird erneut die Hauptspannungsrichtung nach Gleichung 3-12 ausgewertet. Damit der Verlauf des Trajektorieninkrement einen Kreisbogen darstellt, müssen sich die Tangenten der Trajektorie an P_0 und P_1 treffen. Im diskreten, numerischen Verfahren werden dazu die Hilfspunkte E_i aufgestellt mit:

$$\begin{aligned}\bar{E}_0 &= \bar{P}_0 + \bar{\phi}_0 \Delta_s/2 \\ \bar{E}_1 &= \bar{P}_1 - \bar{\phi}_1 \Delta_s/2\end{aligned}\tag{Gl. 3-27}$$

Hierbei wird der Abstand Δ_E zwischen den Hilfspunkten bestimmt und \bar{E}_1 mit zugehörigem \bar{P}_1 gesucht, welches den kleinsten Abstand Δ_E ausweist. Bei diesem Approximationsverfahren wird angenommen, dass innerhalb eines Inkrementes eine konstante (mittlere) Krümmung im Spannungsverlauf existiert. Dieser Algorithmus wird ebenfalls in beide Richtungen ($\bar{s}_{1,0}$ und $-\bar{s}_{1,0}$) so lange iteriert, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird. Auch hierbei kann die Modifikation der Trajektorienausbreitung vorgenommen werden, indem bei der Minimierung von Δ_E eine Abweichung von $\bar{\phi}_1$ zu $\bar{\phi}_0$ bestraft wird. Des Weiteren kann dieser Algorithmus um eine Schrittweitensteuerung ergänzt werden. Diese variiert näherungsweise Δ_s , abhängig von der Richtungsänderung innerhalb eines Segmentes.

$$\begin{aligned}\rho &= \arccos(\bar{\phi}_0 \cdot \bar{\phi}_1) \\ \Delta_{s,\text{neu}} &= \frac{\rho_{\text{tol}}}{\rho} \Delta_s\end{aligned}\tag{Gl. 3-28}$$

Beide Trajektorienverfahren können glatte Kurven generieren und werden für die weitere Untersuchung betrachtet. In Tabelle 3-2 werden die Eigenschaften der Verfahren verglichen. Neben Trajektorien der ersten Hauptspannung können auch noch weitere gesucht werden.

Tabelle 3-2: Methodischer Vergleich zwischen den Hauptspannungstrajektorienalgorithmen

	Runge-Kutta-Verfahren	Beyer-Verfahren
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer numerischer Aufwand • Einfache Modifizierbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Schrittweitensteuerung • Keine Fehlorientierung der Hauptspannung in Stützpunkten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlorientierung der Hauptspannung in Stützpunkten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher numerischer Aufwand • Hoher Implementierungsaufwand

Spannungstrajektorien lassen sich auch auf Grundlage einer variablen Lastfunktion als Kontinuumsbeschreibung berechnen (Tamijani et al. 2018). Da die Spannungswerte für die Prozesskette an jeder Stelle im Bauteil wichtig sind, kann auf eine FE-Simulation nicht verzichtet werden, weshalb diese Ansätze nicht betrachtet werden.

3.2.3 Ermittlung von Subvolumen

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt Verfahren zur Ermittlung von Hauptspannungstrajektorien erläutert worden sind, werden nun Methoden zur Ermittlung zusammenhängender Subvolumen vorgestellt. Ergänzend wird präsentiert, wie Slicingflächen zur weiteren Bahnplanungsmethode gefunden werden können.

Die Aufteilung einer betrachteten CAD-Geometrie in einzelne Subvolumen hat den Vorteil, dass diese Subvolumen weitgehend getrennt voneinander geplant und gedruckt werden können. Dadurch kann die Bahnplanungsaufgabe in kleinere Teilaufgaben untergliedert und vereinfacht werden. Dazu wird das Gesamtvolumen eines Bauteils V_{ges} , unter Verwendung der FE-Diskretisierung, in M Subvolumen unterteilt:

$$V_{\text{ges}} = \{\sum_{l=1}^M V_l \mid M \in \mathbb{N}\} = \{\sum_{l=1}^M \sum_{i=1}^N e_{l,i} \mid M, N \in \mathbb{N}\} \quad \text{Gl. 3-29}$$

Es werden dabei so viele Subvolumen gewählt wie Spannungsbereiche im belasteten Bauteil vorkommen, die jeweils durch eine dominierende Trajektorie abgebildet werden können. Innerhalb eines Subvolumens wird nur eine Slicingfläche und eine Trajektorie als Leitkurve zur Ausrichtung der Bahnen in der Einzelbahnplanung verwendet. Der vorherrschende Beanspruchungsfall im gesamten Subvolumen soll deshalb durch eine dominierende Trajektorie abgebildet werden. Sonstige Zugspannungen innerhalb eines Subvolumens, die nicht in Trajektorienrichtung verlaufen, müssen somit kleiner sein als die zulässige Matrixzugfestigkeit. Subvolumensuchalgorithmen können auf verschiedene Weise gestaltet werden. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verfahren sind:

- Direkte Zuordnung einzelner Knoten zur jeweiligen Trajektorie
- Nearest-Neighbour-Algorithmus zur strukturierten Suche

Bei beiden Verfahren ist entscheidend, ob ein Element $e_{l,i}$ zum Subvolumen V_l der jeweiligen Trajektorie T_l zugewiesen wird, falls die Hauptspannung des betrachteten Elementes in eine ähnliche Richtung verläuft, falls das Element in der Nähe der Trajektorie ist oder falls die Spannungsgröße gering ist. Die mathematischen Formulierungen dazu lauten wie folgt:

$$a_{l,i} = \nabla T_l(\xi^*) \cdot \bar{s}_{1,i} \quad \text{Gl. 3-30}$$

$$b_{l,i} = 1 + \frac{\sigma_{1,i}}{\sigma_{1,l,\max}} \quad \text{mit } \sigma_{1,l,\max} \neq 0 \quad \text{Gl. 3-31}$$

$$d_{l,i} = \frac{1}{|\nabla T_l(\xi^*) e_l|} \frac{1}{m} \quad \text{mit } |\nabla T_l(\xi^*) e_l| \neq 0 \quad \text{Gl. 3-32}$$

wobei ∇T_l der Gradient von T_l entlang ξ ist, also die Richtung der Trajektorie und ξ^* die Koordinate der Trajektorienvariablen, die zum betrachteten Element den kürzesten Abstand hat.

Bei der direkten Zuordnung wird jedes Element dem am besten geeigneten Subvolumen zugewiesen. Hierbei werden die Variablen aus Gl. 3-30 bis 3-32 gewichtet und das Element wird dem Subvolumen l zugeordnet, dessen Wertigkeit $\eta_{\max,l}$ maximal ist nach:

$$e_{l,i} = \left\{ e_i \in V_l \mid \eta_{\max,l} = \frac{\gamma_a a_i + \gamma_d d_{l,i}}{\gamma_a + \gamma_d} \right\} \quad \text{Gl. 3-33}$$

Diese Zuordnung berücksichtigt keine Nachbarschaften und ist nicht geometrisch strukturiert.

Beim Nearest-Neighbor-Algorithmus wird die Subvolumensuche beginnend von den höchstbelasteten Elementen aus gestartet. Um möglichst zusammenhängende und konvexe Subvolumen zu erhalten, wird eine Zuordnungsreihenfolge der Elemente verwendet. Dieser sieht vor, beginnend von einem Element, die umliegenden Elemente zu suchen, diese bezüglich ihrer Zuordnung zum jeweiligen Subvolumen zu untersuchen und im Anschluss verbreitungsartig die Nachbarelemente weitergehend zu untersuchen. Ein Element e_i wird hierbei einem Subvolumen V_l mit den Grenzwerten ε_a , ε_b und ε_d nach folgender Definition zugeordnet:

$$e_{l,i} = \left\{ e_i \in V_l \mid a_i \geq \varepsilon_1 \vee b_i \geq \varepsilon_2 \vee d_{T_j-e_i} \geq \varepsilon_3 \right\} \quad \text{Gl. 3-34}$$

Die Abbildung 3-5 zeigt schematisch den Nearest-Neighbor-Algorithmus auf.

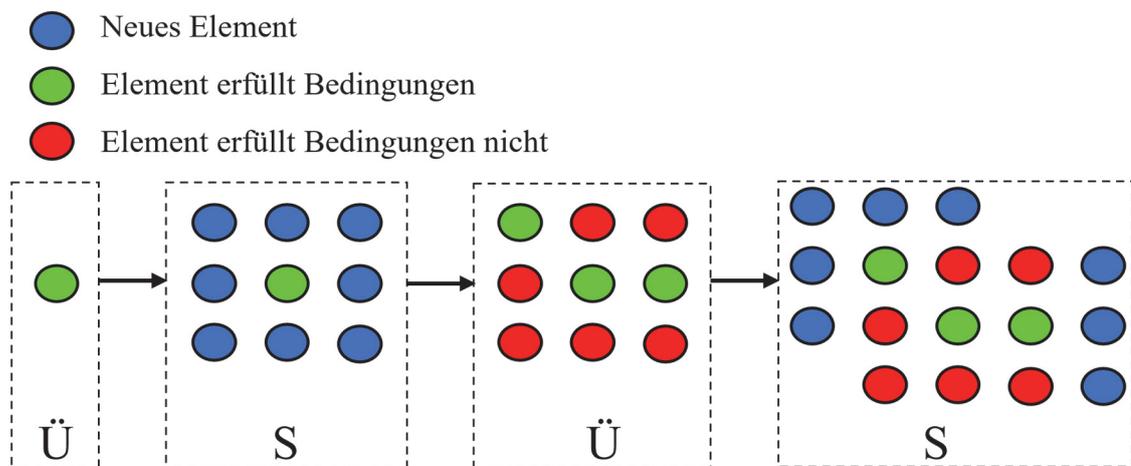


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung des Nearest-Neighbor-Suchalgorithmus (\ddot{U} = Überprüfung des Elements; S = Suche neuer Nachbarelemente)

Mit dem Nearest-Neighbor-Suchalgorithmus können zusammenhängende Bereiche gefunden werden. Bei mehreren Trajektorien und Subvolumen kann die Suche parallel erfolgen. Hierbei wird solange im Subvolumen der maximal beanspruchten Trajektorie gesucht, bis die Elementspannung im Suchbereich gleich groß ist wie die Maximalspannung der nächsten, höchstbeanspruchten Trajektorie usw. Einschlüsse und nicht optimal konditionierte Zuordnungen können hierbei jedoch existieren. In Tabelle 3-3 ist eine Gegenüberstellung der beiden Suchalgorithmen herangezogen. Auf Grund der Eignung beider Verfahren werden diese implementiert und deren Ergebnisse im folgenden Kapitel verglichen.

Tabelle 3-3: Methodischer Vergleich zwischen den Subvolumensuchalgorithmen

	Direkte Zuordnung	Nearest-Neighbor
Vorteile	<ul style="list-style-type: none">• Geringer numerischer Aufwand• Schnelle Suche	<ul style="list-style-type: none">• Geometrisch strukturierte Suche• Geschlossene Konturen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none">• Kann nicht-geschlossene Subvolumen erzeugen	<ul style="list-style-type: none">• Elemente können nicht optimalem Subvolumen zugeordnet werden• Größerer numerischer Aufwand

Eine besondere Herausforderung stellt die Subvolumendefinition in Bereichen des Lasteingriffes dar. Hierbei müssen in der Regel vereinfachte Lösungen gefunden werden.

Nach der Subvolumensuche ist es für die spätere Prozessqualität meist förderlich, eine manuelle Nachmodellierung der Subvolumen vorzunehmen. Dabei werden vereinfachte Subvolumen reverse-engineered (vgl. Topologieoptimierung).

3.2.4 Mehrachsige belastungsgerechte Einzelbahnplanung

Auf Grundlage der gefundenen Subvolumen und der dazugehörigen Trajektorien kann im nächsten Prozessschritt die Planung der Einzelbahnen in den jeweiligen Subvolumen und in akkumulierter Form im gesamten Bauteil vorgenommen werden. Diese Bahnen werden nach den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen CL-Slicingmethoden und mäandrierenden Bahnverläufen generiert. Um dies entsprechend durchführen zu können, müssen die Spezifikationen zu den Subvolumen definiert werden.

Die Bahnen in jedem Subvolumen sollen aufgrund der Hauptspannungsorientierung in Richtung der dominierenden Leitkurve verlaufen. Um diese Bahnen generieren zu können, muss zunächst eine Slicingfläche $H_{s,j}$ definiert werden und, entsprechend dieser Fläche, wird das Bauteil in einzelne Schichten unterteilt. Es ist deshalb notwendig, dass die Slicingfläche entlang der Trajektorie verläuft (siehe Unterkapitel 3.2). Im Fall, dass die Fläche durch zwei Trajektorien aufgespannt wird, können doppelgekrümmte Flächen entstehen. Falls die Fläche mittels zweitem Hauptspannungsvektor im Startpunkt der Trajektorie P_0 aufgespannt wird, kann diese nach folgender Definition bestimmt werden mit:

$$H_{s,j} := \{T_j, \bar{s}_{2,p_0}\} \in \mathbb{R}^3 \quad \text{Gl. 3-35}$$

Alternativ kann manuell ein Konturvektor verwendet werden, der evtl. Vorteile für den Druckprozess hat. Für das Slicing wird das NURBS-basierte Verfahren verwendet. Die gewählte Aufbauichtung \bar{w}_s ist hierbei der Normalenvektor (siehe Abbildung 3-6) entsprechend des \bar{s}_3 -Vektors.

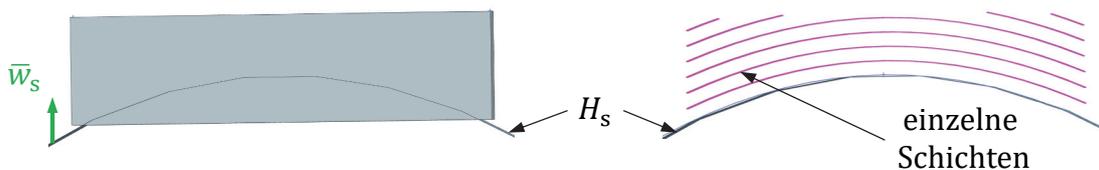


Abbildung 3-6: Slicingbeispiel: Bauteil mit Slicingfläche (links); einzelne Schichten (rechts)

Nachdem das Subvolumen in einzelne Schichten untergliedert worden ist, können die einzelnen Druckbahnen generiert werden. Dies erfolgt durch die vorgegebene Trajektorie T_j , welche auf der Fläche äquidistant versetzt wird (im doppelgekrümmten Raum nicht notwendigerweise parallel). Die Einzelbahnen können in einzelne Stützpunkte durch lineare oder Spline-Ansatzfunktionen diskretisiert werden. Durch die Verbindung der Enden einzelner Bahnen entsteht ein mäanderförmiger Verlauf. Neben der Bahnbeschreibung muss auch die Orientierung der Subvolumen für den Druckvorgang definiert werden. Die Orientierung $\bar{\Phi}_j$ steht auf der Fläche am betrachteten Bahnpunkt P_s :

$$\bar{\Phi}_j(P_s) \perp H_{s,j}(P_s) \quad \text{Gl. 3-36}$$

Die Umrechnung der Orientierung $\bar{\Phi}_j$ auf die kinematischen Achsen wird in Kapitel 5 anhand der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kinematik erläutert.

Im Falle einer hohen Spannungskonzentration führt die Ausrichtung aller Bahnen in Zugrichtung zu einer weiteren Kraftkonzentration auf einem kleineren Querschnitt. Dieser Fall tritt ein, wenn folgende Grenzwerte in den Bereichen hoher Spannung erreicht werden:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \xi} \geq \partial \sigma_{1,\text{grenz}} \vee \max \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \bar{s}_2} ; \frac{\partial \sigma_1}{\partial \bar{s}_3} \right) \geq \partial \sigma_{2/3,\text{grenz}} \quad \text{Gl. 3-37}$$

Falls die Ungleichung aus Gl. 3-37 nicht erfüllt ist, führt ein 0°-90°-Kreuzgelege aus abwechselnd Leittrajektorie-orientierten und orthogonal dazu liegenden Schichten zu einer höheren Bauteilfestigkeit, da hierbei das Verhältnis von Streckgrenze zu E-Modul größer ist (siehe Anhang A.1) mit:

$$\frac{\sigma_{t,f}}{E_{m,f}} = 0,015 < 0,016 = \frac{\sigma_{t,\text{Kreuz}}}{E_{m,\text{Kreuz}}} \quad \text{Gl. 3-38}$$

Die Wirkung der Vergrößerung des Lastbereichs ist hierbei entscheidender für das Bauteilverhalten als die größere Zugfestigkeit.

Nachdem alle Bahnen für alle Subvolumen generiert worden sind, müssen diese so sortiert werden, dass die Bahnen innerhalb einer Schicht zusammenhängend gedruckt werden können. Damit keine Kollisionen zwischen den Schichten und zwischen einem Wechsel von Subvolumen auftreten, müssten Traversen geplant werden. Zwischen Schichten eines Subvolumens kann es notwendig sein, in ein anderes Subvolumen zu wechseln, falls die sequenzielle Abfolge aller Subvolumen nicht kollisionsfrei ablaufen kann. Um eine geeignete Abfolge planen zu können, werden im folgenden Abschnitt Ansätze zur kollisionsfreien Bewegung im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren vorgestellt.

3.2.5 Ansätze zum kollisionsfreien, mehrachsigen Schmelzschichtverfahren

Kollisionen in der konventionellen planar-schichtbasierten 3-achsigen Additiven Fertigung können durch das sequenzielle Abarbeiten einzelner Schichten, verbunden durch einen diskreten Schichtwechsel, vermieden werden. In der mehrachsigen Bewegung ist die kollisionsfreie Bahnplanung eine anspruchsvolle Teilaufgabe der Prozessplanung.

Einzelne Subvolumen können in einzelne Schichten diskretisiert meist kollisionsfrei, durch Orientierung des Druckkopfes normal zur Slicingfläche gedruckt werden. Bei stark gekrümmten Flächen kann es zu Kollisionen innerhalb einer Fläche kommen. Die Sequenzierung der Subvolumen, ihrer Schichten und Bahnen kann durch eine geometrische Abstandsbetrachtung oder

Räumliche Zerlegung: Die *räumliche Zerlegung* basiert auf einer rekursiven Aufteilung des gesamten Bearbeitungsraumes. Dazu wird der Raum in einfach zu betrachtende Teilumgebungen aufgeteilt, welche dann leichter miteinander abzugleichen sind. Beispiele hierfür sind *Octrees* (Jung et al. 1996) oder *Binary-Space-Partition-Bäume* (Ericson 2008). Durch die strukturierte Zerlegung des Bearbeitungsraumes lassen sich effizient angrenzende Bereiche finden, die dann feiner aufgelöst untersucht werden können.

Bounding-Volumes: Bei dem *Bounding-Volumes*-Ansatz werden die zu untersuchenden Objekte auf einfache Grundkörper stark reduziert, indem geometrische Hüllen, wie Kugeln oder Quader, um sie gelegt werden (Gottschalk et al. 1996). Diese mathematisch einfach zu beschreibenden Hüllkörper werden auf Kollisionen geprüft. Falls sich Hüllkörper der beiden Objekte überschneiden, können die originalen Objekte lokal feiner aufgelöst analysiert werden.

Distanzfeldmethode: Um einen Abstand zwischen zwei relativ zueinander bewegten Körpern zu ermitteln, wurde in der Entwicklung der Kollisionsüberwachung in numerischen Steuerungen eine Distanzfeldmethode entwickelt und implementiert (Kayser 1989). Diese Methode beruht auf der Geometriebeschreibung durch skalare und vektorielle Felder. Dabei kann die Distanz zwischen zwei Körpern berechnet werden und neben der Kollisionsbetrachtung auch mögliche Ausweichmanöver bestimmt werden.

Bei Bahnplanungsverfahren wird häufig das *Bounding-Volumes*-Verfahren genutzt.

3.2.6 FE-Modellierung endostrukturell optimierter Bauteile

Das anisotrope Werkstoffverhalten von gedruckten Bauteilen und deren richtungsabhängige Steifigkeit und Festigkeit lassen sich in der FE-Modellierung abbilden und der Belastungsfall kann simuliert werden. Dazu wird jedes Subvolumen entsprechend der Leitkurve, also den Bahnen modelliert. Es wird im Folgenden auf die mechanische Beschreibung von transversal-isotropen Eigenschaften eingegangen.

Das *Hook'sche* Gesetz aus Gl. 3-5 kann für ein beliebiges Element vereinfacht mit der *Voigt'schen* Notation (aufgrund des Kräftegleichgewichtes) dargestellt werden mit dem Spannungstensor $\bar{\sigma} \in \mathbb{R}^{1 \times 6}$, der Steifigkeitsmatrix $\bar{\underline{C}} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ und dem Verzerrungstensor $\bar{\underline{\epsilon}} \in \mathbb{R}^{1 \times 6}$ nach:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{21} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix}}_{\underline{\underline{\bar{c}}}} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{21} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 3-39}$$

Isotrope Werkstoffe wie Stahl haben die Eigenschaft, dass deren Steifigkeit in alle Richtungen gleich ist und daher unendlich viele Symmetrieebenen existieren. Demgegenüber ist in Gleichung Gl. 3-40 das *Hook'sche* Gesetz für anisotrope Werkstoffe kleiner Dehnungen aufgeführt:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{21} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} c_{11} & 2\nu_{12}(\lambda + G_{23}) & 2\nu_{12}(\lambda + G_{23}) & 0 & 0 & 0 \\ 2\nu_{12}(\lambda + G_{23}) & \lambda + 2G_{23} & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 2\nu_{12}(\lambda + G_{23}) & \lambda & \lambda + 2G_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}}_{\underline{\underline{\bar{c}}}} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ 2\gamma_{23} \\ 2\gamma_{31} \\ 2\gamma_{21} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 3-40}$$

Mit den Schubmodulen G_{12} , G_{23} und G_{13} und den Querkonstraktionszahlen $\nu_{1-3,1-3}$ wobei 1 die Vorzugsrichtung darstellt und 2 und 3 orthogonal dazu stehen. Des Weiteren sind die Hilfskonstanten λ als Lamé-Konstante und c_{11} definiert mit:

$$\lambda = \frac{\nu_{12} \nu_{21} + \nu_{23}}{(1 - \nu_{23} - 2\nu_{12}\nu_{21})(1 + \nu_{23})} E_2 \quad \text{Gl. 3-41}$$

$$c_{11} = \frac{1 - \nu_{23}}{1 - \nu_{23} - 2\nu_{12}\nu_{21}} E_1 \quad \text{Gl. 3-42}$$

Übersichtlicher erscheint die Inverse dieser Darstellung mit der Nachgiebigkeitsmatrix $\underline{\underline{\bar{Z}}}$:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ 2\gamma_{23} \\ 2\gamma_{31} \\ 2\gamma_{21} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}}_{=\underline{\underline{\bar{Z}}}} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{21} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 3-43}$$

mit den Elastizitätsmodulen E_1, E_2 und E_3 und den Kopplungen aufgrund von Symmetrie:

$$\nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{21} = \nu_{31}, \nu_{23} = \nu_{32}, \quad G_{12} = G_{13}, \quad E_2 = E_3 \quad \text{Gl. 3-44}$$

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{21}}{E_1} \quad \text{Gl. 3-45}$$

Mit dieser Beschreibung kann die Modellierung einzelner Subvolumen vorgenommen werden. Die lokale Ausrichtung der Vorzugsrichtung 1 jedes Finiten Elements orientiert sich nach der spannungsdominanten Leitkurve T_j . Mit dieser Bauteilmodellierung kann die tatsächliche Kraft- und Spannungsverteilung im Bauteil im linear-elastischen Beanspruchungsfall simuliert werden. Hierbei kann nach Gl. 3-46 ein Bauteilversagen bestimmt werden, falls folgende Bedingung erfüllt ist:

$$1 \leq \max \left(\frac{\sigma_1}{R_{m,f}}, \frac{\sigma_2}{R_{m,m}}, \frac{\sigma_3}{R_{m,m}} \right) \quad \text{Gl. 3-46}$$

Die transversal-isotrope FE-Modellierung und Simulation wird im folgenden Kapitel angewandt und untersucht.

3.3 Zusammenfassung der konzeptionellen Arbeit

In diesem Kapitel ist eine generische Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren erarbeitet und deren Teilfunktionen detailliert erläutert worden. Auf Grundlage der in der Einleitung definierten Zielsetzung und des Standes der Technik wurden zunächst fertigungstechnische Randbedingungen für die Bahnplanungsmethode aufgestellt. Die entwickelte Methode und deren Eigenschaften wurden erläutert. Diese stellt eine Ergänzung zur konventionellen mehrachsigen Bahnplanung dar, welche Informationen aus einer initialen FE-Simulation des zu druckenden Bauteils sowie dem zugehörigen Belastungsfall verwendet, um die Bahnplanung belastungsgerecht zu gestalten. Dazu wird das Bauteil in diskrete Subvolumen unterteilt, die jeweils einen näherungsweisen homogenen Spannungsverlauf aufweisen. Dafür werden Hauptspannungstrajektorien gesucht, zu denen zwei Verfahren aufgestellt und methodisch miteinander verglichen worden sind (*Runge-Kutta-* und *Beyer-*Verfahren). Darauf aufbauend wurden Methoden zur Subvolumenfindung und deren Vor- und Nachteile untersucht (*direkte Zuordnung* und *Nearest-Neighbor*). Um die Einzelbahnen mit dieser Methode bestimmen zu können, wurde erläutert, wie Slicingflächen definiert werden, mit denen ein Bauteil in einzelne Schichten diskretisiert wird, und die Bahnvorgabe entsprechend einer Leitkurve erfolgt. Zur virtuellen Vorabsicherung und zur geeigneten Sequenzierung der Bahnen wurden Kollisionserkennungsmethoden erläutert. Abschließend wurde die Modellierung von transversal-isotropen Werkstoffen präsentiert, mit denen das mechanische Verhalten von Bauteilen und deren belastungsgerechte Bahnplanung prädiktiert werden kann. Im folgenden Kapitel werden die beschriebene Methode und deren Teilkomponenten implementiert und parametrisiert. Dafür muss eine geeignete Fertigungshardware bereitgestellt werden, um Druckversuche durchführen zu können.

4 Implementierung und Parametrierung der Bahnplanungsmethode

Das Konzept zur belastungsgerechten Bahnplanung im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren wurde im vorangegangenen Kapitel eingeführt und wird nun informationstechnisch und anwendungsbezogen umgesetzt. Dieses Kapitel enthält die Vorstellung der softwaretechnischen Implementierung der Methode sowie die Beschreibung der Versuchsdruckanlage, mit welcher dieses Verfahren angewandt wurde. Dazu wird zunächst die Systemarchitektur der softwaretechnischen Lösung vorgestellt. Es wird insbesondere auf die bestehenden Softwarelösungen, die Eigenentwicklungen und deren Schnittstellen eingegangen. In den Unterkapiteln 4.2 bis 4.4 werden die jeweilige Software sowie deren Parametrierung anhand von Beispieluntersuchungen erläutert. Abschließend wird im Unterkapitel 4.6 eine 8-achsige Druckanlage, die speziell für das mehrachsige Schmelzschichtverfahren entwickelt und untersucht worden ist, vorgestellt und auf die Entwicklung des Druckkopfes und die Anlagensteuerung eingegangen.

4.1 Systemarchitektur

Zur Umsetzung der belastungsgerechten Bahnplanung wurde analysiert, auf welche bestehenden Teillösungen zurückgegriffen werden kann, die bereits die Anforderungen erfüllen, sodass fehlende Teilfunktionen durch die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Module ergänzt werden können. Für FE-Simulationen ist spezialisierte Software seit Jahrzehnten verfügbar. Dazu zählen beispielsweise Programme wie *ANSYS*, *ABAQUS* oder *PERMAS*. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde *ANSYS* als FE-Software genutzt. Diese etablierte Software wird kommerziell eingesetzt und hat einen globalen Nutzerkreis. Genutzt werden hierbei FE-Funktionen wie Vernetzung und statisch-mechanische Simulationen sowohl für isotropes als auch für transversal-isotropes Werkstoffverhalten. Darüber hinaus existieren für die Weiterverarbeitung der Netzinformationen und Simulationsergebnisse umfassende Bibliotheken wie *pyansys* oder *pyMAPDL* (PyMAPDL 2021). Mit diesen können die für die Hauptspannungstrajektorienermittlung und Subvolumensuche notwendigen Simulationsdaten in eine *Python*-Umgebung importiert werden, wodurch diese Verkettung modular aufgebaut ist. Eine geeignete Schnittstelle stellt die sogenannte Result-Datei im RST-Format dar. Da die Trajektorien- und Subvolumensuche in der benötigten Form neu ist, wurden diese Teilaufgaben in einer *Python*-basierten Software realisiert und Dateien im CSV-Format bzw. STL-Format generiert. Am

Ende der Bahnplanungsmethode kommt ein Algorithmus zum Slicing und zur Einzelbahnplanung zum Einsatz. Dazu gibt es teilweise kommerzielle Lösungen (Wolf et al. 2020), die meist eine prozessspezifische Datenaufbereitung für den Druckprozess benötigen. Detailuntersuchungen wurden im Rahmen dieser Arbeit in *Matlab* und *Python* implementiert. Als Gesamtprozesskette wurde die kommerzielle CAM-Software *Siemens Nx* verwendet, welche CL-Slicing und die Generierung von Einzelbahnen sowie Traversen ermöglicht. Diese CAM-Software musste für die folgende Untersuchung um einem weiteren Postprozessorschritt ergänzt und an die Steuerung angepasst werden. Die Eingangsinformation in die Einzelbahnplanung ergibt sich aus der Ausgabe der Subvolumen und der Trajektorien sowie der Slicingflächen. Der Ausgang aus der Einzelbahnplanung ist eine CLS-Datei. Darin werden Bahnbewegungen in einer *Automatically Programmed Tool (APT)*-Sprache beschrieben. Diese werden mittels eines Postprozessors (ebenfalls *Python*-basiert) in ein NC-Programm umgewandelt. Hinzu werden im Postprozessor aus der Werkzeugorientierung die Achswerte für die Rotationsachsen berechnet, die dann durch prozessspezifische Befehle ergänzt werden. Die strukturübergreifende Verarbeitungskette der belastungsgerechten Bahnplanung im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren ist in Abbildung 4-1 zu sehen.

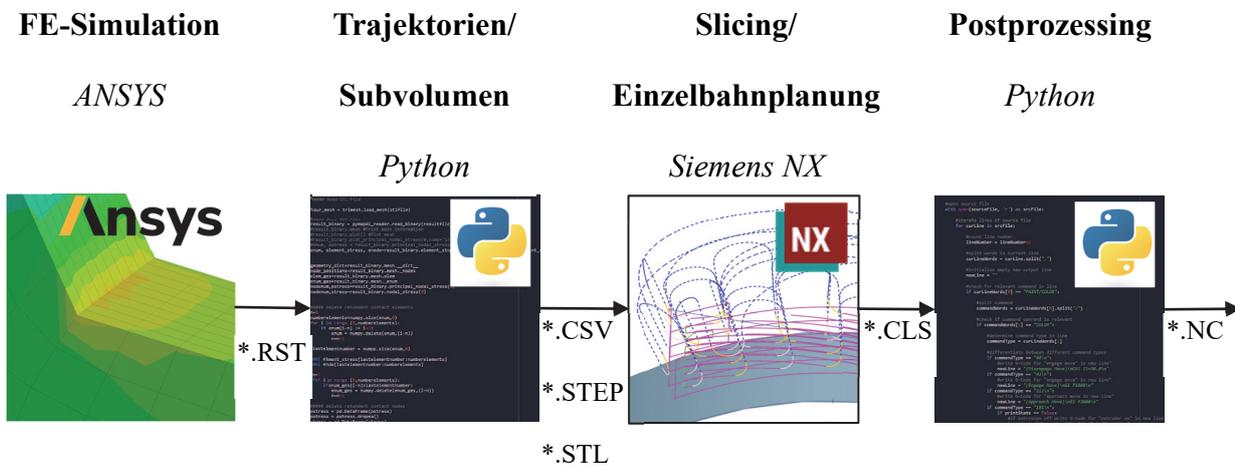


Abbildung 4-1: Verarbeitungskette der belastungsgerechten Bahnplanung

Im Folgenden wird auf die einzelnen softwaretechnischen Teillösungen eingegangen und die Implementierung sowie Parametrierung der beschriebenen Methoden erläutert.

4.2 FE-Modellierung und Simulation

Von wesentlicher Notwendigkeit ist die qualitative Prädiktion der Spannungen in einem Bauteil, die durch ein oder mehrere Belastungsfälle hervorgerufen werden. Die FE-Analyse wird in der Methode zum einen zur initialen Simulation des statisch-mechanischen Verhaltens eines zu untersuchenden Körpers angewandt. Zum anderen wird die FE-Analyse dazu verwendet, die Raupenorientierung, basierend auf dem Resultat der belastungsgerechten Bahnplanung, detailgetreu zu simulieren, um damit eine genaue Prognose der Spannungen im gedruckten Bauteil zu erhalten. In den folgenden Abschnitten werden beide Anwendungen vorgestellt und erläutert.

4.2.1 Initiale isotrope statisch-mechanische Bauteilsimulation

In der initialen FE-Simulation müssen Bereiche hoher Spannung und deren Spannungsverläufe bestimmt werden. Da die Simulationsergebnisse nur für die Bestimmung der Trajektorien und somit der Einzelbahnen verwendet werden, ist ein quantitativ exaktes Ergebnis nicht notwendig. Durch die initialen Materialzuweisungen mit $R_{t,m}$ und E_m wird lediglich eine Approximation des Bauteilverhaltes angestrebt.

Für die Geometrieerstellung des Bauteils in *ANSYS Workbench R2020* wird aus der CAD-Konstruktionssoftware (hier *SolidWorks*) das betrachtete Bauteil als STEP-Datei (siehe Abschnitt 2.2.1.2) oder als native SLDPRT-Datei importiert. In diesen Feature-basierten Dateiformaten ist der Aufbau der Geometrie beschrieben, was eine automatisierte Vernetzung mit Hexaedern vereinfacht bzw. ermöglicht. Tetraeder wären hierbei eine mögliche, etwas ungenauere Alternative. Die Vernetzung erfolgt üblicherweise automatisiert, kann jedoch auch manuell optimiert werden. Die Parametrierung der Elementgröße wurde anhand eines Zugstabes und der Referenzbauteile hinsichtlich deren Einfluss auf das Simulationsergebnis untersucht. Eine Elementgröße von 2 mm ist ausreichend für einen Modellierungsfehler von unter 2 % Divergenz in den Spannungswerten, jedoch muss in Bereichen von Kerben oder großer Spannungs- oder Verformungsgradienten die Elementgröße reduziert werden (Ladeveze et al. 1983). Die mechanischen Kennwerte des angenommenen isotropen Werkstoffs aus Tabelle 2-3 werden in den *Technischen Daten* als „Isotropes PLA“-Material eingestellt. Nach der Definition der Lagerungen und Kraftangriffe kann die statisch-mechanische Simulation durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Simulation sowie die Vernetzungsinformationen werden in der binären RST-Datei gespeichert und zur Weiterverwendung bereitgestellt.

4.2.2 Endostrukturelle transversal-isotrope statisch-mechanische Bauteilsimulation

Um die Raupenorientierung in FEM abzubilden, kann eine transversal-isotrope Werkstoffmodellierung vorgenommen werden (siehe Abschnitt 3.2.6). Dazu wurde das Softwaremodul *AN-SYS Composite PrepPost* verwendet. Das Modul ermöglicht eine schichtbasierte Modellierung mit dem Werkstoff „gedrucktes PLA“ und einer elementweisen Ausrichtung der Vorzugsrichtung. Diese kann in eine bestimmte Koordinatenrichtung oder entlang einer importierten Leitkurve ausgerichtet werden. Die Vorzugsrichtungen zwischen zwei Schichten können variieren. In dem *ACP-Setup*-Schritt wird ein Schichtmodell erzeugt, das statisch-mechanisch simuliert werden kann.

Ein Beispiel stellt im Folgenden ein Zugstab dar, welcher mit einer Schichtdicke von 0,25 mm modelliert wurde (nach Tabelle 2-2). Die Geometrie wurde in einzelne Schichten vernetzt und die Randbedingungen wurden definiert (siehe Abbildung 4-2 oben), sowie die Raupenrichtung jeweils in Krafrichtung und quer dazu mit 3 Konturbahnen modelliert. Die simulierte Bruchkraft der unten dargestellten Proben beträgt bei Längsraupen 1.640 N und bei Querraupen 1.290 N, bei gleicher Bruchdehnung von 1,8 mm. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Spannungen beim Bauteil mit Längsbahnen gleichverteilt sind, wohingegen beim anderen die längsorientierten Konturbahnen, aufgrund der größeren Steifigkeit viel Kraft aufnehmen.

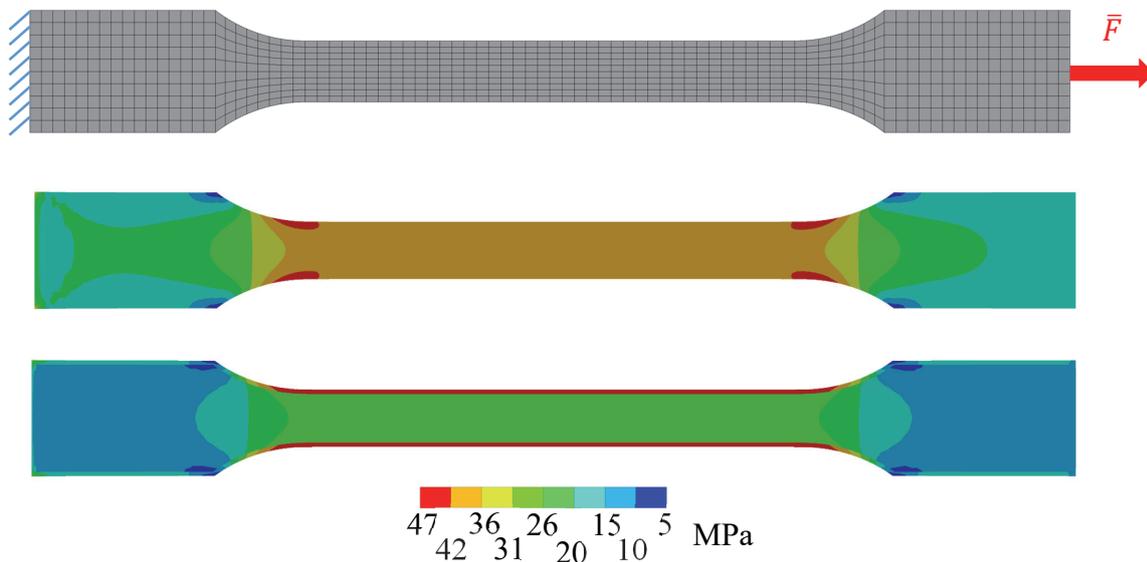


Abbildung 4-2: Transversal-isotrope Simulation eines Zugstabes: Vernetzung und Randbedingungen (oben); Zugspannungen bei Längsbahnen (Mitte); Zugspannungen bei Querbahnen mit Außenbahnen (unten)

4.3 Implementierung der Trajektoriensuche und Subvolumenermittlung

Als Kernfunktionalität der belastungsgerechten Bahnplanungsmethode dient die Hauptspannungstrajektoriensuche und Subvolumenermittlung der Ausrichtung und Vorgabe der Bahnen bzw. der Raupen in einem Bauteil, die die endostrukturellen Festigkeitseigenschaften definieren. Da es hierzu keine vorhandene Softwarelösung gibt, wurde diese im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Hierzu wurde die *Python*-Distribution namens *Anaconda* verwendet mit der *Python*-Version 3.7.4. Die Implementierung erfolgte objektorientiert, weshalb im Folgenden zunächst die Klassendefinitionen erläutert werden und dann auf die einzelnen Funktionen, Methoden, Attribute und Abläufe eingegangen wird.

Eingabe für diesen Algorithmus ist ein Bauteil, welches durch Geometrie, Netzinformationen sowie Spannungsinformationen in der Klasse *FE-Model* beschrieben ist. Hierbei stellt die Klasse *FE-Model* eine Unterklasse zu *Mesh* dar, welche Netzinformationen kapselt (siehe Abbildung 4-3). Die Klasse *Trajectory* beschreibt Hauptspannungstrajektorien im Bauteil, die auf die Klasse *FE-Model* referenziert werden.

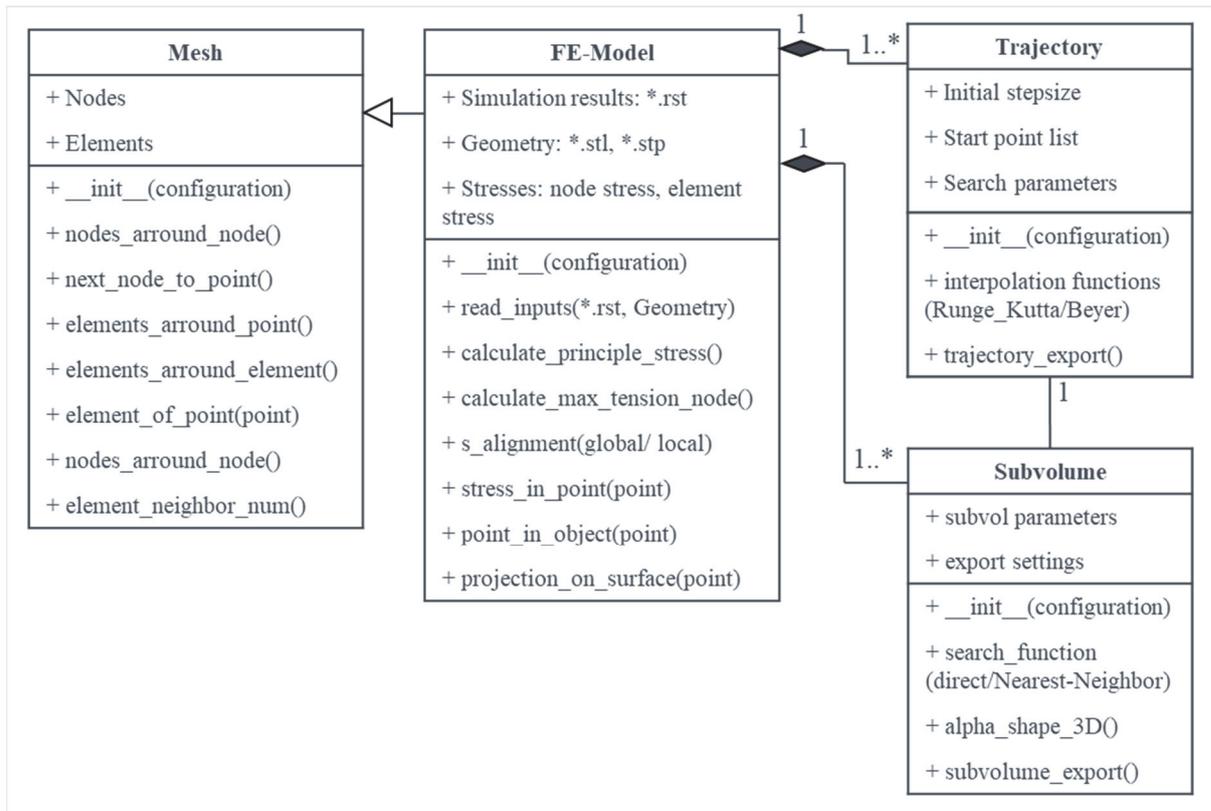


Abbildung 4-3: Vereinfachtes Klassendiagramm für die Trajektorien- und Subvolumensuche

Des Weiteren referenziert die Klasse *Subvolume* auf *FE-Model* und auf die Klasse *Trajectory*, wobei Instanzen der Klasse *Subvolume* sich nur auf eine Instanz der Klasse *Trajektorie* beziehen können (nicht zwangsläufig umgekehrt). Die wesentlichen Attribute und Methoden sowie der Ablauf werden im Folgenden beschrieben.

Zu den Klassen FE-Modell und Mesh: Zur Handhabung der Geometrieinformationen besitzt die Klasse *Mesh* diverse Hilfsmethoden, wie *element_neighbor_num*, welche alle Elementnachbarn auflistet. Eine Instanz der Klasse *FE-Model* hat das Attribut *Simulation results*, die sich auf eine importierte RST-Datei bezieht. Diese Datei enthält die Netz- und Simulationsinformationen, die unter anderem durch die Methode *read_inputs* importiert werden (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Variablenimport von RST-Dateien (n = Anzahl Knoten; e = Anzahl Elemente)

Variable	Beschreibung	Dimension
node_positions	Knotenposition	$3 \times n$
node_stresses	Knotenspannungen	$6 \times n$ (Voigtsche Notation)
element_stresses	Elementspannung	$6 \times e$ (Voigtsche Notation)
enode	Zuweisung der Knoten je Element	$8 \times n$ für Quader, $3 \times n$ für Tetraeder
element_type	Elementtyp	String

Mit *calculate_max_tension_node* wird der Punkt $P_{\sigma_{1,\max}}$ berechnet. Anhand der Knotenspannung kann in der Methode *calculate_principal_stress* das Eigenwertproblem nach Gl. 3-8 mit der Funktion *linalg.eigh* der Bibliothek *numpy* für hermetische Matrizen effizient gelöst werden. Daraus resultieren die Variablen $\bar{\sigma}$ und \bar{s} (letztere wird betragsnormiert). Die Lösung des Eigenwertproblems ist nicht eindeutig, da die Zugspannungsrichtungen in \bar{s} oder $-\bar{s}$ orientiert sein können (siehe Abschnitt 3.2.2). Deshalb werden mit der Methode *s_alignment* unter Betrachtung der Gl. 3-10 die Vektoren einheitlich ausgerichtet. Dies kann entweder global erfolgen, das heißt initial für das ganze Bauteil oder lokal, das heißt in einem bestimmten geometrischen Bereich, um einen betrachteten Punkt P_i . In Abbildung 4-4 (links) ist die lokale Ausrichtung der Spannungsvektoren um den roten Knoten gezeigt. Die Knoten innerhalb des roten Bereichs mit Radius r werden über die Funktion *spatial.KDTree.query_ball_point* der Bibliothek *scipy* gesucht und deren Spannungsrichtung mit dem roten Vektor verglichen und ggf.

umorientiert (wie violett gestrichelt dargestellt). Äquivalent erfolgt diese Ausrichtung im globalen Fall durch Nachbarschaftssuche im gesamten Bauteil. Die lokale Suche hat den Vorteil, dass die aktuelle Ausrichtung der Trajektorie Ausgangspunkt für die Ausrichtung ist, sie muss daher jedoch sequenziell für die Trajektoriensuche ausgeführt werden (siehe Abbildung 4-4 rechts). Aufgrund des verlauforientierten Vorteils wurde die lokale Suche verwendet.

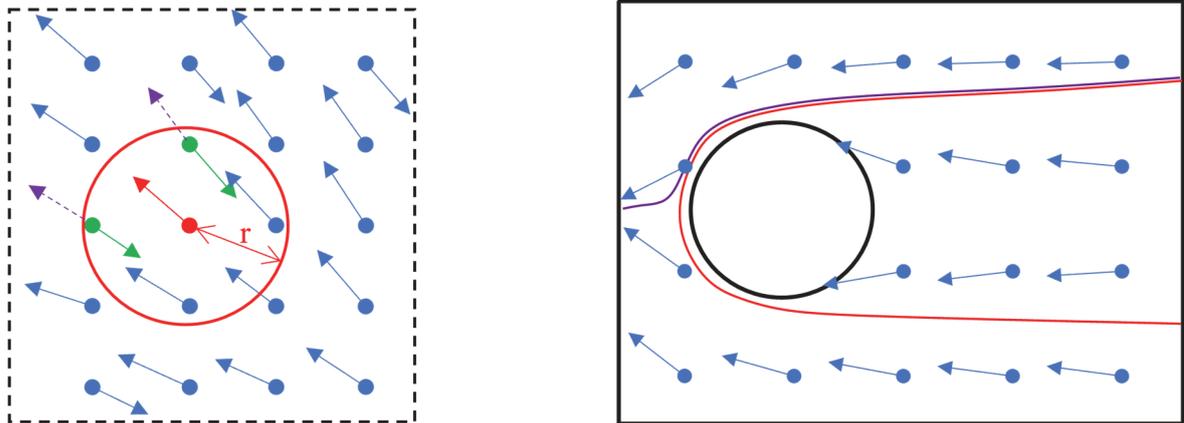


Abbildung 4-4: Ausrichtung der Hauptspannungsvektoren: lokale Suche um den roten Knoten im roten Suchbereich und Umorientierung der grünen Vektoren (links); Trajektoriensuche mit globaler in violett und lokaler Ausrichtung in rot (rechts)

Für die spätere Trajektoriensuche ist es erforderlich, σ_1 und $\bar{\sigma}_1$ an einem beliebigen Punkt P_i im Bauteil auszuwerten. In *stress_in_point* werden die Spannungswerte in P_i über die Methode *interpolate.LinearNDInterpolator* von *scipy* interpoliert. Hierbei wird $\bar{\sigma}_1|_{P_i}$ über eine lineare baryzentrische Interpolation der nächstgelegenen Knoten im jeweiligen Element durchgeführt. Die Interpolation basiert auf einer konvexen Hülle (sogenannte *Qhull*), die über die Knotenwolke aufgespannt wird (Barber et al. 1996). Diese somit bestimmten Spannungswerte können in sehr geringem Maße von der tatsächlichen Element-Ansatzfunktion abweichen. Bei der Trajektorieninterpolation ist es notwendig zu wissen, ob ein Punkt innerhalb oder außerhalb des Bauteils liegt. Dies wird mit *point_in_objekt* überprüft. Darin wird die Methode *ray.ray_triangle.RayMeshIntersector.contains_points* der Bibliothek *trimesh* verwendet, welche über eine Strahlbetrachtung erkennt, ob der gesuchte Punkt außerhalb einer tessellierten Oberfläche liegt. Die Bauteilgeometrie wird hierzu im STL-Format importiert. Im Falle, dass der betrachtete Punkt außerhalb der Bauteilgeometrie liegt, jedoch die Trajektorie fortgesetzt werden soll (eine Erläuterung hierzu erfolgt später), kann dieser durch die Methode *projection_on_surface* ins Bauteil verschoben werden. Dazu wird dieser mit *proximity.closest_point_naive* durch eine geometrische Projektion auf die tessellierte Oberfläche verschoben.

Die Klasse *Trajectory* referenziert auf eine Instanz der Klasse *FE-Model*, wobei hier beliebig viele vorliegen können. Die Attribute sind nach Abschnitt 3.2.2 die Suchparameter (wie Art des Interpolationsverfahrens), die Liste der Startpunkte zur Trajektoriensuche, sowie die initiale Schrittweite Δ_s . Zur Separierung der Interpolationsalgorithmen wurden diese in zwei verschiedene Unterklassen definiert (siehe Abbildung 4-5).

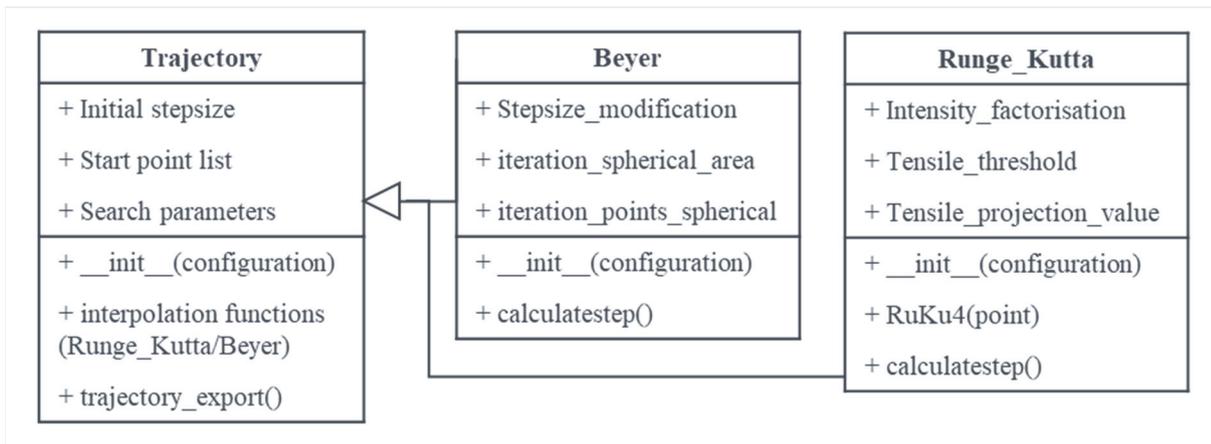


Abbildung 4-5: Vereinfachtes Klassendiagramm der Trajektoriensuche

Die Trajektorie wird als Instanz der Hauptklasse initialisiert und in den Unterklassen werden einzelne Interpolationsschritte berechnet. Das *Beyer*-Verfahren wurde, wie in Abschnitt 3.2.2.2 beschrieben, implementiert. Das interne Minimierungsverfahren kann hierbei mit der *Brute-Force*-Methode oder, numerisch effizienter, mit einem *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*-Verfahren gelöst werden (Beyer 2015). Auf Grundlage von Detailuntersuchungen an Referenzbauteilen wurden die Interpolationsparameter mit einer minimalen Schrittweite von $\Delta_s/4$ und $\rho_{tol} = 10$ mm, sowie der Iterationsbereich von Δ_θ und Δ_ψ zu jeweils $12,25^\circ$ mit 20 Extrapolationspunkten festgelegt. Eine Beispieltrajektorie ist in Abbildung 4-7 gezeigt.

Beim alternativen *Runge-Kutta*-Verfahren wird \overline{dp} nach Gl. 3-18 bestimmt. Dieses Verfahren ermöglicht neben der rein mechanischen Betrachtung der Hauptspannungstrajektorien auch eine Beeinflussung von \overline{dp} und damit die gezielte Modifikation des Verlaufs der Trajektorie. Über das *Runge-Kutta*-Verfahren kann folgendes erreicht werden: Verhinderung eines Abbrechens der Trajektoriensuche bei dortigem hohem Spannungsniveau und Beeinflussung der Änderung des Trajektorienverlaufs. Bei erstem wird ab einem Spannungswert von $\sigma_{tol} = 20$ MPa ein außenliegender Interpolationspunkt mit der beschriebenen Methode *projection_on_surface* auf die Bauteiloberfläche orthogonal projiziert. Bei zweitem kann die Änderung des Trajekto-

rienverlaufs in Abhängigkeit von der lokal vorherrschenden Spannungsgröße modifiziert werden. Dabei wird postuliert, dass die Trajektorie und damit die Vorgabe der Raupen nur dort exakt der Hauptspannung folgen muss, wo diese groß ist. In Bereichen niedriger Spannung ist es vorteilhaft, eine geradlinige und glatte Trajektorie zu erhalten, die einen idealen und schnellen Druckprozess (keine Ausgleichsbewegungen etc.) gewährleistet. Hierzu wurde ein Orientierungs-Modifikationsverfahren methodisch entwickelt und nach folgender Gleichung angewandt:

$$\widetilde{dp}_i = \overline{dp}_i f_\sigma + \overline{dp}_{i-1} (1 - f_\sigma), \quad \text{mit } f_\sigma = \begin{cases} \sqrt{\frac{\sigma_{1,P_0}}{\sigma_{1,P_{i-1}}}}, & \sigma_{1,P_{i-1}} \leq R_{t,m} \\ 0, & \sigma_{1,P_{i-1}} \ll R_{t,m} \end{cases} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Beide Trajektorienmodifikationsverfahren sind in Abbildung 4-6 dargestellt.

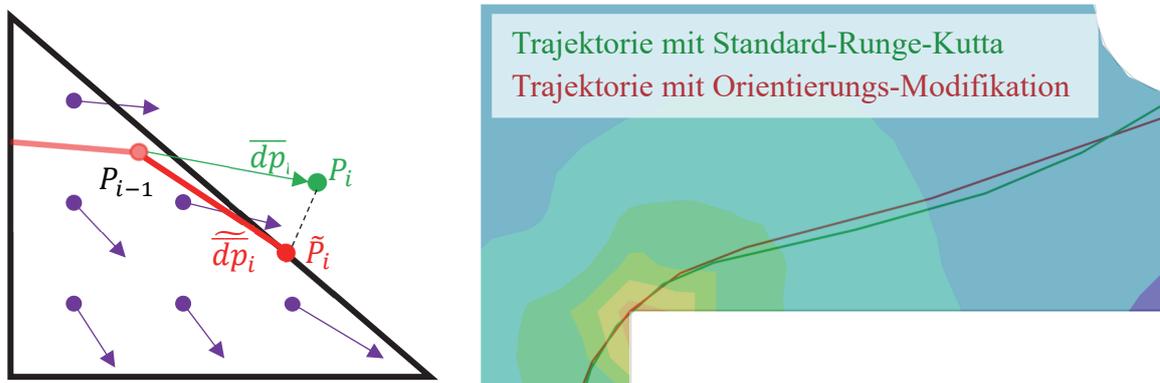


Abbildung 4-6: Modifikationsverfahren für die Runge-Kutta-Trajektoriensuche: Projektionsverfahren (links); Orientierungs-Modifikationsverfahren (rechts)

In Abbildung 4-7 ist ein Vergleich der Interpolationsverfahren anhand eines Beispiels skizziert.



Abbildung 4-7: Hauptspannungstrajektorien mit Runge-Kutta- und Beyer-Verfahren

Der Verlauf beider Trajektorien ist insbesondere im hochbeanspruchten Bereich sehr ähnlich (Abweichung unter 2°). Aufgrund der Modifikationsmöglichkeit und der numerischen Effizienz (etwa 50-mal schneller) wurde das *Runge-Kutta*-Verfahren in der Validierung verwendet.

Die Klasse Subvolumen referenziert auf eine Instanz der Klasse *FE-Model* und es können zu einem Modell beliebig viele Subvolumen existieren. Die Attribute der *Subvolumen*-Klasse sind beispielsweise die Grenzwerte nach Gl. 3-33 und 3-34. Die Subvolumen müssen zur weiteren Bahnplanung als Volumengeometrie vorliegen. Deshalb werden diese einzelnen Subvolumen durch eine konvexe Hülle mittels der Methode *alpha_shape_3D* abgebildet und mit der Referenzgeometrie abgeglichen. Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei der Subvolumensuche mit dem *Nearest-Neighbor*-Algorithmus beschrieben. Hierbei wird zunächst ein einzelnes Subvolumen mit einer Trajektorie betrachtet.

Zu Beginn des Verfahrens wird für jedes Subvolumen jeweils eine Tabelle *element_neighbour_checked* angelegt, die zum strukturierten Vorgehen in einem geometrisch wachsenden Bereich Elementnachbarn hinsichtlich der Zugehörigkeit zu einem Subvolumen untersucht. Diese Tabelle hat in der ersten Spalte die Elementnummer (*element_neighbour_checked(0,0)* enthält den Startpunkt) und zu Beginn des Verfahrens wird die erste Zeile mit $n+1$ Spalten initialisiert, wobei n angibt wie viele Nachbarelemente ein Element haben kann. Die restlichen Einträge enthalten den booleschen Wert 0. Dieser Eintrag wird zu 1, falls der dazugehörige Nachbarelement schon auf das Zugehörigkeitskriterium überprüft wurde. Zu jedem Wert in den Spalten von 1 bis $n+1$ kann eindeutig eine Elementnummer in der initial ermittelten Elementnachbarliste *element_neighbour_num* zugeordnet werden. Falls ein Elementnachbar das Zugehörigkeitskriterium erfüllt und noch keine Zeile in der Tabelle *element_neighbour_checked* mit der Nummer dieses Elements in Spalte 0 enthalten ist, wird eine weitere Zeile unten angefügt. So werden mit Fortschritt des Suchverfahrens immer weitere Zeilen an die Tabelle angefügt. Die Tabelle wird dabei von links nach rechts und von oben nach unten abgearbeitet. In Tabelle 4-2 ist hierfür ein Beispiel dargestellt, bei dem der Suchalgorithmus im Element 190 beginnt und das erste betrachtete Nachbarelement die Nummer 25 hat.

Tabelle 4-2: Beispiel zum Vorgehen bei Subvolumensuche mit Nachbarelementliste

Spalte 0	Spalte 1	Spalte 2	...	Spalte n	Spalte n+1
190	1	0	...	0	0
25	0	1	...	0	0

Somit werden ausgehend von einem Startknoten P_0 iterativ immer neue Knotennachbarn gesucht und überprüft. Im Falle, dass mehrere Subvolumen in einem FE-Modell vorkommen, wird zusätzlich eine globale Liste mit bereits zugeordneten Elementen verwendet, die zum Ausschluss bei den einzelnen Subvolumen führt. Die Elementaufteilung bei der *direkten Zuweisung* ist hingegen eine triviale Aufgabe. Nach der Subvolumensuche werden zur geometrischen Weiterverwendung die Subvolumen mittels der Funktion *alpha_shape_3D* unter Verwendung eines *Delauny*-Algorithmus tesseliert (Edelsbrunner et al. 1992). In Abbildung 4-8 ist ein Vergleich der beiden Subvolumensuchalgorithmen anhand eines Bauteils dargestellt.

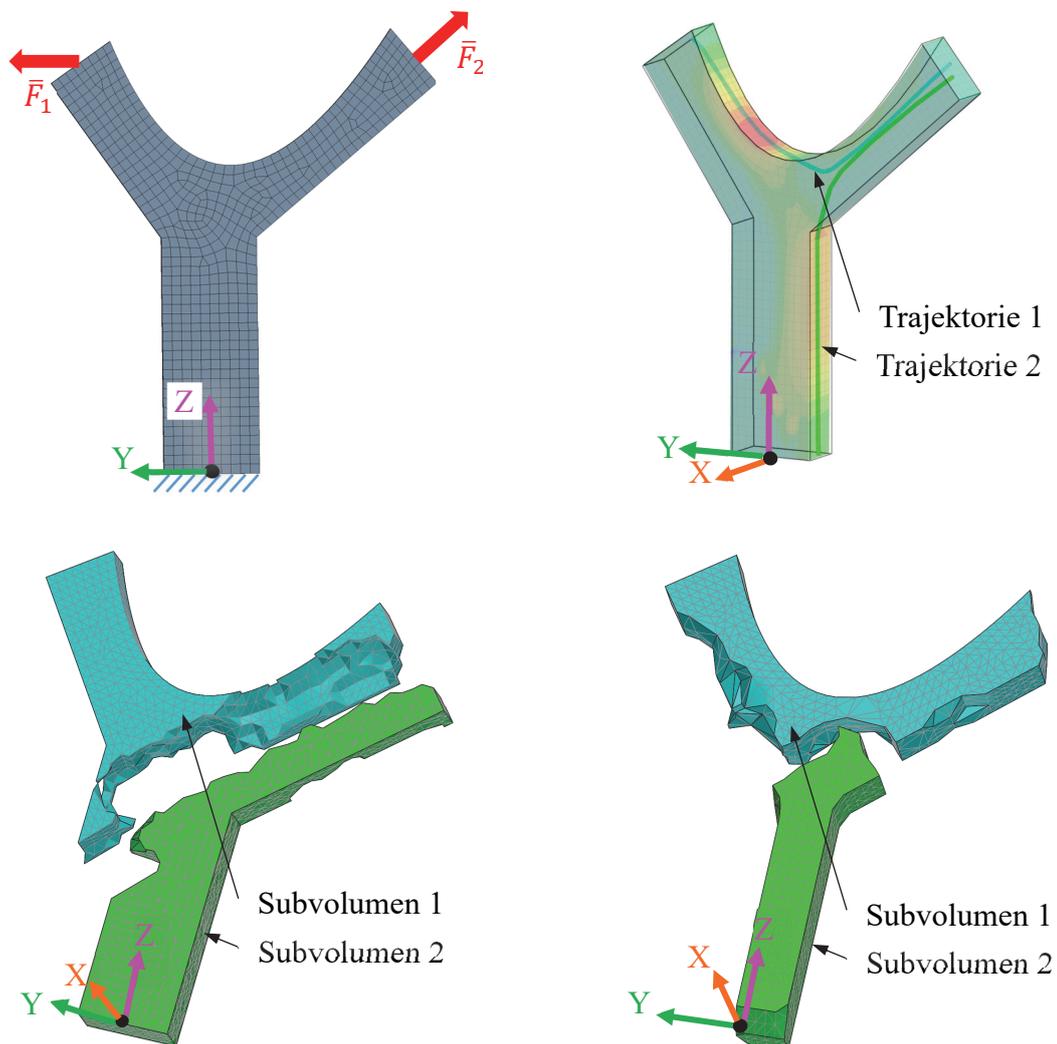


Abbildung 4-8: Beispiele für die Subvolumensuche mit FE-Modell (oben links), zwei ermittelten Hauptspannungstrajektorien (oben rechts) sowie die Subvolumen der direkten Zuweisung (unten links) und des Nearest-Neighbor-Algorithmus (unten rechts); (Subvolumen sind aus visuellen Gründen auseinander verschoben)

Die Lösung der *direkten Zuweisung* mit den bedienungsoptimierten Grenzwerten $\gamma_a = 1$ und $\gamma_d = 4$ verteilt alle Elemente und resultierende zusammenhängende Bereiche. Die diskrete Verteilung des Gesamtvolumens gibt den Verlauf der Trajektorien mit vereinzelt Ausbuchtungen wieder. Bei dem *Nearest-Neighbor-Algorithmus* mit den Grenzwerten $\varepsilon_1 = 0,8$, $\varepsilon_2 = 0,3$ und $\varepsilon_3 = 4$ wird das Gesamtvolumen des Bauteils nicht vollständig auf die beiden Subvolumen aufgeteilt, da es Bereiche gibt, die die Zugehörigkeitsbedingung Gl. 3-34 nicht erfüllen. Hierbei ist zwingend ein manuelles Nachkonstruieren der Subvolumen erforderlich. Aufgrund der vollständigen Verteilung wird für die Validierung die direkte Zuweisung verwendet.

4.4 Realisierung des CL-Slicings und der Einzelbahnplanung

Zum CL-Slicing und für die Einzelbahnplanung wird die CAD-CAM-Software *Siemens Nx* (Version 1938) verwendet. Hierzu werden die Geometriebeschreibungen des Bauteils und der Subvolumen als STEP-Datei bzw. als STL-Datei importiert sowie die jeweilige Slicingfläche. Für den Import der Trajektorien wurde in der Programmiersprache *Visual Basic* eine Importfunktion geschrieben, mit der die Stützpunkte der Kurve geladen und durch einen kubischen Spline verbunden werden können. Für das CL-Slicing und die Einzelbahnplanung wird die Funktion *Freiform Additiv Aufbau* verwendet. Dafür muss ein Druckkopf als Werkzeug angelegt werden und die Randbedingungen, wie Slicingfläche, Aufbaurichtung \bar{w}_s , die Trajektorie als Leitkurve und die Druckparameter vorgegeben werden. Die somit generierten Bahnen und Traversen sind anhand einer Beispielschicht mit einer einfach gekrümmten Slicingfläche und einer geraden als Leitkurve in Abbildung 4-9 gezeigt.

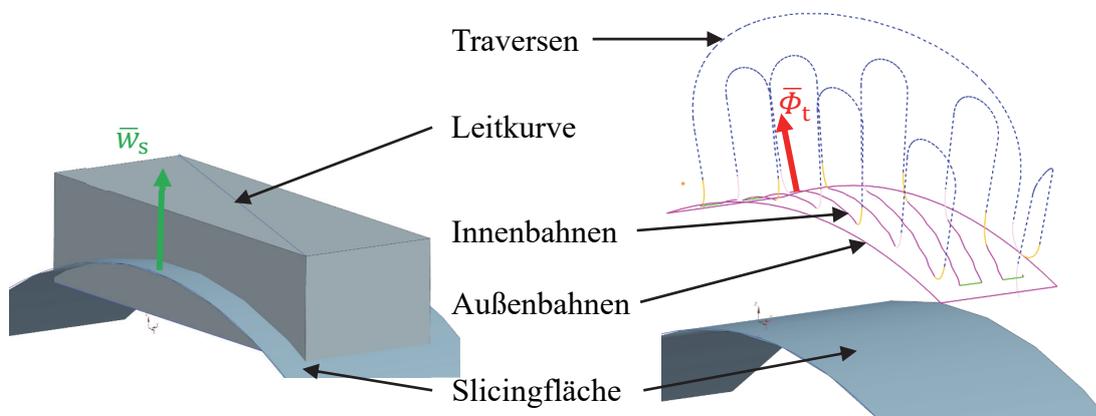


Abbildung 4-9: CL-Slicing (links) und Einzelbahnplanung (rechts) eines Beispielbauteils

Die Bahnen und Traversen werden diskretisiert und in einzelnen Bahnsegmenten im CLS-Format beschrieben. Jedes Bahnsegment wird durch seine Zielkoordinaten im kartesischen Raum definiert mit \bar{r}_i und die zugehörige Oberflächennormalen $\bar{\Phi}_{t,i}$. Die unterschiedlichen Bewegungssätze (Druckbewegungen, Traversen, Anfahrbewegungen etc.) werden mit bestimmten Kommandos beschrieben. Die Bahnplanung bei der konventionellen Variante erfolgt mit einer ebenen Slicingfläche und meist abwechselnd orthogonal stehenden Bahnvorgabekurven.

4.5 Postprozessing bei der Bahnplanung

Die im vorangegangenen Schritt generierten Fertigungsdaten müssen zur Verwendung auf Anlagensteuerungen nach (Norm DIN 66025-1:1983-01) formatiert werden (sogenanntes Parsing). Hierbei wird der spezielle Achsverbund der Kinematik, welche in Abschnitt 4.6.1 beschrieben wird, betrachtet. Ein hierfür entwickelter *Python*-Algorithmus modifiziert zum einen die Bewegungsbefehle und zum anderen berechnet er aus den Vektoren der Oberflächennormalen $\bar{\Phi}_t$ die Achswerte für die Rotationsachsen des Werkzeugtisches. Um im redundanten Achssystem den schnellsten Weg zwischen zwei Achsstellungen zu erhalten, werden die Bewegungen über Fallunterscheidungen zeitlich optimiert. Im einfachsten Fall lassen sich die Rotationsachsen über die Kugelbetrachtung berechnen mit:

$$\begin{aligned} B2 &= \arccos(\bar{\Phi}_t \cdot \bar{e}_z) \\ C2 &= \arctan\left(\frac{\bar{\Phi}_t \cdot \bar{e}_y}{\bar{\Phi}_t \cdot \bar{e}_x}\right) \text{ für } \bar{\Phi}_t \cdot \bar{e}_x \neq 0. \end{aligned} \tag{Gl. 4-2}$$

Hierbei ist gewährleistet, dass der in $-\bar{e}_z$ -Richtung orientierte Druckkopf immer senkrecht auf der Druckoberfläche steht. Prozesstechnisch ist diese exakte Ausrichtung nicht notwendig, da im Schmelzschichtverfahren Orientierungstoleranzen existieren. Das bedeutet, dass die Orientierung des Druckkopfes innerhalb eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von etwa 30° gleichbleibende Prozessqualitäten gewährleistet. Die dadurch zulässigen Toleranzen können dazu genutzt werden, Orientierungsänderungen zu überschleifen und somit die Bearbeitungsdauer zu reduzieren sowie durch die glatteren Bahnverläufe die Prozessqualität zu verbessern. In (Wulle et al. 2021) wurde gezeigt, wie eine zeitoptimale Lösung einer Mehrachsbelegung für Druckanwendungen gefunden wird. Eine einfachere Variante wurde ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit mit einem hybriden Algorithmus realisiert, bei dem ein *Moving-Average*-Filter

die Orientierungsänderung glättet und anschließend überprüft wird, ob der Toleranzkegel eingehalten wird und, falls nicht, den Orientierungsvektor auf die Kegelfläche zurückdreht. Hiermit kann der Druckprozess deutlich schneller ausgeführt und bessere Oberflächenqualitäten erzielt werden.

Um das finale NC-Programm zu erzeugen, müssen die einzelnen Programmabschnitte der Bahnen für verschiedene Subvolumen zusammengesetzt werden. Im einfachen Falle, dass alle Subvolumen eine gemeinsame Slicingfläche haben, können die Schichten zusammengeführt werden. Andernfalls müssen die Bereiche methodisch oder über Abschnittsverfahren, wie bspw. in (Wu et al. 2017) gezeigt, mit Kollisionskontrollen nach Abschnitt 3.2.5 erfolgen. Das erstellte NC-Programm kann im nächsten Schritt auf der Maschinensteuerung ausgeführt werden.

4.6 Mehrachsige CNC-Druckanlage

Zu Beginn der Untersuchung im Jahr 2016 war keine marktreife mehrachsige Schmelzschichtanlage verfügbar. Für Forschungs- und Entwicklungszwecke wurde am ISW eine mehrachsige Kinematik entwickelt, die zur Untersuchung der Methode dieser Arbeit erweitert und verwendet worden ist. Vorteilhaft hierbei ist der umfassende steuerungstechnische Zugriff auf Druckanlage und Druckparameter sowie die Beeinflussung von Bahnparametern. In den folgenden Abschnitten wird zunächst diese Sonderkinematik beschrieben und deren kinematische Transformation, sowie der entwickelte Druckkopf und die Anlagensteuerung erläutert. Abschließend wird beschrieben, wie die Fertigung der Referenzbauteile stattgefunden hat.

4.6.1 8-achsige Sonderkinematik

Die zur Untersuchung verwendete Kinematik wurde als Prototyp für eine Miniaturfabrik entwickelt und ist in Abbildung 4-10 zu sehen. Sie wurde als Produktionsmodul ausgelegt mit äußeren Abmaßen von 1000 mm Breite, 700 mm Tiefe und 2050 mm Höhe. Das Skelett der Anlage besteht aus 60 mm x 60 mm Aluminiumprofilen. In der erweiterten Konfiguration, in welcher die Untersuchungen betrieben worden sind, bestand die Kinematik aus einer parallelen Spindelkinematik, die als Kulissenkinematik auf einem X-Y-Kreuztisch bewegt wurde, und einem heb- und senkbaren Dreh-Schwenktisch. Die Spindelkinematik ist eine neuartige Kon-

struktur, die die Achsen Z, B1 und C1 bewegt. Hierbei treiben drei parallel angeordnete Hohlwellenmotoren mit inkrementalen Drehgebern drei innenliegende, miteinander gekoppelte Spindeln an. Durch Rotationsbewegungen im:

- Motor M1 bewegen sich die Z-Achse und die B1-Achse,
- Motor M2 bewegt sich die Z-Achse und
- Motor M3 bewegen sich die B1-Achse und die C1-Achse.

Am unteren Ende ist ein Winkelgetriebe angeflanscht, woran der Druckkopf abtriebseitig montiert ist. Vorteile dieser Spindelkinematik sind die geringen translatorischen Verschiebungen bei einer Rotationsbewegung durch die kurzen Längen zwischen Drehachse und dem TCP. Der genaue Aufbau ist in (Friedrich et al. 2017) beschrieben. Der Kreuztisch ist jeweils einseitig durch Achseinheiten mit Kugelgewindetrieben angetrieben. Die Orientierung des Werkstücks wird durch einen Dreh-Schwenktisch manipuliert. Diese integrierte Tischeinheit beinhaltet die Achsen B2 und C2. Eine zusätzliche W-Achse des Tisches vergrößert den Achsbereich in Z-Richtung.

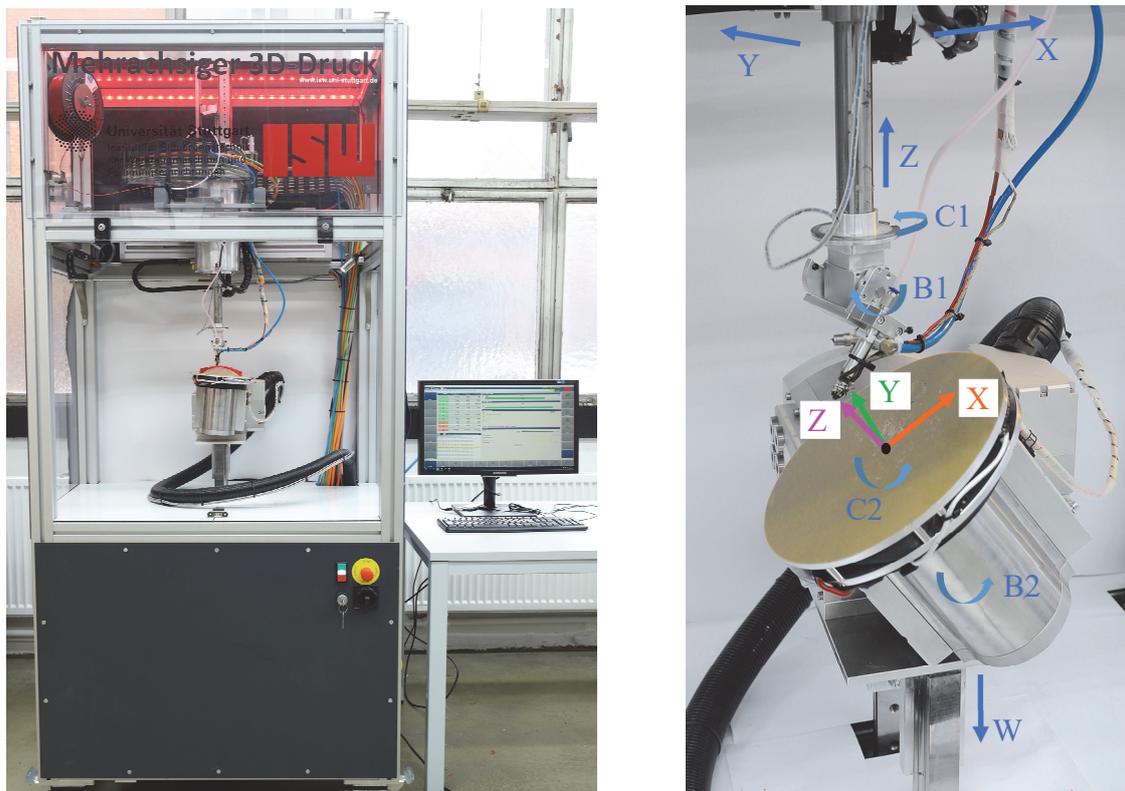


Abbildung 4-10: 8-achsige Sonderkinematik: Gesamtanlage mit Human-Machine-Interface (links); Achsen in blau mit Werkstückkoordinatensystem (rechts)

In Tabelle 4-3 sind die Achsen der Kinematik im transformierten Werkstückkoordinatensystem aufgeführt sowie deren Arbeitsbereiche und die jeweiligen (Haupt-)Antriebe.

Tabelle 4-3: Achsen der 8-achsigen Sonderkinematik und deren Arbeitsbereiche

Achse	Arbeitsbereiche	Antrieb
X-Achse	-250 mm bis 250 mm	Festo: EMMS-AS-55-M-LS-TM
Y-Achse	-150 mm bis 150 mm	Festo: EMMS-AS-55-M-LS-TM
Z-Achse	0 mm bis 110 mm	Printed Motors: QME 120/022-6-08
W-Achse	0 mm bis 180 mm	Beckhoff: AM3042-0E21-0000
B1-Achse	-90° bis 90°	Printed Motors: QME 120/022-6-08
B2-Achse	-90° bis 90°	Carl Hirschmann: Rundtisch F30269
C1-Achse	-100° bis 150°	Printed Motors: QME 120/022-6-08
C2-Achse	unendlich	Carl Hirschmann: Rundtisch F30269

Zur Untersuchung innerhalb dieser Arbeit wurden nur die Achsen X, Y, Z, B2 und C2 verwendet. Mit diesen kann gewährleistet werden, dass die Anlage Orientierungsfreiheit relativ zwischen Druckkopf und Tisch besitzt. Eine Drehung um die Druckkopfachse ist aufgrund des zylindrischen Düsenquerschnitts nicht notwendig. Auf weitere Kollisionsvermeidungsansätze durch die Rotationsachsen des Druckkopfes wurde hier aus Komplexitätsgründen verzichtet. Die Transformation der Kinematik wurde in Form einer Vor- und Rückwärtstransformation formuliert. Die Rückwärtstransformation der fünf Achsen ist gegeben durch folgende Gleichungen:

$$M_X = X_0 - L_{Tz} \sin(M_{B2}) + X \cos(M_{B2}) \cos(M_{C2}) + Y \cos(M_{B2}) \sin(M_{C2}) - Z \sin(M_{B2}) \quad \text{Gl. 4-3}$$

$$M_Y = Y_0 + Y \cos(M_{C2}) - X \sin(M_{C2}) \quad \text{Gl. 4-4}$$

$$M_Z = Z_0 + Z \cos(M_{B2}) + L_{Tz} \cos(M_{B2}) + X \sin(M_{B2}) \cos(M_{C2}) + Y \sin(M_{B2}) \sin(M_{C2}) \quad \text{Gl. 4-5}$$

$$M_{B2} = B2 \quad \text{Gl. 4-6}$$

$$M_{C2} = C2 \quad \text{Gl. 4-7}$$

Hierbei gibt M_i den jeweiligen Achswert der mechanischen Achse i im Weltkoordinatensystem an, und $X, Y, Z, B2$ und $C2$ die vorgegebenen Koordinaten im transformierten Werkstückkoordinatensystem. X_0, Y_0 und Z_0 geben die Nullpunkte vom Weltkoordinatensystem zum transformierten Werkstückkoordinatensystem an. L_{Tz} ist der Abstand zwischen der Rotationsachse der B2-Achse und der Tischoberfläche. Diese Transformation ist in der CNC implementiert (siehe Abschnitt 4.6.3). Die Anlage besitzt eine Absolutgenauigkeit von $< 0,1$ mm und ist damit hinreichend genau gegenüber dem Raupendurchmesser mit 0,5 mm. Nach (Friedrich et al. 2017) wurde eine unterste Eigenfrequenz von 28 Hz simulativ identifiziert. Die statische und dynamische Steifigkeit der Anlage wurde nicht näher betrachtet, da diese als ausreichend angesehen wurde, weil keine Prozesskräfte während des Druckvorgangs auftreten. Die Dynamik der Anlage kann Bahngeschwindigkeiten von bis zu 0,1 m/s und Bahnbeschleunigungen von bis zu 2 m/s^2 gewährleisten, was für die Druckanwendung ausreicht.

4.6.2 Druckkopfsystem

PLA wurde als Werkstoff für diese Grundlagenuntersuchung ausgewählt, da es einfach und verzugsarm druckbar ist, ohne eine aufwändige Bauraumbeheizung integrieren zu müssen. Im konventionellen, schichtweisen Druckverfahren ist die Kompaktheit des Druckkopfes nicht zwingend erforderlich und deshalb in aktuell verfügbaren Modellen auch nicht ausgeprägt. Für das mehrachsige Druckverfahren wurde jedoch ein spezieller Druckkopf entwickelt, um einen möglichst geringen Kollisionsbereich zu erzielen. Der entwickelte Druckkopf besitzt einen Bowden-Extruder, das bedeutet, dass die Filamentförderung über einen Bowdenzug erfolgt, wobei der Extrudermotor am Kreuztisch montiert ist und somit keine Kollisionskontur darstellt. Der Extrudermotor ist als geschwindigkeits geregelter Servomotor (*Beckhoff* AM3111-0301-0001) ausgeführt. Die Befestigung des Druckkopfes erfolgt über eine sogenannte *Groove Mount*, in der drei Zylinderabschnitte der Welle in einer komplementären geschlitzten Bohrung gefasst werden (siehe Abbildung 4-11). Das Kühlprinzip des Druckkopfes basiert auf aktiver Konvektion mittels durchströmender Druckluft. Die von außen zugeführte Druckluft wird über einen angeflanschten Schlauch in das Kühlelement eingebracht und strömt durch zehn parallele Kühlkanäle, die über Querbohrungen miteinander verbunden sind. Oberhalb des Heizbereichs verlässt die erwärmte Druckluft den Druckkopf durch Öffnungen. In den Grundkörper des Druckkopfes ist eine sogenannte *Prometheus*-Druckdüse einschraubt. Um diesen unteren Teil ist ein mit einem Glasfaserschlauch isolierter Widerstandsdraht mehrfach umwickelt. Dieser

besteht aus Manganin mit einem Durchmesser von 0,5 mm, einer Länge von 55 cm und einem elektrischen Widerstand von $6,05 \Omega/\text{m}$. In die Wicklung integriert ist ein Temperatursensor (Thermoelement). Die Düse des Druckkopfes hat einen Durchmesser von 0,5 mm. Der Kollisionsraum des Druckkopfes kann im unteren Bereich durch einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von 90° beschrieben werden und ist damit deutlich kleiner als derjenige von konventionellen Druckköpfen mit ca. 142° .

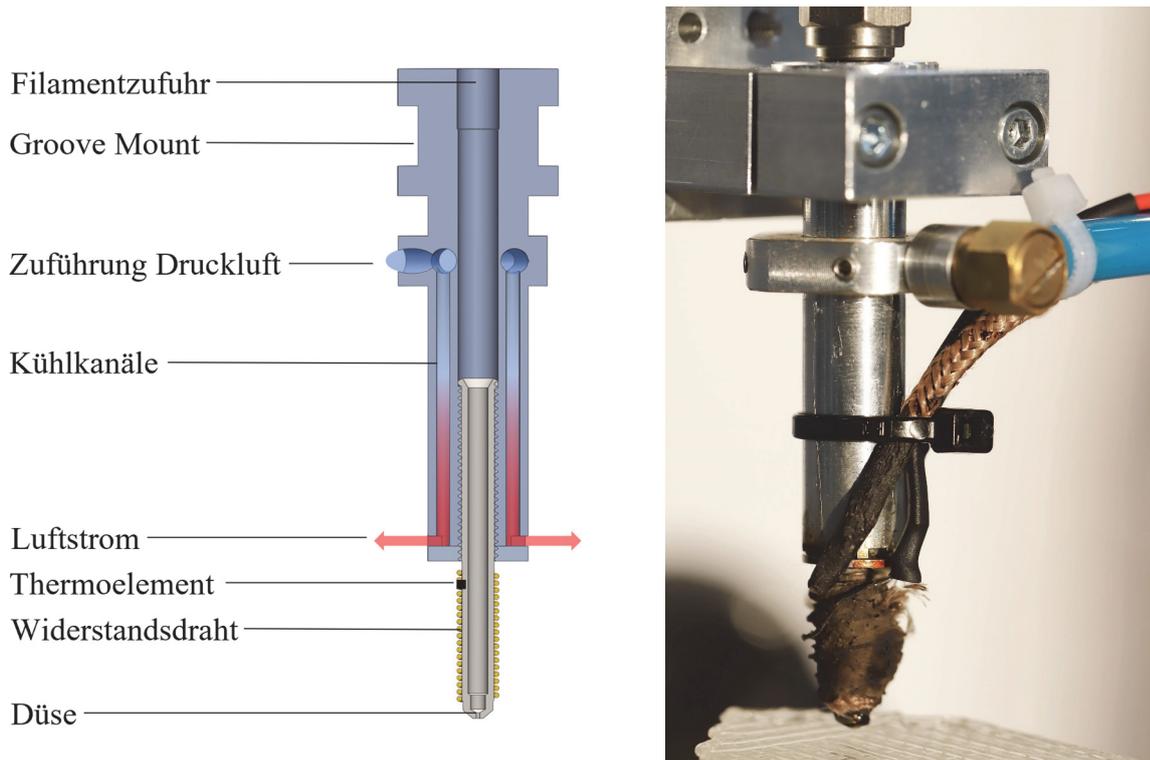


Abbildung 4-11: Speziell schlanker Druckkopf für kleinen Kollisionsraum: CAD (links); realer Druckkopf im Druckprozess (rechts)

Der Heizdraht wird über ein PWM-Modul bestromt. Zur Temperaturregelung des Druckkopfes wurde zunächst dessen Systemverhalten identifiziert. Dieses lässt sich ausreichend genau durch ein PT1-Glied mit der Verstärkung von $68,97 \frac{^\circ\text{C}}{\text{A}}$ und einer Zeitkonstante von 2,3 s abbilden. Hierbei wurde ein PI-Regler gewählt und nach dem Betragsoptimum eingestellt mit $K_p = 0,015$ und $T_n = 0,43 \text{ s}$. Die Zieltemperatur ϑ_{Heiz} ist ausgehend von der Raumtemperatur in 10 s erreicht und schwankt dann um $\pm 1^\circ\text{C}$, abhängig von $v_{\text{Fil}}(t)$.

Um ein Ablösen der gedruckten Struktur durch *Warping* zu vermeiden, wurde ein Heizbett in den Tisch eingebaut. Die Energiezuführung erfolgt über einen Schleifring, um endloses Drehen

der C2-Achse zu ermöglichen. Dessen PI-Temperaturregelung basiert auf einem *Pt1000*-Temperatursensor. Die Zieltemperatur von 55 °C wurde nach 3 min und 11 s erreicht und die Temperatur schwankte um $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Der entwickelte Druckkopf erfüllt die geforderten Eigenschaften eines konstanten Extrusionsquerschnittes sowie einer Steuerbarkeit des Volumenstroms. Der Düsendurchmesser von 0,5 mm kann Schichtdicken zwischen 0,3 mm und 0,5 mm erzeugen.

Um die Festigkeit von gedruckten Bauteilen zu erhöhen, wurde ein Druckkopf mit Endlosfaserintegration entwickelt. Dessen Extruderschnecke diente zur Förderung von thermoplastischem Granulat. Eine Durchgangsbohrung entlang der Rotationsachse der Schnecke ermöglicht eine zentrale Zuführung eines Kohlenstoff-Endlosfasergranates in den Düsenkanal. Der Druckkopf mit integrierter Faserstreckung und Granulatextruder ist im Anhang A.3 abgebildet. Dieser wurde aufgrund seines noch inkonstanten Extrusionsprozesses nicht für diese Untersuchung eingesetzt.

4.6.3 Steuerung der Druckanlage

Die Steuerung der Druckanlage (CNC) basiert auf einer kommerziellen *TwinCAT 3.1*-Steuerung der Firma *Beckhoff* (Version 4024.10). Diese läuft auf einem Windows-basierten IPC *Cx2040*. Die echtzeitfähige *TwinCAT*-Steuerung taktet mit einer Zykluszeit von 2 ms im CNC- und SPS-Task. Während die CNC die Bahnbewegung steuert, werden in der SPS die Funktionen der Extrusionssteuerung und Temperaturregelung ausgeführt (siehe Abbildung 4-12).

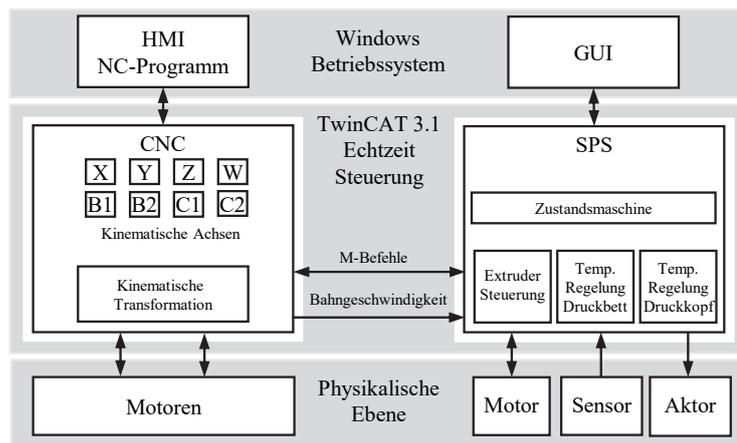


Abbildung 4-12: Steuerungsarchitektur der 8-achsigen Druckanlage

In der CNC werden die acht beteiligten Achsen in einem Kanal verbunden, in der das NC-Programm decodiert, die Bahnbewegung geplant, interpoliert und ausgeführt wird (Pritschow

2006). Die vollständige kinematische Transformation der Achsen ist als separates echtzeitfähiges C++-Modul in der CNC eingebunden. Hierzu wurde ein sogenanntes *TcCOM*-Objekt erstellt, in dem die Vor- und Rückwärtstransformation der Kinematik beschrieben ist. Die Schnittstelle zwischen CNC und SPS bildet das *High-Level-Interface* über welches beispielsweise binäre Druckbefehle (M-Funktionen) oder die Bahngeschwindigkeit für die Extrudersteuerung übermittelt werden. Um das träge Extrusionsverhalten zu kompensieren wurde eine modellbasierte Vorsteuerung als weiteres *TcCOM*-Objekt integriert (Wulle et al. 2019a). Dieses es, Extrusionsbeginn und -ende genauer zu steuern.

4.6.4 Fertigung von Bauteilen an der Druckanlage

Die beschriebene Druckanlage wurde für die Untersuchung und Durchführung der Druckvorgänge für die Testbauteile eingesetzt. Die Druckparameter, die dabei verwendet worden sind, sind in Tabelle 4-4 zusammengefasst. Um die Haftung zwischen den gedruckten Kunststoffraupen und dem Druckbett zu erhöhen, wurde dieses mit einem Haftungsmittel beschichtet (hier Haarspray). Als konventioneller Slicer wurde (Cura 2021) und Siemens NX mit planaren Slicingflächen verwendet.

Tabelle 4-4: Verwendete Druckparameter bei Druckvorgängen

Druckparameter	Wert
Bahnabstand und Schichthöhe	jeweils 0,5 mm
Anzahl an Konturaußenbahnen	2 Stück \cong 1,0 mm
Druckkopftemperatur	200 °C
Druckbetttemperatur	55 °C
Bahngeschwindigkeit bei Traversen	3000 mm/min \cong 0,05 m/s
Druckgeschwindigkeit	1000 mm/min \cong 0,017 m/s
Druckgeschwindigkeit erste Schicht	500 mm/min \cong 0,008 m/s
Überschleifverfahren	Sin ² mit Konturtoleranz 0,1 mm

4.7 Zusammenfassung zum Kapitel Implementierung und Parametrierung

Die Implementierung und Parametrierung der im Konzeptkapitel aufgestellten Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren wurde in diesem Kapitel beschrieben. Hierbei wurde zunächst die softwaretechnische Gesamtlösung präsentiert sowie erläutert, auf welche bestehenden Lösungen zurückgegriffen wurde und welche Aufgaben in eigenen Modulen gelöst wurden.

Die FE-Modellierung und Simulation kann sowohl für den initialen Fall mit angenommen isotropem Werkstoff durchgeführt werden, als auch für transversal-isotrope Bauteilsimulationen, in denen die gesteigerten Festigkeiten durch die Bahnplanungsmethode prädiziert werden können. Es werden hierbei jedoch lediglich linear-elastische Verformungen berücksichtigt. Das plastische Verformen von realen Bauteilen unter Last und die damit verbundene Spannungsänderung, wird nicht simuliert. Die *Runge-Kutta*- und *Beyer*-Methoden zur Ermittlung der Hauptspannungstrajektorien wurden erfolgreich implementiert und deren Ergebnisse anhand eines Beispiels verglichen. Prinzipiell können beide Methoden glatte, spannungsorientierte Trajektorien ermitteln, die als Leitkurve für die Bahnplanung verwendet werden können. Die *Runge-Kutta*-Methode wurde für die weitere Untersuchung ausgewählt, da dieses eine einfache Modifikation hin zu einer prozessorientierten Bahnplanung ermöglicht. Darauf aufbauend wurden die Implementierungen der Subvolumenermittlung nach den Algorithmen der *direkter Zuweisung* und *Nearest-Neighbor* präsentiert und verglichen. Hierbei wurden die Grenzwertparameter experimentell ermittelt. Die *direkte Zuweisung* hat den Vorteil, dass alle Elemente einem Subvolumen zugeordnet werden können und wird deshalb präferiert. Grundsätzlich können beide Varianten für diese Suche verwendet werden, jedoch ist auf Grundlage der Subvolumenergebnisse eine manuelle Nachkonstruktion der Geometrien vorteilhaft für die anschließende Bahnplanung und Prozessführung. Die weitere Prozesskette zur Bahnplanung und NC-Programm-Generierung wurde auf bestehenden bzw. erweiterten Softwarelösungen aufgebaut, sodass die gesamte Prozesskette beschrieben ist. Zur Validierung der Methode wurde eine Mehrachsdruckanlage entwickelt, mit der die Druckvorgänge für Bauteile realisiert werden. Im nächsten Schritt müssen geeignete Referenzbauteile gefunden werden, die auf konventionelle und belastungsgerechte Weise gefertigt und deren Festigkeitsdifferenz ermittelt werden.

5 Simulative und experimentelle Validierung

Um die Anwendbarkeit der entwickelten belastungsgerechten Bahnplanungsmethode zu untersuchen und eine Quantifizierung des Festigkeitspotenzials geben zu können, das durch die Methode gehoben werden kann, ist eine mechanische Überprüfung von zentraler Bedeutung. Deshalb wird in diesem Kapitel eine simulative und experimentelle Validierung anhand von Referenzbauteilen durchgeführt, sowie abschließend eine kritische wissenschaftliche Reflexion und eine wissenschaftstheoretische Einordnung dieser Arbeit vorgenommen.

5.1 Referenzbauteile

Referenzbauteile dieser wissenschaftlichen Untersuchung haben die Funktion, Eigenschaften wie Geometrie, Spannungszustände etc. zu verkörpern, die für eine Klasse ähnlicher Bauteile stehen. Dazu werden im Rahmen dieser Arbeit vier Referenzbauteile genutzt, die unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Durch deren Untersuchung ist der Transfer der Methode auf entsprechend vergleichbare Bauteile gegeben. Des Weiteren können anhand der Referenzbauteile die gesamte Methode und ihre Teilfunktionen validiert werden.

Die Referenzbauteile haben unterschiedliche Komplexitätsgrade sowohl bezüglich Geometrie, als auch Spannungszustand. Die ersten zwei Bauteile zeichnen sich durch eine einfache Bauteilgeometrie aus (siehe Abbildung 5-1). Das erste Referenzbauteil besitzt eine ebene Kontur, das zweite eine räumlich gekrümmte Kontur mit einem Krümmungsradius von 30 mm. Auch beim Beanspruchungsfall wurden zweidimensionale und dreidimensionale Spannungszustände gewählt. Als Erweiterung zu den Zugstäben als Primitivbeispiel wurde hierfür ein ebenes und ein gekrümmtes L-Profil ausgewählt. Diese besitzen jeweils zwei Bohrungen mit 6 mm Durchmesser, in denen die Zugkraft über Stifte eingeleitet wird. In den jeweiligen Belastungsfällen werden die Bauteile auseinandergezogen. In Abbildung 5-1 sind die akademischen Referenzbauteile dargestellt.

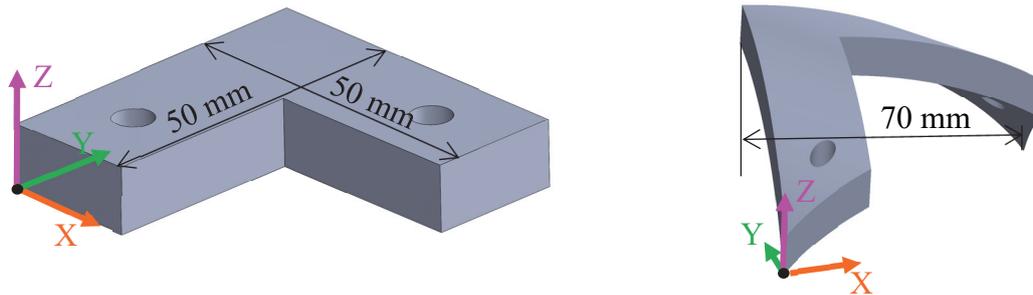


Abbildung 5-1: Akademische Referenzbauteile: ebenes L-Profil (links); gekrümmtes L-Profil (rechts)

Um die entwickelte Methode auch an komplexen Bauteilen zu validieren, wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes am ISW die aktuellen Defizite des Schmelzschichtverfahrens und dessen Potenzial untersucht, sowie die möglichen Einsatzgebiete erörtert. Das Schmelzschichtverfahren hat die Eigenschaft, dass es effizient und kostengünstig Bauteile geringer Losgröße fertigen kann. Deshalb werden Additiven Fertigungsverfahren in der Medizintechnik eine herausragende Rolle zuteil. Insbesondere die Personalisierung von medizinisch orthopädischen Produkten wird durch die Additive Fertigung wesentlich ermöglicht (Richard 2019). Jedoch wurde hier von Herstellern von Orthesen bemängelt, dass additiv gefertigte dünne und elastische Bauteile nicht die notwendige Festigkeit für den Einsatz mitbringen. An diesem Problem knüpft die Methode dieser Arbeit an. Als Anwendungsbeispiel wurde eine Skolioseorthese ausgewählt, die alternativ zur Orthopädiemechanik simulationsunterstützt entwickelt und personalisiert wurde. Skoliose ist eine Wirbelsäulenerkrankung, die meistens in der Kindheit beginnt und teilweise durch Therapie geheilt werden kann. Die damit verbundene Verkrümmung und Verdrehung der Wirbelsäule werden meist im mittleren Verkrümmungsgrad (Coopwinkel ab 20° bis 45°) durch das Tragen von Korsetten und Wirbelsäulenorthesen therapiert, welche die Wirbelsäule begradigen können (Radl et al. 2011). Die Wirkungsweise einer Orthese entspricht im Wesentlichen einer 3-Punkt-Biege-Korrektur, ergänzt durch ein Rotationsmoment, wodurch die Wirbelsäule wachstumslenkend aufrichtet werden kann (Seifert et al. 2016). Konventionelle, marktübliche Korsette haben häufig einen geringen Tragekomfort. Durch die Personalisierung der Orthese soll der Tragekomfort gesteigert, die Wirkungsweise verbessert werden und gleichzeitig die nötige Festigkeit und Steifigkeit der Orthesenbauteile gegeben sein. Zum Stand der Technik wurde eine TriaC-2 Orthese der Firma SPORLASTIC GmbH herangezogen (Sporlastic GmbH 2022).

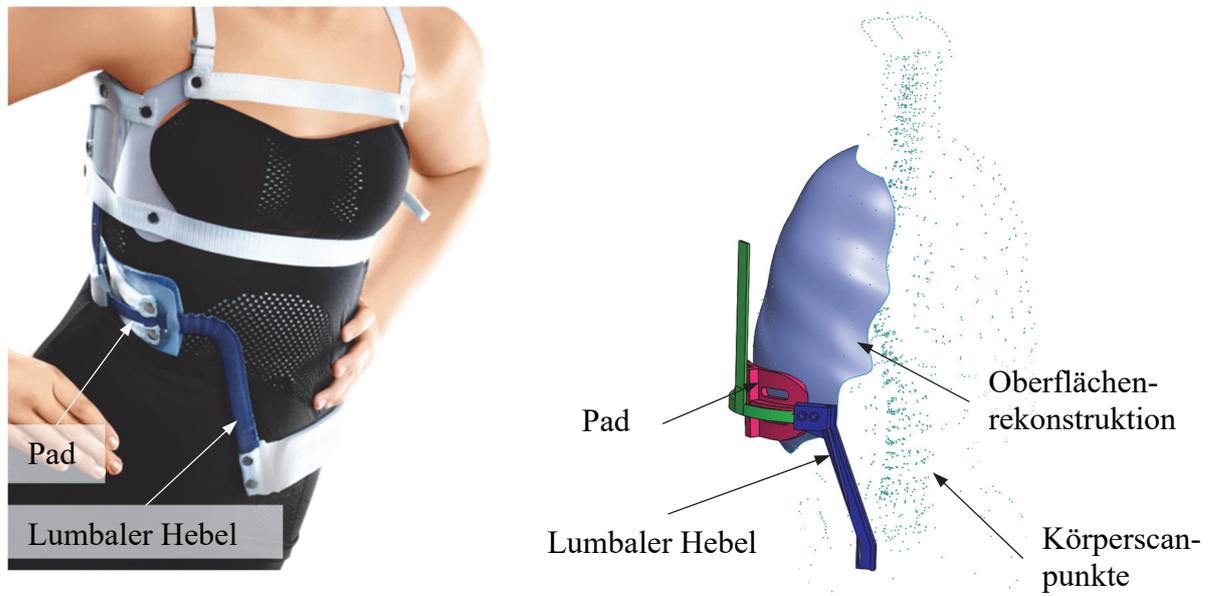


Abbildung 5-2: Skolioseorthese des Modells TriaC II [Quelle: Sporlastic GMBH] (links); Demonstrator für personalisierte Skolioseorthopädie (rechts)

Diese dynamische Skolioseorthese besteht aus einer offenen Gurt- und Riemenkonstruktion im Schulterbereich, einem seitlichen Verbindungsstab und lumbalen Hebeln im Beckenbereich als Stahlstabkonstruktion, sowie aus einem Beckengurt. Im thorakalen und lumbalen Bereich sind Pads, sogenannte Pelotten, integriert, welche die Korrekturkräfte übertragen. Insbesondere das Pad und der lumbale Hebel bieten Optimierungspotenzial, die in personalisierter Form den Tragekomfort erhöhen und die Wirkungsweise verbessern können. Der lumbale Hebel bspw. kann bei einer Beugebewegung unangenehmes Eindrücken in den Bauch zur Folge haben.

Eine Vorgehensweise zur Entwicklung personalisierter Bauteile wird von (Redaelli et al. 2020) beschrieben, die auf der durch eine medizinische Bildgebung wie der Computertomographie aufbauende Rekonstruktion des menschlichen Skelettes basiert. Auf die beiden Bauteile übertragen, kann das Orthesenpad an die gescannte Körperkontur angepasst werden und eine gezielte Kraft- und Momenteneinleitung für die individuelle Skoliose erfolgen. Ein angepasster, additiv gefertigter lumbaler Hebel würde im Vergleich zu den Metallbügeln eine komfortablere Alternative darstellen, da durch die etwas nachgiebigeren Eigenschaften und abgerundeten Ecken unerwünschte Druckstellen minimiert werden. Ein neu entwickelter lumbaler Hebel kann so gestaltet sein, dass die Geometrie der Körperkontur angepasst ist und dieser in Wirkrichtung hohe Steifigkeiten und quer dazu niedrige Steifigkeiten aufweist. Die entwickelten

Bauteile hierzu sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Das Orthesenpad hat eine Breite von 125 mm, der lumbale Hebel eine Gesamtlänge von 180 mm.

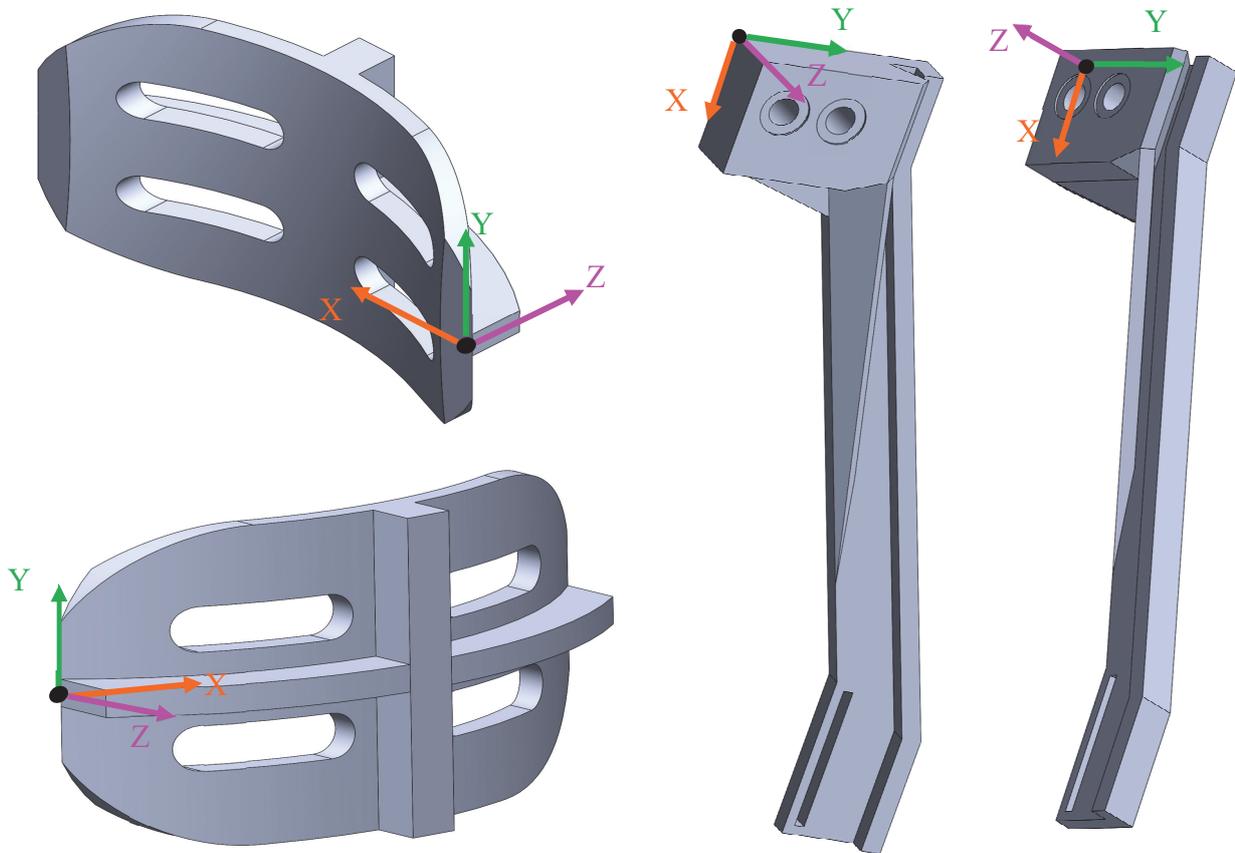


Abbildung 5-3: Orthesenpad (links) und lumbaler Hebel (rechts) einer personalisierten Skolioseorthese

Das Orthesenpad wird durch Oberkörperbewegungen auf Aufspreizen belastet. Deshalb wird ein Aufbiegen des Bauteils als Belastungsfall angenommen. Der lumbale Hebel wird in dessen Hauptwirkrichtung und quer dazu biegebelastet. Das Bauteil versagt bei einer zu starken Gurtzugkraft in Y-Richtung an der unteren Lasche als Belastungsfall 1, und die durch Beugen eingeleitete Biegung um die Y-Achse definiert den Belastungsfall 2. Der lumbale Hebel ist in den oberen beiden Bohrungen fixiert (abgebildete Schraubverbindungen). Ergänzend zur mechanischen Betrachtung der neuen Orthesenbauteile wurde eine Mehrkörpersimulation in der Simulationsumgebung *demoa* am Instituts für Modellierung und Simulation biomechanischer Systeme der Universität Stuttgart durchgeführt. In dieser Kooperation wird das Ziel verfolgt, eine computergestützte Orthesenauslegung zu entwickeln, die personalisierte und orthopädisch-effektive Bauteile ermöglicht.

5.2 Untersuchungsmethoden zur Validierung

Die entwickelte Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung wird anhand der vier beschriebenen Referenzbauteile untersucht. Dazu wird zunächst die Methode angewandt und deren Teilfunktionen erläutert. Die Validierung wird anhand der transversal-isotropen Simulation der Bauteile sowie einer mechanischen Bauteilprüfung der gedruckten Bauteile vorgenommen. Die Fertigung wird hierbei nach folgenden Vorgehensweisen geplant und miteinander verglichen:

- 3-achsige ebene, konventionelle Bahnplanung
- 5-achsige belastungsgerechte Bahnplanung

Eine Ausnahme stellt das ebene L-Profil dar, bei dem noch weitere Bahnausrichtungen analysiert worden sind.

Bei der numerischen Untersuchung wurden die Bauteile entsprechend ihrer Subvolumen und deren spannungsdominierender Trajektorie modelliert, wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben. Die Simulationsergebnisse werden analysiert und entsprechend der Veränderung des Spannungszustandes sowie der Festigkeitshypothese nach Gl. 3-2 bewertet.

Bei der experimentellen Untersuchung wurden Testbauteile der Referenzbauteile auf der in Abschnitt 4.6 beschriebenen Druckanlage aus PLA-Filamenten der Firma *Filamentworld* gefertigt (siehe Abbildung 5-4 links). Um eine statistische Mindestmenge an Proben zu haben, wurden jeweils drei Bauteile pro Referenzbauteil und Bahnplanungsart gedruckt. In der späteren Auswertung wurde aus den Ergebnissen der mechanischen Bauteilprüfungen die Mittelwerte μ und empirische Standardabweichung S_{abw} nach (Meier 2020) berechnet mit:

$$S_{abw}(l) = \sqrt{\frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^q |F_i(l) - \mu|^2} \quad \text{Gl. 5-1}$$

$$\mu(l) = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q F_i(l) \quad \text{Gl. 5-2}$$

mit der Anzahl der Proben $q = 3$ und $F_i(l)$ als gemessene Kraft der Probe i beim Verformungsweg l . Die Bauteilprüfung der Testbauteile fand an der Materialprüfanstalt Stuttgart statt (siehe Abbildung 5-4 rechts). Die eingesetzte Zug- und Druckprüfmaschine Typ ZDEM 20/60 der

Firma Walter + Bai AG der Güteklasse 1 hat eine Messtoleranz von unter 0,1 %. Der Zugkraftanstieg betrug zwischen 15 N/s und 30 N/s mit Ausnahme des lumbalen Hebels mit 1 N/s, da hier die Maximalkraft deutlich geringer war. Die Kraft wurde jeweils bis zum Bruch stetig erhöht. Die Bauteilprüfungen fanden bei einer Raumtemperatur von 20 °C statt.



Abbildung 5-4: Mehrachsiger Druck des Orthesenpads (links); Zug-Druck-Kombiprüfmaschine an der Materialprüfanstalt Stuttgart (rechts)

Um die Materialverteilung in gedruckten Bauteilen zu untersuchen, wurden anhand zweier ebenen L-Profile auch computertomografische Scans vorgenommen. Hiermit konnte analysiert werden, dass Druckresultate äquivalent sind, jedoch hat das Extrusionsverhalten Auswirkungen auf das Druckergebnis in Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeitsänderung.

5.3 Das ebene L-Profil

Das ebene L-Profil weist einen extrudierten L-förmigen Querschnitt auf und dient als einfaches Beispiel für die Belastung mit eingeleiteten Zugkräften. Als Komplexitätssteigerung zum Zugstab hat es eine Kerbe, die zu lokaler Spannungserhöhung führt. Die über die Bohrungen eingeleitete Zugkraft wirkt als Zug- und Biegebelastung im Bauteil.

In der ersten Teilfunktion der belastungsgerechten Bahnplanung wurde der Spannungszustand des L-Profils durch eine initiale isotrope, statisch-mechanische Bauteilsimulation ermittelt. Dazu wurde die CAD-Geometrie mit Hexaedern mit einer maximalen Elementgröße von 1,5 mm vernetzt (6.416 Knoten und 5.054 Elemente). Der Belastungsfall ist durch eine feste Einspannung in Bohrung I und einer Kraft von 600 N an der Bohrung II in Gegenrichtung zur Bohrung I gekennzeichnet (siehe Abbildung 5-5 links). Die Kraft wurde so gewählt, dass die

Verformung noch im linear-elastischen Bereich ist. Das FE-Modell und die Simulationsergebnisse der ersten Hauptspannung sind in Abbildung 5-5 (rechts) dargestellt. Hierbei tritt die maximale Hauptspannung in der Kerbe auf. Von dort aus breitet sich der Spannungsverlauf in das Bauteil, vor allem in Richtung der Bohrungen, aus. An der Kerbe ($P_K = [20, 30, 5]^T$) kommt es also zur lokalen Spannungserhöhung bzw. es existiert dort ein hoher Spannungsgradient (vgl. Gl. 3-37).

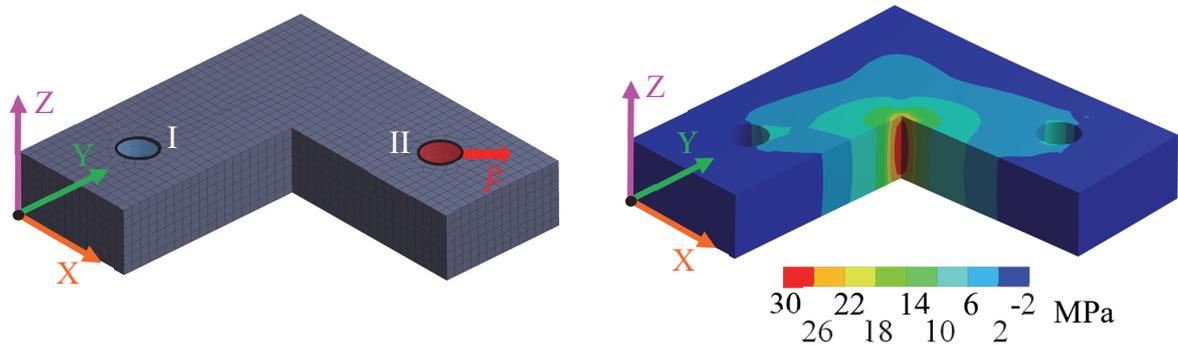


Abbildung 5-5: Isotrope FE-Simulation des ebenen L-Profiles: Vernetzung und Randbedingungen (links); Simulationsergebnis der ersten Hauptspannung (rechts)

Der Spannungsgradient ist in X- und Y-Richtung groß, wohingegen er in Z-Richtung sehr klein ist. Daher kann von einem ebenen Spannungszustand ausgegangen werden. Die Schwachstelle des Bauteils stellt somit die Kerbe dar und ein Riss würde sich bei Überlast normal zu ersten Hauptspannung ausbreiten, also entlang folgenden Vektors:

$$\bar{r}_B = [-1, 1, 0]^T \perp \bar{s}_1|_{P_K} \quad \text{Gl. 5-3}$$

Eine analytische Berechnung ergibt eine Zugspannung in der Kerbe von $\sigma_{ges} = 18$ MPa aus überlagerter Zug- und Biegebeanspruchung mit den Kerbwirkungszahlen $\alpha_Z = 5$ und $\alpha_B = 7$. Dies zeigt, dass das simulierte Spannungsniveau größer ist als in Realität (wie meist bei Kerbwirkungen in FEM-Simulationen), jedoch der Spannungsverlauf qualitativ abgebildet werden kann.

Auf Grundlage der isotropen Simulationsdaten konnte nun mit dem *Runge-Kutta*-Verfahren die Hauptspannungstrajektorie im L-Profil ermittelt werden. Da der auftretende Spannungszustand im Bauteil eine klar abgrenzbare Ausprägung im Kerbbereich zeigt, in dem eine dominierende Spannungsorientierung vorherrscht, wurde nur ein Startpunkt für eine Trajektorie betrachtet. Dieser wurde in die Kerbe gesetzt, abzüglich der zwei Außenbahnen, die konturparallel und

nicht optimierbar sind ($P_0 = [19, 31, 5]^T$). Das Resultat der Trajektorienermittlung ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Die Trajektorie verläuft vom Startpunkt aus in $\pm \bar{s}_1|_{P_0}$ und macht jeweils Bögen um die Bohrungen und kommt nach einer mehr als 180°-Wendung zurück in Richtung der Kerbe, hört jedoch davor an der Bauteilgrenze auf. Die Trajektorie umschließt somit die Bohrungen. Sie ist nahezu punktsymmetrisch zum Startpunkt, wobei Differenzen insbesondere im Bereich der Bohrungen auftreten.

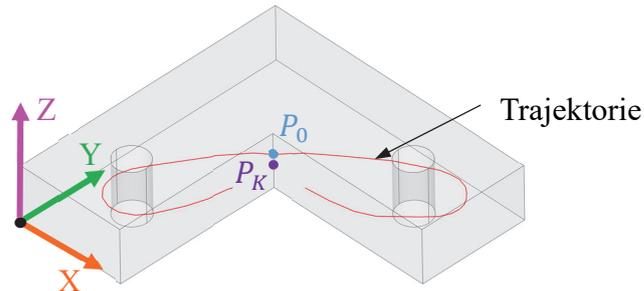


Abbildung 5-6: Hauptspannungstrajektorie des ebenen L-Profiles

Als nächste Teilfunktion wird das zugehörige Subvolumen gesucht. Da nur eine Trajektorie vorliegt, gibt es entsprechend lediglich das Gesamtvolumen. Der betrachtete Belastungsfall ruft einen ebenen Spannungszustand hervor und die Trajektorie weist einen nahezu ebenen Verlauf auf. Aus diesen Gründen wurde die X-Y-Ebene als Slicingfläche verwendet.

Um die unterschiedlichen mechanischen Bauteileigenschaften, die durch die konventionelle und belastungsgerechte Bahnplanung hervorgerufen werden, zu simulieren, wurde jeweils eine transversal-isotrope Bauteilmodellierung angewandt. Dazu wurde ein konventionelles X-Y-Kreuzgelege mit der trajektorienorientierten Ausrichtung der Vorzugsrichtung als PLA-Werkstoffparameter modelliert. Die Hauptrichtungen der Steifigkeitsmatrix $\bar{\underline{C}}$ der Finiten Elemente sind in Abbildung 5-7 (oben) skizziert. Die zwei Konturaußenbahnen werden dabei nicht betrachtet, da sie auf die Gesamtfestigkeit einen geringen Einfluss haben. In Abbildung 5-7 (unten) sind die Simulationsergebnisse der ersten Hauptspannung der repräsentativen Schicht sieben ($z = 3,5$ mm) dargestellt, welche beim Kreuzgelege eine Schicht mit Raupenausrichtung in Y-Richtung ist. Der maximale Hauptspannungsbetrag ist im Bauteil mit trajektorienorientierter Raupenausrichtung bei 31 MPa und bei Kreuzgelege lediglich bei 29 MPa. Dies ist darin begründet, dass die Lastverteilung unterschiedlich ausfällt, die durch die größere Steifigkeit in Raupenorientierung beeinflusst wird. Insbesondere bei der lokalen Spannungserhöhung in der

Kerbe ist zu erkennen, dass durch höhere Steifigkeiten in Hauptspannungsrichtung die Kräfte förmlich angezogen werden. Somit zeigt der Spannungsverlauf des Bauteils mit trajektorienorientierter Raupenausrichtung im Vergleich zu dem mit Kreuzgelege, dass eine höhere Spannungskonzentration auftritt, ausgehend von der Kerbe in Richtung der Hauptspannung.

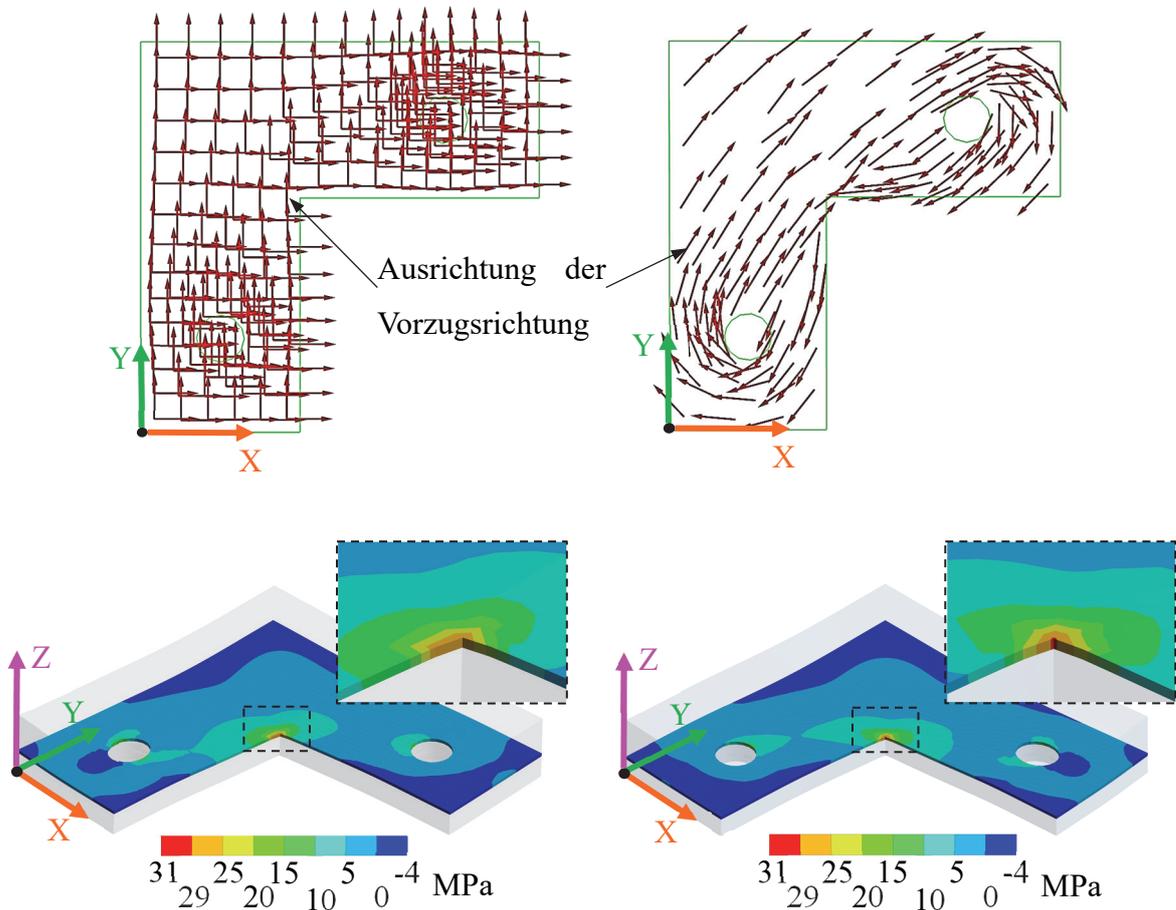


Abbildung 5-7: Modellierung (oben) und Simulation (unten) der transversal-isotropen Eigenschaften; X-Y-Kreuzgelege (links); Trajektorienorientierung (rechts)

Trotz der höheren Spannung hat das Bauteil mit trajektorienorientierter Raupenausrichtung bei näherungsweise ebener Betrachtung nach Gl. 3-2 eine höhere Festigkeit:

$$\max\left(\frac{31 \text{ MPa}}{47 \text{ MPa}}; \frac{14 \text{ MPa}}{31 \text{ MPa}}\right) = 0,66 < 0,96 = \max\left(\frac{29 \text{ MPa}}{30 \text{ MPa}}; \frac{15 \text{ MPa}}{30 \text{ MPa}}\right) \quad \text{Gl. 5-4}$$

mit den ersten beiden Hauptspannungen und den Werkstoffkennwerten (siehe Anhang A.1 nach Festigkeit von 0°-90°-Kreuzgelegen). Die maximale Dehnung beträgt bei der konventionellen Variante 0,213 mm und bei der belastungsgerechten Variante 0,200 mm. Bei größerer Last kommt es zu plastischer Verformung und einer Lastumverteilung im Bauteil. Diese Modellierung wird nicht betrachtet.

Nach der Trajektoriensuche und Subvolumenfindung wurden die Einzelbahnen geplant. Um den Einfluss der Raupenausrichtung an diesem Beispiel ausgiebig zu analysieren, wurden neben dem konventionellen (Kreuzgelege) und belastungsgerechten (trajektorienorientierten) Bahnplanungsverfahren noch zwei weitere Arten betrachtet (siehe Tabelle 5-1). Die zu \bar{s}_1 orthogonal ausgerichteten Bahnen sind hier als Negativbeispiel aufgeführt, um das maximale Delta des Festigkeitspotenzials zu ermitteln. Des Weiteren wurde ein Gelege definiert, das je eine Schicht belastungsgerechter Bahnen, gefolgt von einer Schicht orthogonaler Bahnen, besitzt. Diese Variante hat im Vergleich zur reinen belastungsgerechten Art eine geringere Kraftkonzentration in der Kerbe aufgrund der geringeren Steifigkeiten. Diese beiden Varianten wurden ebenfalls simulativ untersucht und unterstreichen das unten gezeigte Prüfergebnis.

Tabelle 5-1: Bahnstrategien für das ebene L-Profil mit Druckdauer

Konventionell	Belastungsgerecht	Orthogonal	Gelege Belastungsgerecht-Orthogonal
1 h 18 min	1 h 26 min	1 h 20 min	1 h 23 min

Die Bahnplanungsvarianten des L-Profiles haben Auswirkungen auf die Druckdauer aufgrund von unterschiedlicher Traversenanzahl (Tabelle 5-1 unterste Zeile). Die ersten beiden sind in gedruckter Form in Abbildung 5-8 dargestellt.

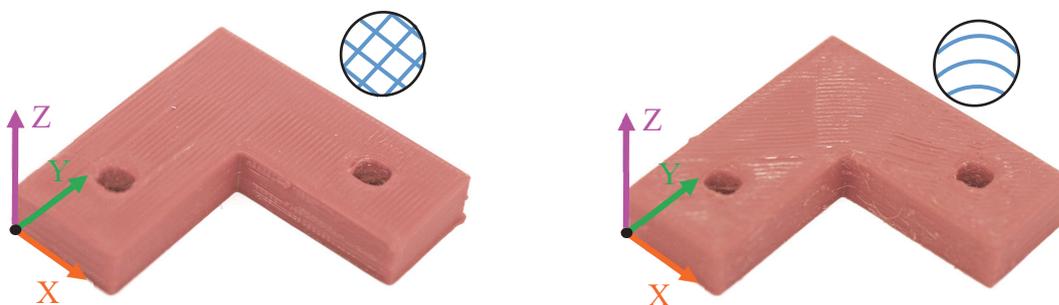


Abbildung 5-8: Gedruckte ebene L-Profile: konventionell (links); belastungsgerecht (rechts)

Die gedruckten Testteile wurden in der Prüfmaschine mit 6 mm-Stiften eingespannt und auf Zug belastet. Das Kraft-Weg-Diagramm der Varianten des L-Profiles ist in Abbildung 5-9 abgebildet. Der Verlauf des Kraft-Weg-Diagramms zeigt einen ähnlichen Verlauf wie das der Zugstabproben. Setzungen zu Beginn der Bauteilprüfung finden nur in sehr geringem Maße statt. Bei zunehmender Last gibt es bei allen Varianten eine lineare Verformung, jedoch mit unterschiedlicher Steifigkeit. Bei einer bestimmten Kraft kommt es zum Fließen des Bauteils, jedoch ist der plastische Bereich gering (plastischer Bereich $< 5\%$ der Zugfestigkeit), ausgenommen des belastungsgerechten Bauteils, dass eine stärkere Streckung im höchsten Kraftbereich (zwischen 1,95 kN und 2,14 kN) erfährt. Es ist zu deuten, dass ab 1,95 kN einzelne Rau- pen in der Kerbe reißen und es zur Lastumverteilung kommt, wodurch noch mehr Kraft aufgenom- men werden kann. Die Standardabweichungen sind als Balken eingezeichnet. Diese sind gering bei unter 5 %.

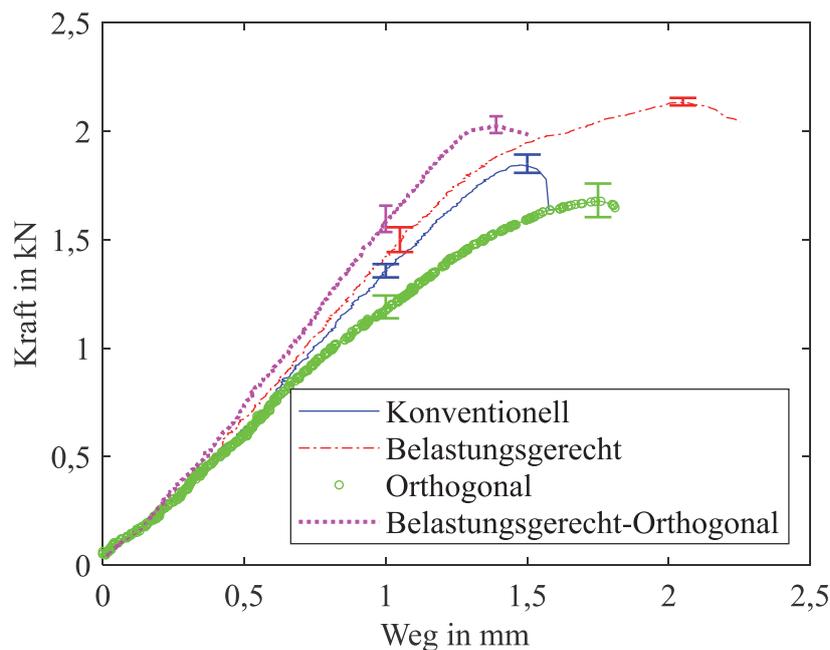


Abbildung 5-9: Kraft-Weg-Diagramm des Testbauteils (ebenes L-Profil)

In Tabelle 5-2 sind die Bauteilfestigkeiten und Steifigkeiten der Varianten sowie deren relative Differenz zur konventionellen Variante zusammengefasst. Die belastungsgerechte Variante weist maximale Zugfestigkeit auf und auch eine erhöhte Steifigkeit im Vergleich zur konventionellen Variante. Durch Videoanalysen konnte gezeigt werden, dass bei der belastungsgerechten Variante Bereiche um die Bohrungen stärker verformen als beim Gelege Belastungsgerecht-Orthogonal, aufgrund der dortigen Spannung quer zur Rau- penausrichtung. Dadurch hat

die belastungsgerechte Variante nicht die maximale Gesamtsteifigkeit. Diese weist das Gelege auf.

Tabelle 5-2: Vergleich der Festigkeit und Steifigkeit beim ebenen L-Profil

	Bauteilfestigkeit (relative Differenz)		Steifigkeit (relative Differenz)	
Konventionell	1.843 N		1.362 N/mm	
Belastungsgerecht	2.142 N	(+ 16 %)	1.437 N/mm	(+ 5 %)
Orthogonal	1.677 N	(- 9 %)	1.148 N/mm	(- 16 %)
Belastungsgerecht-Orthogonal	2.022 N	(+ 10 %)	1.626 N/mm	(+ 19 %)

Im Bruchverhalten lassen sich ebenfalls Unterschiede im Bereich des duktilen und spröden (Rest-)Bruches zu erkennen (siehe Abbildung 5-10).

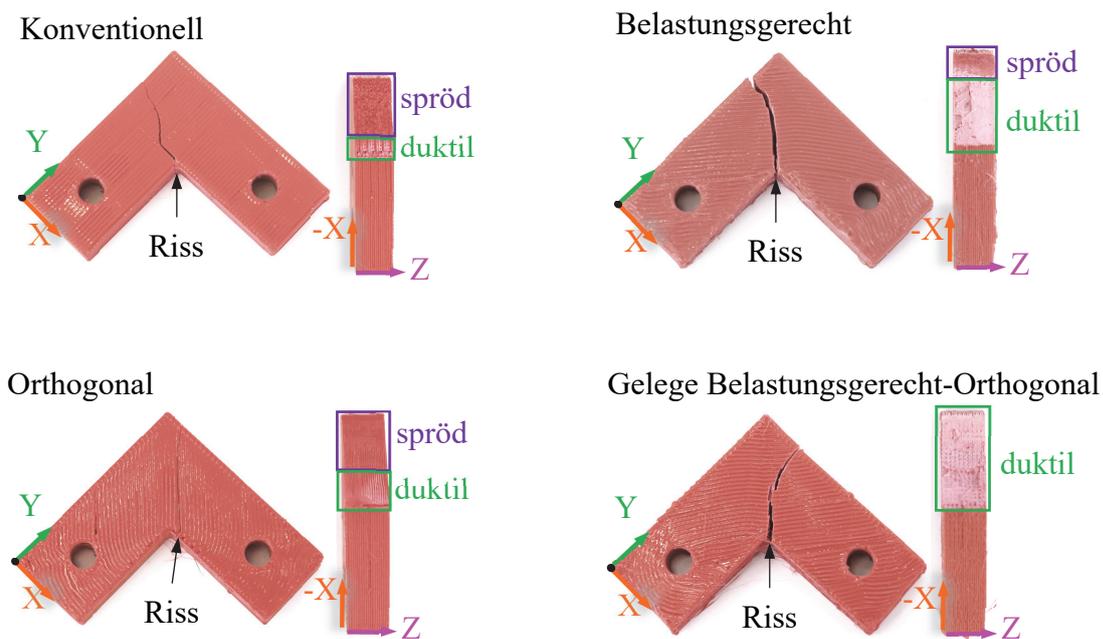


Abbildung 5-10: Bruchverhalten der ebenen L-Profile

Die konventionelle Variante verformte sich bei Last leicht und ein Riss breitete sich in der Kerbe entlang \bar{r}_B aus. Ab einer Risslänge von 5 mm brach der Restquerschnitt spröde (erst in negativer X-Richtung, dann schräg), da er die Last nicht mehr ertrug. Bei der belastungsgerechten Variante dehnte sich das Bauteil elastisch und es kam zu lokalem Fließen. Bei höherer Last

breitete sich ein Riss entlang des \bar{r}_B -Vektors aus und es kam zum Duktilbruch bis auf die letzten 7 mm. Die orthogonale Variante dehnte sich stark und riss dann 15 mm duktil auf, bis die Schichten delaminierten. Der Rissbeginn fand leicht außerhalb der Kerbe zwischen Bahnen statt. Das Gelege aus belastungsgerechten und orthogonalen Schichten weist einen reinen Duktilbruch auf. Der Riss begann ebenfalls in der Kerbe und breitete sich in \bar{r}_B -Richtung aus. Ergänzend wurden Varianten mit Iso-Spannungstrajektorien untersucht, die ebenfalls höhere Festigkeiten als die Standardvariante aufwiesen. Diese wurden jedoch nicht weiterverfolgt, da deren Übertragung auf die Mehrachs-anwendung für beliebige Bauteile zu komplex ist und deren Untersuchung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Fazit: Anhand dieses relativ einfachen ebenen L-Profils wurden die Auswirkungen von Rau-
penorientierung im gedruckten Bauteil untersucht. Es ist ersichtlich, dass die Ausrichtung der
Rau-
pen in Hauptspannungsrichtung eine Festigkeitssteigerung bewirkt, dass aber auch damit
einhergehende lokale Steifigkeitssteigerung eine Auswirkung auf den Spannungszustand hat
und eine Spannungskonzentration bewirken kann. Gegenüber der konventionellen Variante
konnte eine Festigkeitssteigerung von 16 % nachgewiesen werden; eine numerisch simulierte
Verbesserung liegt bei 45 %.

5.4 Das gekrümmte L-Profil

Im Vergleich zum ebenen hat das gekrümmte L-Profil eine erhöhte Komplexität, da der Span-
nungszustand und die Bauteilkontur räumlich gekrümmt sind. Bis auf die Teilfunktionen der
Ermittlung der Slicingfläche und die Einzelbahnplanung ist das Vorgehen zur belastunggerech-
ten Bahnplanung analog zum vorherigen Referenzbauteil.

Zunächst wurde der Spannungszustand des gekrümmten L-Profils durch eine initiale isotrope
statisch-mechanische Bauteilsimulation ermittelt. Dabei wurde die Geometrie mit Hexaedern
mit einer maximalen Elementgröße von 2 mm vernetzt (4.728 Knoten und 3.495 Elemente).
Der Belastungsfall ist analog mit einer Zugkraft von 190 N. In Abbildung 5-11 (links) ist der
Spannungsverlauf der ersten Hauptspannung zu sehen, bei dem eine verstärkte Spannungskon-
zentration an der unteren Seite (in negative Z-Richtung) der Kerbe auftritt. Die maximale Span-
nung von 31 MPa wird beim gekrümmten L-Profil bei einer deutlich geringeren Kraft erreicht
als beim ebenen Referenzbauteil, da ein zusätzliches Biegemoment um die X-Achse angreift
und die Kerbwirkung durch den dreidimensionalen Spannungszustand verstärkt auftritt. Vom

unteren Kerbende ($P_K = [20, 50, 30]^T$) verteilt sich die Spannung gleichförmig im Bauteil, wodurch schalenförmige Iso-Spannungslinien auftreten. Um den Punkt P_K herum ist der Spannungsgradient in X-Y-Ebene ausgerichtet, jedoch krümmt er sich beidseitig in negativer Z-Richtung fast konturparallel. Es handelt sich daher um einen dreidimensionalen Spannungszustand, wobei die Schwachstelle des Bauteils das Kerbende P_K darstellt, und ein Riss würde sich bei Überlast normal zur ersten Hauptspannung ausbreiten, also entlang folgenden Vektors:

$$\vec{r}_B = [-1, 1, \clubsuit]^T \perp \vec{s}_1|_{P_K}, \text{ wobei } 0 \leq \clubsuit \ll 1 \quad \text{Gl. 5-5}$$

Der Spannungszustand im gekrümmten L-Profil hat ebenfalls eine klar abgrenzbare Ausprägung mit einer dominierenden Spannungsorientierung. Der Startpunkt der Hauptspannungstrajektorie nach dem *Runge-Kutta*-Verfahren wurde gewählt mit $P_0 = [19, 51, 30]^T$. In Abbildung 5-11 (rechts) ist die gefundene Trajektorie dargestellt, die nahezu punktsymmetrisch zum Startpunkt ist. Sie breitet sich von diesem in die Richtungen der Bohrungen aus und verläuft zunächst konturparallel, driftet jedoch 15 mm vor den Bohrungen leicht ins Bauteilinnere ab, bis sie auf die Bohrungen stößt.

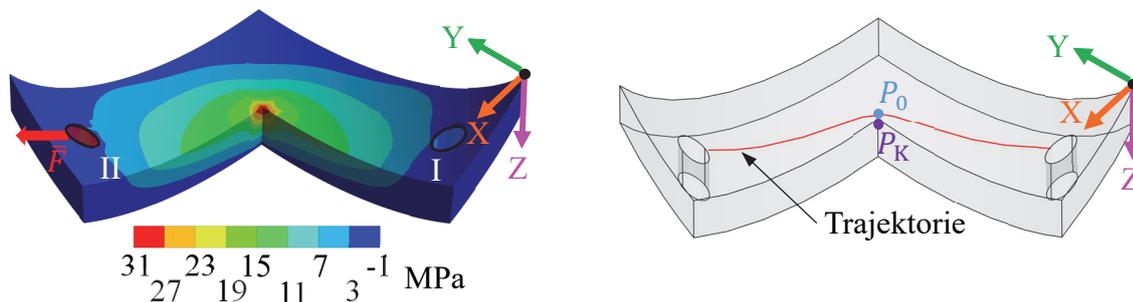


Abbildung 5-11: Simulationsergebnis der ersten Hauptspannung des isotropen gekrümmten L-Profiles (links); Hauptspannungstrajektorie (rechts)

Weitere analysierte Trajektorien mit Startpunkten um P_0 weisen einen ähnlichen Verlauf auf und stoßen, falls nicht an der Bohrung, am oberen Ende (positive Z-Richtung) an die Bauteilgrenze, während sie ihre Richtung nicht maßgeblich ändern. Bei diesem Bauteil wurde ebenfalls das Gesamtvolumen als einziges Subvolumen definiert, welches zur gefundenen Trajektorie zugehörig ist. Der Spannungsgradient in der Kerbe ist zwar groß, jedoch verteilt sich die Spannungsspitze nach Raupenversagen in der Kerbe ringförmig, woraus eine räumliche Stützwirkung resultiert. Aus diesem Grund wird hier kein Gelege verwendet.

Der betrachtete Belastungsfall ruft einen gekrümmten Spannungszustand hervor und die Trajektorie weist einen gekrümmten Verlauf auf. Deshalb wurde entlang der Trajektorie eine

Slicingfläche aufgespannt. Hierzu könnte prinzipiell die Richtung der zweiten Hauptspannung verwendet werden. Da die Kurvenschaar um P_0 ähnliche Verläufe hat, wurde in diesem Referenzbauteil eine Fläche verwendet, die durch die extrapolierte Haupttrajektorie und eine extrapolierte Nebentrajektorie mit Startpunkt mit den Koordinaten $[18, 52, 30]^T$ aufgespannt wird. Die somit aufgespannte Slicingfläche ist in Abbildung 5-12 (links) dargestellt. Mit dieser Slicingfläche wird in der belastungsgerechten Bahnplanung das Bauteil in Z-Richtung in einzelne Schichten unterteilt. Bei der konventionellen Bahnplanung wurde standardmäßig die X-Y-Ebene als Slicingfläche gewählt. Für das Fertigen beider Varianten sind Stützstrukturen in Form einer Volumenprojektion der Bauteilkontur auf die X-Y-Ebene notwendig.

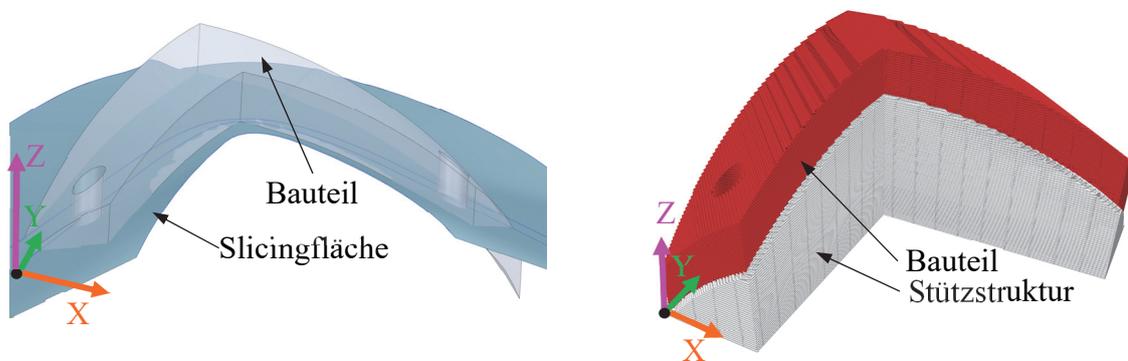


Abbildung 5-12: Gekrümmte Slicingfläche des gekrümmten L-Profiles (links); konventionelles, 3-achsiges Slicing und Stützstruktur (rechts)

Die transversal-isotrope Bauteilsimulation mit einer Zugkraft von 110 N der beiden Varianten zeigt ähnliche Auswirkungen durch die verschiedenen Raupenorientierungen wie beim ebenen L-Profil. In P_0 beträgt die erste Hauptspannung bei der belastungsgerechten Variante 30 MPa und bei der konventionellen Variante 21 MPa. Dadurch ergibt sich nach Gl. 3-2 ein Festigkeitsverhältnis von 0,66 zu 0,7. Die Gesamtverformung bei der belastungsgerechten Variante beträgt 1,71 mm und bei der konventionellen 1,74 mm.

Auf Basis der doppelgekrümmten Slicingfläche werden in der Einzelbahnplanung komplette 5-Achs-Bewegungen zwischen Interpolationspunkten generiert, die im nachträglichen Orientierungsüberschleifen teilweise geglättet wurden. Dieses Bauteil ist ein Beispiel dafür, dass eine 5-achsige Bewegung für das Abfahren der Bahnen notwendig ist, da es sonst im 3-Achsbetrieb zu Kollisionen im Bereich der Bauteilenden kommen würde. Die Stützstruktur wird in beiden Varianten konventionell 3-achsig gedruckt. Bei der konventionellen Variante ist die Bahnaus-

richtung pro Schicht abwechselnd in X- und Y-Richtung orientiert. Die Druckdauer der belastungsgerechten Variante betrug 3 h 49 min (1 h 14 min Stützstruktur und 2 h 35 min Bauteil) und die der konventionellen Variante 3 h 14 min. In Abbildung 5-13 ist das Kraft-Weg-Diagramm der Varianten des gekrümmten L-Profiles abgebildet. Hierbei kommt es ebenfalls zu einer linear-elastischen gefolgt von einer plastischen Verformung.

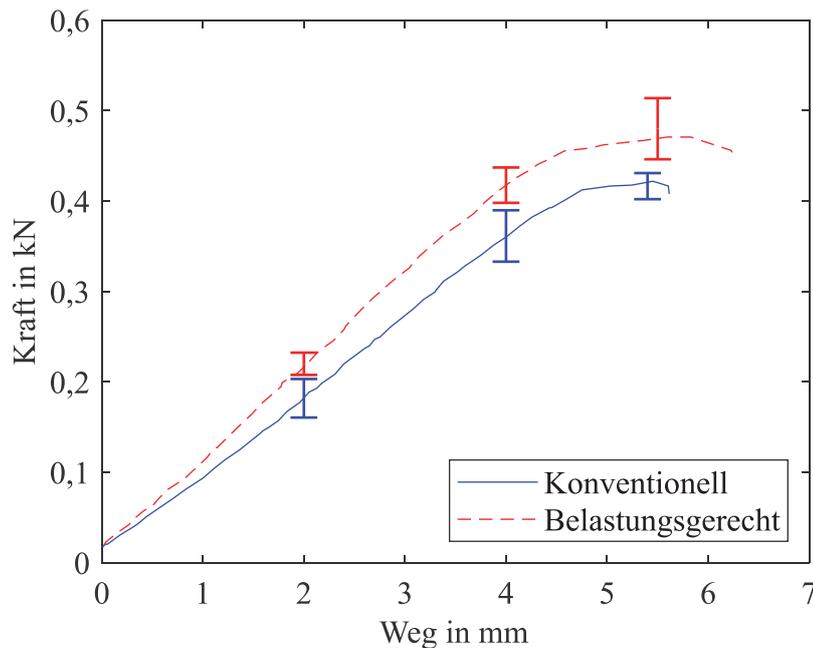


Abbildung 5-13: Kraft-Weg-Diagramm des Testbauteils (gekrümmtes L-Profil)

Steifigkeit und Festigkeit unterscheiden sich bei den beiden Varianten um 16 % und 12 % (siehe Tabelle 5-3). Die Standardabweichung ist jedoch größer (bei ca. 10 %) als beim ebenen L-Profil, vor allem bei der belastungsgerechten Variante. Dies ist darin begründet, dass die Druckqualitäten der höchstbelasteten Raupen um das untere Kerbende herum unterschiedlich sind, da sie direkt auf die Stützstruktur gedrückt wurden und damit weniger geometrisch exakt sind. Die plastische Verformung ist ebenfalls recht gering.

Tabelle 5-3: Vergleich der Festigkeit und Steifigkeit beim gekrümmten L-Profil

	Bauteilfestigkeit (relative Differenz)	Steifigkeit (relative Differenz)
Konventionell	844 N	172 N/mm
Belastungsgerecht	941 N (+ 12 %)	199 N/mm (+ 16 %)

Die geprüften Bauteile weisen ein markantes Bruchverhalten auf (siehe Abbildung 5-14): die belastungsgerechte Variante hat einen deutlich größeren duktilen Bereich (13 mm von der Kerbe ausgehend), da im Bruchquerschnitt die Raupen großflächig in Richtung der ersten Hauptspannung ausgerichtet sind. Bei der konventionellen Variante ist der Duktilbruch nur in einem unteren kleinen Dreieck zu sehen, das an der unteren Kante 8 mm lang ist.

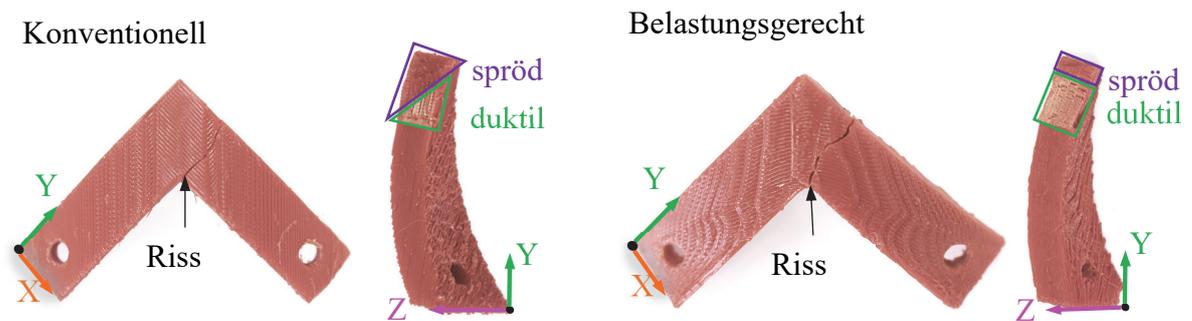


Abbildung 5-14: Bruchverhalten der gekrümmten L-Profile

Fazit: Mit diesem Beispiel wurde gezeigt, wie durch die belastungsgerechte mehrachsige Bahnplanung eine Festigkeitssteigerung bei Bauteilen mit gekrümmten Spannungsverläufen und realisiert werden kann. Die Verbesserung der Festigkeit ist experimentell mit 12 % nachgewiesen und mit 6 % simulativ prädiziert worden.

5.5 Das Orthesenpad

Nach den akademischen Referenzbauteilen stellt das Orthesenpad in seiner geometrischen Komplexität und dem komplexen Spannungszustand eine größere Herausforderung dar. An diesem Beispiel wird dargelegt, wie getrennte dominierende Spannungsbereiche durch einzelne Trajektorien und Subvolumen belastungsgerecht hergestellt werden können.

Zur initialen isotropen, statisch-mechanischen Bauteilsimulation wurde die Bauteilgeometrie mit Hexaedern mit einer maximalen Elementgröße von 2 mm vernetzt (45.826 Knoten und 11.492 Elemente). Der Belastungsfall ist hierbei, wie bereits in Abschnitt 5.1 erläutert, das Aufbiegen der Seitenflächen, deshalb wird hierbei ein Biegelastfall untersucht. Dieser wird in der Simulation dergestalt dargestellt, dass die Kraft \bar{F} von 650 N am oberen mittleren Steg flächig angreift (siehe Abbildung 5-15 oben). Die unteren beiden Flächen dienen als Auflager. Um

einen statisch bestimmten Lastfall zu definieren, wird zusätzlich die Innenkante der linken unteren Fläche starr fixiert. Diese Festlegung entspricht nicht exakt der späteren Bauteilprüfung, jedoch hat der daraus entstehende lokale Fehler keinen Einfluss auf das Bruchverhalten im Bereich hoher Spannung. In Abbildung 5-15 (unten) ist die erste Hauptspannung dargestellt. Bei der Kreuzverrippung treten hohe Druckspannungen (bis 40 MPa) auf, die jedoch geringer sind als die Druckfestigkeit des Werkstoffs und sie werden daher nicht berücksichtigt (siehe Anhang A.2). Diese Unteransicht wurde gewählt, da dort der Bereich maximaler Zugspannungen ist.

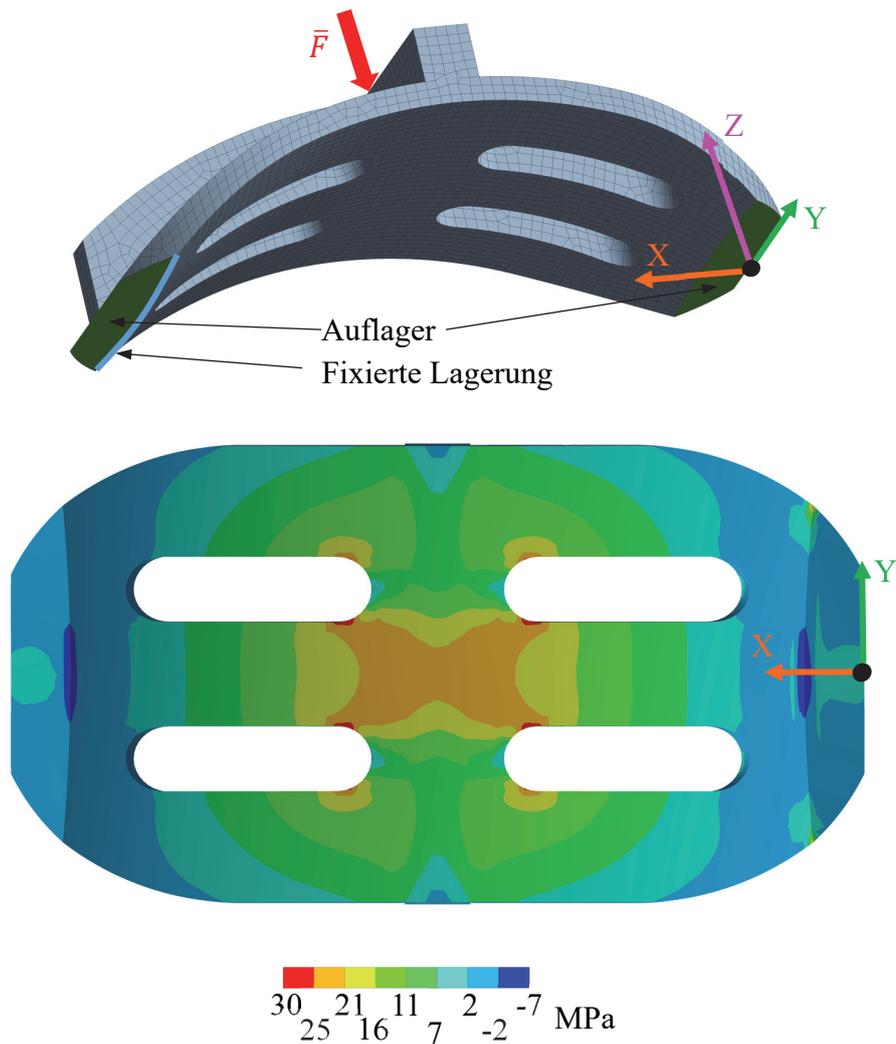


Abbildung 5-15: Isotrope FE-Simulation des Orthesenpads: Vernetzung und Randbedingungen (oben); Simulationsergebnis der ersten Hauptspannung (unten)

Hier zeigt der Spannungsverlauf eine flächige bis ringförmige Ausbreitung in X-Richtung bzw. um das Zentrum des Bauteils an der Innenseite. Die Bereiche der maximalen Belastung sind die Randbereiche der Lüftungslänglöcher, wobei die innenliegenden Randbereiche höher beansprucht werden. Dort gibt es lokale Spannungserhöhungen auf einem bereits hohen Spannungsniveau; der Spannungsgradient ist hier also geringer als bei den L-Profilen. Hierbei beträgt die Hauptspannung bis zu 30 MPa. Bei Überlast ist damit zu rechnen, dass sich, ausgehend von den hochbelasteten Randpunkten der Lüftungsschlitze, ein Riss ausbreitet, der in Y-Richtung verläuft. Sowohl der Bauteilkontur- als auch der Spannungsverlauf sind räumlich gekrümmt.

Ausgehend von dieser Spannungsanalyse können die Bereiche der Spannungskonzentrationen als Startpunkte für die Trajektoriensuche betrachtet werden. Zusätzlich zu den acht Randpunkten der Lüftungsschlitze (abzüglich der 1 mm Außenbahnen) wurde aufgrund der flächig verteilten Spannung und der Symmetrie das Zentrum der Innenseite des Bauteils als weiterer Startpunkt gewählt. In Abbildung 5-16 sind die nach dem *Runge-Kutta*-Verfahren gefundenen Trajektorien zu sehen. Diese sind vorwiegend in die X-Achse ausgerichtet, wobei sie bei den Lüftungsschlitzen eine Kurve in Y-Richtung verfolgen. Alle Trajektorien beginnen den Verlauf konturparallel, driften dann ab Mitte der Lüftungsschlitze ins Bauteilinnere ab (also in positive Z-Richtung), bis sie auf die Bauteilgrenze stoßen. Aufgrund der Spannungssymmetrie sind die gefundenen Trajektorien ausgehend von den um die Y-Mittellinie gespiegelten Startpunkte nahezu identisch (also T_a mit $P_{0,a} \approx T_b$ mit $P_{0,b}$ etc.), deshalb wurde nur die Varianten gewählt mit den Startpunkten, die weiter in X-Richtung liegen. Insgesamt haben die Trajektorien einen glatten Verlauf und entlang der X-Achse sind die Z-Koordinaten der fünf Trajektorien nahezu identisch.

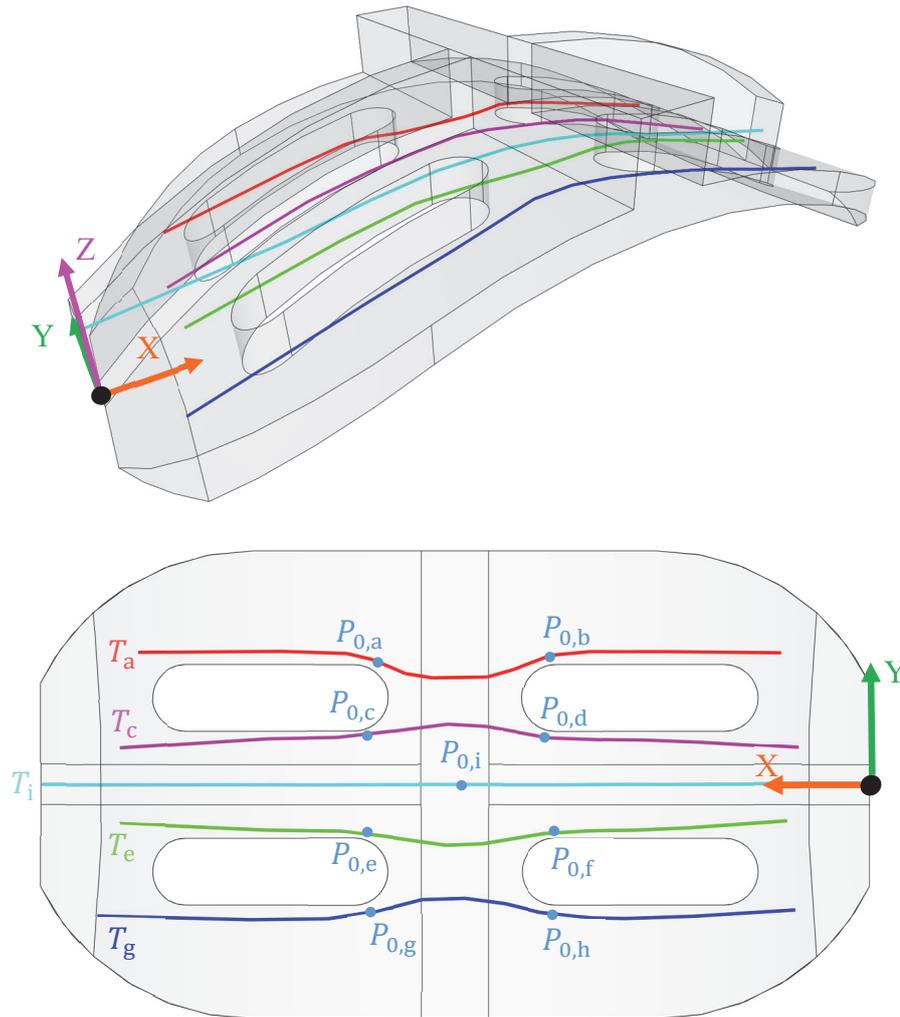


Abbildung 5-16: Hauptspannungstrajektorien T_a bis T_g mit Startpunkten $P_{0,a}$ bis $P_{0,h}$ im Orthesenpad

Ausgehend von den Trajektorien T_a bis T_i wurde eine Subvolumensuche vorgenommen. Hierzu wurde der Suchalgorithmus an den jeweiligen Startpunkten zur Trajektoriensuche begonnen. Das Ergebnis der Subvolumensuche ist in Abbildung 5-17 (oben) dargestellt. Die hier verwendete *direkte Zuweisungsmethode* wurde mit den Parametern $\gamma_a = 1$ und $\gamma_d = 4$ durchgeführt. Die Subvolumen zeigen deutlich auf, dass der Spannungsverlauf im Bauteil um die Trajektorien herum sehr ähnlich ausgerichtet ist. Einzelne Ausbuchtungen sind hierbei erkennbar. Es treten geometrische Hüll-Fehler auf, hervorgerufen durch die Methode *alpha_shape_3D*, die durch einen Abgleich mit der Ursprungsgeometrie eliminiert werden können. Prinzipiell können die gefundenen Subvolumen für die belastungsgerechte Bahnplanung verwendet werden. Es ist jedoch für die Bahnplanung und spätere Prozessausführung vorteilhaft, wenn die Subvolumen durch eine geometrische Vereinfachung bzw. manuelle Nachkonstruktion abgebildet werden.

Deshalb wurden in einem nachgelagerten *Reverse-Engineering*-Schritt die Subvolumen manuell untergliedert (siehe Abbildung 5-17 unten).

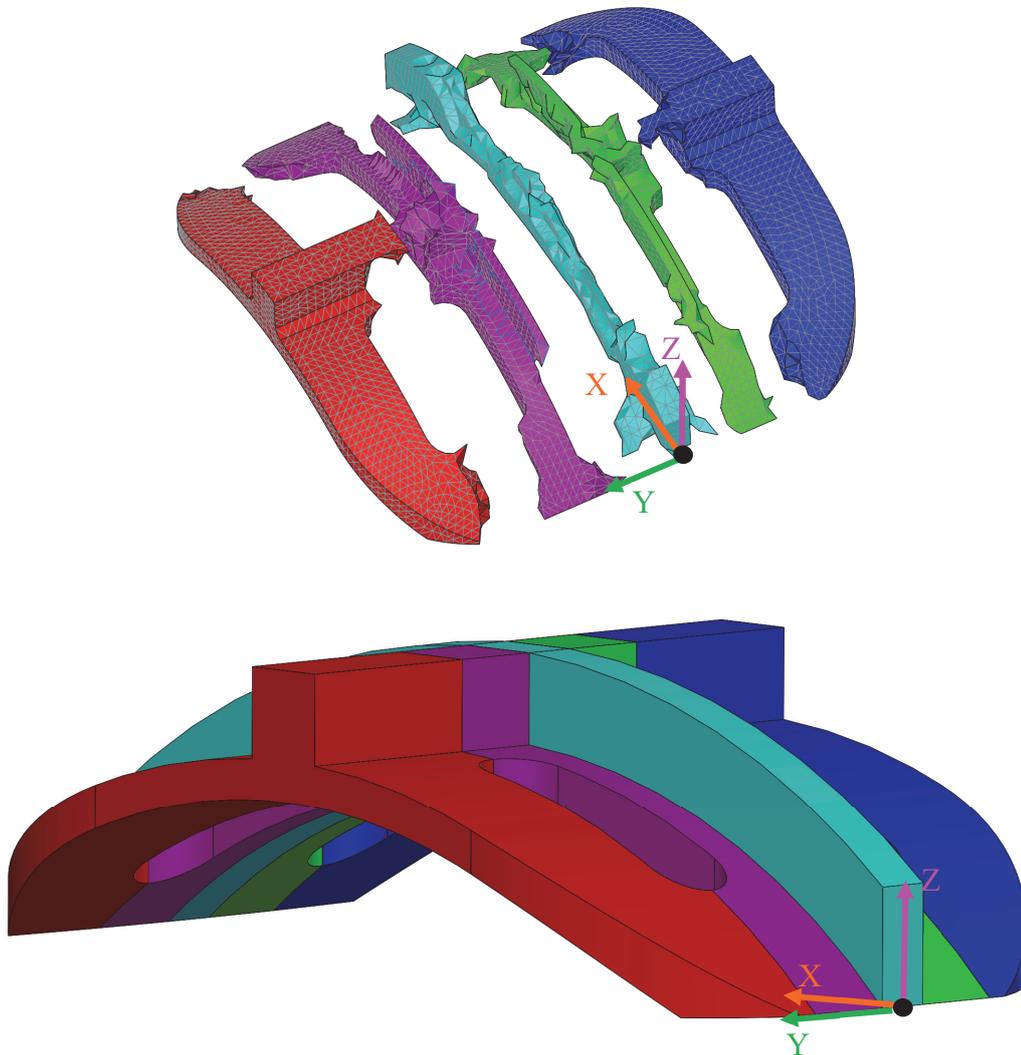


Abbildung 5-17: Subvolumensuche beim Orthesenpad: Lösungsgeometrien aus Suchalgorithmus (oben); manuelle Nachkonstruktion der Subvolumen (unten)

Nachdem die Trajektorien gefunden und die Subvolumen definiert worden sind, wurde die Slicingfläche bestimmt. Da die Trajektorien fast genau in einer um die Y-Achse gekrümmten Fläche liegen, ist es günstig, diese als Slicingfläche zu wählen. Hierzu wurde eine Fläche entlang der Trajektorie T_i in die Y-Achse aufgespannt, in der die anderen Trajektorien im hochbelasteten Bereich ebenfalls liegen. In Abbildung 5-18 ist die Slicingfläche dargestellt. Für die Einzelbahnplanung wurden die Trajektorien T_a , T_c , T_e , T_g auf die Slicingebene projiziert.

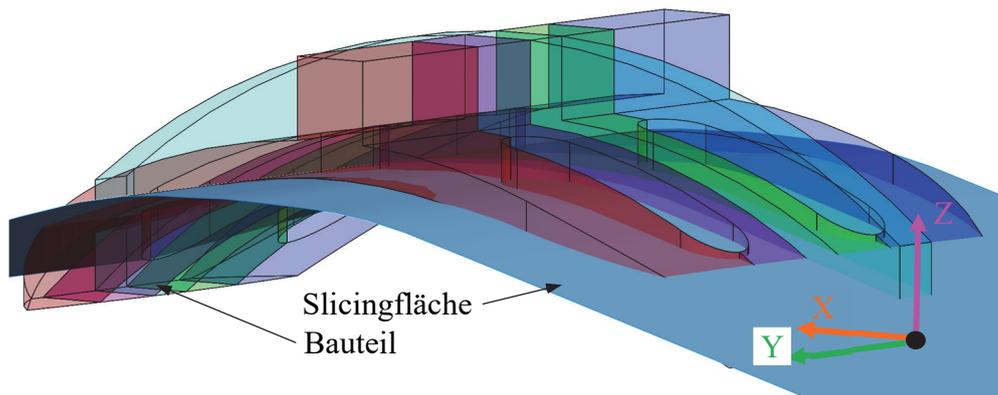


Abbildung 5-18: Slicingfläche für das CL-Slicing beim Orthesenpad

Falls die Trajektorien nicht in einer Fläche liegen würden, könnte das weitere Vorgehen im Bahnplanungsprozess äquivalent verlaufen. Lediglich bei der Sequenzierung der Einzelbahnen wäre die Abfolgeplanung komplexer und Trajektorien müssten teilweise in Einzelsegmente untergliedert und separat gedruckt werden. Im konventionellen Fall wurde die X-Y-Ebene als Slicingfläche festgelegt. Die Bahnausrichtung ist dabei abwechselnd pro Schicht in die Vektoren $[1, 1, 0]^T$ und $[1, -1, 0]^T$ orientiert.

Die Ergebnisse der transversal-isotropen Bauteilsimulation sind bei beiden Varianten ähnlich, sowohl bezüglich Spannungsverlauf als auch Spannungsbetrag. Die maximale Zugspannung beträgt bei der belastungsgerechten Variante 29 MPa und bei der konventionellen Variante 26 MPa. Dies führt nach Gl. 3-2 mit einem Festigkeitsverhältnis von 0,62 zu 0,84 zu einer deutlichen Steigerung der Festigkeit. Hierbei sei jedoch bemerkt, dass der Vergleich nicht wirklich belastbar ist, da bei der konventionellen Variante der Bahnverlauf im Verhältnis zur ersten Hauptspannung nicht exakt mit den Orientierungen der Zugstabuntersuchungen aus Anhang A.1 vergleichbar ist. Die Gesamtverformung bei der belastungsgerechten Variante beträgt 2,01 mm und bei der konventionellen 2,21 mm.

In der Einzelbahnplanung wurden bei beiden Varianten konventionelle Stützstrukturen geplant, die das projizierte Volumen ausgehend von der X-Y-Ebene bis zur Bauteilkontur in Z-Richtung eingenommen haben. Bei der belastungsgerechten Variante wurden alle Subvolumen mit der definierten Slicingfläche unterteilt und die Einzelbahnen in den jeweiligen Subvolumen auf Grundlage der jeweiligen Leitkurve geplant. Die geplanten Bahnen wurden anschließend in ein zusammengesetztes NC-Programm so kombiniert, dass jeweils die Bahnen der fünf Subvolumen in einer Schicht nachfolgend sequenziert werden. Das Bauteilkoordinatensystem wurde

entsprechend dem Koordinatensystem der Druckanlage orientiert. Durch die in Y-Richtung extrudierte Slicingschicht war bei dem Druckvorgang lediglich eine Rotation um die B2-Achse erforderlich, um den Druckkopf normal zur Fläche auszurichten. Im konventionellen Fall erfolgte die Einzelbahnplanung standardmäßig. Die gedruckten Testbauteile sind in Abbildung 5-19 dargestellt.



Abbildung 5-19: Gedrucktes Orthesenpad: belastungsgerechte Bahnplanung (oben); konventionelle Bahnplanung (unten)

Die Druckdauer der belastungsgerechten Variante betrug 7 h 45 min (1 h 55 min Stützstruktur und 5 h 50 min Bauteil) und die der konventionellen Variante 6 h 5 min. Das Kraft-Weg-Diagramm der Biegetests ist in Abbildung 5-20 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die belastungsgerechten Testbauteile fester und steifer waren, als die mit konventioneller Bahnplanung. Bei der belastungsgerechten Variante gab es eine Setzung bei kleiner Last, die auf Unebenheiten an der Auflagefläche in der Bindenaht zwischen den Subvolumen zurückzuführen ist. Bei größer werdender Last gab es hier einen linear-elastischen Bereich und oberhalb von

2 kN beginnt eine plastische Verformung. Die Standardabweichung bei der belastungsgerechten Variante ist bei 7,5 % und damit deutlich größer als bei der konventionellen Variante. Dies könnte, wie bei dem gekrümmten L-Profil, auf die geometrisch weniger exakte Ablage der ersten und hochbeanspruchten Rauhen auf der Stützstruktur zurückzuführen sein. Bei der konventionellen beginnt der plastische Bereich bereits bei 1,6 kN.

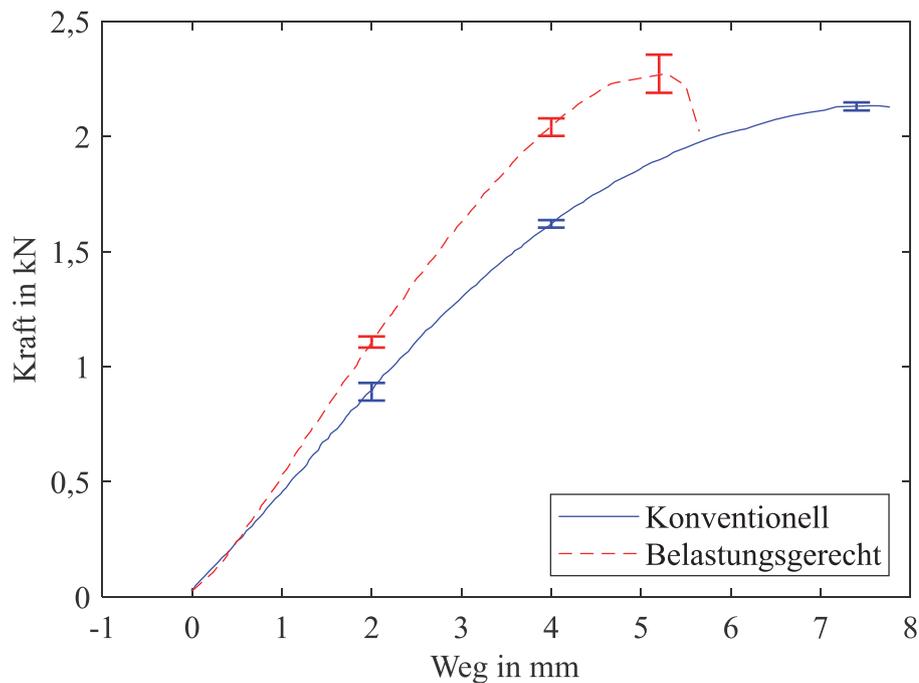


Abbildung 5-20: Kraft-Weg-Diagramm des Testbauteils Orthesenpad

Im Vergleich zur konventionellen ist bei der belastungsgerechten Variante die Festigkeit um 7 % leicht erhöht, jedoch ist die Streckgrenze und die Steifigkeit deutlich größer (siehe Tabelle 5-4). Bei dem Bruchverhalten der Testbauteile in Abbildung 5-21 ist zu erkennen, dass bei der belastungsgerechten Variante der duktile Bereich deutlich größer ist als bei der konventionellen Variante und die Rauhen in Bahnrichtung gebrochen sind. Bei der konventionellen Variante tritt ein Scherbruch und eine Delamination auf.

Tabelle 5-4: Vergleich der Festigkeit und Steifigkeit beim Orthesenpad

	Bauteilfestigkeit (relative Differenz)	Steifigkeit (relative Differenz)
Konventionell	2.133 N	426 N/mm
Belastungsgerecht	2.273 N (+ 7 %)	536 N/mm (+ 26 %)

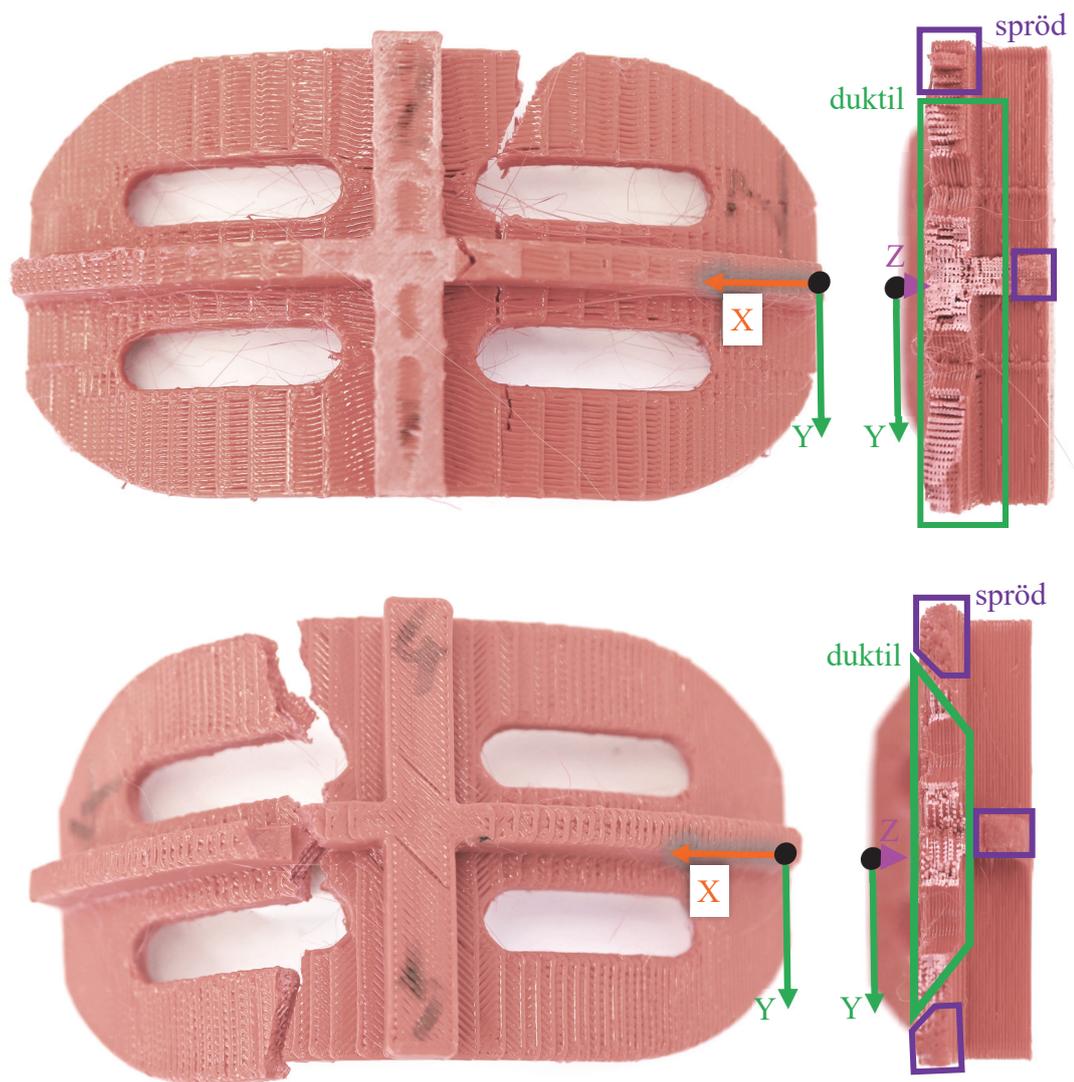


Abbildung 5-21: Bruchverhalten beim Orthesenpad: belastungsgerechte Bahnplanung (oben); konventionell Bahnplanung (unten)

Fazit: Die belastungsgerechte Bahnplanung beim Orthesenpad zeigt auf, wie Bereiche unterschiedlicher Spannungsverläufe anhand einzelner Trajektorien und deren Subvolumen geplant werden können und eine Festigkeitssteigerung im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren von 7 % erzielt werden kann; simulativ wurde eine Verbesserung von 35 % präzidiert.

5.6 Der lumbale Hebel

Der lumbale Hebel ist ein Referenzbeispiel, welches eine komplexe Geometrie verkörpert und aufgrund äußerer Last Bereiche ebene und gekrümmte Spannungszustände besitzt. Ergänzend zeigt dieses Beispiel auf, wie in der belastungsgerechten Bahnplanung zwei unterschiedliche Belastungsfälle kombiniert betrachtet werden können. Diese Belastungsfälle sind wie oben erwähnt Biegungen um die X- und um die Z-Achse.

Der lumbale Hebel wurde zur initialen isotropen Bauteilsimulation mit Hexaedern mit einer maximalen Elementgröße von 2 mm vernetzt (5.501 Knoten und 5.562 Elemente). Dieser ist in den beiden Bohrungen und der Senkung fest gelagert. Beim Belastungsfall 1 greift eine Kraft \bar{F}_1 von 26 N am unteren Steg an (siehe Abbildung 5-22 oben). Die Kraft in positiver Z-Richtung ruft größere Spannungen hervor als in umgekehrter Richtung, weshalb diese Orientierung hier betrachtet wird. Die simulierte erste Hauptspannung zeigt Spannungsspitzen an den Stegen, wobei diese beim schrägen Steg etwas höher sind (bis 31 MPa). Der Spannungsverlauf ist meist glatt und beim geraden Steg nahezu planar und beim schrägen Steg meist konturparallel. Bei Überlast würde ein Riss bei den Stegen beginnen und in negativer Z-Richtung verlaufen. Beim Belastungsfall 2 greift eine Kraft \bar{F}_2 mit 35 N am unteren Steg an (siehe Abbildung 5-22 unten).

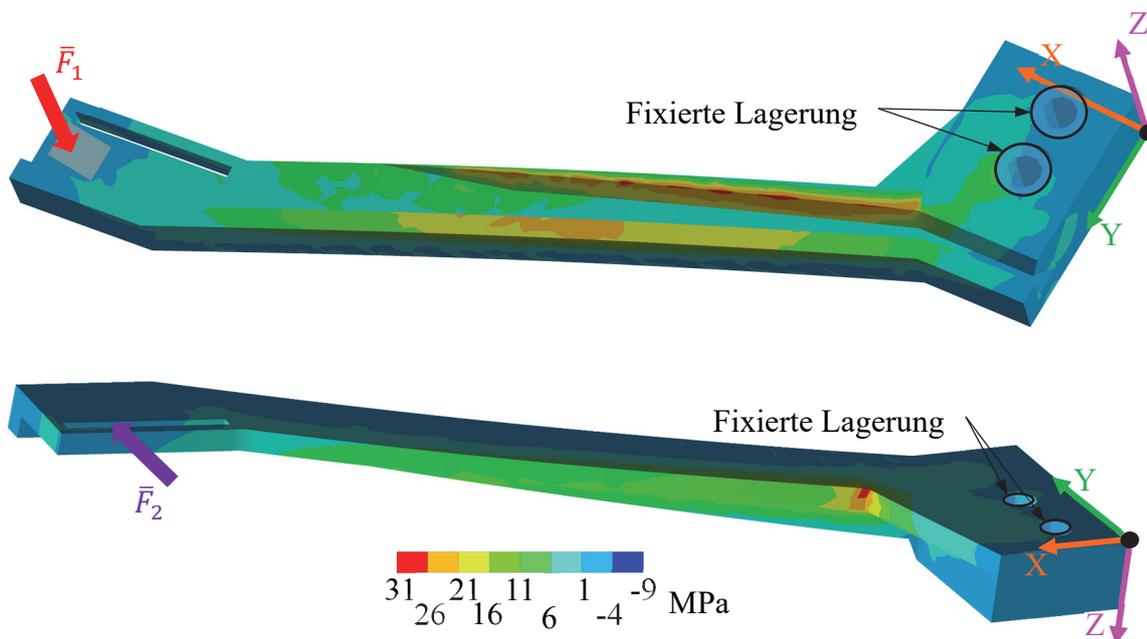


Abbildung 5-22: Isotrope FE-Simulation des lumbalen Hebels: Ergebnis der ersten Hauptspannung beim Belastungsfall 1 (oben) und beim Belastungsfall 2 (unten)

Der hier vorliegende Spannungszustand zeigt eine lokale Spannungsüberhöhung beim Übergang zwischen dem schrägen Steg und dem Kopfteil an einer 120° -geöffneten Kerbe. Der Spannungsgradient ist eben und ähnlich wie beim ebenen L-Profil ausgeprägt, jedoch durch den abgeflachten Winkel etwas geringer. Bei Überhöhung der Last würde das Bauteil in der Kerbe einreißen.

Diese zwei Belastungsfälle haben jeweils einen bzw. zwei Bereiche hoher Beanspruchung mit lokal trajektorien dominierender Spannungsrichtung. Dadurch, dass diese Bereiche getrennt voneinander sind, können zur belastungsgerechten Bahnplanung die Bereiche hoher Beanspruchung getrennt betrachtet und geplant werden. Hierbei kann der Spannungszustand im Bauteil durch Superposition der Spannungen beider Belastungsfälle angenommen werden, wobei nur Spannungen oberhalb eines Schwellwertes verwendet werden. Mit diesem Ansatz wurden anhand der drei Punkte maximaler lokaler Spannung Trajektorien gesucht.

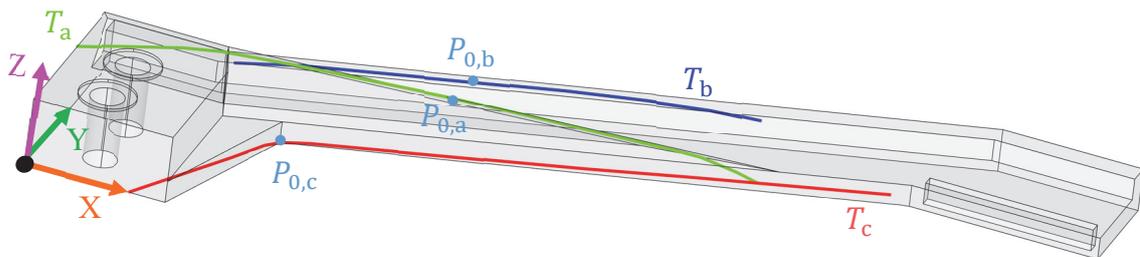


Abbildung 5-23: Hauptspannungstrajektorien T_a bis T_c mit Startpunkten $P_{0,a}$ bis $P_{0,c}$ im luminalen Hebel

Die gefundenen Trajektorien T_a mit $P_{0,a}$ und T_b mit $P_{0,b}$ resultieren aus dem Belastungsfall 1. T_a beginnt am schrägen Steg und verläuft räumlich und im Bereich der hohen Spannungen konturparallel. Bei dieser Trajektorienuche wird die Projektionsmethode *projection_on_surface* eingesetzt, da sonst jeder Interpolationspunkt bei der Suche in positiver X-Richtung abgebrochen werden würde, da sich der nächste Iterationspunkt außerhalb des Bauteils befände. An den Enden des schrägen Stegs verläuft die Trajektorie ins Bauteil, wo die Spannungen gering sind. Die Trajektorie T_b ist nahezu eben, parallel zur X-Y-Ebene. Die aus dem Belastungsfall 2 resultierende Trajektorie T_c verläuft mit einer Wendung um den Startpunkt $P_{0,c}$.

Auf Grundlage der Trajektorien T_a bis T_c wurde eine Subvolumensuche vorgenommen. Hierzu wurde der Suchalgorithmus an den jeweiligen Startpunkten zur Trajektorienuche begonnen. Die ermittelten Subvolumen nach der *direkten Zuweisung* mit den Parametern $\gamma_a = 1$ und $\gamma_d = 4$ sind in Abbildung 5-24 (oben) dargestellt. Die Subvolumen zeigen deutlich auf, dass

der Spannungsverlauf im Bauteil um die Trajektorien herum sehr ähnlich ausgerichtet ist. Bei bestimmten niederbelasteten Bereichen kann eine andere Aufteilung der Geometrie erfolgen, ohne dass die Bauteilfestigkeit gegenüber den beiden Belastungsfällen sinkt. Deshalb wurde auch hierbei zur besseren Prozessführung eine geometrische Vereinfachung der Subvolumen durch eine manuelle Nachkonstruktion vorgenommen, die in Abbildung 5-17 (unten) zu sehen ist. Die Sequenzierung der Subvolumen für die Einzelbahnplanung ist dergestalt, dass die roten und blauen Subvolumen schichtweise parallel und anschließend das grüne Subvolumen darauf gedruckt werden können.

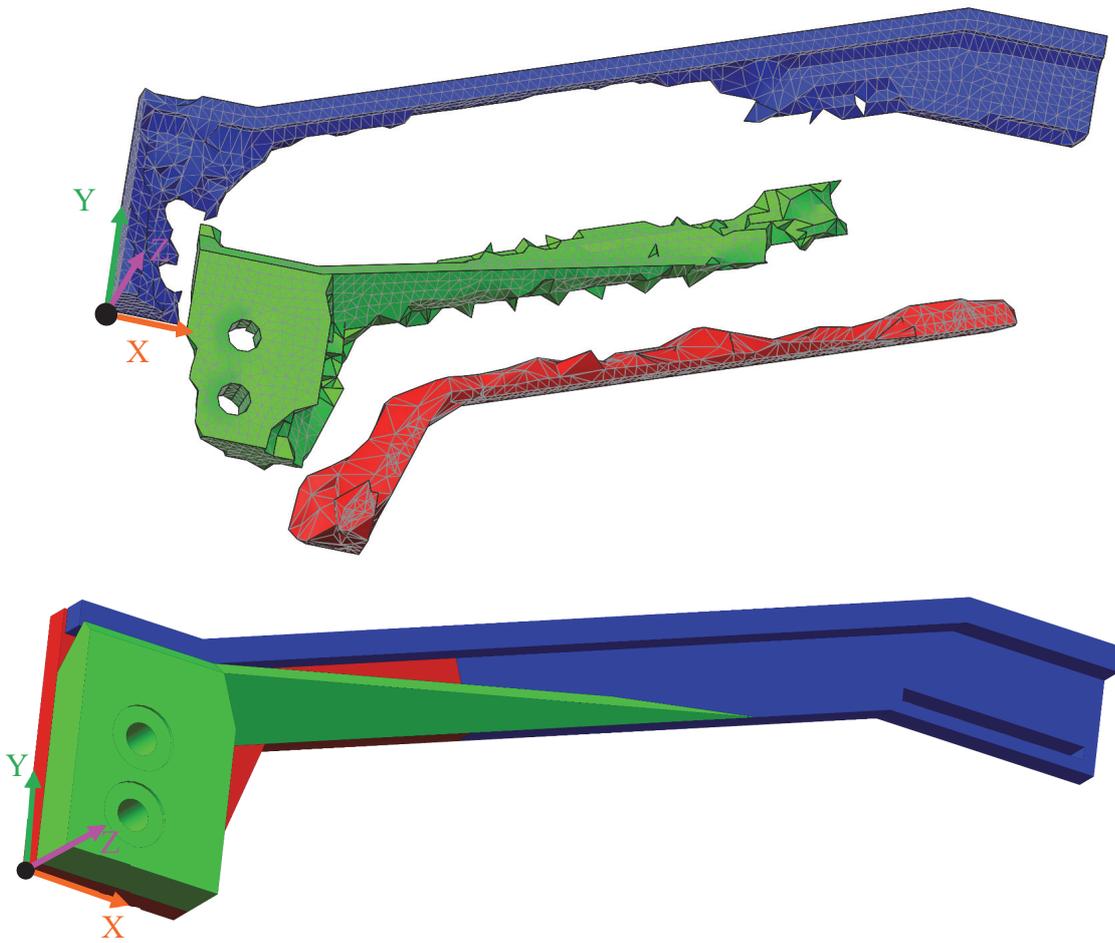


Abbildung 5-24: Subvolumensuche beim lumbalen Hebel: Ergebnisse aus Suchalgorithmus (oben); Nachkonstruktion der Subvolumen (unten)

Aufgrund des ebenen Verlaufs wurde die X-Y-Ebene als Slicingfläche für die Subvolumen mit den zugehörigen Trajektorien T_b und T_c gewählt. Bei dem Subvolumen mit Trajektorie T_a wurde die Slicingfläche durch die Trajektorie T_a und die Y-Achse aufgespannt. Im konventionellen Fall wurde die X-Y-Ebene als Slicingfläche festgelegt. Die Bahnausrichtung ist dabei abwechselnd pro Schicht in die Vektoren $[1, 1, 0]^T$ und $[1, -1, 0]^T$ orientiert.

Bei der transversal-isotropen Bauteilsimulation des Belastungsfalls 1 mit 20 N ist der Bereich maximaler Zugspannung bei beiden Varianten am oberen Ende des schrägen Stegs. Bei belastungsgerechter Bahnplanung beträgt dort die erste Hauptspannung 31 MPa und bei der konventionellen Variante 30 MPa. Das bedeutet nach Gl. 3-2 ein approximiertes Festigkeitsverhältnis von 0,66 zu 0,97. Die Gesamtverformung bei der belastungsgerechten Variante beträgt 14,8 mm und bei der konventionellen 17,1 mm. Beim Belastungsfall 2 mit 28 N Last ist der Spannungsverlauf beider Varianten ähnlich zur isotropen Simulation. Die maximale Spannung in $P_{0,c}$ beträgt bei der belastungsgerechten Variante 24 MPa und bei der konventionellen Variante 28 MPa. Hier gibt es eine ähnliche Festigkeitssteigerung nach Gl. 3-2 von 0,51 zu 0,90. Die Gesamtverformung bei der belastungsgerechten Variante beträgt 5,16 mm und bei der konventionellen 5,94 mm.

Für die belastungsgerechte Variante ist die Einzelbahnplanung für jedes Subvolumen vorgenommen worden. Hierbei wurde das NC-Programm so assembliert, dass zunächst die ebenen Subvolumen nach T_b und T_c im Schichtwechsel vorkommen und im Anschluss das Subvolumen nach T_a 5-achsig darauf gedruckt worden ist. Im konventionellen Fall erfolgte die Einzelbahnplanung standardmäßig. Die Druckdauer der konventionellen Variante betrug 2 h 10 min und die der belastungsgerechten Variante 2 h 30 min.

In Abbildung 5-25 ist das Kraft-Weg-Diagramm der Biegetests zu sehen. Die belastungsgerechten Testbauteile sind fester und steifer als die mit konventioneller Bahnplanung und eine plastische Verformung ist fast nicht zu erkennen, wohingegen das Bauteil der konventionellen Variante ab 45 N fließt. Aufgrund der sich ändernden Testbedingungen, hervorgerufen durch Biegedrillknicken, ist die Standardabweichung bei den konventionellen Testbauteilen recht hoch mit 15 %. Im Gegensatz dazu hat die Testreihe der steiferen belastungsgerechten Variante eine geringere Standardabweichung mit 5 %.

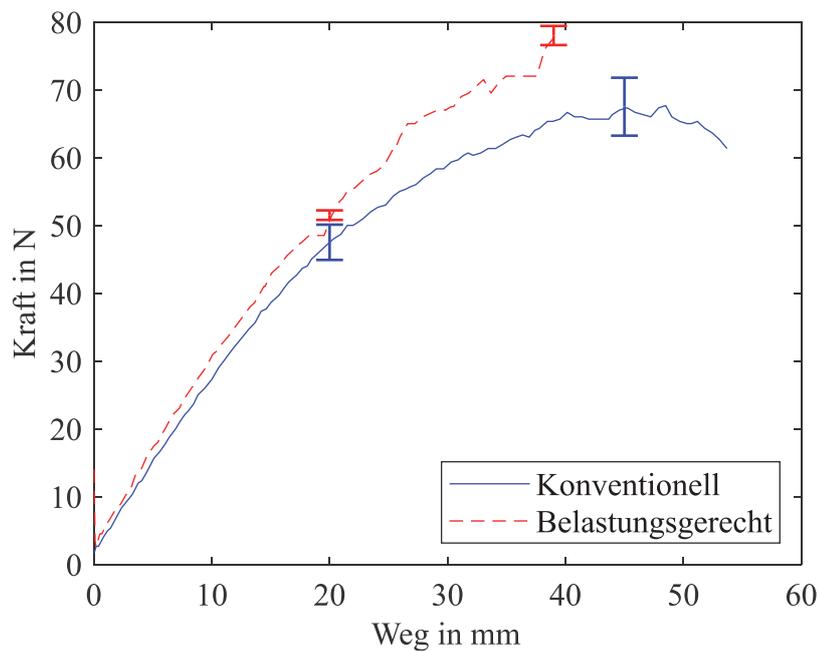


Abbildung 5-25: Kraft-Weg-Diagramm des Testbauteils lumbaler Hebel mit Biegebelastung in Z-Richtung

Im Vergleich zur konventionellen ist bei der belastungsgerechten Variante die Festigkeit um 15 % erhöht (siehe Tabelle 5-5).

Tabelle 5-5: Vergleich der Festigkeit und Steifigkeit beim lumbalen Hebel

	Bauteilfestigkeit (relative Differenz)	Steifigkeit (relative Differenz)
Konventionell	68 N	25 N/mm
Belastungsgerecht	78 N (+ 15 %)	28 N/mm (+ 12 %)

Am Bruchverhalten der Testbauteile in Abbildung 5-26 ist zu erkennen, dass der Ort der Bruchstelle bei beiden Varianten gleich ist und an der zu erwarteten Stelle. Bei beiden Varianten kommt es zum Duktilbruch und sprödem Restbruch. Auf der Bruchfläche ist zu erkennen, dass kaum Delamination auftritt, sondern die Raupen entlang ihrer Orientierung brechen.

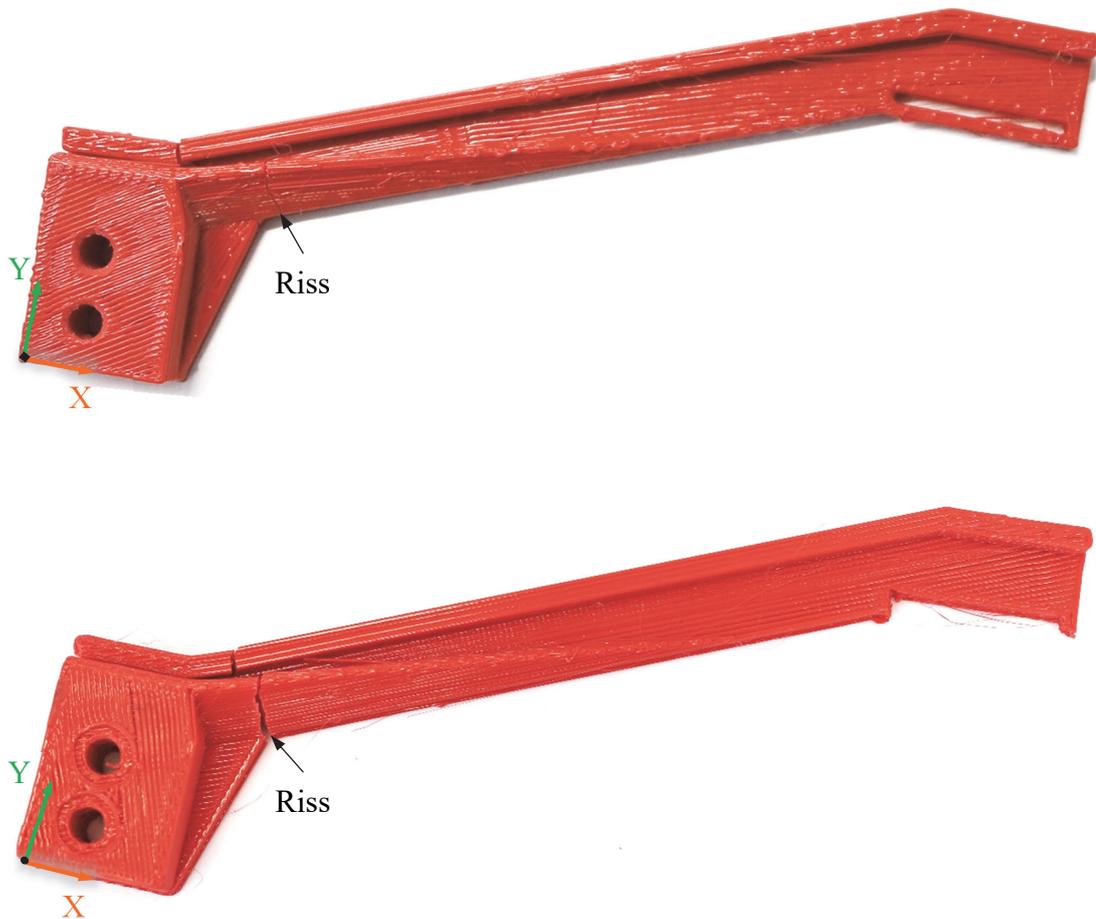


Abbildung 5-26: Bruchverhalten beim lumbalen Hebel: belastungsgerechte Bahnplanung (oben); konventionelle Bahnplanung (unten)

Der Belastungsfall 2 wurde ebenfalls untersucht, es konnten jedoch keine aussagekräftigen Biegetests durchgeführt werden, da sich der Belastungsfall während der Prüfung durch Biegedrillknicken zu stark änderte. Die Erkenntnis, die jedoch daraus gezogen werden konnte, war, dass die belastungsgerechte Variante steifer war und keines der Bauteile bei maximaler Last gebrochen ist. Testbauteile der konventionellen Variante sind bei geringerer Last gebrochen.

Fazit: Anhand des lumbalen Hebels konnte untersucht werden, inwieweit die belastungsgerechte Bahnplanung auf mehrere Belastungsfälle in Kombination anwendbar ist. Im Falle, dass die Spannungsverläufe, die aus den verschiedenen Belastungsfällen resultieren, unterschiedliche Bereiche mit hoher Beanspruchung haben, kann die Methode eine deutliche Steigerung der Festigkeit erzielen (hier 15 %); simulativ wurde eine Verbesserung von 47 % prädictiert.

5.7 Kritische Reflexion der Methode und wissenschaftstheoretische Einbettung

Die Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren wurde anhand von vier Referenzbauteilen experimentell und numerisch validiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch diese Methode Bauteile hergestellt werden können, die hinsichtlich definierter Belastungsfälle eine höhere Festigkeit aufweisen, als im konventionellen Schmelzschichtverfahren erzielbar wären. Bei den Referenzbeispielen ist eine durchschnittliche Steigerung der Festigkeit von 12,5 % gegenüber mittels konventioneller Bahnplanung gefertigter Bauteile experimentell nachgewiesen worden. Bei der Fertigung beider Varianten waren hierbei gleiche Prozessbedingungen gegeben. Eine entscheidende Erkenntnis aus den Versuchen ist, dass sich die Bauteilfestigkeit nicht unabhängig von lokalen und globalen Steifigkeitsänderungen steigern lässt, abgesehen von bestimmten Gelegen. Die Steifigkeitssteigerung bei den Referenzbauteilen betrug rund 15 %. Der sich durch die durchschnittliche Steifigkeitssteigerung ändernde Spannungszustand kann lokale Spannungsspitzen intensivieren. Dafür sieht die Methode vor, dass ein Kreuzgelege verwendet wird, welches ein Kompromiss aus Kraftverteilung und Festigkeitssteigerung erzielt. Durch die Methode können räumliche Spannungsverläufe und komplexe Bauteile verarbeitet werden. Die implementierten Teilfunktionen wie Hauptspannungstrajektorien- und Subvolumenermittlung sind für diese Anwendung performant und robust gelöst. Insbesondere die Trajektorienermittlung zeigt valide Ergebnisse in komplexen räumlichen Spannungsfeldern. Die Subvolumenfindung und deren geometrische Darstellung können bei einfachen Geometrien und einfachen Spannungsverläufen direkt als CAD-Geometrie für die Einzelbahnplanung verwendet werden, jedoch ist bei komplexeren Fällen eine manuelle Nachkonstruktion oder Optimierung der Suchalgorithmen notwendig. Das mechanische Verhalten von gedruckten Bauteilen kann durch die transversal-isotrope Simulation untersucht werden. Hierbei können unterschiedliche Spannungsverläufe, die durch die speziellen Raupenorientierungen beeinflusst werden, prognostiziert werden, jedoch konnte mit einer linear-elastischen Modellierung die quantitative Festigkeitssteigerung nicht zuverlässig bestimmt werden. Bei räumlich gekrümmten Spannungsverläufen wird bei dieser belastungsgerechten Bahnplanung eine Mehrachsbewegung notwendig, die zu einer Vergrößerung der Druckzeit führt, die die Produktivität der Methode einschränkt. Evident sind hierbei die Notwendigkeit einer Mehrachskinematik und mehrachsigen Steuerungslösungen.

Die Grenzen der Methode liegen in der technischen Nutzbarkeit und in den damit zusammenhängenden Charakteristiken von Spannungsverläufen in Bauteilen. In der aktuellen Implementierung ist es notwendig, dass der Bediener der Bahnplanung die Auswahl der Startpunkte hinsichtlich Anzahl und Position für die Hauptspannungstrajektorien- und Subvolumenermittlung manuell trifft. Dieser Schritt könnte durch Vergleichsalgorithmen automatisiert werden. Ein weiteres Hindernis zur vollständigen Automatisierung der Methode stellt der manuelle Eingriff bei der Nachkonstruktion von Subvolumen dar. Bei der aktuellen Implementierung kann es teilweise zu Ausbuchtungen kommen, die ungünstige Auswirkungen auf die Fertigung haben können. Insbesondere kleine, unglatte Konturverläufe können in der Einzelbahnplanung zu kurzen Bahnsegmenten führen, die hinsichtlich Bauteilfestigkeit ungünstig sind. Um geeignete Subvolumenergebnisse erzielen zu können, kann eine manuelle Parameteroptimierung angesetzt werden. Im Hinblick auf mechanische Eigenschaften kann die Methode nicht auf Bauteile, die einen hydrostatischen Spannungszustand aufweisen, angewandt werden, da hierbei eine Optimierung keine Verbesserung bewirkt würde. Des Weiteren kann bei Spannungswirbeln eine einheitliche Ausrichtung der Raupen nicht zur Festigkeitssteigerung führen. Symmetrische Spannungsverläufe sowie Redundanzen bei der Hauptspannungstrajektorienermittlung können zu Problemen führen, wie in (Voelkl et al. 2020) erläutert. Hierbei ist ebenfalls eine manuelle Vorgabe notwendig. Zusammenfassend kann die Methode als halb-automatisches Vorgehensmodell für die effektive Steigerung der Festigkeit von Bauteilen angesehen werden.

Um das Potenzial dieser Methode weiter zu steigern, sind Werkstoffe mit einer ausgeprägteren Anisotropie (hohes $\sigma_{t,f}/\sigma_{t,m}$ -Verhältnis) von Interesse. Dafür wurde im Rahmen dieser Arbeit das ebene L-Profil auch aus einem Filament gedruckt, welches Kohlenstoffkurzfasern enthält. Die hierbei ermittelten Ergebnisse sind bei einer Festigkeitssteigerung von 20 % zwar besser als beim reinen PLA-Werkstoff, jedoch ist die absolute Festigkeit geringer. Dies liegt an der unzureichenden Bindung zwischen Fasern und Matrix. Ein deutlich größeres Potenzial besteht beim Drucken von endlosfaserverstärktem Kunststoff. Für diesen Prozess ist die beschriebene Methode grundsätzlich einsetzbar, jedoch muss eine verfahrenstechnische Lösung gefunden werden, wie die Faser zu Beginn des Druckens in der bereits gedruckten Struktur befestigt werden kann, um eine nötige Vorspannung aufzubringen und wie zwischen den Bahnsequenzen ein Faserdurchtrennung realisiert werden kann. Ergänzend könnte untersucht werden, inwieweit Bereiche eines Bauteils, die sehr gering beansprucht sind, mit einer zusätzlichen Topologieoptimierung leichter und ressourceneffizienter hergestellt werden können.

In diesem Abschnitt wird eine wissenschaftstheoretische Betrachtung dieser Arbeit vorgenommen. Die Wissenschaftstheorie, die ein Teilgebiet der Philosophie ist, versucht das Vorgehen zur Gewinnung neuer Erkenntnisse in der Wissenschaft zu beschreiben und zu klassifizieren. Grundlegend für diese Arbeit ist die Hypothese, dass Bauteile durch eine belastungsgerechte Bahnplanung im Schmelzschichtverfahren mit höherer Festigkeit hergestellt werden können.

Die vorliegende Arbeit und die darin diskutierte Hypothese werden aus zwei grundlegenden wissenschaftstheoretischen Perspektiven betrachtet: dem logischen Empirismus, wie in (Blumberg et al. 1931) beschrieben, und dem kritischen Rationalismus nach Karl Popper (Keuth 2007). Der logische Empirismus strebt nach Erkenntniserweiterungen und versucht aus Inhalten von Prämissen eine Konklusion zu induzieren. Durch die Beobachtung von einzelnen Spezialfällen und eine Verifikation von Hypothesen werden Theorien abgeleitet. Diese sind jedoch nicht erosionsbeständig, können also durch neue Prämissen ihre Gültigkeit verlieren. Im Gegensatz dazu werden beim kritischen Rationalismus wissenschaftliche Hypothesen nicht durch Beobachtungen begründet, sondern können lediglich durch sie falsifiziert werden. Das bedeutet, dass nach Popper Theorien oder Modelle nur so lange Bestand haben, bis ihre Unwahrheit bewiesen worden ist. Diese beiden dialektischen Pole lassen keinen Raum für eine Synthese, jedoch können wissenschaftstheoretische Fragen in beiden Theorien diskutiert werden. Dabei ist grundsätzlich die wissenschaftstheoretische Selbstdefinition des ingenieurwissenschaftlichen Handelns nicht eindeutig geklärt, denn das Streben nach technologischem Fortschritt erwirkt meist Lösungen für bestimmte Anwendungsfälle und zwingt sich nicht in diese Theorien.

Die in dieser Arbeit beschriebene Methode stützt sich auf empirische Untersuchungen sowie auf die Systemeigenschaften vorhandener Technologien. Nach dem logischen Empirismus verfolgt diese wissenschaftliche Arbeit eine Anwendung von induktiv mehrfach bestätigten Hypothesen für eine neue Methode zur belastungsgerechten Herstellung von Bauteilen durch das Schmelzschichtverfahren. Im Teil der Validierung wurde eine Verifikation der Methode und damit ihre Sinnhaftigkeit durch empirische Untersuchungen und logische Argumentationen nachgewiesen. Da hierbei lediglich eine Auswahl von Referenzbauteilen und Spannungszuständen betrachtet worden ist, kann bei dieser Verifikation der Methode jedoch nicht von einem erosionsbeständigen Nachweis ausgegangen werden. Durch eine Induktion wird aktuell die Hypothese der Festigkeitssteigerung angenommen. Nicht ausgeschlossen ist die Möglichkeit einer Falsifikation der Methode für beliebige Anwendungsfälle. Zukünftige Beobachtungen und Untersuchungen können aber auch zu Ergänzungen der Methode führen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der grundlegenden Fragestellung, wie Bauteile im Schmelzschichtverfahren gedruckt werden können, die eine höhere Belastbarkeit aufweisen, wurde in dieser Arbeit eine Methode zur belastungsgerechten mehrachsigen Bahnplanung untersucht. Die Forschungsfrage stützt sich auf die Tatsache, dass gedruckte Bauteile höher auf Zug beansprucht werden können in die Richtung, in der die Extrusionsraupen orientiert sind, als orthogonal dazu. Bei Zugstäben aus gedrucktem PLA wurden dabei eine Differenz der Zugfestigkeit von 48 % ermittelt. Diese anisotropen Eigenschaften wurden bereits mehrfach bei unterschiedlichen Werkstoffen im Schmelzschichtverfahren nachgewiesen und sind auf thermische-induzierte Vorgänge im Werkstoff und Lufteinschlüsse zurückzuführen, die durch den Druckprozess beeinflusst werden. In dieser Arbeit wurde untersucht, inwieweit eine methodische Vorgehensweise zur Ausrichtung der Bahnen und somit der höherfesten Beanspruchungsrichtung realisiert werden kann unter Verwendung der verfahrenstechnischen Freiheiten des mehrachsigen Schmelzschichtverfahrens.

Um diese Forschungsfrage einzubetten, wurde der Stand der Technik recherchiert. Es wurde analysiert, dass für das mehrachsige Schmelzschichtverfahren bereits diverse Hardwarelösungen und Bahnplanungsverfahren entwickelt worden sind. Jedoch existiert noch keine Prozesskette für die effiziente Verwendung der verfahrenstechnischen Freiheiten, mit dem Ziel unter Betrachtung definierter Belastungsfälle Bauteile mit höherer Festigkeit herstellen zu können. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt und untersucht, die eine belastungsgerechte Bahnplanung ermöglicht, sowohl im Hinblick auf anisotrope Festigkeiten wie Steifigkeiten des gedruckten Werkstoffs, auf Anwendbarkeit in Bezug auf komplexe Bauteilgeometrien und räumliche Spannungsverläufe sowie auf eine lokale Spannungsmaxima-orientierte Festigkeitssteigerung. Die Methode basiert auf der Untergliederung einer CAD-Geometrie in einzelne Subvolumen, deren jeweilige Struktur durch einen ähnlichen Spannungsverlauf gekennzeichnet werden können, der mittels einer Hauptspannungstrajektorie als Leitkurve beschrieben werden kann. Um eine Spannungsanalyse durchführen zu können, ist es erforderlich, das Bauteil und die betrachteten Belastungsfälle mittels eines initialen statisch-mechanischen FE-Modells zu simulieren. Darauf aufbauend werden in Bereichen, in denen die erste Hauptspannung extrem ist, also dort wo hohe Zugspannungen auftreten, Hauptspannungstrajektorien ermittelt, die Ausgangspunkt für ein Bauteilversagen darstellen. Es ist daher notwendig,

dass entlang dieser Trajektorien die Vorzugsrichtung des gedruckten Werkstoffs verläuft, die durch den Bahnverlauf im Prozess vorgegeben wird. Zur Ermittlung der Hauptspannungstrajektorien wurden das *Runge-Kutta*- und ein *Beyer*-Verfahren aufgestellt, implementiert und parametrisiert. Dabei wurde der Vorteil des *Runge-Kutta*-Verfahrens für dieses Vorgehen deutlich. Für die Ermittlung der Subvolumen wurden ebenfalls zwei Methoden aufgestellt und bewertet. Diese Spannungsanalyseinformationen und geometrischen Vorgaben sowie die Definition einer Slicingfläche werden für die Einzelbahnplanung vorbereitet. Diese baut auf etablierten *Curved-Layer-Slicing*methoden auf und übergibt die Bahninformationen an den Postprozessor, welcher daraus ein prozessorientiertes NC-Programm ableitet.

Um diese generische Methode validieren zu können, wurde eine 8-achsige Sonderkinematik mit einem speziellen Druckkopf ausgerüstet. Damit wurden Bauteile hergestellt, welche mechanisch geprüft worden sind. Als Referenzbauteile wurden zwei akademische Bauteile sowie zwei Bauteile einer personalisierten Skolioseorthese ausgewählt. Letztere stehen im Fokus dieser Anwendung mit geringer Losgröße, da hierbei die Anforderung an eine geometrische Freiheit bei der Bauteilherstellung kombiniert mit einer Festigkeitsanforderung besteht. Durch die Methode konnte eine durchschnittliche Festigkeitssteigerung von 12,5 % bei den vier Referenzbauteilen nachgewiesen werden. Eine wichtige Erkenntnis ist dabei, dass die maximale Festigkeitssteigerung von 48 % sich nicht direkt auf beliebige Bauteile und Spannungsverläufe übertragen lässt. Dies ist zum einen darin begründet, dass die konventionelle Bahnplanung meist kein Festigkeitsminimum erzielt und dass die maximale Festigkeit nur da genutzt werden kann, wo sich die damit verbundene höhere Steifigkeit nicht maßgeblich auf den Spannungsverlauf auswirkt. Ergänzend zur mechanischen Validierung wurde zur Prognose eine linear-elastische anisotrope Bauteilsimulation entsprechend der Subvolumen und der Leitkurvenorientierung der Bauteile vorgenommen. Diese konnte jedoch nur qualitativ ein Bild darüber abgeben, welche Spannungsänderungen durch die Belastungsorientierung der Bahnen resultieren.

Die entwickelte Methode kann nun zur Festigkeitssteigerung von Bauteilen eingesetzt werden, wodurch die Einsatzmöglichkeiten des mehrachsigen Schmelzschichtverfahrens erweitert werden. Innerhalb der Methode können weitere Ansätze zur Subvolumenermittlung untersucht werden, die eine vollständige Automatisierung erlauben. Der nächste Schritt dabei wäre die Integration dieser Funktionalität in ein professionelles CAM-Tool mit FEM-Schnittstelle. Die Effektivität der Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung kann durch eine zukünftige Weiterentwicklung des Drucks mit integrierten Endlosfasern erheblich gesteigert werden.

7 Anhang

A.1 Zugversuche mit verschiedenen Orientierungen

Zur Untersuchung des Einflusses von Raupenorientierungen in verschiedene Richtungen und zur Untersuchung von Gelegen wurden Zugstäbe des Typs 1A nach Norm (Norm DIN EN ISO 527-2) aus PLA hergestellt und geprüft. Das ausgewertete Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist unten dargestellt. Als Gelege wird eine Bahnausrichtung bezeichnet, bei der Schichten in abwechselnder Weise in orthogonal zueinander liegenden Richtungen gedruckt werden. Bspw. bedeutet 0° - 90° -Gelege, dass die Bahnen jeder Schicht mit gerader Nummer in Zugrichtung und mit ungerader Nummer orthogonal zur Zugrichtung orientiert sind.

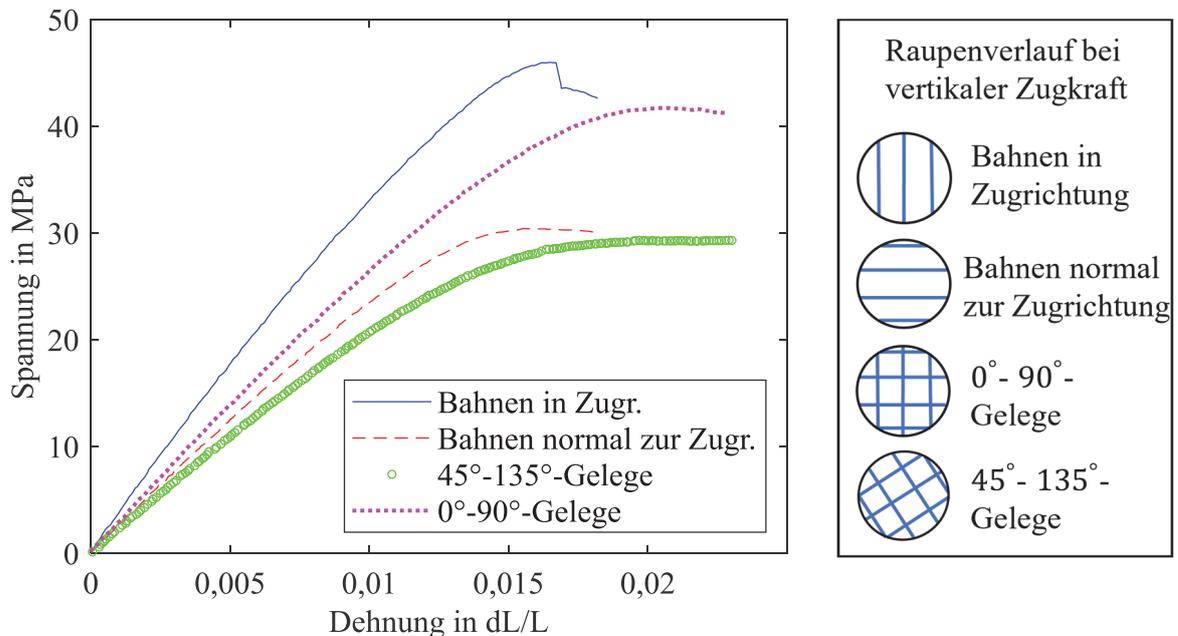


Abbildung A.1: Spannungs-Dehnungsdiagramm von Zugproben unterschiedlicher Bahnausrichtung mit PLA

Tabelle A.1: Ermittelte mechanische Eigenschaften der Zugprüfkörper

	Bahnen in Zugrichtung	Bahnen normal zur Zugrichtung	0° - 90° -Gelege	45° - 135° -Gelege
Zugfestigkeit	46 MPa	31 MPa	42 MPa	29 MPa
E-Modul	3.067 MPa	2.133 MPa	2.636 MPa	2.069 MPa

A.2 Kompressionsversuche

Um die Druckfestigkeit von gedruckten Bauteilen zu messen, wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 30 mm aus PLA hergestellt und geprüft. In der unteren Abbildung ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass es aufgrund der nicht glatten Oberfläche zu initialen Setzungen kommt. Die Druckfestigkeit beträgt 64 MPa bei einem E-Modul von etwa 2.000 MPa. Die Druckfestigkeit ist somit deutlich höher als die Zugfestigkeit.

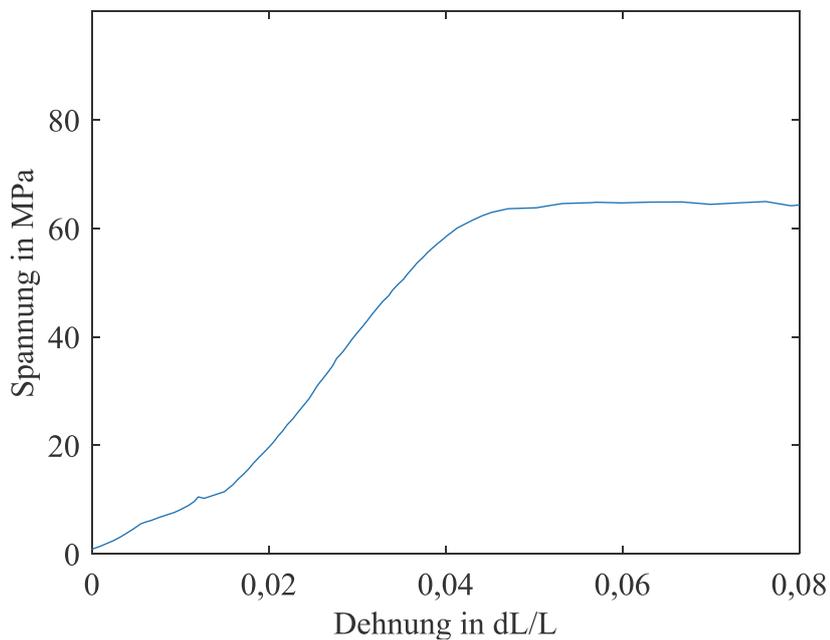


Abbildung A.2: Kompressionsversuche mit gedrucktem Würfel aus PLA

A.3 Extruder mit Endlosfaserintegration

Der entwickelte Extruder mit Endlosfaserintegration besteht aus einer Extrudereinheit mit Hohlwellenschnecke, Hohlgetriebe und Hohlwellen-Schrittmotor. Durch den Granulattrichter wird Material der Extruderschnecke zugeführt. Im Heizbereich wird das Granulat auf Schmelztemperatur erhitzt, bevor die Schmelze das Endlosfasergarn ummantelt und der Faserverbund den Extruder durch die Düse verlässt. Der Faserspanner erzeugt eine Vorspannung der Faser. Der Zuführwinkel des Extrudats zur Druckebene beträgt 25° , um Faserbruch zu vermeiden. Der Düsenauslass liegt in der Rotationsachse um Ausgleichsbewegungen zu vermeiden.

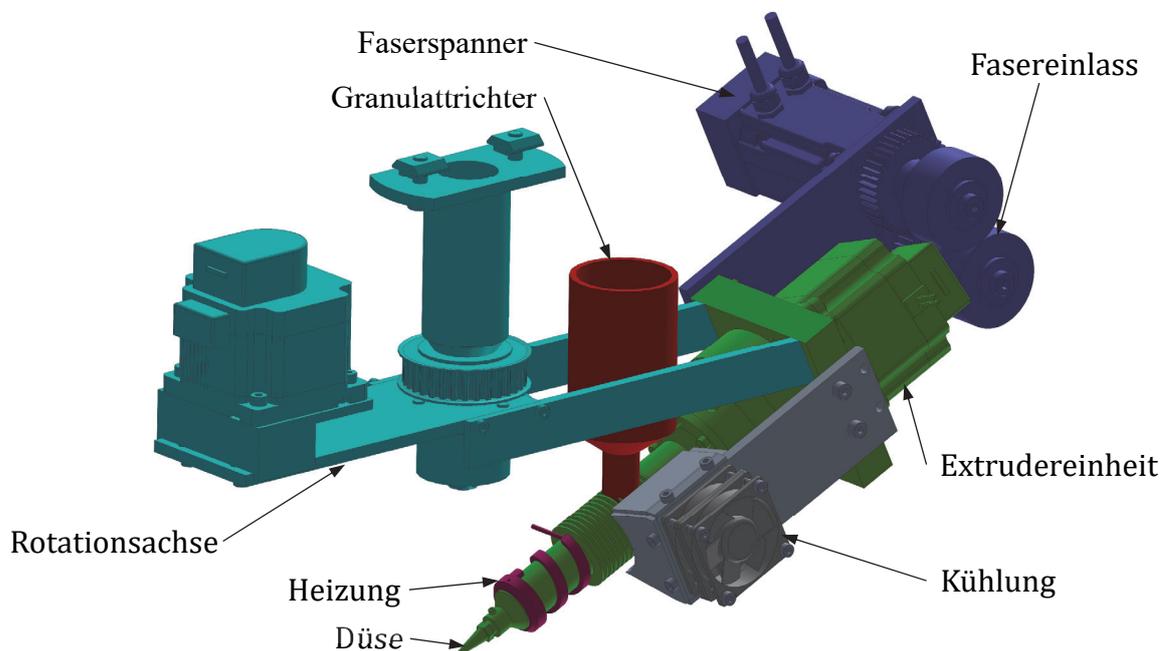


Abbildung A.3: CAD-Modell des Extruders mit Endlosfaserintegration

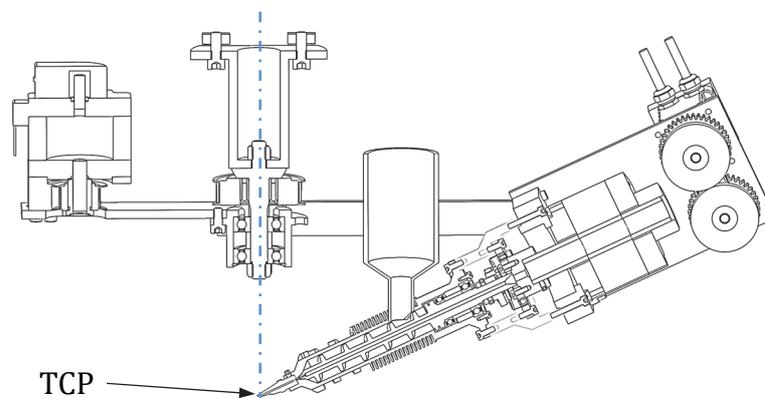


Abbildung A.4: Schnittdarstellung des Extruders mit Endlosfaserintegration

Literaturverzeichnis

- Adams et al. 2018** Adams, Davis; Turner, Cameron J., 2018. An implicit slicing method for additive manufacturing processes. *Virtual and Physical Prototyping* **13** (1), S. 2–7
DOI: 10.1080/17452759.2017.1392684
- Ahn et al. 2002** Ahn, Sung - Hoon; Montero, Michael; Odell, Dan; Roundy, Shad; Wright, Paul K., 2002. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal* **8** (4), S. 248–257
DOI: 10.1108/13552540210441166
- Alafaghani et al. 2017** Alafaghani, Ala'aldin; Qattawi, Ala; Alrawi, Buraaq; Guzman, Arturo, 2017. Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. *Procedia Manufacturing* **10**, S. 791–803
DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.079
- Allaire et al. 2019** Allaire, Grégoire; Cavallina, Lorenzo; Miyake, Nobuhito; Oka, Tomoyuki; Yachimura, Toshiaki, 2019. The Homogenization Method for Topology Optimization of Structures: Old and New. *Interdisciplinary Information Sciences* **25** (2), S. 75–146
DOI: 10.4036/iis.2019.B.01
- Avdeev et al. 2019** Avdeev, Artem; Shvets, Andrey; Gushchin, Ilya; Torubarov, Ivan; Drobotov, Aleksey; Makarov, Aleksey; Plotnikov, Aleksander; Serdobintsev, Yuri, 2019. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition. *Machines* **7** (3), S. 57
DOI: 10.3390/machines7030057
- Barber et al. 1996** Barber, C. Bradford; Dobkin, David P; Huhdanpaa, Hannu, 1996. The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software* **22** (4), S. 469–483
DOI: 10.1145/235815.235821
- Bellini et al. 2004** Bellini, Anna; Güçeri, Selçuk; Bertoldi, Maurizio, 2004. Liquefier Dynamics in Fused Deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* **126** (2), S. 237–246
DOI: 10.1115/1.1688377

- Bendsøe et al. 2004** Bendsøe, Martin P; Sigmund, Ole, 2004.
Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications.
Second Edition, Corrected Printing.
Berlin, Heidelberg: Springer.
Springer eBook Collection.
ISBN 9783662050866
DOI: 10.1007/978-3-662-05086-6
- Berger et al. 2013** Berger, Uwe; Hartmann, Andreas; Schmid, Dietmar, 2013.
Additive Fertigungsverfahren: Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing.
1. Aufl.
Haan-Gruiten: Verl. Europa Lehrmittel.
Bibliothek des technischen Wissens.
ISBN 3808550333
- Beyer 2015** Beyer, Frank, 2015.
Hauptspannungstrajektorien in der numerischen Festkörpermechanik: Ein Algorithmus zur Visualisierung der Bauteilbeanspruchung in zwei und drei Dimensionen, Dissertation Universität Dresden.
ISBN 9783867804578
- Bletzinger et al. 2001** Bletzinger, Kai-Uwe; Ramm, Ekkehard, 2001. Structural optimization and form finding of light weight structures. *Computers & Structures* **79** (22-25), S. 2053–2062
DOI: 10.1016/S0045-7949(01)00052-9
- Blumberg et al. 1931** Blumberg, Albert E; Feigl, Herbert, 1931. Logical Positivism. *The Journal of Philosophy* **28** (11), S. 281
DOI: 10.2307/2015437
- Bonnard et al. 2018** Bonnard, Renan; Hascoët, Jean-Yves; Mognol, Pascal; Stroud, Ian, 2018. STEP-NC digital thread for additive manufacturing: data model, implementation and validation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* **31** (11), S. 1141–1160
DOI: 10.1080/0951192X.2018.1509130
- Bonten 2016** Bonten, Christian, 2016.
Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen.
2., aktualisierte Auflage.
München: Hanser.
Hanser-eLibrary.
ISBN 978-3-446-44674-8
DOI: 10.3139/9783446449176

- Bourell et al. 2017** Bourell, David; Kruth, Jean Pierre; Leu, Ming; Levy, Gideon; Rosen, David; Beese, Allison M; Clare, Adam, 2017. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals* **66** (2), S. 659–681
DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009
- Brackett et al. 2011** Brackett, David; Ashcroft, Ian; Hague, Richard J.M., 2011. Topology Optimization for Additive Manufacturing **2011** (International Solid Freeform Fabrication Symposium), 2011
Verfügbar unter: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-27-Brackett.pdf>
- Breuninger et al. 2013** Breuninger, Jannis; Becker, Ralf; Wolf, Andreas; Rommel, Steve; Verl, Alexander, 2013. *Generative Fertigung mit Kunststoffen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
ISBN 978-3-642-24324-0
DOI: 10.1007/978-3-642-24325-7
- Campocasso et al. 2018** Campocasso, Sébastien; Chalvin, Maxime; Reichler, Ann-Kathrin; Gerbers, Roman; Dröder, Klaus; Hugel, Vincent; Dietrich, Franz, 2018. A framework for future CAM software dedicated to additive manufacturing by multi-axis deposition. *Procedia CIRP* **78**, S. 79–84
DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.314
- Castelli et al. 2019** Castelli, Kevin; Giberti, Hermes, 2019. A Preliminary 6 Dofs Robot Based Setup for Fused Deposition Modeling. In: Carbone, Giuseppe; Gasparetto, Alessandro (Hrsg.): *Advances in Italian Mechanism Science*. Cham: Springer International Publishing, S. 249–257
ISBN 978-3-030-03319-4
DOI: 10.1007/978-3-030-03320-0_27
- Chacón et al. 2017** Chacón, Jesús M; Caminero, Miguel A; García-Plaza, Eustanquio; Núñez, Pedro J., 2017. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design* **124**, S. 143–157
DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065

- Chakraborty et al. 2008** Chakraborty, Debapriya; Aneesh Reddy, B; Roy Choudhury, A., 2008. Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling.
In: *Computer-Aided Design*, S. 235–243
DOI: 10.1016/j.cad.2007.10.014
- Chen et al. 2021** Chen, Xiangjia; Fang, Guoxin; Liao, Wei-Hsin; Wang, Charlie C.L., 2021. Field-Based Toolpath Generation for 3D Printing Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Composites.
Additive Manufacturing, S. 102470
DOI: 10.1016/j.addma.2021.102470
- Cheng et al. 2021** Cheng, Tiffany; Thielen, Marc; Poppinga, Simon; Tahouni, Yasaman; Wood, Dylan; Steinberg, Thorsten; Menges, Achim; Speck, Thomas, 2021. Bio - Inspired Motion Mechanisms: Computational Design and Material Programming of Self - Adjusting 4D - Printed Wearable Systems.
Advanced Science, S. 2100411
DOI: 10.1002/adv.202100411
- Choi et al. 2002** Choi, Shiu H; Kwok, Tung, 2002. A tolerant slicing algorithm for layered manufacturing.
Rapid Prototyping Journal **8** (3), S. 161–179
DOI: 10.1108/13552540210430997
- Comminal et al. 2018** Comminal, Raphaël; Serdeczny, Marcin P; Pedersen, David Bue; Spangenberg, Jon, 2018. Numerical Modeling of the Material Deposition and Contouring Precision in Fused Deposition Modeling.
Proceedings of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, S. 1855–1864
Verfügbar unter: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/numerical-modeling-of-the-material-deposition-and-contouring-prec>
- Coupek et al. 2018** Coupek, Daniel; Friedrich, Jens; Battran, David; Riedel, Oliver, 2018. Reduction of Support Structures and Building Time by Optimized Path Planning Algorithms in Multi-axis Additive Manufacturing.
Procedia CIRP **67**, S. 221–226
DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.203

- Croccolo et al. 2016** Croccolo, Dario; Agostinis, Massimiliano de; Fini, Stefano; Olmi, Giorgio; Vranic, Aleksandar; Ciric-Kostic, Snezana, 2016. Influence of the build orientation on the fatigue strength of EOS maraging steel produced by additive metal machine.
Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures **39** (5), S. 637–647
DOI: 10.1111/ffe.12395
- Cuan-Urquizo et al. 2019** Cuan-Urquizo, Enrique; Barocio, Eduardo; Tejada-Ortizgoza, Viridiana; Pipes, R. Byron; Rodriguez, Ciro A; Roman-Flores, Armando, 2019. Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches.
Materials (Basel, Switzerland) **12** (6)
DOI: 10.3390/ma12060895
- Cura 2021** Cura, 2021.
Ultimaker Cura: Leistungsstarke, benutzerfreundliche 3D-Drucksoftware.
Verfügbar unter: <https://ultimaker.com/de/software/ultimaker-cura>
Zugriff am: 20.06.2021
- Dai et al. 2018** Dai, Chengkai; Wang, Charlie C. L; Wu, Chenming; Lefebvre, Sylvain; Fang, Guoxin; Liu, Yong-Jin, 2018. Support-free volume printing by multi-axis motion.
ACM Transactions on Graphics **37** (4), S. 1–14
DOI: 10.1145/3197517.3201342
- Dapogny et al. 2019** Dapogny, Charles; Estevez, Rafael; Faure, Alexis; Michailidis, Georgios, 2019. Shape and topology optimization considering anisotropic features induced by additive manufacturing processes.
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering **344**, S. 626–665
DOI: 10.1016/j.cma.2018.09.036
- Daynes et al. 2019** Daynes, Stephen; Feih, Stefanie; Lu, Wen Feng; Wei, Jun, 2019. Design concepts for generating optimised lattice structures aligned with strain trajectories.
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering **354**, S. 689–705
DOI: 10.1016/j.cma.2019.05.053

- Deaton et al. 2014** Deaton, Joshua D; Grandhi, Ramana V., 2014. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000.
Structural and Multidisciplinary Optimization **49** (1), S. 1–38
DOI: 10.1007/s00158-013-0956-z
- Domm 2020** Domm, Matthias, 2020.
Additive Fertigung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste mittels 3D-Extrusion.
Als Manuskript gedruckt.
Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH.
IVW-Schriftenreihe Band 138.
ISBN 978-3-944440-35-4
- Edelsbrunner et al. 1992** Edelsbrunner, Herbert; Mücke, Ernst P., 1992.
Three-dimensional alpha shapes.
In: *Proceedings of the 1992 workshop on Volume visualization*,
10/19/1992 - 10/20/1992, Boston, Massachusetts, United States, S. 75–82
- Eiliat et al. 2019** Eiliat, Hasti; Urbanic, Jill, 2019. Determining the relationships between the build orientation, process parameters and voids in additive manufacturing material extrusion processes.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **100** (1-4), S. 683–705
DOI: 10.1007/s00170-018-2540-6
- Ericson 2008** Ericson, Christer, 2008.
Real-time collision detection.
[Nachdr.]
Amsterdam: Elsevier Morgan Kaufmann.
Morgan Kaufmann series in interactive 3D technology.
ISBN 1558607323
- Ertay et al. 2018** Ertay, Deniz Sera; Yuen, Alexander; Altintas, Yusuf, 2018. Synchronized material deposition rate control with path velocity on fused filament fabrication machines.
Additive Manufacturing **19**, S. 205–213
DOI: 10.1016/j.addma.2017.05.011
- Esprit CAM 2021** Esprit CAM, 2021.
Das leistungsfähige CAM System ESPRIT. | ESPRITCAM.
Verfügbar unter: <https://www.espritam.com/de-de>
Zugriff am: 20.06.2021

- Fang et al. 2020** Fang, Guoxin; Zhang, Tianyu; Zhong, Sikai; Chen, Xi-angjia; Zhong, Zichun; Wang, Charlie C. L., 2020. Reinforced FDM: Multi-Axis Filament Alignment with Controlled Anisotropic Strength. *ACM Transactions on Graphics* **39** (6), S. 1–15
DOI: 10.1145/3414685.3417834
- Ferreira et al. 2017** Ferreira, Rafael Thiago Luiz; Amatte, Igor Cardoso; Dutra, Thiago Assis; Bürger, Daniel, 2017. Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. *Composites Part B: Engineering* **124**, S. 88–100
DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.05.013
- Fischer et al. 2013** Fischer, Andreas; Rommel, Steve; Bauernhansl, Thomas, 2013. New Fiber Matrix Process with 3D Fiber Printer – A Strategic In-process Integration of Endless Fibers Using Fused Deposition Modeling (FDM), S. 167–175. *Digital product and process development system*, 2013
Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-41329-2_17
- Fleischer 2019** Fleischer, Bernhard, 2019. Methodisches Konstruieren. In: Fleischer, Bernhard (Hrsg.): *Methodisches Konstruieren in Ausbildung und Beruf*. 1st ed. 2019. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Vieweg, S. 21–57
ISBN 978-3-658-27690-4
DOI: 10.1007/978-3-658-27690-4_2
- Föppl et al. 2019** Föppl, Ludwig; Neuber, Heinz, 2019. *Festigkeitslehre mittels Spannungsoptik*. Reprint 2019. Berlin, Boston: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. ISBN 9783486769951
DOI: 10.1515/9783486769951
- Friedrich et al. 2017** Friedrich, Jens; Maurer, Andreas; Lechler, Armin; Verl, Alexander, 2017. Estimation of the pose-dependent stability lobe diagram for a new 5-axis machine concept, S. 99–104, 2017
Verfügbar unter: <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2017/ANNALS-2017-2-14.pdf>

- Fuhrmann 2018** Fuhrmann, Marco, 2018.
Qualitätsorientierte modellbasierte Prozessparameteroptimierung für das Fused Deposition Modeling, Dissertation. Ergebnisse aus der Produktionstechnik 2018, Band 23. ISBN 9783863596330
- Gálvez et al. 2014** Gálvez, Akemi; Iglesias, Andrés; Puig-Pey, Jaime, 2014. Computing parallel curves on parametric surfaces. *Applied Mathematical Modelling* **38** (9-10), S. 2398–2413 DOI: 10.1016/j.apm.2013.10.042
- Gao et al. 2015** Gao, Wei; Zhang, Yunbo; Ramanujan, Devarajan; Raman, Karthik; Chen, Yong; Williams, Christopher B; Wang, Charlie C.L; Shin, Yung C; Zhang, Song; Zavatieri, Pablo D., 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design* **69**, S. 65–89 DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001
- Garland et al. 2015** Garland, Anthony; Fadel, Georges, 2015. Design and Manufacturing Functionally Gradient Material Objects With an Off the Shelf Three-Dimensional Printer: Challenges and Solutions. *Journal of Mechanical Design* **137** (11), S. 297 DOI: 10.1115/1.4031097
- Gebhardt 2013** Gebhardt, Andreas, 2013.
Generative Fertigungsverfahren: Additive manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 4., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser. ISBN 978-3-446-43651-0
- Gebhardt 2014** Gebhardt, Andreas, 2014.
3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM). München: Hanser. ISBN 978-3-446-44238-2
- Gibson et al. 2015** Gibson, Ian; Rosen, David; Stucker, Brent, 2015.
Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. 2. ed. New York, NY: Springer. ISBN 978-1-4939-2113-3

- Gleadall et al. 2018** Gleadall, Andrew; Visscher, Dafydd; Yang, Jing; Thomas, Daniel; Segal, Joel, 2018. Review of additive manufactured tissue engineering scaffolds: relationship between geometry and performance.
Burns & trauma **6**, S. 19
DOI: 10.1186/s41038-018-0121-4
- Gohari et al. 2018** Gohari, Hossein; Barari, Ahmad; Kishawy, Hossam, 2018. An efficient methodology for slicing NURBS surfaces using multi-step methods.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **95** (9-12), S. 3111–3125
DOI: 10.1007/s00170-017-1219-8
- Gottschalk et al. 1996** Gottschalk, Stefan A; Lin, Ming C; Manocha, Dinesh, 1996.
OBBTree: a hierarchical structure for rapid interference detection.
SIGGRAPH '96: Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques
DOI: 10.1145/237170.237244
- Götz et al. 2020** Götz, Sebastian; Eulitz, Klaus-Georg, 2020.
Betriebsfestigkeit.
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
ISBN 978-3-658-31168-1
DOI: 10.1007/978-3-658-31169-8
- Grewell et al. 2003** Grewell, David A; Bonten, Christian (Hrsg.), 2003.
Plastics and composites welding handbook.
Munich: Hanser.
ISBN 9781569903131
- HAGE3D 2021** HAGE3D, 2021.
Hage3D 175 Convertible - Hage3D.
Verfügbar unter: <https://hage3d.com/index.php/hage3d-175-convertible/>
Zugriff am: 19.06.2021
- Hans Weber 2021** Hans Weber, 2021.
Hansweber DXR-Series; Hans Weber Maschinenfabrik GmbH.
Verfügbar unter: <https://www.hansweber.de/additive-fertigungssysteme/dxr-series/>
Zugriff am: 22.06.2021

- Hassel et al. 2020** Hassel, Thomas; Carstensen, Torben, 2020. Properties and anisotropy behaviour of a nickel base alloy material produced by robot-based wire and arc additive manufacturing. *Welding in the World* **64** (11), S. 1921–1931
DOI: 10.1007/s40194-020-00971-7
- Helfesrieder et al. 2020** Helfesrieder, Nico; Lechler, Armin; Verl, Alexander, 2020. Method for generating manufacturable, topology-optimized parts for Laminated Layer Manufacturing. *Procedia CIRP* **93**, S. 38–43
Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120306144> DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.048
- Hildebrand et al. 2013** Hildebrand, Kristian; Bickel, Bernd; Alexa, Marc, 2013. Orthogonal slicing for additive manufacturing. *Computers & Graphics* **37** (6), S. 669–675
DOI: 10.1145/166117.166119
- Hoffmann 1996** Hoffmann, Kai, 1996. *Beiträge zur Strömungs- und Spannungsberechnung in Extrusionswerkzeugen*, RWTH Aachen, Dissertation. Aachen: Verlag der Augustinus-Buchhandlung. Aachener Beiträge zur Kunststoffverarbeitung 54. ISBN 3860734881
- Hope et al. 1997** Hope, Rory; Jacobs, Peter; Roth, R. N., 1997. Rapid prototyping with sloping surfaces. *Rapid Prototyping Journal* **3** (1), S. 12–19
DOI: 10.1108/13552549710169246
- Hoppe et al. 1993** Hoppe, Hugues; DeRose, Tony; Duchamp, Tom; McDonald, John; Stuetzle, Werner, 1993. *Mesh optimization*. SIGGRAPH
DOI: 10.1145/166117.166119
- Huang et al. 2012** Huang, Ben Shian; Singamneni, Sarat, 2012. Alternate slicing and deposition strategies for fused deposition modelling of light curved parts. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* **Vol. 55** (nr 2)
Verfügbar unter: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-8064e0c9-f70f-4447-8963-3c2f3ca7f10d>

- Huang et al. 2015** Huang, Bin; Singamneni, Sarat B., 2015. Curved Layer Adaptive Slicing (CLAS) for fused deposition modelling. *Rapid Prototyping Journal* **21** (4), S. 354–367
DOI: 10.1108/RPJ-06-2013-0059
- IceSL 2022** IceSL, 2022.
IceSL.
Verfügbar unter: <https://icesl.loria.fr/>
Zugriff am: 13.03.2022
- Isa et al. 2019** Isa, Mohammed A; Lazoglu, Ismail, 2019. Five-axis additive manufacturing of freeform models through buildup of transition layers.
Journal of Manufacturing Systems **50**, S. 69–80
DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.12.002
- Jami et al. 2013** Jami, Hesamodin; Masood, Syed H; Song, W. Q., 2013. Dynamic Response of FDM Made ABS Parts in Different Part Orientations.
Advanced Materials Research **748**, S. 291–294
Verfügbar unter: <https://www.scientific.net/AMR.748.291> DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.748.291
- Jamieson et al. 1995** Jamieson, Ron; Hacker, Herbert, 1995. Direct slicing of CAD models for rapid prototyping.
Rapid Prototyping Journal **1** (2), S. 4–12
DOI: 10.1108/13552549510086826
- Janssen 2020** Janssen, Henning, 2020.
Additive Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen: Additive process chain for the production of thermoplastic fiber composite hybrid components.
1. Auflage.
Aachen: Apprimus Verlag.
Produktionsmaschinen Band 14/2020.
ISBN 978-3-86359-870-9
- Jiang et al. 2017** Jiang, Ruth; Kleer, Robin; Piller, Frank T., 2017. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030.
Technological Forecasting and Social Change **117**, S. 84–97
DOI: 10.1016/j.techfore.2017.01.006

- Jin et al. 2014** Jin, Yu-an; He, Yong; Fu, Jian-zhong; Gan, Wen-feng; Lin, Zhi-wei, 2014. Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology. In: *Additive Manufacturing*, S. 32–47
DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.004
- Jin et al. 2017** Jin, Yuan; Du, Jianke; He, Yong; Fu, Guoqiang, 2017. Modeling and process planning for curved layer fused deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **91** (1-4), S. 273–285
DOI: 10.1007/s00170-016-9743-5
- Jin et al. 2019** Jin, Zeqing; Zhang, Zhizhou; Gu, Grace X., 2019. Autonomous in-situ correction of fused deposition modeling printers using computer vision and deep learning. *Manufacturing Letters* **22**, S. 11–15
DOI: 10.1016/j.mfglet.2019.09.005
- Jung et al. 1996** Jung, Derek; Gupta, Kamal K., 1996. Octree-based hierarchical distance maps for collision detection. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 454-459 vol.1
- Kalsoom et al. 2016** Kalsoom, Umme; Nesterenko, Pavel N; Paull, Brett, 2016. Recent developments in 3D printable composite materials. *RSC Advances* **6** (65), S. 60355–60371
DOI: 10.1039/C6RA11334F
- Kampker et al. 2019** Kampker, Achim; Triebs, Johannes; Kawollek, Sebastian; Ayvaz, Peter; Hohenstein, Steffen, 2019. Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems. *Procedia CIRP* **81**, S. 815–819
DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.205
- Kayser 1989** Kayser, Karl-Heinz, 1989. *Kollisionserkennung in numerischen Steuerungen mit der Distanzfeldmethode*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISW Forschung und Praxis, Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart 78. ISBN 9783642837678
DOI: 10.1007/978-3-642-83767-8

- Kelly et al. 2011** Kelly, Donald; Reidsema, Carl; Bassandeh, A; Pearce, Garth; Lee, Merrill, 2011. On interpreting load paths and identifying a load bearing topology from finite element analysis.
Finite Elements in Analysis and Design (47), S. 867–876
DOI: 10.1016/j.finel.2011.03.007.
- Keuth 2007** Keuth, Herbert (Hrsg.), 2007.
Karl Popper: Logik der Forschung.
3. Aufl.
München: Oldenbourg Akademieverlag.
ISBN 9783050050188
DOI: 10.1524/9783050050188
- Khoshnevis 2004** Khoshnevis, Behrokh, 2004. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies.
Automation in Construction **13** (1), S. 5–19
DOI: 10.1016/j.autcon.2003.08.012
- Khurana et al. 2020** Khurana, Jivtesh B; Simpson, Timothy W; Frecker, Mary, 2020. Structurally intelligent 3D layer generation for active-Z printing.
29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2018
Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/17234>
- Klahn et al. 2021** Klahn, Christoph; Meboldt, Mirko; Fontana, Filippo Federico; Leutenecker-Twelsiek, Bastian; Jansen, Jasmin, 2021.
Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung: Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten.
2. Auflage.
Würzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG.
ISBN 9783834334695
- Klein 2015** Klein, Bernd, 2015.
FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau.
10., verb. Aufl. 2015.
Wiesbaden: Springer Vieweg.
Springer eBook Collection.
ISBN 9783658060541
DOI: 10.1007/978-3-658-06054-1

- Knippers et al. 2019** Knippers, Jan; Schmid, Ulrich; Speck, Thomas, 2019. *Bionisch bauen: Von der Natur lernen*. ISBN 978-3035617856
- Kubalak et al. 2018** Kubalak, Joseph R; Wicks, Alfred L; Williams, Christopher B., 2018. Using multi-axis material extrusion to improve mechanical properties through surface reinforcement. *Virtual and Physical Prototyping* **13** (1), S. 32–38
DOI: 10.1080/17452759.2017.1392686
- Kubalak et al. 2019** Kubalak, Joseph R; Wicks, Alfred L; Williams, Christopher B., 2019. Exploring multi-axis material extrusion additive manufacturing for improving mechanical properties of printed parts. *Rapid Prototyping Journal* **25** (2), S. 356–362
DOI: 10.1108/RPJ-02-2018-0035
- Kubalak et al. 2021** Kubalak, Joseph R; Wicks, Alfred L; Williams, Christopher B., 2021. Investigation of Parameter Spaces for Topology Optimization With Three-Dimensional Orientation Fields for Multi-Axis Additive Manufacturing. *Journal of Mechanical Design* **143** (5)
DOI: 10.1115/1.4048117
- Ladeveze et al. 1983** Ladeveze, Pierre; Leguillon, Dominique, 1983. Error Estimate Procedure in the Finite Element Method and Applications. *SIAM Journal on Numerical Analysis* **20** (3), S. 485–509
DOI: 10.1137/0720033
- Li et al. 2016** Li, Hongbin; Wang, Taiyong; Sun, Jian; Yu, Zhiqiang, 2016. The adaptive slicing algorithm and its impact on the mechanical property and surface roughness of freeform extrusion parts. *Virtual and Physical Prototyping* **11** (1), S. 27–39
DOI: 10.1080/17452759.2015.1136868
- Liu et al. 2016** Liu, Jikai; Ma, Yongsheng, 2016. A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Software* **100**, S. 161–175
DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.07.017

- Liu et al. 2018a** Liu, Jikai; Gaynor, Andrew T; Chen, Shikui; Kang, Zhan; Suresh, Krishnan; Takezawa, Akihiro; Li, Lei; Kato, Junji; Tang, Jinyuan; Wang, Charlie C. L; Cheng, Lin; Liang, Xuan; To, Albert. C., 2018. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization* **57** (6), S. 2457–2483
DOI: 10.1007/s00158-018-1994-3
- Liu et al. 2018b** Liu, Jikai; Ma, Yongsheng; Qureshi, Ahmed J; Ahmad, Rafiq, 2018. Light-weight shape and topology optimization with hybrid deposition path planning for FDM parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **97** (1-4), S. 1123–1135
DOI: 10.1007/s00170-018-1955-4
- Löffler et al. 2019** Löffler, Robin; Koch, Michael, 2019. Innovative Extruder Concept for Fast and Efficient Additive Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine* **52** (10), S. 242–247
DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.10.071
- Lorensen et al. 1987** Lorensen, William E; Cline, Harvey E., 1987. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* **21** (4), S. 163–169
DOI: 10.1145/37402.37422
- Luo et al. 2016** Luo, Nan; Wang, Quan, 2016. Fast slicing orientation determining and optimizing algorithm for least volumetric error in rapid prototyping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **83** (5-8), S. 1297–1313
DOI: 10.1007/s00170-015-7571-7
- Markforged 2021** Markforged, 2021.
Markforged | Home Page.
Verfügbar unter: <https://markforged.com/de>
Zugriff am: 17.06.2021
- Martha 2015** Martha, Alexander Matthias, 2015.
Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung, Dissertation Universität Duisburg-Essen
Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:464-20151218-181626-1>

- Matsuzaki et al. 2016** Matsuzaki, Ryosuke; Ueda, Masahito; Namiki, Masaki; Jeong, Tae-Kun; Asahara, Hirotsuke; Horiguchi, Keisuke; Nakamura, Taishi; Todoroki, Akira; Hirano, Yoshiyasu, 2016. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific Reports* **6** (1), S. 23058
DOI: 10.1038/srep23058
- Meier 2020** Meier, Lukas, 2020. Deskriptive Statistik. In: Meier, Lukas (Hrsg.): *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik*. Berlin: Springer Spektrum, S. 71–87
ISBN 978-3-662-61487-7
DOI: 10.1007/978-3-662-61488-4_3
- Menges 2002** Menges, Georg, 2002. *Werkstoffkunde Kunststoffe*. 5., völlig überarb. Aufl. München: Hanser. Studentexte Kunststofftechnik. ISBN 3-446-21257-4
- ModuleWorks 2021** ModuleWorks, 2021. *ModuleWorks | Market Leading CAD/CAM component technology*. Verfügbar unter: <https://www.moduleworks.com/de/>
Zugriff am: 20.06.2021
- Murtezaoglu et al. 2018** Murtezaoglu, Yavuz; Plakhotnik, Denys; Stautner, Marc; Vaneker, Tom; van Houten, Fred J.A.M., 2018. Geometry-Based Process Planning for Multi-Axis Support-Free Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* **78**, S. 73–78
DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.175
- Nayyeri et al. 2022** Nayyeri, Pooyan; Zareinia, Kouros; Bougherara, Habiba, 2022. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, S. 1–26
DOI: 10.1007/s00170-021-08347-x
- Ngo et al. 2018** Ngo, Tuan D; Kashani, Alireza; Imbalzano, Gabriele; Nguyen, Kate T.Q; Hui, David, 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* **143**, S. 172–196
DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012

- Nguyen et al. 2018** Nguyen, Lam; Buhl, Johannes; Bambach, Markus, 2018. Decomposition algorithm for tool path planning for wire-arc additive manufacturing. *Journal of Machine Engineering* **Vol.18** (No.1), S. 96–107 DOI: 10.5604/01.3001.0010.8827
- Nomura et al. 2015** Nomura, Tsuyoshi; Dede, Ercan M; Lee, Jaewook; Yamasaki, Shintaro; Matsumori, Tadayoshi; Kawamoto, Atsushi; Kikuchi, Noboru, 2015. General topology optimization method with continuous and discrete orientation design using isoparametric projection. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **101** (8), S. 571–605 DOI: 10.1002/nme.4799
- Norm DIN 66025-1:1983-01** Norm DIN 66025-1:1983-01. *DIN 66025; Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen: Allgemeines*
- Norm DIN EN ISO 527-2** Norm DIN EN ISO 527-2. *DIN EN ISO 527-2:2012-06, Kunststoffe _ Bestimmung der Zugeigenschaften _ Teil_2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO_527-2:2012); Deutsche Fassung EN_ISO_527-2:2012.*
- Norm DIN EN ISO/ASTM 52900** Norm DIN EN ISO/ASTM 52900. *DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06, Additive Fertigung _ Grundlagen _ Terminologie (ISO/ASTM DIS_52900:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN_ISO/ASTM 52900:2018.*
- Norm DIN EN ISO/ASTM 52910** Norm DIN EN ISO/ASTM 52910. *DIN EN ISO/ASTM 52910:2020-02, Additive Fertigung _ Konstruktion _ Anforderungen, Richtlinien und Empfehlungen (ISO/ASTM 52910:2018); Deutsche Fassung EN_ISO/ASTM 52910:2019.*
- Norm ISO/ASTM 52900:2015** Norm ISO/ASTM 52900:2015:2015. *ISO/ASTM 52900:2015: Additive manufacturing — General principles — Terminology.*
- Oksman et al. 2003** Oksman, Kristiina; Skrifvars, Mikael; Selin, Johan F., 2003. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology* **63** (9), S. 1317–1324 DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00103-9

- Otnad 2014** Otnad, Thomas, 2014.
Dosierung von Kunststoffen für generative Fertigungsverfahren.
München, Technische Universität München, 2014.
<http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1173870>
- Panetta et al. 2015** Panetta, Julian; Zhou, Qingnan; Malomo, Luigi; Pietroni, Nico; Cignoni, Paolo; Zorin, Denis, 2015. Elastic textures for additive fabrication.
ACM Transactions on Graphics **34** (4), S. 1–12
DOI: 10.1145/2766937
- Parandoush et al. 2017** Parandoush, Pedram; Lin, Dong, 2017. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites.
Composite Structures **182**, S. 36–53
DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.08.088
- Patentschrift US5121329A** Crump, Scott S., 1992.
Apparatus and method for creating three-dimensional objects.
US5121329A
- Piegl 1995** Piegl, Les, 1995.
The NURBS Book.
Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.
Monographs in Visual Communication Ser.
ISBN 9783642973857
- Piegl et al. 1999** Piegl, Les A; Tiller, Wayne, 1999. Computing offsets of NURBS curves and surfaces.
Computer-Aided Design **31** (2), S. 147–156
DOI: 10.1016/S0010-4485(98)00066-9
- Plocher et al. 2018** Plocher, János; Panesar, Ajit, 2018. Next-Generation Fibre-Reinforced Lightweight Structures for Additive Manufacturing.
International Solid Freeform Fabrication Symposium
DOI: 10.26153/tsw/17068
- Plocher et al. 2019** Plocher, János; Panesar, Ajit, 2019. Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures.
Materials & Design **183**, S. 108164
DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108164

- Popescu et al. 2018** Popescu, Diana; Zapciu, Aurelian; Amza, Catalin; Baciu, Florin; Marinescu, Rodica, 2018. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review.
Polymer Testing **69**, S. 157–166
DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020
- Pritschow 2006** Pritschow, Günter, 2006.
Einführung in die Steuerungstechnik: Mit 388 Bildern und 40 Tabellen.
München, Wien: Hanser.
ISBN 3446214224
- PyMAPDL 2021** PyMAPDL, 2021.
PyMAPDL Documentation — ansys.mapdl.core 0.60.3 documentation.
Verfügbar unter: <https://mapdl.docs.pyansys.com/>
Zugriff am: 20.12.2021
- Qin et al. 2019** Qin, Yuchu; Qi, Qunfen; Scott, Paul J; Jiang, Xiangqian, 2019. Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data.
Computer-Aided Design **111**, S. 44–64
DOI: 10.1016/j.cad.2019.02.004
- Radl et al. 2011** Radl, Roman; Maafe, Michael; Ziegler, Sven, 2011. Skoliose: Die Krumme Wirbelsäule.
Der Orthopäde **40** (5), S. 449–462
DOI: 10.1007/s00132-011-1771-0
- Redaelli et al. 2020** Redaelli, Davide Felice; Storm, Fabio Alexander; Biffi, Emilia; Reni, Gianluigi; Colombo, Giorgio, 2020.
A Virtual Design Process to Produce Scoliosis Braces by Additive Manufacturing.
In: *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*, 2020, Cham, S. 860–870
- Rezayat et al. 2015** Rezayat, Hassan; Zhou, Wenchao; Siriruk, Akawut; Penumadu, Dayakar; Babu, Sudarsanam S., 2015. Structure–mechanical property relationship in fused deposition modelling.
Materials Science and Technology **31** (8), S. 895–903
DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000010
- Richard 2019** Richard, Hans Albert, 2019.
Additive Fertigung Von Bauteilen und Strukturen: Neue Erkenntnisse und Praxisbeispiele.
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
ISBN 9783658274122

- Schumacher et al. 2015** Schumacher, Christian; Bickel, Bernd; Rys, Jan; Marschner, Steve; Daraio, Chiara; Gross, Markus, 2015. Microstructures to control elasticity in 3D printing. *ACM Transactions on Graphics* **34** (4), S. 1–13
DOI: 10.1145/2766926
- Seifert et al. 2016** Seifert, Jens; Thielemann, Falk; Bernstein, Peter, 2016. Adoleszente idiopathische Skoliose : Leitfaden für die praktische Anwendung. *Der Orthopäde* **45** (6), S. 509–517
DOI: 10.1007/s00132-016-3274-5
- Siemens NX 2021** Siemens NX, 2021. *Additive Fertigung | Siemens Digital Industries Software*. Verfügbar unter: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/products/manufacturing-planning/additive-manufacturing.html>
Zugriff am: 20.06.2021
- Singamneni et al. 2012** Singamneni, Sarat; Roychoudhury, Asimava; Diegel, Olaf; Huang, Bin, 2012. Modeling and evaluation of curved layer fused deposition. *Journal of Materials Processing Technology* **212** (1), S. 27–35
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.08.001
- Slic3r 2021** Slic3r, 2021. *Slic3r - Open source 3D printing toolbox*. Verfügbar unter: <https://slic3r.org/>
Zugriff am: 20.06.2021
- Sood et al. 2010** Sood, Anoop Kumar; Ohdar, R. K; Mahapatra, S. S., 2010. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design* **31** (1), S. 287–295
DOI: 10.1016/j.matdes.2009.06.016
- Sporlastic GmbH 2022** Sporlastic GmbH, 2022. *TRIAC II die dynamische Skoliose-Orthese - Sporlastic*. Verfügbar unter: <https://www.sporlastic.de/produkt/artikel/triac-ii/>
Zugriff am: 01.01.2022
- Stava et al. 2012** Stava, Ondrej; Vanek, Juraj; Benes, Bedrich; Carr, Nathan; Měch, Radomír, 2012. Stress relief: improving structural strength of 3D printable objects. *ACM Transactions on Graphics* **31** (4), S. 1–11
DOI: 10.1145/2185520.2185544

- Takahashi et al. 2010** Takahashi, Junichi; Yamamoto, Toshiharu; Shizawa, Kazuyuki, 2010. Modeling and simulation for ductile fracture prediction of crystalline polymer based on craze behavior.
International Journal of Mechanical Sciences **52** (2), S. 266–276
DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2009.09.028
- Tam et al. 2017** Tam, Kam-Ming Mark; Mueller, Caitlin T., 2017. Additive Manufacturing Along Principal Stress Lines.
3D Printing and Additive Manufacturing **4** (2), S. 63–81
DOI: 10.1089/3dp.2017.0001
- Tamijani et al. 2018** Tamijani, Ali Y; Gharibi, Kaveh; Kobayashi, Marcelo H; Kolonay, Raymond M., 2018. Load paths visualization in plane elasticity using load function method.
International Journal of Solids and Structures **135**, S. 99–109
DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.11.013
- Taufik et al. 2013** Taufik, Mohammad; Jain, Prashant K., 2013. Role of build orientation in layered manufacturing: a review.
International Journal of Manufacturing Technology and Management **27** (1/2/3), S. 47
DOI: 10.1504/IJMTM.2013.058637
- Teufelhart 2016** Teufelhart, Stefan, 2016.
Belastungsoptimiertes Design von Gitterstrukturen für die additive Fertigung nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung, Dissertation Technische Universität München
Verfügbar unter: <http://media-tum.ub.tum.de/node?id=1296003>
- Thillaithevan et al. 2021** Thillaithevan, Dilaksan; Bruce, Paul; Santer, Matthew, 2021. Stress-constrained optimization using graded lattice microstructures.
Structural and Multidisciplinary Optimization **63** (2), S. 721–740
DOI: 10.1007/s00158-020-02723-z
- Thompson et al. 2016** Thompson, Mary Kathryn; Moroni, Giovanni; Vaneker, Tom; Fadel, Georges; Campbell, R. Ian; Gibson, Ian; Bernard, Alain; Schulz, Joachim; Graf, Patricia; Ahuja, Bhrihu; Martina, Filomeno, 2016.
Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints.
In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, S. 737–760
DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004

- Thrimurthulu et al. 2004** Thrimurthulu, Koyyana; Pandey, Pulak M; Reddy, Venkata N., 2004. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling.
International Journal of Machine Tools and Manufacture **44** (6), S. 585–594
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004
- van de Werken et al. 2020** van de Werken, Nekoda; Tekinalp, Halil; Khanbolouki, Pouria; Ozcan, Soydan; Williams, Andrew; Tehrani, Mehran, 2020. Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective.
Additive Manufacturing **31**, S. 100962
DOI: 10.1016/j.addma.2019.100962
- van der Houwen et al. 1990** van der Houwen, Pieter J; Sommeijer, Ben P., 1990. Parallel iteration of high-order Runge-Kutta methods with step-size control.
Journal of Computational and Applied Mathematics **29** (1), S. 111–127
DOI: 10.1016/0377-0427(90)90200-J
- van Dijk et al. 2013** van Dijk, Nico P; Maute, Kurt; Langelaar, Matthijs; van Keulen, Fred, 2013. Level-set methods for structural topology optimization: a review.
Structural and Multidisciplinary Optimization **48** (3), S. 437–472
DOI: 10.1007/s00158-013-0912-y
- Vanek et al. 2014** Vanek, Juraj; Galicia, Jorge A. G; Benes, Bedrich, 2014. Clever Support: Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication.
Computer Graphics Forum **33** (5), S. 117–125
DOI: 10.1111/cgf.12437
- Venuvinod 2004** Venuvinod, Patri K., 2004.
Rapid Prototyping: Laser-based and Other Technologies.
Boston, MA: Springer.
Springer eBook Collection.
ISBN 9781475763614
DOI: 10.1007/978-1-4757-6361-4
- Voelkl et al. 2020** Voelkl, Harald; Franz, Michael; Klein, Daniel; Wartzack, Sandro, 2020. Computer Aided Internal Optimisation (CAIO) method for fibre trajectory optimisation: A deep dive to enhance applicability.
Design Science **6**
DOI: 10.1017/dsj.2020.1

- Volpato et al. 2013** Volpato, Neri; Franzoni, Alexandre; Luvizon, Diogo Carbonera; Schramm, Julian Martin, 2013. Identifying the directions of a set of 2D contours for additive manufacturing process planning.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **68** (1-4), S. 33–43
DOI: 10.1007/s00170-012-4706-y
- Wakimoto et al. 2018** Wakimoto, Tomomasa; Takamori, Ryoma; Eguchi, Soya; Tanaka, Hiroya, 2018.
Growable Robot with 'Additive-Additive-Manufacturing'
DOI: 10.1145/3170427.3188449
- Wang et al. 2021** Wang, Ting; Li, Nanya; Link, Guido; Jelonnek, John; Fleischer, Jürgen; Dittus, Jörg; Kupzik, Daniel, 2021. Load-dependent path planning method for 3D printing of continuous fiber reinforced plastics.
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **140**, S. 106181
DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106181
- Wauthle et al. 2015** Wauthle, Ruben; Vrancken, Bey; Beynaerts, Britt; Joris- sen, Karl; Schrooten, Jan; Kruth, Jean-Pierre; van Hum- beeck, Jan, 2015. Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures.
Additive Manufacturing **5**, S. 77–84
DOI: 10.1016/j.addma.2014.12.008
- Williams et al. 2011** Williams, Christopher B; Mistree, Farrokh; Rosen, David W., 2011. A Functional Classification Framework for the Conceptual Design of Additive Manufacturing Technologies.
Journal of Mechanical Design **133** (12)
DOI: 10.1115/1.4005231
- Wirth et al. 2020** Wirth, Benjamin; Dittus, Jörg; Baumann, Florian; Cou- tandin, Sven; Fleischer, Jürgen, 2020. Lastgerechte End- losfaser- verstärkungen im 3D-Druck/Load-compliant continuous fiber reinforcements in 3D-printing.
wt Werkstattstechnik online **110** (06), S. 424–428
DOI: 10.37544/1436-4980-2020-06-64
- Wohlers et al. 2021** Wohlers, Terry T; Campbell, Ian; Diegel, Olaf; Huff, Ray; Kowen, Joseph, 2021.
Wohlers report 2021: 3D printing and additive manufac- turing global state of the industry.
Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates.
ISBN 0991333276

- Wolf 2018** Wolf, Martin, 2018.
Development of a Path Planning Strategy for the Multi-Axis Fused Deposition Modeling Process based on Work-piece Stresses.
Stuttgart, Universität Stuttgart, ISW; Betreuer Frederik Wulle, Masterarbeit, 2018
- Wolf et al. 2020** Wolf, Martin; Elser, Anja; Riedel, Oliver; Verl, Alexander, 2020. A software architecture for a multi-axis additive manufacturing path-planning tool.
Procedia CIRP **88**, S. 433–438
DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.075
- Wörner 2018** Wörner, Veit, 2018.
Modellbildung und Echtzeit-Simulation additiver Fertigungsprozesse.
Stuttgart, Universität Stuttgart, ISW; Betreuer Frederik Wulle und Christian Scheifele, Bachelorarbeit, 2018
- Wu et al. 2017** Wu, Chenming; Dai, Chengkai; Fang, Guoxin; Liu, Yong-Jin; Wang, Charlie C.L., 2017.
RoboFDM: A robotic system for support-free fabrication using FDM
DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989140
- Wu et al. 2018** Wu, Jun; Aage, Niels; Westermann, Rudiger; Sigmund, Ole, 2018. Infill Optimization for Additive Manufacturing-Approaching Bone-Like Porous Structures.
IEEE transactions on visualization and computer graphics **24** (2), S. 1127–1140
DOI: 10.1109/TVCG.2017.2655523
- Wulle et al. 2017** Wulle, Frederik; Coupek, Daniel; Schäffner, Florian; Verl, Alexander; Oberhofer, Felix; Maier, Thomas, 2017. Work-piece and Machine Design in Additive Manufacturing for Multi-Axis Fused Deposition Modeling.
Procedia CIRP **60**, S. 229–234
DOI: 10.1016/j.procir.2017.01.046
- Wulle et al. 2019a** Wulle, Frederik; Bubeck, Wolfgang; Elser, Anja; Wolf, Martin; Verl, Alexander, 2019.
Trajektorienplanung mittels modellprädiktiver Vorsteuerung eines FDM-Druckkopfes.
In: Bonten, Christian; Kreutzbruck, Marc (Hrsg.): 26. *Stuttgarter Kunststoffkolloquium.*
1. Auflage.
Stuttgart: IKT Universität Stuttgart
ISBN 978-3-9818681-1-1

- Wulle et al. 2019b** Wulle, Frederik; Wolf, Martin; Riedel, Oliver; Verl, Alexander, 2019. Method for load-capable path planning in multi-axis fused deposition modeling. *Procedia CIRP* **84**, S. 335–340
DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.188
- Wulle et al. 2021** Wulle, Frederik; Richter, Max; Hinze, Christoph; Verl, Alexander, 2021. Time-optimal Path Planning of Multi-axis CNC Processes Using Variability of Orientation. *Procedia CIRP* **96**, S. 324–329
DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.095
- Wulle et al. 2022** Wulle, Frederik; Gorke, Oliver; Schmidt, Sarah; Nistler, Maximilian; Tovar, Günter E.M; Riedel, Oliver; Verl, Alexander; Weber, Achim; Southan, Alexander, 2022. Multi-axis 3D printing of gelatin methacryloyl hydrogels on a non-planar surface obtained from magnetic resonance imaging. *Additive Manufacturing* **50**, S. 102566
DOI: 10.1016/j.addma.2021.102566
- Zhang et al. 2017** Zhang, Pu; Liu, Jikai; To, Albert C., 2017. Role of anisotropic properties on topology optimization of additive manufactured load bearing structures. *Scripta Materialia* **135**, S. 148–152
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.10.021
- Zhang et al. 2020** Zhang, Haiguang; Di Liu; Huang, Tinglong; Hu, Qingxi; Lammer, Herfried, 2020. Three-Dimensional Printing of Continuous Flax Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites by Five-Axis Machine. *Materials (Basel, Switzerland)* **13** (7), S. 1678
DOI: 10.3390/ma13071678
- Zhao et al. 2000** Zhao, Zhiwen; Luc, Zhiwen, 2000. Adaptive direct slicing of the solid model for rapid prototyping. *International Journal of Production Research* **38** (1), S. 69–83
DOI: 10.1080/002075400189581
- Zhao et al. 2013** Zhao, Haibin; Cui, Zhixiang; Sun, Xiaofei; Turng, Lih-Sheng; Peng, Xiangfang, 2013. Morphology and Properties of Injection Molded Solid and Microcellular Polylactic Acid/Polyhydroxybutyrate-Valerate (PLA/PHBV) Blends. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **52** (7), S. 2569–2581
DOI: 10.1021/ie301573y

- Zhao et al. 2018** Zhao, Gang; Ma, Guocai; Feng, Jiangwei; Xiao, Wenlei, 2018. Nonplanar slicing and path generation methods for robotic additive manufacturing.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **96** (9-12), S. 3149–3159
DOI: 10.1007/s00170-018-1772-9
- Zhao et al. 2020** Zhao, Donghua; Guo, Weizhong, 2020. Mixed-layer adaptive slicing for robotic Additive Manufacturing (AM) based on decomposing and regrouping.
Journal of Intelligent Manufacturing **31** (4), S. 985–1002
DOI: 10.1007/s10845-019-01490-z
- Zukunftspreis 2018** Zukunftspreis, 2018. Zukunftspreis für die Erfindung: Neues Freiformflächen-3D-Druckverfahren, Frederik Wulle, Dr. Karl-Heinz Wurst, Daniel Coupek, Jens Friedrich und Florian Eger.
Amtsblatt Rietheim-Weilheim **2018**, 28.03.2018
Verfügbar unter: https://www.stiftung-ewaldmarquardt.de/downloadfile/5b34b3cb4e17661d0abbab2a083e64954/amsblatt_rietheim-weilheim_28.03.2018.pdf

Lebenslauf

Persönliches:	Name:	Frederik Julian Alexander Wulle
	Geburtsort:	Sindelfingen
	Geburtsdatum:	08.03.1990
	Eltern:	Heidrun und Rainer Wulle
	Familienstand:	Verheiratet mit Hanna Reim
Schulbildung:	1996 – 2009	Allgemeine Hochschulreife Freie Waldorfschule Ludwigsburg
	Studium:	2009 – 2012
2013 – 2016		Master-Studium Maschinenbau Schwerpunkt: Steuerungstechnik und Technische Dynamik Universität Stuttgart
Beruf:	2016 – 2021	Wissenschaftlicher Mitarbeiter ISW der Universität Stuttgart
	seit 2022	Forschungskordinator Forschungscampus ARENA2036 e.V.



Additive Fertigungstechnologien haben sich in den letzten zehn Jahren von einer Nischenanwendung für Rapid Prototyping zu einer technologischen und wirtschaftlich bedeutenden Industrie entwickelt. Um die Produktivität dieser Technologien weiter zu steigern, wird an Methoden zur Optimierung der Prozesskette im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren (Markenname *Fused Deposition Modeling*) geforscht, welches aufgrund der prozesstechnischen Freiheiten großes Potenzial in sich birgt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methode zur belastungsgerechten Bahnplanung entwickelt mit dem Ziel, Bauteile im mehrachsigen Schmelzschichtverfahren mit höherer Belastbarkeit herzustellen. Mechanische Grundlage ist hierbei, dass gedruckte Bauteile in Richtung der Orientierung der Extrusionsraupen einer höheren Zugbeanspruchung standhalten können als in andere Belastungsrichtungen. Die entwickelte Methode ermöglicht eine belastungsgerechte Bahnplanung auf Grundlage definierter Belastungsfälle im Hinblick auf anisotropes Werkstoffverhalten. Durch diese Bahnplanungsmethode konnten bei einer mechanischen Validierung durchschnittliche Festigkeitssteigerungen von 12,5 % nachgewiesen werden.