

IVW - Schriftenreihe Band 172

Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH Kaiserslautern

Maximilian Eckrich

**Auslegung mittels Nassfaserlegen hergestellter
Strukturen aus Faser-Kunststoff-Verbund auf
Basis einer Topologieoptimierung**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.dnb.de>>.

Herausgeber: Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer
Erwin-Schrödinger-Straße 58
67663 Kaiserslautern
www.leibniz-ivw.de

Verlag: Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: pri-me Printservice & Medienservice
Eisenbahnstraße 55
67655 Kaiserslautern
www.pri-me.eu
D-386

© Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2025

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.
ISSN 1615-021X
ISBN: 978-3-944440-69-9

Auslegung mittels Nassfaserlegen hergestellter Strukturen aus Faser-Kunststoff-Verbund auf Basis einer Topologieoptimierung

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Herrn

Dipl.-Ing. Maximilian Eckrich

aus Speyer

Tag der mündlichen Prüfung:	28.08.2025
Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. Roland Ulber
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Neumeyer
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. David May
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Joachim Hausmann
3. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Axel Spickenheuer

Vorwort

Diese Arbeit wurde in den Jahren 2020 bis 2025 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Programmbereichen Verarbeitungstechnik und Digitalisierung am Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) angefertigt.

Besonders danke ich meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. habil. David May, für die exzellente Betreuung der Arbeit, für sein Vertrauen, für seine positive und motivierende Grundhaltung, für seine Vorbildwirkung und für die mir gebotenen Möglichkeiten zur Weiterentwicklung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Hausmann danke ich für die Übernahme der Zweitbegutachtung und für die wertvollen wissenschaftlichen Diskussionen im Verlauf der Arbeit sowie für seine Beiträge dazu, dass ich mich durch vorherige studentische Arbeiten überhaupt für eine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IVW entschieden habe. Ferner danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Axel Spickenheuer für die Übernahme der Drittbegutachtung und für sein konstruktives Feedback. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Neumeyer.

Besonders bedanken möchte ich mich bei den zahlreichen Mitarbeitenden, mit denen ich am IVW zusammenarbeiten durfte.

Zunächst gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang und Dr.-Ing. Andreas Gebhard für die Aufnahme in die Programmbereiche Verarbeitungstechnik und Digitalisierung und für die umfassende Unterstützung meiner Arbeit.

Für zahlreiche fachliche Diskussionen, für die gegenseitige Unterstützung und für das Gefühl, Teil eines tollen Teams zu sein, danke ich meiner Bürokollegin Anna Dlugaj und Dr.-Ing. Peter Arrabiyeh aus der Nachwuchsgruppe „TopComposite“ sowie meinen Kolleginnen und Kollegen aus den Programmbereichen Verarbeitungstechnik und Digitalisierung: Andreas Krämer, Benedikt Bergmann, Thomas Hoffmann, Dr.-Ing. Jan Janzen, Alexander Faas, Tim Schmidt, Dr.-Ing. Julian Weber, Dr.-Ing. Stefan Weidmann, Alexander Nuhn, Dr.-Ing. Florian Gortner, Dr.-Ing. Maximilian Salmis, Fabian Röder, Dr. Miro Duhovic, Dr.-Ing. Dominic Schommer, Martin Müller, Stefano Cassola, Dr.-Ing. Stephan Becker, Kevin Chen, Valentine Domengie, Martin Detzel, Marvin Wolf, Dr.-Ing. Björn Willenbacher, Dr.-Ing. Jan Eric Semar, Megha Rani und Robert Köhler. Aus dem Programmbereich Bauteilentwicklung danke ich Konstantin Mehl für

die Einführung in die Topologieoptimierung und für seine Unterstützung hierzu sowie Dr.-Ing. Florian Mischo, Stefan Schmidt, Dr.-Ing. Jan Rehra, Thomas Pfaff, Andreas Kenf, Dr.-Ing. Tobias Donhauser und Alexander Huf für die Unterstützung bei Materialcharakterisierungen oder Simulationen. Dr.-Ing. Florian Rieger, Dr.-Ing. Benedikt Hannemann, Thomas Rief, Dr.-Ing. Florian Schimmer, Dr.-Ing. Torsten Heydt und Dr.-Ing. Janna Krummenacker danke ich für die Betreuung und für die tolle Aufnahme bei meinen ersten Schritten am IVW als Studierender.

Ohne Unterstützung bei der Bauteilherstellung, bei Versuchen oder bei der Fertigung von Werkzeugen wäre die Erstellung der Arbeit nicht möglich gewesen. Hierfür bedanke ich mich herzlich bei Steven Brogdon, Torsten Weick, Uwe Schmitt, Stefan Gabriel, Werner Gölzer, Ralph Schneider, Holger Franz, Volker Disandt, Christian Ackel und Harald Weber. Regina Köhne und Karin Assahli danke ich für ihre großartige Unterstützung in allen organisatorischen Bereichen von Konferenzen und Veröffentlichungen bis hin zur Betreuung studentischer Arbeiten.

Für ihre Beiträge zu meiner Arbeit am IVW und zur vorliegenden Arbeit danke ich meinen Studienarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften, vor allem Julius Schwalb, Moritz Bobe, Bastian Natter, Georg Heil, Alexander Schulz und Abdullah Farrukh.

Meinen Eltern danke ich von ganzem Herzen für Ihre Liebe, dass Sie mir die Möglichkeit eines Studiums und einer akademischen Laufbahn ermöglicht haben, und dass sie mich und meine Schwester auf diesem Weg stets bedingungslos und mit aller Kraft unterstützt haben.

Zuletzt gebührt der größte Dank meiner Frau Lena dafür, dass Sie mir stets treu zur Seite steht, für ihr Verständnis in schwierigen Phasen, und vor allem für ihre bedingungslose Liebe und Unterstützung, selbst wenn dies eigenen Verzicht bedeutet. Unserem Sohn danke ich für die zahlreichen glücklichen Momente, die er uns bereits in so kurzer Zeit beschert hat. Ich freue mich auf unsere weitere gemeinsame Zukunft als Familie.

Neustadt an der Weinstraße, Oktober 2025

Maximilian Eckrich

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen.....	III
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen.....	IV
Kurzfassung.....	VI
Abstract	VII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Potenziale und Herausforderungen	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik.....	6
2.1 Verfahren zur Herstellung topologisch optimierter FKV-Komponenten	6
2.1.1 Nassfaserlegen	7
2.1.2 Tailored Fiber Placement	10
2.1.3 3D-Druck mit Endlosfaserverstärkung.....	12
2.1.4 Tapelegen.....	14
2.1.5 Wickeltechnik	15
2.2 Defekte bei der Radienablage mittels Faserablageverfahren.....	16
2.3 Auslegung topologisch optimierter FKV-Strukturen.....	18
2.3.1 Topologieoptimierung	19
2.3.2 Ableiten von Ablagepfaden	26
2.3.3 Gestaltung von Kreuzungspunkten	34
2.3.4 Festlegung der Bauteilquerschnitte.....	35
2.3.5 Auslegungsansätze auf Basis einer Topologieoptimierung	36
3 Untersuchung des Nassfaserlege-Prozesses	39
3.1 Eingesetzte Materialien	39
3.2 Werkstoffkenngrößen bei gerader Ablage	40
3.2.1 Herstellung von Probekörpern	40

3.2.2	Lichtmikroskopische Untersuchung.....	41
3.2.3	Mechanische Charakterisierung	42
3.3	Verhalten bei Radianablage.....	44
3.4	Zusammenfassung und Rückschlüsse für die Auslegung.....	50
4	Auslegungsansatz auf Basis einer Topologieoptimierung.....	52
4.1	Topologieoptimierung	57
4.1.1	BESO-Verfahren	57
4.1.2	Berücksichtigung biaxialer Faserorientierungen.....	60
4.1.3	Parameterstudien zur biaxialen Topologieoptimierung	66
4.2	Ableiten von Ablagepfaden für das Nassfaserlegen.....	72
4.2.1	Algorithmus zum Ableiten von Ablagepfaden	73
4.2.2	Studien zum Ableiten von Ablagepfaden	79
4.3	Modellierung mittels Nassfaserlegen hergestellter Strukturen	82
4.4	Optimierung der Anzahl abzulegender Faserbündel	87
4.5	Zur Wahl des Lagenaufbaus	88
5	Untersuchung topologisch optimierter Strukturen	92
5.1	Einfluss der Optimierung der Faserbündelanzahl je Ablegepfad	94
5.2	Einfluss des Lagenaufbaus	102
5.3	Einfluss des Topologieoptimierungsansatzes	104
5.4	Vergleich mit Referenz-Strukturen.....	112
6	Zusammenfassung	115
7	Literatur	118
	Betreute studentische Arbeiten	128
	Publikationen	129
	Lebenslauf	132

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Kurzform	Beschreibung
AFP	Automated Fiber Placement
ATL	Automated Tape Laying
BESO	Bi-directional Evolutionary Structural Optimization
CAIO	Computer Aided Internal Optimization
CFAO	Continuous Fiber Angle Optimization
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
cFRPC	Continuous fiber reinforced polymer composite
CLT	Klassische Laminattheorie
CTS	Continuous Tow Shearing
DMO	Discrete Material Optimization
EQS	Equally-space method
ESO	Evolutionary Structural Optimization
FDM	Fused Deposition Modeling
FE	Finite Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FRPC	Fiber reinforced polymer composite
HS	Hauptspannung
IVW	Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe
PLA	Poly lactide
RTM	Resin Transfer Molding
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SKO	Soft Kill Option
TFP	Tailored Fiber Placement
UD	Unidirektional

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Lateinische Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	mm^2	Querschnittsfläche
b	mm	Probekörperbreite
C	$\text{N} \cdot \text{mm}$	Nachgiebigkeit
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
E	$\text{N} \cdot \text{mm}$	Dehnungsenergie
F	N	Kraft
G	N/mm^2	Schubmodul
h	mm	Probekörperhöhe
L	mm	Auflagerabstand
$\frac{m_f}{L}$	g/km	Rovingfeinheit bzw. tex-Zahl
N	-	Elementanzahl
n	N/mm	Kraftfluss
n	-	Rovinganzahl
p	-	Penalty-Exponent
R	N/mm^2	Festigkeit
r	mm	Radius
S	N/mm	Struktursteifigkeit
s	mm	Verschiebung
t	mm	Dicke
u	mm	Verschiebung
u, v	mm	Vektorkomponenten
V	mm^3	Volumen(-anteil)
v	mm^3	Elementvolumen
w	-	Gewichtungsfaktor / Funktionsparameter
x	-	Relative Elementdichte
x, y	mm	Koordinaten

Griechische Zeichen	Einheit	Beschreibung
α	N*mm	Sensitivität
β	rad bzw. °	Umschlingungs- oder Faserorientierungswinkel
β	-	Faktor
ε	-	Dehnung
μ_H	-	Haftreibungskoeffizient
$\mu_{\perp\parallel}$	-	Querkontraktionszahl
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	N/mm ²	Normalspannung
τ	N/mm ²	Schubspannung
φ	-	Relativer Faservolumenanteil

Kurzfassung

Das Nassfaserlegen ist ein neues Fertigungsverfahren für Strukturen aus Faser-Kunststoff-Verbund. Es bietet vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten und ein hohes Potenzial in Bezug auf ein geringes Bauteilgewicht. Um dieses zu erschließen, wird im Rahmen der Arbeit ein Auslegungsansatz auf Basis einer Topologieoptimierung entwickelt. Der entwickelte Topologieoptimierungsansatz berücksichtigt die anisotropen Werkstoffeigenschaften und sieht in Strukturbereichen, wo dies nötig ist, eine zweite Faserorientierung vor. Weiterhin wird eine Strategie zur Erzeugung der für die Fertigung benötigten Ablagepfade entwickelt. In Bauteiluntersuchungen wird gezeigt, dass eine Optimierung der Anzahl abzulegender Faserbündel im Anschluss an die Pfaderzeugung das Leichtbaupotenzial weiter steigern kann. Zusätzlich wird der Einfluss des Lagenaufbaus im Bereich von Kreuzungspunkten auf die Bauteilsteifigkeit untersucht. Abschließend wird geprüft, ob eine isotrope Topologieoptimierung, eine anisotrope Topologieoptimierung mit ausschließlich unidirektionalen Faserorientierungen oder eine anisotrope Topologieoptimierung unter Berücksichtigung zusätzlicher Faserorientierungen im Hinblick auf die massespezifische Bauteilsteifigkeit zu bevorzugen ist.

Abstract

Wet Fiber Placement is a new manufacturing process for structures made from fiber-reinforced polymer composites. It offers a wide range of design options and high potential in terms of a low component weight. In order to exploit this potential, a design approach based on topology optimization is developed. The developed topology optimization approach takes the anisotropic material properties into account and considers a second fiber orientation in structural areas where this is necessary. Furthermore, a strategy for generation of the placement paths required for manufacturing is developed. Component tests show that an optimization of the number of fiber bundles to be placed, which is performed subsequently to the path generation, can further increase the lightweight potential. In addition, the influence of the placement sequence at intersection points on the component stiffness is investigated. Finally, it is examined whether an isotropic topology optimization, an anisotropic topology optimization with exclusively unidirectional fiber orientations or an anisotropic topology optimization with consideration of additional fiber orientations is preferable with regard to the weight-specific component stiffness.

1 Einleitung und Zielsetzung

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) eignen sich ideal für Leichtbauanwendungen. Insbesondere mit FKV mit Endlosfaserverstärkung können hervorragende mechanische Eigenschaften bei gleichzeitig geringer Dichte erreicht werden. FKV weisen in der Regel anisotrope mechanische Werkstoffeigenschaften auf. In Faserrichtung sind die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften am höchsten, während sie quer zur Faserrichtung niedriger sind. Daher ist es gängige Praxis, die Faserorientierung an die auf ein Bauteil wirkenden Belastungen anzupassen. Konventionelle Fertigungsverfahren für endlosfaserverstärkte FKV wie das Wickeln, die Pultrusion, oder das Laminieren mit Prepregs oder trockenen Halbzeugen unterliegen jedoch Restriktionen bezüglich der Bauteilgeometrie. Des Weiteren kann bei diesen Verfahren die Faserorientierung nicht beliebig gewählt und vor allem nicht innerhalb einer Lage eines Laminats beliebig variiert werden. Faserablageverfahren wie das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Nassfaserlegen, das Automated Fiber Placement (AFP), das Tailored Fiber Placement (TFP) oder der 3D-Druck mit Endlosfaserverstärkung hingegen bieten durch die automatisierte, schichtweise Aufbringung oder Ablage von Fasermaterial die Möglichkeit Material nur dort abzulegen, wo es tatsächlich für die Struktursteifigkeit benötigt wird. Zudem kann bei diesen Verfahren die Faserorientierung innerhalb einer Lage gezielt variiert werden, z. B. durch die Ablage der Fasern entlang von Kurven. Durch diese Charakteristika weisen diese Verfahren ein hohes Leichtbaupotenzial auf. Durch eine endkonturnahe Bauteilherstellung wird zudem der Materialeinsatz vermindert, was Ressourcen schont und insbesondere bei teuren Kohlenstofffasern ein wirksames Mittel zur Kostenreduktion ist.

1.1 Potenziale und Herausforderungen

Die hohen Potenziale der genannten Faserablage- und additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung materialsparender und für Leichtbauanwendungen geeigneter Bauteile können nur mittels optimierter Bauteilgestaltung und -auslegung erschlossen werden: Ein Bauteil ist stets nur so gut wie das zugrundeliegende Design. Die Auslegung muss daher die geometrischen Freiheiten und Restriktionen des betrachteten Fertigungsverfahrens und die den konkreten Anwendungen zugrundeliegenden Anforderungen berücksichtigen.

Die Gestaltung auf Basis von empirischen Erfahrungswerten und Auslegungsrichtlinien stößt bei Bauteilen, bei denen die variabel ablegbaren Fasern optimal ausgenutzt werden sollen, aufgrund der enormen Freiheitsgrade zunehmend an ihre Grenzen [1]. Ohne numerische Unterstützung ist es für den Menschen nur schwer möglich, einen Gestaltungsentwurf zu generieren, der:

- Zur bestmöglichen Ausnutzung der anisotropen Werkstoffeigenschaften die lokal im Bauteil vorherrschenden Belastungsrichtungen möglichst optimal durch die Faserorientierungen abbildet.
- Für ein minimales Bauteilgewicht so wenig Material wie möglich und nur an den Stellen, wo es tatsächlich benötigt wird, vorsieht.

Zum leichtbaugerechten Konstruieren wird daher vermehrt die Topologieoptimierung eingesetzt [1]. Bei der strukturmechanischen Topologieoptimierung handelt es sich um ein numerisches Optimierungsverfahren, bei dem Material innerhalb eines vorgegebenen Bauraums so angeordnet und umverteilt wird, dass ein vorgegebenes Ziel (z. B. eine maximale Steifigkeit) bestmöglich erreicht wird [2]. In den letzten Jahren werden zunehmend Topologieoptimierungsansätze entwickelt, die anisotropen Werkstoffeigenschaften Rechnung tragen können [2-8]. Sie beschränken sich jedoch meist auf die Optimierung einer unidirektionalen Faserorientierung. Insbesondere für die in der Regel mehrachsig beanspruchten Kreuzungsstellen einer topologisch optimierten Struktur stellt dies keinen geeigneten Ansatz dar, da eine unidirektionale Faserorientierung ungeeignet ist, um mehrachsige Spannungszustände aufzunehmen. Für das im Rahmen der Arbeit betrachtete Nassfaserlegen ist zudem unklar, ob die Wahl des Topologieoptimierungsansatzes, also beispielsweise eine isotrope Topologieoptimierung oder eine anisotrope Topologieoptimierung, die Bauteileigenschaften maßgeblich beeinflusst, und welcher Ansatz zu bevorzugen ist.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, das Ergebnis der Topologieoptimierung, welches zunächst einen Designvorschlag darstellt, in ein fertigungsgerechtes Bauteildesign zu überführen. Für das Nassfaserlegen bedeutet dies, dass das Topologieoptimierungsergebnis in ein Ablagemuster, also in eine Anordnung diverser Ablagepfade, überführt werden muss, welches die fertigungstechnischen Restriktionen berücksichtigt, gleichzeitig aber den optimalen Designentwurf möglichst gut abbildet. Vor diesem Hintergrund werden in der Forschung zunehmend numerische Methoden entwickelt,

die eine automatisierte Erzeugung von Ablagepfaden anhand von Topologieoptimierungsergebnissen erlauben [9-19]. Die bisher entwickelten Verfahren weisen jedoch häufig eine mangelnde Einstellbarkeit der Pfadabstände auf. Weiterhin enthalten die mit den Verfahren erzeugten Ablagepfade im Bereich von Kreuzungspunkten häufig kleine Krümmungsradien. Letztere führen jedoch beim Nassfaserlegen zu Ablagedefekten und sind bei der Pfaderzeugung möglichst zu vermeiden.

Zur simulationsgestützten Absicherung der Struktureigenschaften wird ein Bauteilmodell benötigt, das die Struktureigenschaften möglichst gut abbildet. Für das TFP-Verfahren wurde bereits ein Ansatz, mit dem sich Ablagepfade automatisiert in ein dreidimensionales Bauteilmodell überführen lassen, entwickelt [1]. Mit diesem Ansatz kann ebenso eine Optimierung der lokalen Bauteilquerschnitte erfolgen [20]. Für das Nassfaserlegen als neues Fertigungsverfahren wurden noch keine Ansätze zur Modellbildung untersucht.

Ebenfalls gibt es bisher keine Studien, die den Einfluss der Ablagereihenfolge der einzelnen Faserbündel auf die mechanischen Eigenschaften topologisch optimierter FKV-Strukturen betrachten. Die Ablagereihenfolge legt letztlich den Lagenaufbau des Bauteils fest und hat insbesondere im Bereich von Kreuzungsstellen durch die lokale Aufdickung und Auslenkung der Fasern in Dickenrichtung des Bauteils möglicherweise einen Einfluss auf dessen mechanische Eigenschaften.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, einen Beitrag zur Auslegung topologisch optimierter, mittels Nassfaserlegen hergestellter FKV-Strukturen zu leisten.

Hierzu soll zunächst eine Vorgehensweise für die Auslegung definiert und die einzelnen Auslegungsschritte untersucht werden. Dabei soll ein Topologieoptimierungsansatz, der die anisotropen Werkstoffeigenschaften berücksichtigt und im Bereich von Kreuzungsstellen auch mindestens zwei Faserorientierungen zur Aufnahme mehrachsiger Spannungszustände vorsieht, entwickelt und untersucht werden. Im Rahmen der Arbeit wird auch untersucht, ob die Wahl des Topologieoptimierungsansatzes, also vor allem die Durchführung einer isotropen oder anisotropen Topologieoptimierung, die Bauteileigenschaften maßgeblich beeinflusst – und welcher Topologieoptimierungsansatz hier letztlich zu bevorzugen ist. Weiterhin wird eine Methode entwickelt, um möglichst automatisiert Ablagepfade anhand des Topologieoptimierungsergebnisses zu

erzeugen. Im Rahmen der Arbeit wird geprüft, ob die hiermit erzeugten Pfade den Hauptspannungen innerhalb des Bauteils folgen und ob sich mit der Methode gleichmäßige Pfadabstände und im Bereich von Kreuzungsstellen fertigungsgerechte und mechanisch günstige Pfadverläufe ohne kleine Krümmungsradien funktional realisieren lassen.

Für das TFP-Verfahren existiert bereits ein Ansatz zur Überführung von Ablagepfaden in dreidimensionale Bauteilmodelle [1] sowie zur Optimierung der lokalen Bauteilquerschnitte [20]. Im Rahmen dieser Arbeit wird überprüft, ob ein solcher Modellierungsansatz auch für das Nassfaserlegen ausreichend genaue Simulationsergebnisse liefert. Zusätzlich werden Studien zum Einfluss der Ablagereihenfolge im Bereich von Kreuzungspunkten auf die mechanischen Eigenschaften topologisch optimierter Strukturen durchgeführt.

Zu Beginn der Arbeit wird zunächst der Stand der Technik hinsichtlich der Topologieoptimierung – insbesondere im Hinblick auf anisotrope Werkstoffe – und hinsichtlich des Ableitens von Ablagepfaden betrachtet. Weiterhin wird der Stand der Technik der weiteren Bauteilgestaltung anhand von Ablagemustern dargelegt. Dies umfasst vor allem die Festlegung der lokalen Bauteilquerschnitte – gleichbedeutend mit der lokal abzulegenden Menge an Fasermaterial – sowie deren Optimierung.

Da das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Nassfaserlegen ein gänzlich neues Verfahren ist, welches sich von bereits etablierten Verfahren unterscheidet, werden im Hauptteil zunächst die mechanischen Eigenschaften mittels Nassfaserlegen hergestellter Probekörper untersucht und gegenüber Referenzwerten eingeordnet. Weiterhin erfolgen Untersuchungen zur gekrümmten Ablage und der damit einhergehenden Defekte sowie zum Einfluss der Defekte auf die mechanischen Struktureigenschaften. Basierend auf dem Stand der Technik zur Topologieoptimierung, dem Ableiten von Ablagepfaden und der Gestaltung topologisch optimierter FKV-Strukturen und unter Berücksichtigung der Ablagestudien wird im Hauptteil der Arbeit ein Auslegungsansatz für entsprechende Bauteile konzipiert und dessen einzelne Bausteine untersucht.

Hierzu werden zunächst zwei Ansätze zur anisotropen Topologieoptimierung untersucht und miteinander verglichen: Ein Ansatz, der nur die unidirektionale Ablage des Fasermaterials berücksichtigt, während der zweite Ansatz auch die Möglichkeit zur bereichsweisen Ablage von Faserbündeln entlang zweier unterschiedlicher Orientierungen berücksichtigt. Weiterhin wird ein Verfahren zum Ableiten von Ablagepfaden,

welches sowohl einen gleichmäßigen Pfadabstand wie auch ein mechanisch günstiges Design im Bereich von Kreuzungsstellen aufweisen soll, vorgestellt und die hiermit erzeugten Ablagepfade werden analysiert. Auf Basis der Ablagepfade wird ein bereits für das TFP-Verfahren etablierter Ansatz implementiert, der es erlaubt mithilfe von Analysemodellen die optimale Anzahl abzulegender Faserbündel je Ablagepfad (und somit optimale Bauteilquerschnitte) zu ermitteln [20]. Dieser Schritt ist insbesondere deshalb nötig, da eine dreidimensionale Topologieoptimierung in der Regel keine fertigungsgerechten, die Ablage von Faserbündeln berücksichtigenden Querschnitte liefert [1]. Eine zweidimensionale Topologieoptimierung auf der anderen Seite nimmt eine konstante Bauteildicke an. Diese ist ebenso nicht fertigungsgerecht und stellt für die meisten Anwendungen auch keinen optimalen Bauteilentwurf da [1]. Es wird geprüft, ob der Modellierungsansatz auch für die Abbildung der mechanischen Eigenschaften mittels Nassfaserlegen hergestellter Strukturen geeignet ist. Ergänzend werden numerische Studien durchgeführt, bei denen die Ablagereihenfolge und somit der Lagenaufbau im Bereich von Kreuzungspunkten variiert wird. Anhand der Ergebnisse wird ermittelt, ob die Ablagereihenfolge einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ausübt und wie sie gewählt werden sollte.

Abschließend werden entsprechend ausgelegte, topologisch optimierte Strukturen mittels Nassfaserlegen hergestellt und mechanisch geprüft. Die mechanischen Prüfungen sollen dabei die Fragestellungen beantworten, ob:

1. Eine nachträgliche Optimierung der Anzahl abzulegender Faserbündel je Ablagepfad die gewichtsbezogenen mechanischen Eigenschaften der topologisch optimierten Strukturen noch weiter steigern kann.
2. Der Lagenaufbau bzw. die Ablagereihenfolge die mechanischen Eigenschaften der betrachteten Strukturen signifikant beeinflusst.
3. Die Wahl des Topologieoptimierungsansatzes, also isotrope, rein unidirektionale oder anisotrope Optimierung mit bereichsweise zwei Faserorientierungen, unter Durchführung der gesamten Auslegungsprozedur überhaupt einen signifikanten Einfluss auf die erzielten Bauteileigenschaften hat und welcher Optimierungsansatz ggf. zu bevorzugen ist.
4. Der für das TFP-Verfahren entwickelte Modellierungsansatz aus [1] auch für die Simulation mittels Nassfaserlegen hergestellter Strukturen geeignet ist und eine ausreichende Genauigkeit bzgl. der ermittelten Struktureigenschaften aufweist.

2 Stand der Technik

Im Folgenden wird zunächst das im Rahmen der Arbeit betrachtete Nassfaserlegen sowie weitere Fertigungsverfahren für endlosfaserverstärkte FKV, die sich für die Herstellung topologisch optimierter FKV-Strukturen eignen, erläutert. Anschließend werden gängige Topologieoptimierungsverfahren vorgestellt und ein Überblick über den Stand der Technik bzgl. der Topologieoptimierung mit anisotropen Werkstoffen und des Ableitens von Ablagepfaden gegeben. Darauf aufbauend wird der Stand der Technik bzgl. der weiteren Gestaltung topologisch optimierter FKV-Strukturen auf Basis der erzeugten Ablagepfade dargelegt.

2.1 Verfahren zur Herstellung topologisch optimierter FKV-Komponenten

FKV bestehen aus Verstärkungsfasern und einer diese umgebenden Polymer-Matrix. Im Verbund sorgen die Fasern für hohe Steifigkeiten und Festigkeiten und übertragen die Kräfte, während die Matrix die Fasern einbettet, räumlich fixiert, gegen Druckbelastungen abstützt, die Lasten in die Fasern verteilt und diese vor Umgebungseinflüssen schützt [21]. Es gibt zahlreiche unterschiedliche Fasermaterialien, z. B. Glasfasern oder Kohlenstofffasern. Die Fasern können in sehr unterschiedlicher Form vorliegen, z. B. als Kurzfasern (Länge < 10 mm), Langfasern (Länge > 25 mm) oder als sogenannte Endlosfasern [22]. Bei den Matrixsystemen unterscheidet man hauptsächlich zwischen Duroplasten und Thermoplasten [21].

Bei der Herstellung von FKV-Strukturen müssen stets drei Prozessschritte,

- die Imprägnierung
- die Konsolidierung
- und die Solidifikation

durchlaufen werden. Diese drei Schritte können je nach Fertigungsverfahren zeitlich und örtlich getrennt oder auch gleichzeitig ablaufen. Beim Imprägnieren werden die Fasern und die Zwischenräume mit der flüssigen Matrix getränkt. Bei der Konsolidierung wird die Luft aus dem Verbund verdrängt und bei der Solidifikation wird der Kunststoff von seiner flüssigen Form in einen festen Zustand überführt, sodass das Bauteil als Festkörper vorliegt. [23]

Es gibt eine große Vielfalt an unterschiedlichen Halbzeugen und Herstellungsprozessen für FKV. Im Folgenden findet nur eine Betrachtung von Verfahren statt, die sich dadurch auszeichnen, dass:

- sie zur Herstellung topologisch optimierter Strukturen geeignet sind.
- Endlosfasern verwendet werden (keine Kurz- oder Langfasern).
- die Faserorientierung variabel innerhalb einer Lage verändert werden kann.

Dies hat den Hintergrund, dass vor allem der Stand der Technik bzgl. Fertigungsverfahren, die dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Nassfaserlegen ähnlich sind, und die zugehörigen Auslegungsansätze für topologisch optimierte Strukturen betrachtet werden sollen. Verfahren für kurz- oder langfaserverstärkte Kunststoffe wie der Spritzguss oder Sheet Molding Compound eignen sich zwar auch zur Herstellung topologisch optimierter Strukturen, unterscheiden sich jedoch grundsätzlich in Bezug auf die Faserarchitektur und -ausrichtung sowie im Hinblick auf die Prozessführung vom Nassfaserlegen, weshalb sie nicht betrachtet werden. Während beispielsweise beim Handlaminieren mit Prepregs oder textilen Halbzeugen sowie im Resin Transfer Molding-Verfahren ebenfalls topologisch optimierte Strukturen mit Endlosfaserverstärkung hergestellt werden können, so kann durch die Verwendung flächiger, textiler Halbzeuge und Zuschnitte bei diesen Verfahren die Faserorientierung innerhalb einer Lage nicht variiert werden. Faserablageverfahren wie das Tapelegen, das Tailored Fiber Placement oder der 3D-Druck mit Endlosfaserverstärkung hingegen zeichnen sich dadurch aus, dass einzelne Faserbündel oder Fasern automatisiert abgelegt oder aufgebracht werden. Dabei können die Faserverläufe Krümmungen aufweisen, sodass die Faserorientierung innerhalb einer Lage variabel ist. Man spricht daher auch von „variabelaxialen“ Verfahren [1]. Entsprechend werden diese Verfahren und die zugehörigen Auslegungsansätze im Stand der Technik betrachtet. Bei der roboterbasierten 3D-Wickeltechnik werden Faserbündel um Pins oder Bolzen gezogen, um skelettartige Strukturen herzustellen. Das Verfahren erlaubt eine variable Faserorientierung und eignet sich zur Herstellung topologisch optimierter Strukturen. Es wird deshalb ebenso betrachtet.

2.1.1 Nassfaserlegen

Das Nassfaserlegen wird derzeit am *Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW)* entwickelt. Das Verfahren basiert auf der in-line Imprägnierung trockener Faserbündel

(sogenannte Rovings) und deren Direktablage in einem Prozess. Die „nassen“, frisch imprägnierten Rovings sind biegeschlaff und lassen sich einfacher verformen als vorimprägnierte Tapes. Somit ist mit dem Verfahren prinzipiell die Ablage in Kurven möglich. Weiterhin wird durch die Verwendung von Rovings und der in-line Imprägnierung auf vergleichsweise teure, vorimprägnierte Halbzeuge verzichtet.

Das Prinzip des Verfahrens ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Zunächst werden trockene Rovings durch eine Imprägniereinheit geführt. Hierbei können unterschiedliche Systeme verwendet werden, beispielsweise eine über eine Pumpe betriebene Siphon-Imprägniereinheit [24] oder konventionelle Harzbadssysteme. In beiden Fällen werden für eine gute Imprägnierqualität und Faservolumenanteile im Bereich von 45 % bis 55 % ausreichend hohe Zugkräfte benötigt [25].

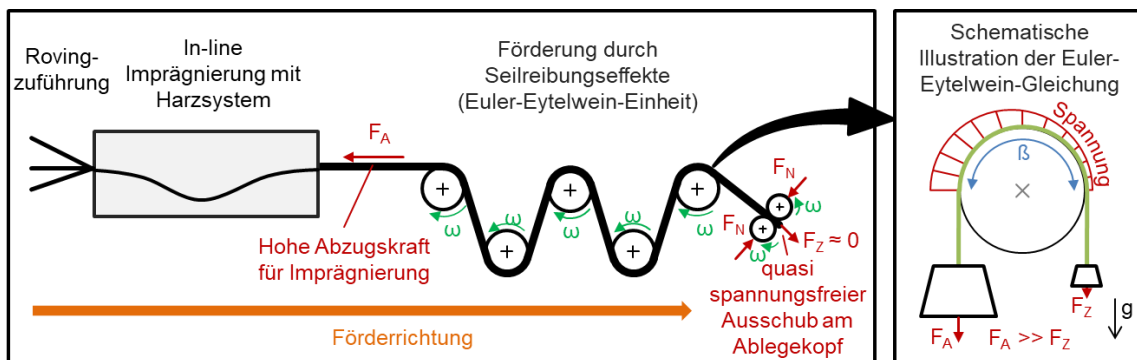


Abbildung 2.1: Prinzip des Nassfaserlegens nach [26]

Um die benötigten Kräfte zur Imprägnierung aufzubringen und für eine weitere Förderung der mit Harz imprägnierten Rovings – die durch das Harz eine sehr gleitfähige Oberfläche und eine geringe Haftreibung aufweisen – werden diese über ein System aus mehreren angetriebenen Rollen geführt [25]. Dieses macht sich Seilreibungseffekte zunutze, die durch die EULER-EYTELWEIN-Gleichung (2.1) beschrieben werden können.

$$F_Z = \frac{F_A}{e^{\mu_H \beta}} \quad (2.1)$$

Hierbei ist μ_H der Haftreibungskoeffizient zwischen Roving und Rolle und β der Umschlingungswinkel. Gemäß Gleichung (2.1) ist die zum Ausschieben des Rovings aufzubringende Kraft F_Z kleiner als die Abzugskraft F_A [25]. MAY ET AL. [25] führen Versuche mit unterschiedlichen EULER-EYTELWEIN-Konzepten durch und zeigen, dass für den höchsten betrachteten Umschlingungswinkel F_Z um bis zu 96 % kleiner ist als die

Abzugskraft F_A . Dadurch muss am finalen Walzenpaar (Abbildung 2.1) nur eine geringe, auf den Roving wirkende Normalkraft F_N (< 10 N [25]) aufgebracht werden, um diesen zu fördern und auszuschieben. Durch die geringe Normalkraft werden Faserschädigungen und das Auspressen von Harz reduziert.

Abbildung 2.2 zeigt einen Laboraufbau der Anlage. Der trockene Roving ist auf einer Spule befestigt und wird durch die Imprägniereinheit gezogen. Die Kraft hierfür wird durch acht über eine Kette angetriebene Rollen aufgebracht. Das finale Walzenpaar zum Aufbringen der restlichen Kraft für die Förderung des Rovings befindet sich im Ablagekopf. Unmittelbar vor dem finalen, angetriebenen Walzenpaar befindet sich eine passive Führungsrolle mit V-Nut im Ablagekopf. Diese hat die Funktion, den Roving seitlich zu führen, um die Ablagegenauigkeit zu erhöhen. Der Ablagekopf verfügt über eine angetriebene Rotationsachse, sodass er entlang der abzulegenden Bahn ausgerichtet werden kann und ist zudem auf einer Z-Achse befestigt, sodass er vertikal verfahren kann (Abbildung 2.3). Unterhalb des Ablagekopfes befindet sich ein XY-Portal, auf dem sich Werkzeuge montieren lassen. Durch horizontales Verfahren des Portals und durch das gleichzeitige Ausschieben des Rovings aus dem Ablagekopf heraus wird der imprägnierte Roving auf dem Werkzeug abgelegt. Über die Steuerungseinheit können die einzelnen Achsen (XY-Tisch, Z-Achse Ablagekopf, Rotationsachse Ablagekopf, Förderwalzen Ablagekopf, EULER-EYTELWEIN-Einheit) manuell bewegt werden. Alternativ können Fertigungsprogramme gemäß den geplanten Ablagepfaden in Form eines G-Codes hinterlegt und automatisch abgearbeitet werden.

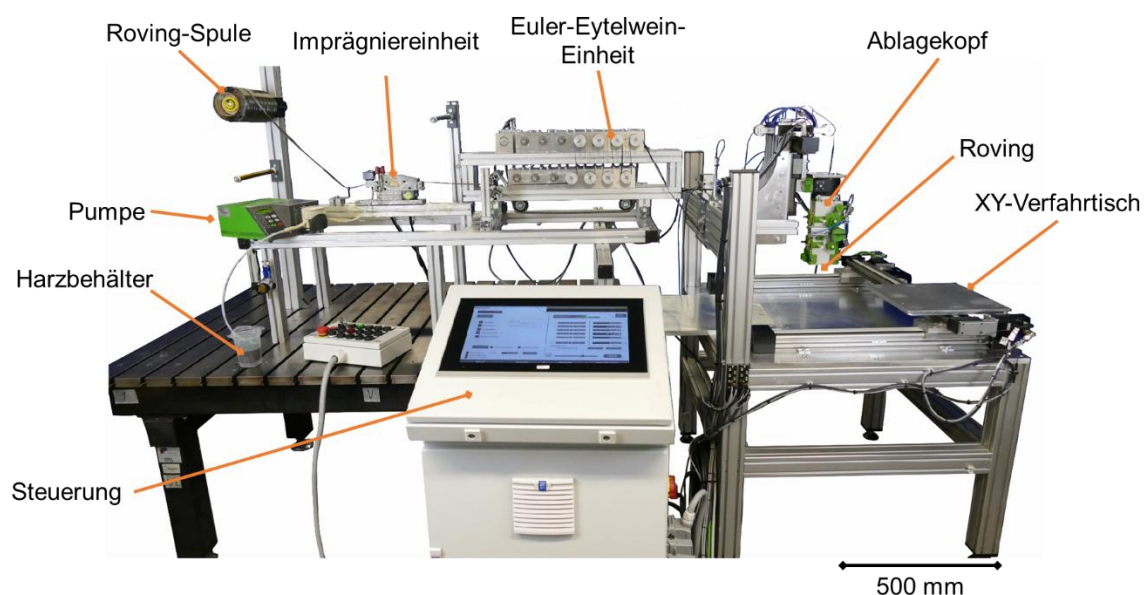


Abbildung 2.2: Laboranlage zum Nassfaserlegen nach [27]

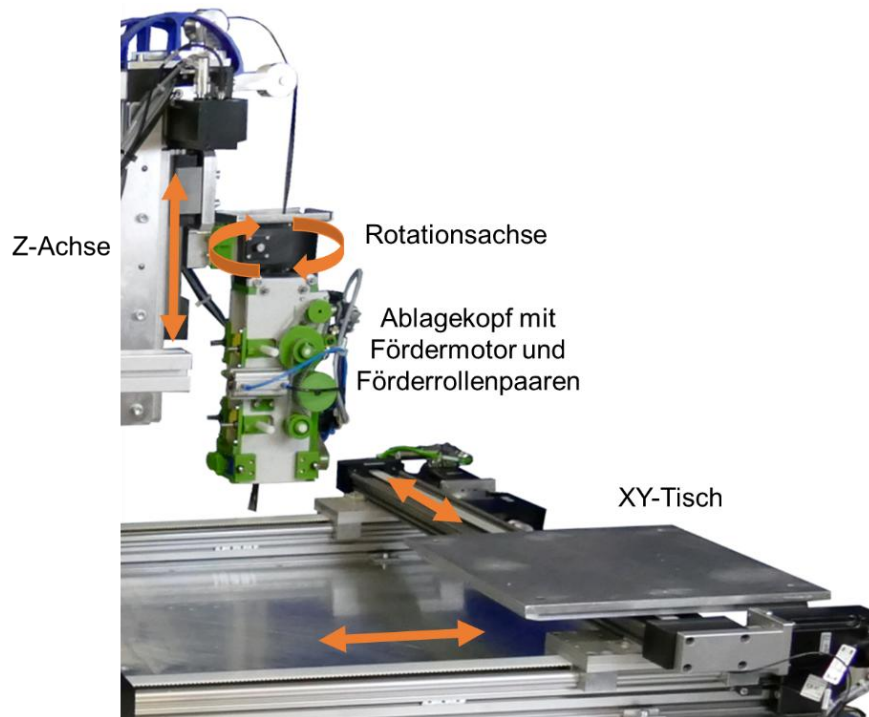


Abbildung 2.3: Angetriebene Achsen und Ablagekopf an der Laboranlage

Nach der Ablage müssen die Bauteile noch konsolidiert werden und über das Aushärten des Harzes solidifizieren. Hierfür muss Druck auf das Bauteil appliziert und die Aushärtereaktion, z. B. durch Einstellen einer gewissen Temperatur, durchlaufen werden. Für diesen Schritt sind verschiedene, gängige Verfahren denkbar, beispielsweise die Autoklaventechnik, das Nasspressen in einer Presse oder das Vakuumsackverfahren.

Durch die hohe geometrische Flexibilität und die Möglichkeit die Faserorientierung lokal der Belastung anzupassen, eignet sich das Nassfaserlegen zur Herstellung topologisch optimierter Strukturen. Hierfür können die Fasern endkonturnah in Nutenwerkzeuge abgelegt werden, sodass nach der Konsolidierung und Solidifikation nahezu keine Nachbearbeitung nötig ist.

2.1.2 Tailored Fiber Placement

Das Tailored Fiber Placement (TFP) ist ein sticktechnisches Verfahren. Hierbei werden Rovings durch eine drehbare, hin und her pendelnde Führung gezogen und durch eine sich dahinter befindliche Nähnadel mithilfe eines Nähfadens auf ein Basismaterial, das auf einem beweglichen Tisch befestigt ist, aufgestickt und somit fixiert (Abbildung 2.4). Je nach Lösung kann der Nähkopf beliebig gedreht werden, sodass es keine Limitationen bzgl. des Drehwinkels gibt. [1]

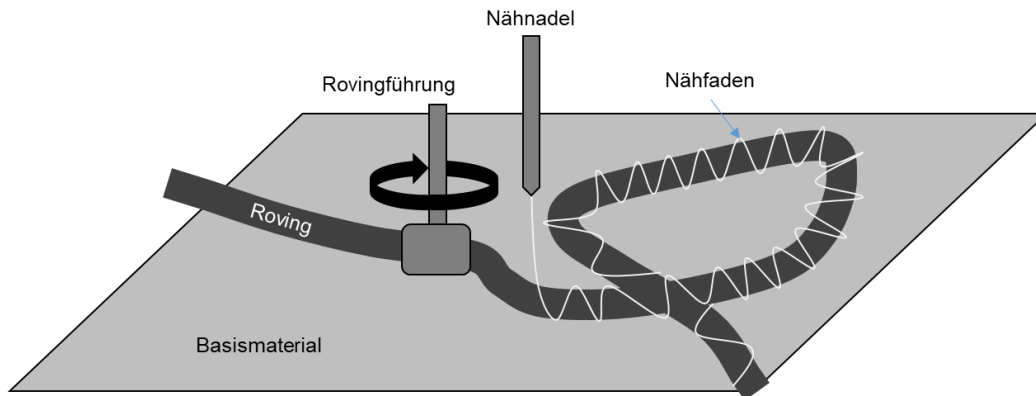


Abbildung 2.4: Prinzip des TFP-Verfahrens nach [1]

Bei den mittels TFP aufgestickten Formen handelt es sich noch um trockene Vorformlinge, sogenannte Preforms. Diese müssen in einem nachgelagerten Schritt mit der Matrix imprägniert und konsolidiert werden sowie solidifizieren. Hierfür eignen sich z. B. das Vakuuminfusionsverfahren oder das Resin Transfer Molding (RTM). Bezüglich der eingesetzten Rovings können alle gängigen Rovingstärken von 3K bis 50K (bestehend aus 3.000 bis 50.000 Einzelfasern) verarbeitet werden. Minimal mögliche Ablageradien betragen etwa 5 mm, sind jedoch abhängig vom verwendeten Fasertyp, von der Rovingstärke und von der Spreizung des Rovings. [1]

Das TFP-Verfahren ist aufgrund der hohen Designfreiheiten für die lastgerechte Ablage von Verstärkungsfasern und zur Herstellung topologisch optimierter FKV-Strukturen geeignet. Beispiele für bereits mittels TFP-Technologie hergestellte, topologisch optimierte Komponenten mit lastgerechter Faserorientierung sind Versteifungsbügel für Fahrradfelgenbremsen (engl. Brake Booster) [1], Leichtbau-Stühle [28], das Mittelstück eines Schießbogens [28] oder Kfz-Heckrahmen [29]. Kommerzielle Anwendungen der TFP-Technologie sind beispielsweise Fensterrahmen für den Airbus A350 [30], Fuß-Orthesen [30] oder Rotoren [31], wobei es sich bei diesen drei Anwendungen nicht um topologisch optimierte Strukturen mit entlang der Lasten ausgerichteten Faserorientierungen handelt. Übliche Bauteilgrößen liegen im Bereich von $< 0,5 \text{ m}^2$ Bauteiloberfläche [32]. Von den hier betrachteten Verfahren ist das TFP-Verfahren dem im Rahmen der Arbeit untersuchten Nassfaserlege-Prozess im Hinblick auf die Prozessfreiheiten und -restriktionen am ähnlichsten. Ein Unterschied besteht in der Fixierung der Preform mithilfe eines Nähfadens, wodurch im Gegensatz zum Nassfaserlegen eine Verschiebung der Fasern im Konsolidierungsprozess verhindert

wird. Weiterhin können beim TFP-Verfahren die trockenen, zweidimensionalen Preforms vor der Imprägnierung drapiert werden, um dreidimensionale Geometrien abzubilden [32]. Beim Nassfaserlegen ist eine Drapierung der abgelegten Preforms aufgrund der fehlenden Fixierung der imprägnierten Rovings untereinander derzeit nicht möglich.

2.1.3 3D-Druck mit Endlosfaserverstärkung

Während im kunststoffbasierten 3D-Druck hauptsächlich unverstärktes Material verarbeitet wird, wurde diese Technologie dahingehend weiterentwickelt, dass zunehmend auch Materialien mit Verstärkungsfasern in Form von Kurzfasern oder auch Endlosfasern verwendet werden können. Für den 3D-Druck mit Faserverstärkung wird meist das Fused Deposition Modeling (FDM) unter Verwendung thermoplastischer Matrixsysteme eingesetzt [33]. Bei diesem Verfahren werden strangförmige Kunststoffhalbzeuge in einen Extruder gefördert, dort aufgeschmolzen und auf das Druckbett extrudiert, wo sie abkühlen und erstarren. Bezüglich des thermoplastischen 3D-Drucks mit kontinuierlicher Faserverstärkung wird zwischen drei Ansätzen unterschieden (Abbildung 2.5). Beim ersten Ansatz werden die Fasern und die Matrix auf dem Druckbett zusammengeführt. Beim zweiten Ansatz erfolgt die Zusammenführung in der Druckdüse und beim dritten Ansatz werden vorimprägnierte Halbzeuge verwendet. Die höchsten Faservolumengehalte und die besten mechanischen Eigenschaften lassen sich mit letztgenanntem Ansatz erzielen. [33]

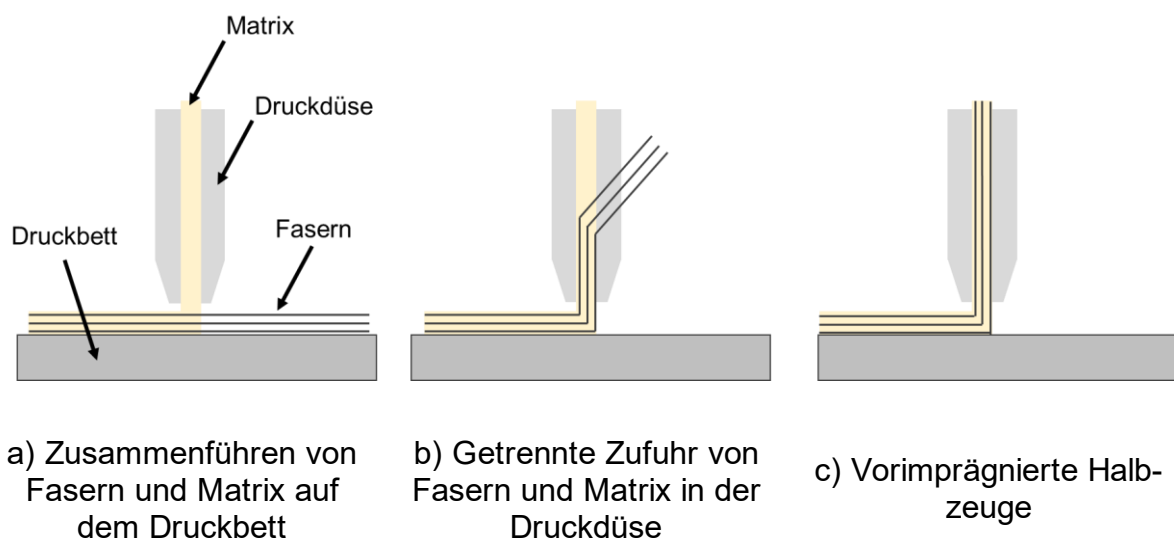


Abbildung 2.5: Konzepte für den thermoplastischen 3D-Druck mit kontinuierlicher Faserverstärkung nach [33]

Wird das extrudierte Material beim Verlassen der Düse ausreichend schnell heruntergekühlt, dann kann mit dem 3D-Druck sogar eine Ablage in den freien Raum erfolgen, sodass die Fasern aus der Ablageebene heraus orientiert vorliegen können [33]. Generell verfügt der 3D-Druck somit über höhere geometrische Freiheitsgrade als das Nassfaserlegen. Nachteilig sind die meist geringen Output-Geschwindigkeiten, da in der Regel nur geringe Halbzeugdicken zum Einsatz kommen und die Druckgeschwindigkeiten eher niedrig sind. Außerdem liegen durch die fehlende Konsolidierung vergleichsweise hohe Porengehalte (ca. 10-30 % [34]) vor. Es ist aber möglich, den Porengehalt durch ein nachgelagertes erneutes Aufschmelzen und Verpressen der Bauteile zu vermindern und somit die Bauteilqualität zu steigern [34].

Der 3D-Druck mit Endlosfaserverstärkung wird bereits zur Herstellung topologisch optimierter Strukturen eingesetzt. In der Forschung werden vielfach brückenähnliche Strukturen für die mechanische Prüfung im Dreipunkt-Biegeversuch mittels endlosfaserverstärktem 3D-Druck hergestellt und untersucht [19,35,36,37], da sich diese aufgrund des einfachen Prüfaufbaus gut zum Vergleich unterschiedlicher Fertigungs- oder Designansätze eignen. Das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt* präsentiert einen anwendungsnahen Demonstrator, bei dem eine topologisch optimierte Struktur mithilfe von endlosfaserverstärktem Hochleistungsthermoplast-Filament in Kombination mit kurzfaserverstärktem Filament zur lokalen Verstärkung auf eine mehrfach gekrümmte FKV-Schale gedruckt wird [38]. Im kommerziellen Bereich entwickelt das Unternehmen *ARRIS* gemeinsam mit *Airbus* mithilfe des endlosfaserverstärkten 3D-Drucks hergestellte, topologisch optimierte Halterungen für den Einsatz in Flugzeugkabinen [39]. Weitere 3D-gedruckte Produkte des Unternehmens umfassen u. a. Skelett-Strukturen, die Doppel-T-Träger ersetzen können [40], Komponenten für Drohnen [41], topologisch optimierte Verstärkungen für Laufschuhe [42] und Kletterausrüstung [43]. Die *9TLabs AG* nutzt ebenfalls den 3D-Druck mit Endlosfaserverstärkung, um beispielsweise Türscharniere für Helikopter [44] oder auch Halterungen für den Luftfahrtbereich mit lastgerechter Faserorientierung [45] herzustellen. Im Hinblick auf die Herstellung topologisch optimierter Strukturen mit an die Belastung angepasster Faserorientierung findet das Verfahren somit bereits industriell Anwendung.

2.1.4 Tapelegen

Beim Tapelegen werden vorimprägnierte, faserverstärkte Tapes automatisiert zur Bauteilherstellung abgelegt. Während beim Automated Tape Laying (ATL) breitere Tapes (Breite ca. 2,5 cm bis 30 cm) [23] eingesetzt werden, werden beim Automated Fiber Placement (AFP) schmalere Tapes verwendet (Breite ca. 3 mm bis 25 mm) [46,47]. Hierdurch wird beim AFP – auf Kosten des Materialoutputs – im Vergleich zum ATL eine höhere Geometriefreiheit erreicht.

Bezüglich der Matrix kann zwischen duroplastischem Tapelegen und Thermoplast-Tapelegen (Abbildung 2.6) unterschieden werden. In beiden Fällen werden die Tapes bei der Ablage mithilfe einer Kompaktierungsrolle auf das Werkzeug oder auf bereits abgelegte Tapes gedrückt. Durch eine eingebaute Schneidvorrichtung können einzelne Tapes diskontinuierlich neben- und aufeinander abgelegt werden, um das Bauteil schichtweise aufzubauen. Die minimale Bauteilgröße ergibt sich aus der minimalen Schnittlänge, die durch den konstruktiven Aufbau des Tapelegekopfes vorgegeben wird. Für die Ablage können Roboter oder Portal-Legesysteme eingesetzt werden, die es erlauben, die Orientierung und Position der einzelnen Tapes zu variieren. In der Regel ist ein nachgelagerter Prozessschritt zur vollständigen Konsolidierung nötig. [23]



Abbildung 2.6: Portal-Legesystem für das Thermoplast-Tapelegen (beide Bilder: Copyright der *Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH*)

Mit dem Tapelegen ist die Ablage auf gekrümmte Oberflächen, die lokale Abstufung der Bauteildicke, die lokale Verstärkung mit einzelnen Tapes und die Ablage von Radien möglich. Die Drapierbarkeit der Tapes ist limitierend für die Radienablage. Schmalere Tapes sorgen für eine verbesserte Drapierbarkeit. [23]

Das Tapelegen wird industriell vor allem für die Herstellung großer, schalenförmiger Bauteile (mehrere Meter in Länge und Breite) im Bereich der Luftfahrt eingesetzt [48].

Beispiele hierfür sind Rumpfsegmente, die Flugzeugnase, die Verkleidung der Tragflächen, Flügelholme [48] sowie Leitwerke oder Flügelmittelkästen [32]. Bei den industriellen Anwendungen dominieren Lamine mit innerhalb einer Lage konstanten Faserorientierungen [49]. Häufig wird ein quasi-isotroper Lagenaufbau verwendet [49]. Das AFP-Verfahren kann auch für die Ablage von Gitter-Strukturen zur Verstärkung genutzt werden. Solche Verstärkungsgitter mit geraden Pfaden werden z. B. in [50] und in [51] mittels AFP hergestellt und untersucht. Üblicherweise werden solche Gitter-Verstärkungsstrukturen jedoch mithilfe des Faserwickelns unter Verwendung von Silikon-Werkzeugen hergestellt [50,52,53]. Eine Anwendung des AFP-Verfahrens zur Herstellung topologisch optimierter Strukturen oder skelettartiger Strukturen mit zumindest weitestgehend lastgerecht ausgerichteten Faserorientierungen konnte bei den durchgeführten Recherchen nicht ermittelt werden. Dies ist wahrscheinlich auf die im Vergleich zum TFP-Verfahren oder dem 3D-Druck höheren Einschränkungen bei der Radienablage, den benötigten Mindestablagelängen und den realisierbaren Dickensprüngen zurückzuführen.

2.1.5 Wickeltechnik

Mit der Wickeltechnik lassen sich rotationssymmetrische Bauteile, z. B. Rohre, Druckbehälter oder auch Futtersilos und Booster für Raketen herstellen. Beim duroplastischen Nasswickeln werden Rovings im Prozess – z. B. unter Verwendung eines Harzbades – imprägniert, durch ein Fadenauge geführt und um den rotierenden Wickelkern, der die Bauteilform vorgibt, gezogen. Die Anlagentechnik basiert heutzutage häufig auf dem Einsatz von Robotern. Gängige Bauteildimensionen liegen im Bereich von bis zu 1 m Durchmesser und einer Länge von bis zu 5 m. [23]

Eine auf Industrie-Robotern basierende Anlagentechnik eröffnet die Möglichkeit, auch von rotationssymmetrischen Geometrien abweichende Bauteile herzustellen [54]. BAUER [54] zeigt in seiner Arbeit vier verschiedene Konzepte für den Aufbau einer Anlagentechnik für das dreidimensionale, roboterbasierte Wickeln. Diese unterscheiden sich u. a. im Hinblick auf den Aufwand bei der Anlagenprogrammierung, die erreichbaren Geschwindigkeiten, die Freiheitsgrade bei der Bauteilherstellung, den benötigten Platz der Anlagentechnik und im Hinblick auf die Anschaffungskosten voneinander. Mit der roboterbasierten Wickeltechnik lassen sich auch aus der Anordnung von Drei-

ecken bestehende Gitter-Strukturen, häufig unter Einsatz von Elastomer-Kernen, herstellen [53,55]. Diese im Englischsprachigen als „isogrid“ bezeichneten Gitter-Strukturen werden in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt [56]. *Albany Engineered Composites* (ehemals *CIRCOMP*) wickelt beispielsweise „isogrid“-Strukturen für den Einsatz in Flugzeugrümpfen [57] und präsentiert ebenso einen Fahrradrahmen in „isogrid“-Bauweise [58]. Werden die Rovings um Stifte, Hülsen oder andere Knotenpunkte statt um einen Kern gezogen, können mit dem Wickeln skelettartige Strukturen hergestellt werden [55]. In seiner Arbeit stellt BAUER [54] einen topologisch optimierten Brake Booster im roboterbasierten Wickelverfahren her. Untersucht wird dort eine vollständig unter Verwendung von Kohlenstofffaserrovings gewickelte Variante sowie weitere Varianten, die zusätzlich im Spritzgussprozess mit kurzglasfaserverstärktem Material hybridisiert werden. Weitere Beispiele für durch Wickeln hergestellte, skelettartige Strukturen sind Pavillons [59,60] oder ein Tisch in Stabwerk-Bauweise [61]. Das Unternehmen *GRADEL* stellt zusammen mit *BMW* eine mit 3D-Wickeltechnik hergestellte Stabwerk-Sitzstruktur vor [62]. Bezüglich der Herstellung skelettartiger oder auch topologisch optimierter Strukturen ist die roboterbasierte 3D-Wickeltechnik somit industriell etabliert.

Im Gegensatz zum Nassfaserlegen können im Roboterwickelprozess – bei Verwendung entsprechender Stifte, Hülsen oder Werkzeuge mit Führungsnuten – dreidimensionale Strukturen, bei denen die Fasern in alle Raumrichtungen orientiert sind, hergestellt werden. Allerdings müssen die Rovings stets in geschlossenen Mustern um die Umlenkpunkte gewickelt werden, um die Fadenspannung aufrecht zu erhalten. Das Verfahren unterscheidet sich bezüglich der Fertigungsrestriktionen und Designanforderungen somit deutlich vom Nassfaserlegen.

2.2 Defekte bei der Radienablage mittels Faserablageverfahren

Bezüglich des Prinzips der Ablagetechnologie sind TFP und AFP dem Nassfaserlegen am ähnlichsten. Bei diesen Verfahren treten bei der Ablage von Radien Defekte auf, die sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken können. Es ist somit naheliegend, dass auch bei der Radienablage mittels Nassfaserlegen Defekte auftreten können, weshalb der Stand der Technik beim TFP und AFP hierzu im Folgenden aufgezeigt wird.

Mittels TFP-Technologie aufgestickte Rovings weisen bereits bei geraden Bahnen eine durch das Aufsticken bedingte Welligkeit auf. Die Welligkeit wirkt sich auf die mechanischen Eigenschaften aus und hängt u. a. von der Stichlänge und dem verwendeten Stichmuster ab. In [63] erreichen mittels TFP-Technologie mit einer Stichlänge von 1 mm abgelegte Rovings in Faserrichtung einen Elastizitätsmodul, der dem über die Mischungsregel berechneten Elastizitätsmodul entspricht. Bei einer Stichlänge von 6 mm hingegen reduziert sich der Elastizitätsmodul in Faserrichtung gegenüber dem über die Mischungsregel erwarteten Wert um ca. 15 %. Ein gegenteiliger Effekt wird in [63] im Hinblick auf die faserparallele Zugfestigkeit festgestellt: Eine kleinere Stichlänge resultiert – aufgrund der steigenden Anzahl an Einstichstellen – in einer verminderten Festigkeit (-28 % gegenüber Mischungsregel für eine Stichweite von 1 mm und -16 % gegenüber Mischungsregel für eine Stichweite von 6 mm). [63]

Beim Sticken entlang gekrümmter Pfade ändert sich die Welligkeit. Der Roving zieht sich in Richtung des Innenradius und wird dort gestaucht, wodurch sich die Welligkeit an der Innenseite erhöht. Die Welligkeit an der Außenseite des Rovings dagegen reduziert sich, da hier Zugspannungen wirken (Abbildung 2.7). Zusätzlich führt die Ablage mit kleiner werdendem Ablageradius zunehmend zu einem Aufstellen des Rovings, wobei die Ablagebreite abnimmt und die Ablagedicke zunimmt. [31]

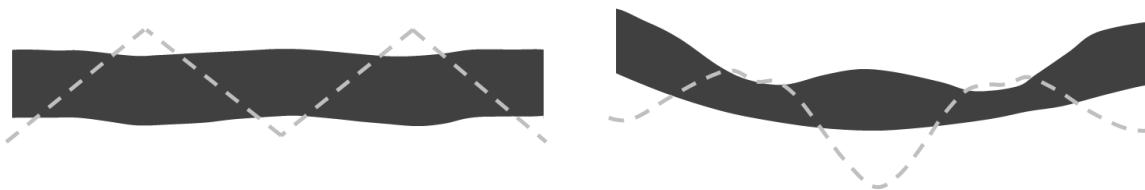


Abbildung 2.7: Welligkeiten beim TFP-Verfahren für einen geraden Pfad (links) und einen gekrümmten Pfad (rechts) nach [31]

Die Radienablage mittels Tapelegen wurde bereits in einigen Arbeiten untersucht [46,64,65,66]. Unabhängig davon, ob duroplastische oder thermoplastische Tapes zum Einsatz kommen, zeigen sich bei der Radienablage Defekte wie die Faserwelligkeit an der Tape-Innenseite [46,64,65], das Hochziehen der Tape-Außenseite [46,64,66] und das Bilden von Falten und Blasen aus der Ablageebene heraus [46,64,65,66]. Die auftretenden Defekte vermindern die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils. Sie hängen von der Tapebreite, den Verarbeitungsparametern und der Materialkombination ab. Mit einem 6,35 mm breiten Kohlenstofffaser-Tape

wird in [46] ein kritischer Ablageradius für das Auftreten von Defekten von 1200 mm ermittelt. Bei gleicher Tapebreite wird in [66] ein Ablageradius von 800 mm ohne auftretende Defekte realisiert. Diese treten in [66] erst bei einem Ablageradius von 600 mm auf.

KIM ET AL. [67] stellen mit dem „Continuous tow shearing“ (CTS) ein Ansatz vor, um Defekte bei der Radienablage im AFP-Verfahren zu vermeiden. Dabei wird ein spezieller Ablagekopf eingesetzt, der das verarbeitete Material bei der Ablage schert. Beim CTS treten Defekte wie Welligkeiten oder das Hochziehen der Außenseite der Tapes nicht auf. Realisiert werden in [67] Radien von 30 mm, ohne dass Defekte auftreten. Allerdings können mit dem CTS Winkeländerungen des Pfads von 90° oder mehr (also z. B. das Ablegen eines Halbkreises) nicht realisiert werden. Der maximale Scherwinkel in [67] beträgt 60°. [67]

2.3 Auslegung topologisch optimierter FKV-Strukturen

Die im vorherigen Abschnitt genannten Verfahren eignen sich mit ihren jeweiligen Einschränkungen zur Herstellung topologisch optimierter FKV-Strukturen. Solche topologisch optimierten Strukturen weisen häufig einen skelett- oder stabwerkartigen Charakter auf. Sie sind daher äußerst materialeffizient und besonders geeignet für Leichtbauanwendungen. Damit entsprechende Bauteile die Potenziale der betrachteten Fertigungsverfahren in Kombination mit der Topologieoptimierung ausnutzen können, bedarf es einer systematischen Entwicklung der Bauteile auf Konstruktions- bzw. Auslegungsebene. Das Ergebnis einer Topologieoptimierung stellt dabei in der Regel einen nicht unmittelbar umsetzbaren Designvorschlag dar [1], sodass weitere Auslegungsschritte notwendig sind. Im Falle des TFP, des 3D-Drucks und auch für das Nassfaserverlegen müssen beispielsweise fertigungsgerechte Ablagepfade bzw. Druckbahnen definiert werden. Im folgenden Abschnitt soll daher zunächst ein Überblick über den Stand der Technik bezüglich der Topologieoptimierung – insbesondere auch im Hinblick auf anisotrope Werkstoffe – gegeben werden. Anschließend wird der Stand der Technik zu hierauf aufbauenden zusätzlichen Auslegungsschritten, z. B. zur Erzeugung von Ablagepfaden, betrachtet.

2.3.1 Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung ist ein numerisches Verfahren, das dazu genutzt wird, eine möglichst optimale Materialverteilung in einem definierten Entwurfsraum unter vorgegebenen Kriterien und Randbedingungen zu finden [68]. Nach SIGMUND UND MAUTE [69] liefert die Topologieoptimierung Antworten auf die Fragestellung „wie Material in einem vorgegebenen Entwurfsraum angeordnet werden soll, um die bestmögliche Performance einer Struktur zu erzielen“ [69]. Bei der strukturmechanischen Topologieoptimierung wird zunächst ein Modell des Entwurfsraums erstellt und dieses mit Randbedingungen und angreifenden Lasten versehen. Weiterhin werden Bedingungen wie beispielsweise das mit Material zu füllende Volumen in Bezug auf den Entwurfsraum und die Zielgröße (z. B. maximale Bauteilsteifigkeit) festgelegt. Üblicherweise wird die Topologieoptimierung mit Finite-Elemente-Programmen gekoppelt und der Entwurfsraum entsprechend in Finite Elemente (FE) diskretisiert. Durch eine Finite-Elemente-Analyse (FEA) wird die Systemantwort der Struktur (z. B. Verformung, mechanische Spannungen oder Dehnungen) berechnet und das Material unter Berücksichtigung der Systemantwort durch den Optimierungsalgorithmus iterativ umverteilt oder je nach Algorithmus auch entfernt. Dies wird wiederholt, bis ein optimaler Strukturentwurf gefunden wird (Abbildung 2.8). Zu beachten ist, dass die Topologieoptimierung in der Regel nur Näherungslösungen liefert. Es kann nicht garantiert werden, dass die gefundene Lösung tatsächlich ein globales Optimum darstellt [1]. Je nach Optimierungsalgorithmus sind lokale Optima möglich [70] oder es wird schlichtweg ein Konvergenzkriterium (z. B. eine zulässige Schwankung der Zielgröße) definiert, bei dessen Erreichen der Optimierungsprozess abgebrochen wird [71].

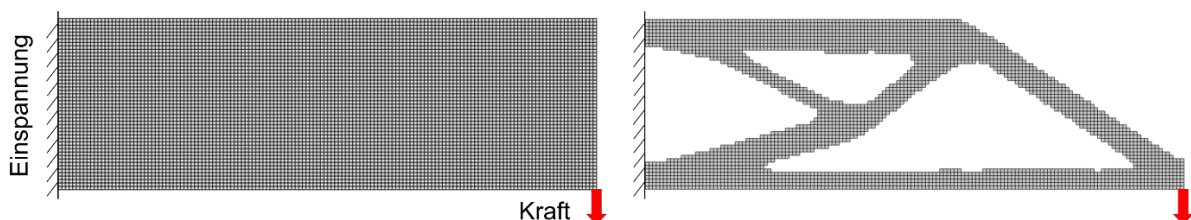


Abbildung 2.8: Prinzipdarstellung der Topologieoptimierung: Diskretisierter Entwurfsraum (links) und optimaler Strukturentwurf (rechts)

Als grundlegender Meilenstein auf dem Gebiet der numerischen Topologieoptimierung wird vielfach die von BENDSØE UND KIKUCHI [72] entwickelte Homogenisierungsme-

thode angesehen. Basierend auf diesem Konzept wurden zahlreiche Topologieoptimierungsalgorithmen entwickelt [69]. Nach DU ET AL. [73] zählen heute die „Solid Isotropic Material with Penalization“-Methode („SIMP“-Methode), die „Level Set“-Methode, die Homogenisierungsmethode und Evolutionäre Methoden zu den gängigsten Verfahren.

Bei der Homogenisierungsmethode [72] werden poröse Mikrostrukturzellen (Abbildung 2.9) verwendet, deren homogenisiertes, mechanisches Verhalten berechnet wird. Jedem Finiten Element im Entwurfsraum wird eine solche Zelle zugewiesen. Durch den Optimierungsalgorithmus werden die Designvariablen der Zellen (bspw. Länge und Breite sowie Orientierung der mittleren Aussparung, vgl. Abbildung 2.9) in jedem Element angepasst, um die Zielfunktion der Struktur (z. B. minimale Nachgiebigkeit) zu maximieren oder zu minimieren. Nachteilig an der Methode ist, dass die einzelnen Elemente über ein unterschiedliches Materialverhalten verfügen, was in realen Bauteilen in der Regel nicht der Fall ist. [74]

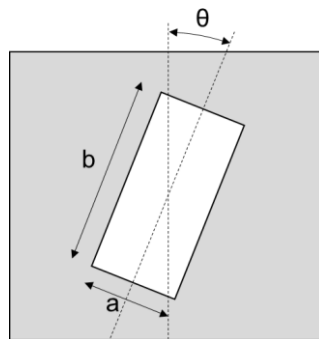


Abbildung 2.9: Prinzipdarstellung der Homogenisierungsmethode nach [74]

Bei der auf dem Ansatz von BENDSØE [75] basierenden SIMP-Methode wird jedem Element im Entwurfsraum eine Dichte ρ zugeordnet, wobei $\rho = 0$ Elementen ohne Material (bzw. Leer-Material) entspricht, während $\rho = 1$ Elementen mit Material (bzw. Voll-Material) entspricht. Jedes Element kann bei der Optimierung eine Dichte zwischen diesen Werten annehmen: $0 < \rho < 1$. Die mechanischen Eigenschaften eines Elements (z. B. sein Elastizitätsmodul) werden entsprechend der Elementdichte skaliert. Bei einer Optimierung mit diesem Ansatz würden jedoch vielfach Elemente mit Dichten zwischen 0 und 1 in der optimierten Struktur verbleiben, wodurch sich eine spätere Einteilung in Voll-Material („1“) und Leer-Material („0“) für ein reales Bauteil schwierig gestaltet. Daher werden Elemente mit Dichten zwischen 0 und 1 mit einer

Kostenfunktion „bestraft“ (engl. Penalization = Bestrafung). Diese Bestrafung sorgt dafür, dass das Optimierungsergebnis zu einer nahezu reinen Leer-Material- und Voll-Material-Lösung mit einer entsprechenden 0-1-Verteilung tendiert. [70,74]

Im Gegensatz zu den auf der Elementdichte basierenden Methoden, welche die Struktur über die jeweilige Dichte als Materialparameter beschreiben, wird bei den sogenannten Level-Set-Methoden der Rand der Struktur mittels impliziter Funktionen beschrieben. Die mit Level-Set-Methoden erzielten Optimierungsergebnisse zeichnen sich somit durch einen klaren Übergang zwischen Struktur und Leer-Material aus, so dass im Vergleich zur SIMP-Methode wenig Nachbearbeitungs- oder Interpretationsaufwand anfällt. [76]

Zu den Evolutionären Methoden gehören das „Evolutionary Structural Optimization“-Verfahren (ESO-Verfahren), das „Bi-directional Evolutionary Structural Optimization“-Verfahren (BESO-Verfahren) und das „Soft Kill Option“-Verfahren (SKO-Verfahren). Bei diesen Verfahren werden empirische bzw. heuristische Vorschriften angewendet, um eine Struktur iterativ zu optimieren [74].

Beim ursprünglichen ESO-Verfahren [77] werden aus dem Entwurfsraum des Bauteils die Elemente gelöscht, deren VON MISES-Spannung in Bezug auf die maximal in der Struktur auftretende VON MISES-Spannung unterhalb eines Grenzwerts liegen. Dieser Prozess wird wiederholt, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, bei dem keine Elemente mehr aus der Struktur entfernt werden. Ab diesem Zeitpunkt wird der Grenzwert durch Addition eines festen Werts, der sogenannten „Evolution Rate“, erhöht und der Iterationsprozess weitergeführt bis sich erneut ein Gleichgewichtszustand einstellt. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis ein gewünschtes Optimum erreicht ist, z. B. bis kein Element eine VON MISES-Spannung unterhalb 25 % des Maximalwerts aufweist. [71]

Beim BESO-Verfahren [78,79] werden Elemente nicht nur aus dem Entwurfsraum gelöscht, sondern sie können auch wieder reaktiviert bzw. hinzugefügt werden. Vorteilhaft an den ESO/BESO-Methoden ist die einfache Einbindung in kommerzielle FE-Programme, das Erreichen von klar abgegrenzten Leer-Material- und Voll-Material-Verteilungen (0-1-Verteilungen ohne Zwischenwerte) und eine gute Berechnungseffizienz [71,80]. Allerdings kann die heuristische Verfahrensvorschrift das Erreichen einer optimalen Lösung nicht garantieren [70]. So kann es dazu kommen, dass die

ESO/BESO-Methoden eine nicht-optimale Lösung produzieren [71] oder sogar komplett zusammenbrechen [70]. Weiterhin sind chaotische Verläufe der Zielfunktion mit starken Sprüngen nicht auszuschließen [70,71]. Um diese Schwachstellen der Verfahren zu eliminieren, schlagen HUANG UND XIE [80] das Einbinden von Filtern, einen Ansatz zur Stabilisierung der Zielfunktion und eine langsame, schrittweise Reduktion des Materialvolumens im Verlauf der Optimierung vor.

Bei der SKO-Methode [81] wird der Mineralisationsvorgang von Knochen nachgebildet: Bereiche eines Knochens, die unter hoher mechanischer Spannung stehen, mineralisieren stärker und werden hierdurch steifer als niedrigbeanspruchte Bereiche. Die SKO-Methode bildet diesen Vorgang nach, indem in einem iterativen Prozess Elementen mit hoher Spannung ein höherer Elastizitätsmodul zugeordnet wird als Elementen mit niedrigerer Spannung. Die Zuordnung von Spannung zu Elastizitätsmodul erfolgt über eine empirische Iterationsvorschrift. In [74] wird die SKO-Methode auch als eine Art „Soft-Kill-BESO-Verfahren“ bezeichnet. [74,81]

Heutige, kommerzielle Topologieoptimierungslösungen können meist noch keine anisotropen Werkstoffeigenschaften berücksichtigen. In der Forschung werden jedoch zunehmend Ansätze entwickelt, die die Topologieoptimierung eines Bauteils unter Berücksichtigung anisotroper Werkstoffeigenschaften ermöglichen. Hierfür werden neben der Bauteiltopologie auch die elementweisen Faserorientierungen optimiert.

Ein Ansatz zur Optimierung von Faserorientierungen ist das von MATTHECK ET AL. [82] entwickelte „Computer aided internal optimization“-Verfahren (CAIO-Verfahren). Bei diesem wird auf Basis iterativ durchgeführter FEA in jeder Iteration die Materialorientierung eines jeden Elements an die Richtung der betragsmäßig größten Hauptspannung im betrachteten Element angepasst. Für sogenannte „schubschwache“ Materialien [83] wurde gezeigt, dass die Ausrichtung der Faserorientierung gemäß der betragsmäßig größten Hauptspannung zu einer maximalen Steifigkeit führt [83,84]. Dieser Ansatz wird beispielsweise in [2,3,4] mit der Topologieoptimierung gekoppelt, um anisotrope Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen. Vorteilhaft ist hierbei, dass für die Optimierung der Faserorientierung keine gesonderte Designvariable bei der Topologieoptimierung eingeführt werden muss.

Ein zweiter Ansatz zur Optimierung der Faserorientierungen ist die „Discrete material optimization“ (DMO) [5,85]. Bei diesem Ansatz werden sogenannte „Kandidaten“-Materialien definiert, wobei jedes Material eine feste Faserorientierung (z. B. 0° , 90° , $+45^\circ$

oder -45°) aufweist. Für jedes Material wird eine Designvariable in der Topologieoptimierung definiert. In der Topologieoptimierung wird dann, basierend auf der Sensitivität eines Elements, diesem das geeignetste Material (und somit die entsprechende Faserorientierung) zugewiesen. Hierbei ist die Sensitivität die Ableitung der Zielfunktion (z. B. der Nachgiebigkeit) in Bezug auf die betrachtete Designvariable (Orientierungswinkel). Die Anzahl an möglichen Kandidaten-Materialien und entsprechenden Orientierungswinkeln kann theoretisch bis ins Unendliche erweitert werden [6].

Ein weiterer, beispielsweise in [7,8] für die anisotrope Topologieoptimierung genutzter Ansatz für die Optimierung von Faserorientierungen ist die „Continuous fiber angle optimization“ (CFAO). Hierbei wird die Materialorientierung eines Finiten Elements durch eine Designvariable für den Orientierungswinkel beschrieben. Die Änderung der Materialorientierung erfolgt über die Berechnung von Sensitivitäten und der mathematischen Optimierung der elementweisen Orientierungswinkel.

Die vorgenannten Ansätze beschränken sich auf eine rein unidirektionale Faserorientierung (UD-Faserorientierung), d. h. für jedes Finite Element ist nur ein Faserwinkel zulässig. Die sich aus der Topologieoptimierung typischerweise ergebenden skelett- oder stabwerkartigen Strukturen weisen im Bereich der strebenförmigen Glieder hauptsächlich einachsige Beanspruchungen auf. Dort ist eine UD-Faserorientierung sinnvoll. Im Bereich der Kreuzungspunkte liegt jedoch in der Regel ein mehrachsiger Beanspruchungszustand vor. Dort stellt eine unidirektionale Faserorientierung keine optimale Lösung dar. Neuere Arbeiten zur anisotropen Topologieoptimierung beschränken sich daher nicht auf UD-Orientierungen, sondern lassen mehrere Faserorientierungen oder auch anisotrope und isotrope Werkstoffe innerhalb einer zu optimierenden Struktur zu.

SCHMIDT ET AL. [86] führen eine zusätzliche Design-Variable, die als Anisotropie-Verhältnis bezeichnet wird, in die Topologieoptimierung ein. Das Anisotropie-Verhältnis kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und wird in der Optimierung genutzt, um zwischen den Steifigkeitsmatrices eines anisotropen und eines isotropen Materials zu interpolieren. Über eine Penalisierungsfunktion für das Anisotropie-Verhältnis werden die Elemente gezwungen, in Richtung klarer 0- (isotropes Material) und 1-Verteilungen (anisotropes Material) zu tendieren. Hierdurch ergeben sich topologisch optimierte Strukturen, die anisotropes (unidirektionales) Material in den Streben und isotropes Material im Bereich der Kreuzungspunkte aufweisen. [86]

KIM ET AL. [87] definieren Einheitszellen für die Mikrostruktur des in der Topologieoptimierung verwendeten Materials. Das Material kann hierbei eine UD-Mikrostruktur (Abbildung 2.10 a)), eine rechteckige Mikrostruktur (Abbildung 2.10 b)) oder eine kreuzförmige Mikrostruktur (Abbildung 2.10 c)) aufweisen. Anhand der geometrischen Designvariablen der Einheitszellen wird die Steifigkeitsmatrix der Elemente durch Anwendung eines Homogenisierungsansatzes berechnet. Zusätzlich werden die Einheitszellen im Verlauf der Topologieoptimierung rotiert. Beim Vergleich der Optimierungsergebnisse wird festgestellt, dass die Verwendung kreuzförmiger Mikrostruktur-Einheitszellen bei gleichem Zielvolumen zu verbesserten Steifigkeiten führt. Dies wird auf eine verbesserte Faserorientierung und Lastumlagerung im Bereich von Kreuzungspunkten zurückgeführt. [87]

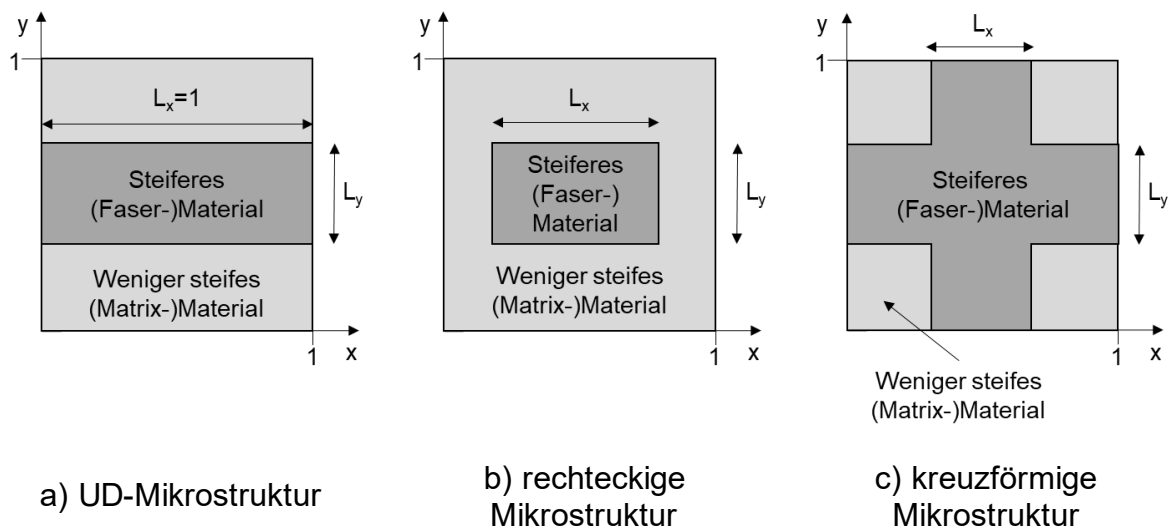


Abbildung 2.10: Mikrostruktur-Einheitszellen nach [87]

SCHWINGEL UND MIDDENDORF [88] verwenden in der Topologieoptimierung einen Material-Designraum bestehend aus UD-Faserorientierung, $0^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung und einem Übergangsbereich (Abbildung 2.11). Der Material-Designraum wird über die von TSAI UND PAGANO [89] eingeführten Laminat-Parameter beschrieben, um die Anzahl an benötigten Design-Variablen zu reduzieren. Die erzielten Optimierungsergebnisse mit dem von SCHWINGEL UND MIDDENDORF [88] verwendeten Ansatz weisen UD-Material in den Streben und $0^\circ/90^\circ$ -Faserorientierungen im Bereich von Kreuzungspunkten auf. Weiterhin werden mit dem erweiterten Material-Designraum höhere Steifigkeiten als mit einem reinen UD-Materialmodell erzielt, und die Faserverläufe im Bereich von Kreuzungsstellen werden als gleichmäßiger und als günstiger für das in [88] betrachtete TFP-Verfahren angesehen.

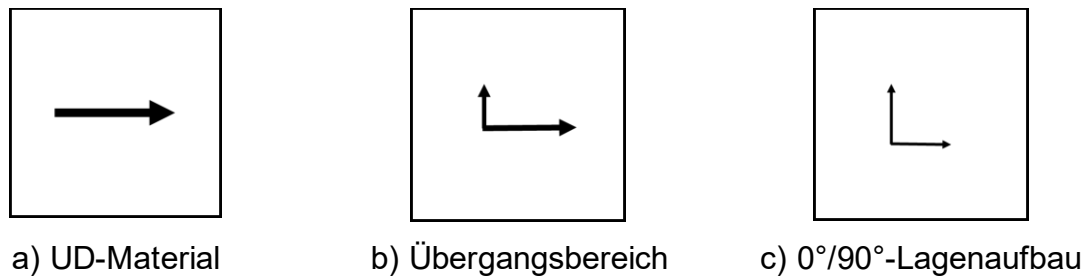


Abbildung 2.11: Material-Designraum für die Topologieoptimierung nach [88]

Einen weiteren Ansatz zur Berücksichtigung von 0°/90°-Faserorientierungen entwickelt LANG [90] für das BESO-Verfahren. Basierend auf dem Verhältnis der ersten und zweiten Hauptspannung werden die Volumenanteile an benötigtem Material in 0°- und in 90°-Richtung ermittelt. Anhand dieser werden anschließend die effektiven Materialeigenschaften durch einen Homogenisierungsansatz nach MORI UND TANAKA [91] berechnet. Das Verfahren wird von LANG [90] auch dahingehend erweitert, dass eine Optimierung unter Berücksichtigung mehrerer Lastfälle durchgeführt werden kann.

Ob die anisotrope Topologieoptimierung überhaupt Vorteile gegenüber einer isotropen Topologieoptimierung liefert, ist nach aktuellem Stand der Technik unklar. SPICKENHEUER [1] führt Materialoptimierungen am Beispiel einer biegebelasteten Scheibe mittels CAIO-Verfahren durch. Verglichen wird der Spannungszustand eines isotropen Materialmodells mit dem CAIO-Ergebnis unter Verwendung eines anisotropen, unidirektionalen Materialmodells. Für beide Fälle leitet SPICKENHEUER [1] entsprechende Hauptspannungstrajektorien (HS-Trajektorien) ab (Abbildung 2.12). Die Ergebnisse aus [1] zeigen, dass sich durch die isotrope Materialoptimierung Trajektorien ableiten lassen, die sinnvoll erscheinen und zudem der klassischen MICHELL-Struktur (Abbildung 2.13) [92], die häufig als Referenz für den entsprechenden Lastfall dient, ähneln. Im Gegensatz dazu folgen aus der Materialoptimierung mit anisotropem UD-Materialmodell HS-Trajektorien, die eine Unstetigkeit an der Symmetrielinie des Bauteils aufweisen. Dieser Knick wäre mit den vorgestellten Faserablageverfahren nicht herstellbar bzw. würde zu starken Ablagedefekten und Ablageungenauigkeiten führen.

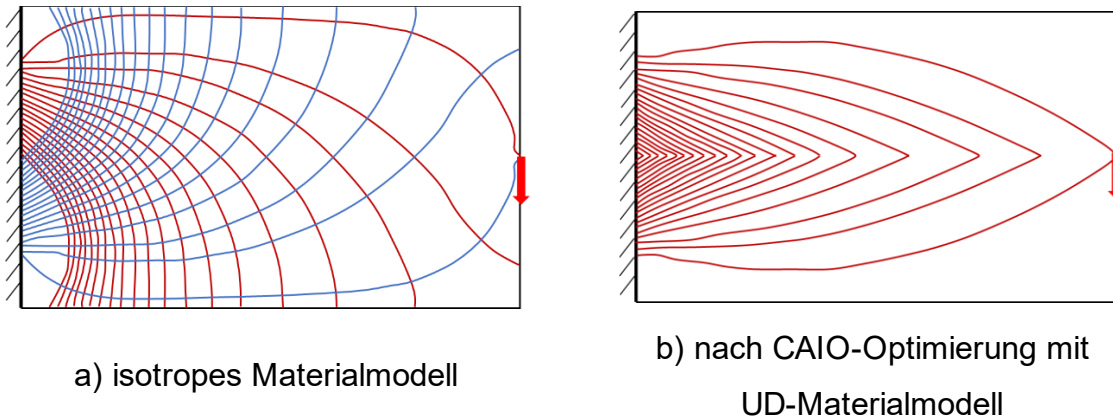


Abbildung 2.12: HS-Trajektorien für eine biegebelastete Scheibe nach [1]

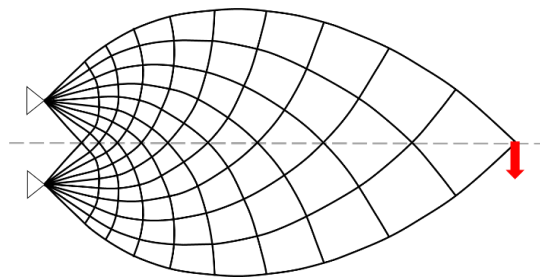


Abbildung 2.13: MICHELL-Struktur für eine biegebelastete Scheibe nach [92]

Die Ergebnisse aus [1] legen nahe, dass eine UD-Materialoptimierung für eine lastgerechte Auslegung ungeeignet ist, da sie in Bereichen mehrachsiger Spannungszustände – in diesem Fall die schubbelastete Scheibenmitte um die Symmetrielinie herum – zu unstetigen HS-Verläufen führt. Aus diesem Grund wird in [1] von einer anisotropen Topologieoptimierung mit UD-Materialmodell abgesehen und stattdessen isotrope Topologieoptimierungen zur Auslegung von TFP-Strukturen herangezogen.

2.3.2 Ableiten von Ablagepfaden

Für die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Verfahren müssen zur Fertigung Ablagepfade (Nassfaserlegen, TFP und AFP), 3D-Druck-Bahnen oder Wickelmuster definiert und an die entsprechende Anlagentechnik übergeben werden. Um die anisotropen Werkstoffeigenschaften möglichst gut auszuschöpfen, sollten sich die Faserorientierungen und Pfade möglichst an den im Bauteil vorliegenden Hauptspannungen orientieren. Je nach Bauteilkomplexität ist die manuelle Erstellung fertigungsgerechter und lastgerechter Ablagepfade mit einem hohen Aufwand verbunden [1]. Entsprechend wurden bereits Ansätze entwickelt, die das Ziel haben, Ablagepfade automatisiert aus dem Ergebnis einer Topologieoptimierung abzuleiten. Hierzu müssen die elementweise

vorliegenden Spannungs- oder Orientierungstensoren in kontinuierliche Pfade überführt werden.

Vielfach werden zur Integration von Richtungsfeldern sogenannte Stromlinienalgorithmen herangezogen. So nutzen z. B. DESAI ET AL. [9] ein Stromlinienverfahren zum Ableiten von Pfaden für den 3D-Druck mit Faserverstärkung. Die in [9] erzeugten Pfade weisen jedoch mitunter unstetige, nicht fertigungsgerechte Verläufe sowie ungleichmäßige Abstände auf. Zudem sind in den Strukturen sehr kurze Pfade enthalten. KUBALAK ET AL. [10] nutzen ebenfalls ein Stromlinienverfahren zum Erzeugen von 3D-Druck-Pfaden. Eingesetzt wird dort ein von JOBARD UND LEFER [93] entwickelter Ansatz, der es erlaubt einen Mindestabstand zwischen den erzeugten Stromlinien einzustellen. Letztlich wird bei der Erzeugung einer Stromlinie stets geprüft, ob sie bereits vorhandenen Stromlinien unter Vorgabe eines Mindestabstands zu nahekommt. Ist dies der Fall, wird die Integration der Stromlinie an diesem Punkt beendet und der Prozess mit der nächsten Stromlinie fortgesetzt [10,93]. Die so erzeugten 3D-Druck-Pfade weisen jedoch sehr kleine Radien im Bereich von Kreuzungspunkten auf.

Grundlegende Untersuchungen zur Visualisierung von Spannungszuständen mithilfe sogenannter HS-Trajektorien führt BEYER [94] durch. Im mechanischen Sinn sind HS-Trajektorien nach BEYER [94] Linien, entlang derer aus der Struktur freigeschnittene, infinitesimale Elemente mit zu den Trajektorien parallelen Rändern keine Schubspannungen und Schubverzerrungen aufweisen. In seiner Arbeit zeigt BEYER [94] auf, dass der häufig verwendete Begriff des Kraftflusses unzulässig ist, da Spannungen oder Kräfte nicht durch Bauteile fließen. Sie weisen im Gegensatz zu Strömungen eine Orientierung, aber keine Fließrichtung auf. Während Strömungslinien anhand von Geschwindigkeitsfeldern erstellt werden können, haben die elementweisen Spannungstensoren eine Richtung, aber im Gegensatz zu einer Geschwindigkeit keinen Richtungssinn. Somit handelt es sich bei Spannungsfeldern nicht um Vektor-, sondern um Tensorfelder. Bei der Behandlung von Spannungsverteilungen in Form von Vektorfeldern können bei der Erzeugung von Trajektorien Widersprüche entstehen. Die Nutzung von Stromlinienalgorithmen mit definierter Fließrichtung zur Erzeugung von HS-Trajektorien oder Ablagepfaden ist somit nicht zulässig. [94]

Zur Erzeugung von HS-Trajektorien entwickelt BEYER [94] daher ein Verfahren dessen Basis die für die Finiten Elemente ermittelten Hauptspannungen aus einer numerischen Berechnung bilden. Im zweidimensionalen Fall sind dies die zwei Hauptnormalspannungen σ_I und σ_{II} . Das Vorgehen zur Trajektorienermittlung nach BEYER [94] ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

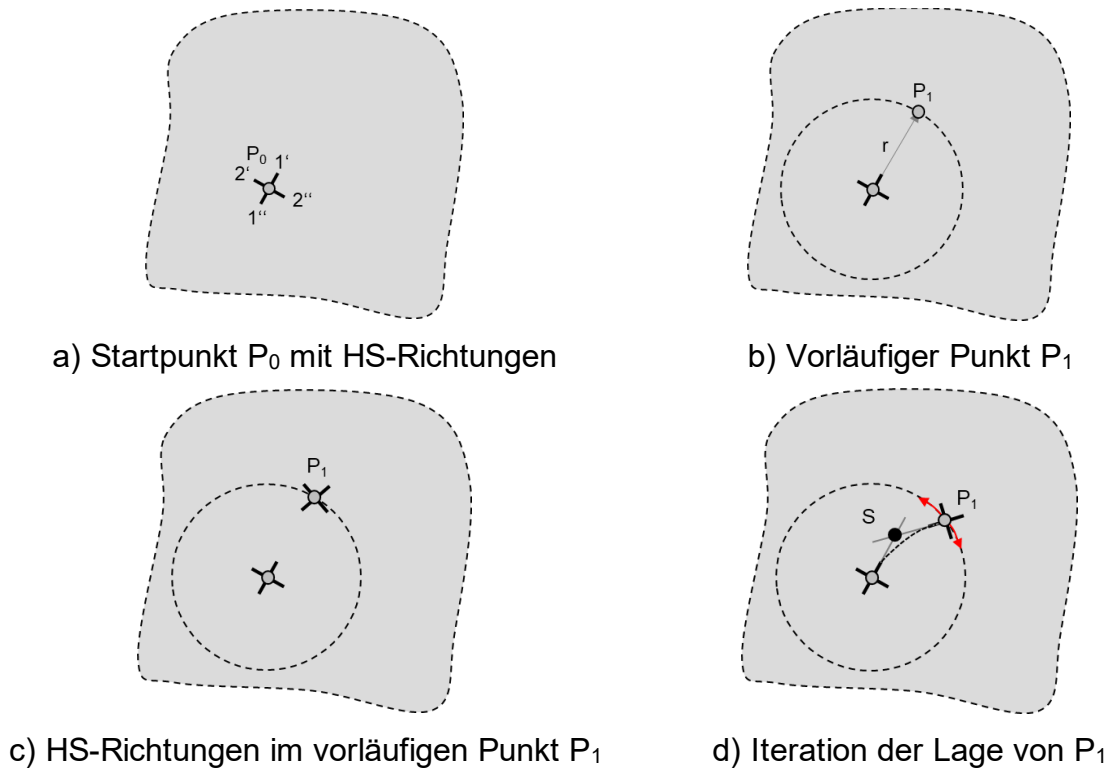


Abbildung 2.14: Vorgehen zur Trajektorienermittlung nach [94]

Für jede HS-Trajektorie wird zunächst ein Startpunkt P_0 benötigt. Entsprechend Abbildung 2.14 weist dieser Startpunkt P_0 zwei HS-Richtungen „1“ und „2“ auf. Diese können jedoch in beide Richtungen, gekennzeichnet durch $1'$ und $1''$ bzw. $2'$ und $2''$, durchlaufen werden. Somit ergeben sich vom Startpunkt aus vier mögliche Richtungen für die Pfaderstellung (Abbildung 2.14 a)). Gestartet wird als erstes in Richtung der ersten Hauptspannung ($1'$). Für die Erzeugung der Trajektorien wird dabei zunächst eine Schrittweite r definiert. Ausgehend vom Startpunkt P_0 wird in Richtung $1'$ dann ein vorläufiger Punkt P_1 gefunden (Abbildung 2.14 b)) und dessen HS-Richtungen ermittelt (Abbildung 2.14 c)). Anschließend wird der vorläufige Punkt P_1 so lange entlang des Kreises verschoben, bis sich die Punkte P_0 und P_1 durch ein Kreisbogensegment verbinden lassen, dessen Tangenten in den Punkten P_0 und P_1 den HS-Richtungen an

diesen Punkten entsprechen. Dies ist dann gegeben, wenn ein Schnittpunkt S gefunden wird, zu dem der Abstand von beiden Punkten aus gesehen gleich ist (Abbildung 2.14 d)). Durch die Wahl dieses Ansatzes wird sichergestellt, dass bei einer Erzeugung der Trajektorie aus der gegengesetzten Richtung von P_1 startend auch wieder der Ausgangspunkt P_0 gefunden wird. Weiterhin ist sichergestellt, dass die Trajektorie in den Punkten stets parallel zu den Hauptspannungen verläuft. Nach Finden des Punktes P_1 wird dieser als Ausgangspunkt für den nächsten Schritt übernommen. Das Verfahren wird solange fortgeführt, bis ein Abbruchkriterium (z. B. das Erreichen eines Bauteilrandes) erreicht wird. Anschließend wird die Prozedur mit dem Ausgangspunkt P_0 auch in Richtung 1“ durchgeführt und die beiden Trajektorien zu einer Trajektorie zusammengeführt. Für die zweite Hauptspannung erfolgt das Vorgehen entsprechend. [94]

Bezüglich der Abstandsregelung für HS-Trajektorien implementiert BEYER [94] ein Schema, welches auf den am Startpunkt P_0 gefundenen HS-Trajektorien A_0 und B_0 ausgehend von P_0 in einem Abstand a neue Startpunkte für weitere Trajektorien findet (Abbildung 2.15). Mit diesem Ansatz kann jedoch im Allgemeinen kein konstanter Trajektorienabstand innerhalb aller Bereiche eines Bauteils erreicht werden. [94]

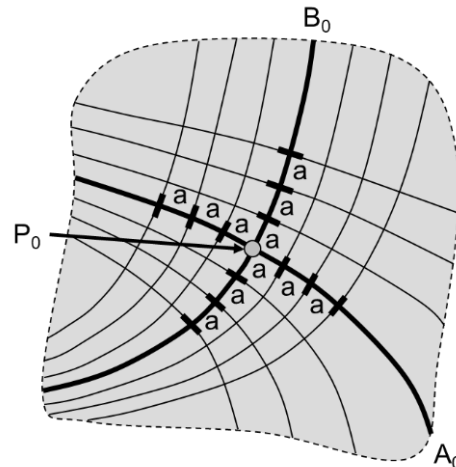


Abbildung 2.15: Startpunktermittlung für weitere Trajektorien mittels konstanter Abstände ausgehend von P_0 nach [94]

MOLDENHAUER [11] diskutiert zunächst Stromlinien-Verfahren zum Ableiten von HS-Trajektorien bzw. Ablagepfaden. Insbesondere wird aufgezeigt, dass bei der unzulässigen Verwendung von Spannungsvektoren, die durchaus einen Vorzeichenwechsel innerhalb eines Bauteils aufweisen können, ein Wegknicken von Stromlinien auftreten kann (Abbildung 2.16). Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus BEYER [94], wonach

Vektoren ungeeignet zur Beschreibung des Spannungszustands sind. Diese Problematik lässt sich für komplexe Bauteile auch durch eine manuelle Korrektur des Vektorfelds nicht beheben [11,94].

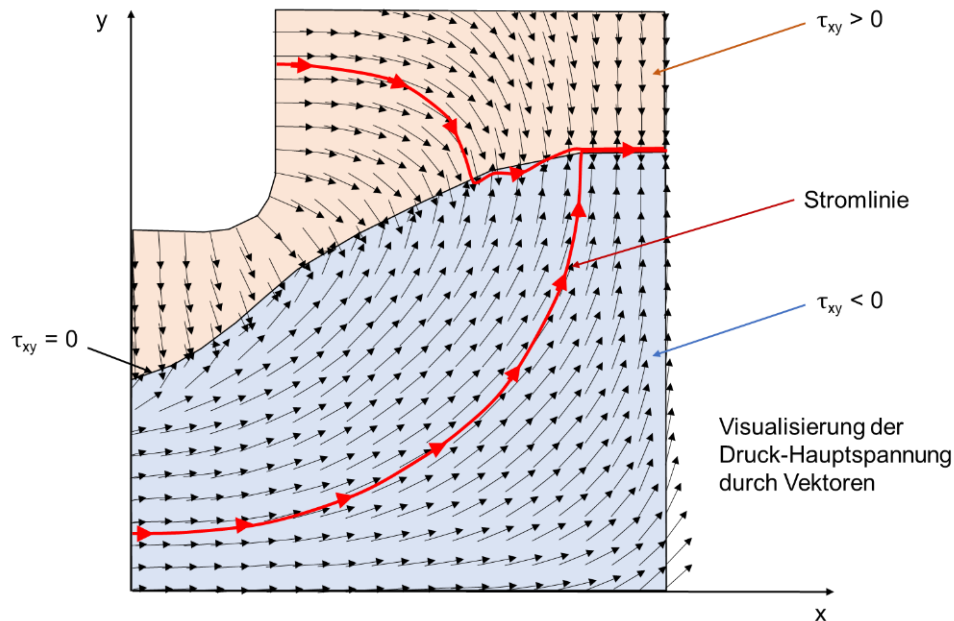


Abbildung 2.16: Wegknicken von Stromlinien durch Vorzeichenwechsel der Vektoren zur Beschreibung der Druck-HS nach [11]

In der Software „CAIO_{Shell}“ entwickelt MOLDENHAUER [11,12] daher einen Ansatz, bei dem die HS-Richtungen nicht als eindeutiger Vektor, sondern als zweideutige Achse aufgefasst werden. Ausgehend von den HS-Richtungen im Mittelpunkt eines jeden Elements wird der Faserverlauf durch sukzessive Anwendung der Punktsteigungsformel zusammengesetzt, wobei die jeweilige Steigung m eines Elements in den beiden Richtungen $\pm m$ berücksichtigt wird. Das Verfahren ist insbesondere auch auf gekrümmte Schalenstrukturen anwendbar [12]. Während durch den gewählten Integrationsansatz Faserrückläufe vermieden werden, ist der Abstand der Faserverläufe jedoch ungleichmäßig [11].

Ein weiterer von MOLDENHAUER [11,13] entwickelter Ansatz zur Erzeugung von HS-Trajektorien – auch im Hinblick auf die Anwendung zur optimalen Faserplatzierung – basiert auf der orthotropen Wärmeleitung. Dieser Ansatz setzt direkt auf dem Modell und Ergebnis einer FEA auf und benötigt keine zusätzliche Software. Zur Ermittlung der Faserverläufe werden folgende Schritte durchgeführt:

1. Durchführen einer FEA des betrachteten Bauteils zur Ermittlung des Spannungszustands

2. Zuweisen der Elementorientierung entsprechend der ersten Hauptspannung
3. Zuweisen von extrem orthotropen Wärmeleitfähigkeiten
4. Erstellen von thermischen Randbedingungen und Durchführen einer thermischen Berechnung in der FE-Software

Durch die den Elementen zugewiesenen extrem orthotropen Wärmeleitfähigkeiten kann nur ein Wärmefluss in die betrachtete Richtung (erste oder zweite Hauptspannung) stattfinden. Daher entsprechen die Isothermen den HS-Trajektorien in der betrachteten Richtung. [11,13]

Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass keine zusätzliche Software neben der ohnehin benötigten FE-Umgebung benötigt wird. Allerdings hängt insbesondere der Abstand der so erzeugten HS-Trajektorien von den gewählten thermischen Randbedingungen ab und lässt sich nur schwer gezielt einstellen. Weiterhin kann hierdurch kein über das Bauteil konstanter Trajektorienabstand erreicht werden.

Mit dem Ziel der belastungsgerechten Bahnplanung für den 3D-Druck untersucht und vergleicht WULLE [95] ein RUNGE-KUTTA-Verfahren mit dem von BEYER [94] vorgestellten Verfahren. Der Vergleich erfolgt allerdings nur anhand einer einzelnen Trajektorie für ein spezifisches Bauteil. Es wird festgestellt, dass die lokale Winkelabweichung zwischen den mit den beiden Verfahren erzeugten Trajektorien unterhalb von 2° liegt, wobei das Verfahren nach BEYER den Spannungstensoren exakt folgt. Ebenso festgestellt wird allerdings, dass das RUNGE-KUTTA-Verfahren in etwa 50-mal schneller ist und weitreichendere Modifikationsmöglichkeiten zur Anpassung an den 3D-Druck bietet. [95]

Vier Ansätze zum Ableiten von 3D-Druck-Pfaden für die Herstellung topologisch optimierter FKV-Komponenten untersuchen und vergleichen PAPAPETROU ET AL. [14]. Die dortigen Untersuchungen umfassen die „Level-set morphology“-Methode, „Offset“-Methode, „Equally-space“-Methode (EQS), und einen Stromlinien-Ansatz. Bei der „Level-Set morphology“-Methode wird zunächst ein Faserpfad mittels einer Level-Set-Funktion beschrieben. Die weiteren Faserpfade werden als Offset von diesem erzeugt. Bei der „Offset“-Methode werden Pfade erzeugt, die parallel zum Rand der Struktur verlaufen. Beide vorgenannten Ansätze weisen starke Knicke auf (Abbildung 2.17 a) und b)). Zudem folgen die hierdurch erzeugten Pfade nicht den Hauptspannungen, sondern eben nur der Bauteilberandung. Das „Offset“-Verfahren wird für den 3D-Druck

häufiger verwendet, z. B. in [15] oder [16]. Das „EQS“-Verfahren folgt näherungsweise den Hauptspannungen. Allerdings sind die Pfadabstände und die lokale Pfaddichte äußerst unregelmäßig (Abbildung 2.17 c)) und sich kreuzende Pfade sind nicht möglich. Das Stromlinien-Verfahren weist gleichbleibende Pfadabstände auf, die Pfade folgen weitestgehend den Hauptspannungen. Allerdings entstehen auch hier kleine Radian (Abbildung 2.17 d)).

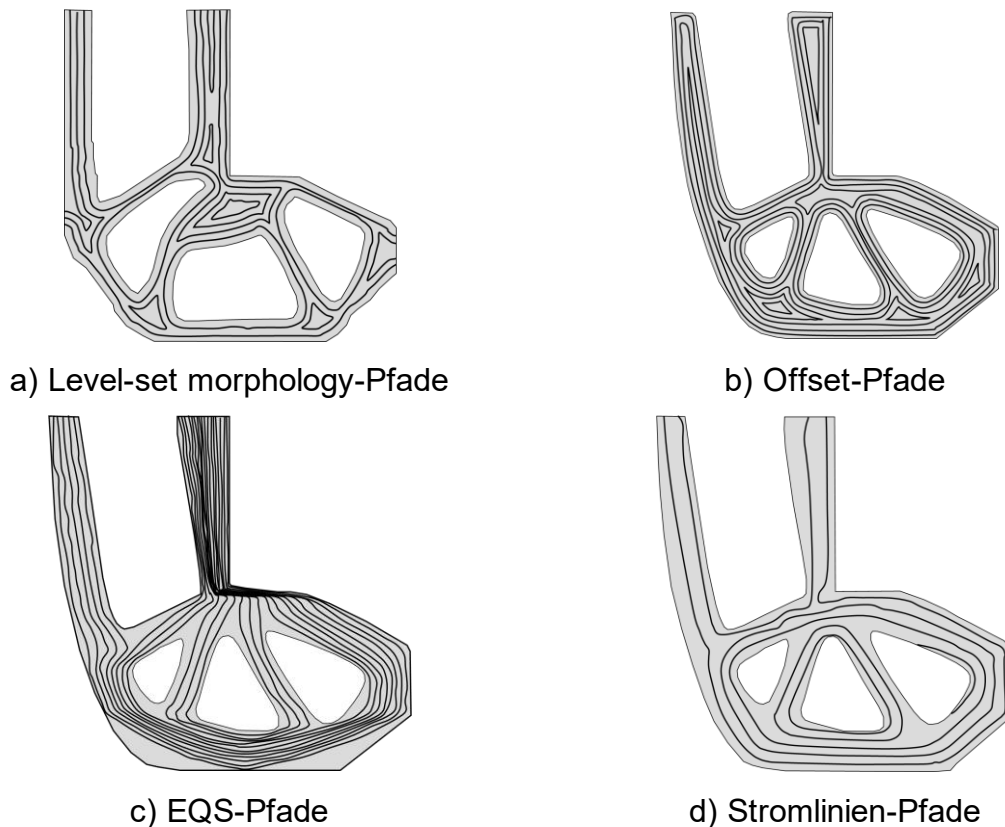


Abbildung 2.17: Mit unterschiedlichen Verfahren erzeugte Ablegepfade am Beispiel eines winkligen Trägers nach [14]

Für den 3D-Druck mit Endlosfaserverstärkung entwickeln WANG ET AL. [17] ein Verfahren zum Erzeugen lastgerechter 3D-Druck-Bahnen. Bei diesem wird die herzustellende Struktur zunächst mithilfe von VORONOI-Diagrammen in charakteristische Segmente unterteilt. Für jedes dieser Segmente werden mittels eines „Stress vector tracing“-Algorithmus lastgerechte Pfade erstellt, wobei Kriterien zur Geradheit des Pfads, aber auch die Abweichung zur lokalen HS-Richtung evaluiert werden. Die mit dem Verfahren erstellten Pfade zeigen insbesondere im Bereich von Kreuzungsstellen ein Design mit sich kreuzenden Pfaden zur Aufnahme mehrachsiger Spannungen (Abbildung 2.18). Durch die Unterteilung der Struktur mittels VORONOI-Diagrammen

weisen die Bahnen keine gleichmäßigen Abstände auf, sodass die hergestellten Strukturen deutliche Lücken oder Bereiche mit einer sehr hohen Pfaddichten zeigen (Abbildung 2.18) [17].

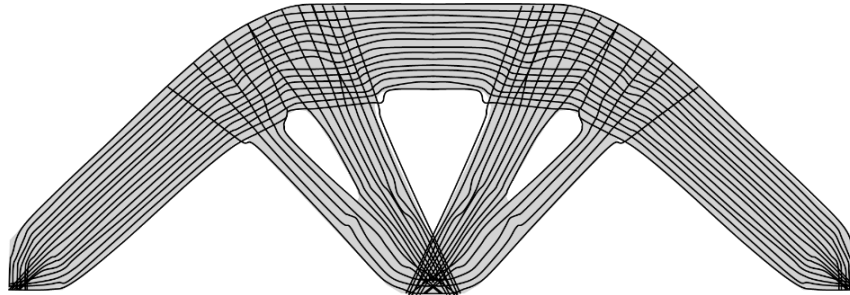


Abbildung 2.18: Erzeugte Ablagepfade nach [17]

Ebenfalls für den 3D-Druck schlagen BODDETI ET AL. [18] einen von KNÖPPE ET AL. [96] entwickelten Algorithmus vor, welcher Pfade in gleichmäßigem Abstand zueinander erstellt. Dort, wo dies nicht möglich ist, enden die Pfade. Vorteilhaft an dem Verfahren ist das Einhalten gleichmäßiger Pfadabstände. Allerdings weisen die erstellten Pfade un stetige Verläufe auf. Hinzu kommt, dass aus dem Ansatz inmitten des Bauteils endende Pfade resultieren.

Einen weiteren Ansatz zum Erstellen lastgerechter Bahnen für den endlosfaserverstärkten 3D-Druck stellen HUANG ET AL. [19] vor. Dieser basiert auf dem „Problem-des-Handelsreisenden“ (engl. Traveling Salesman). Die herzustellende Struktur wird in Punkte unterteilt, die – unter Berücksichtigung der Hauptspannungen – so verbunden werden, dass jeder Punkt nur einmal durchlaufen wird. Hierdurch ergibt sich ein einzelner kontinuierlicher Pfad durch das gesamte Bauteil. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn ein 3D-Drucker mit kontinuierlicher Faserverstärkung ohne Schnittfunktion genutzt werden soll. Für das AFP, TFP oder Nassfaserlegen sind die erzeugten Pfade allerdings nicht fertigungsgerecht, da sie sehr kleine Radien aufweisen und da der Ansatz keine Möglichkeit bietet ein Überlappen von Pfaden im Bereich von Kreuzungsstellen zuzulassen.

Für das roboterbasierte Wickeln erstellen DÖBRICH ET AL. [97] zweidimensionale Wickelmuster zur Herstellung topologisch optimierter Strukturen manuell. Auch in [98] werden zweidimensionale Wickelmuster für topologisch optimierte Strukturen manuell erzeugt. BAUER [54] stellt am Beispiel eines Brake Boosters einen Ansatz für das roboterbasierte Wickeln vor, bei welchem die topologisch optimierte Struktur zunächst in

Ecken, Kanten und Segmente eingeteilt wird. Anhand der aus der Topologieoptimierung resultierenden Breite des Bauteils im Bereich der zugehörigen Kante wird die benötigte Materialmenge ermittelt. Anschließend wird die Struktur manuell in einfache, geschlossene, zweidimensionale „Basis-Wickelmuster“ (10 Stück für die betrachtete Komponente) unterteilt. Mit einem numerischen Ansatz wird die Anzahl des Vorkommens der einzelnen Wickelmuster so optimiert, dass die zuvor aus der Topologieoptimierung ermittelten Materialmengen für die einzelnen Kanten möglichst gut abgebildet werden, wobei zusätzlich Restriktionen bzgl. der Häufigkeit des Vorkommens der Wickelmuster berücksichtigt werden [54].

2.3.3 Gestaltung von Kreuzungspunkten

Je nachdem welches Verfahren für die Fertigung herangezogen wird, ist nach heutigem Stand der Technik nicht klar, wie die Ablagepfade im Bereich von Kreuzungspunkten innerhalb topologisch optimierter Strukturen bestmöglich zu gestalten sind. Für das TFP-Verfahren führen RICHTER ET AL. [99] daher mittels einer eigens entwickelten Vorrichtung Zugversuche an Kreuzungspunkt-Probekörpern mit unterschiedlichen Ablagestrategien durch. Die Strategien umfassen die gerade Überlappung der abgelegten Rovings, ein Auffächern der Rovings im Bereich der Überlappung sowie ein Zusammenführen der Rovings zwischen den einzelnen Streben (Abbildung 2.19). Die gerade Überlappung ist das einfachste Design, führt jedoch auch zur höchsten Aufdickung. Diese fällt beim auffächerten Design nicht so hoch aus. Das Zusammenführen der Rovings ist das aufwendigste Design. Es führt zu einer geringen Aufdickung, allerdings müssen unter Umständen kleine Radien abgelegt werden.

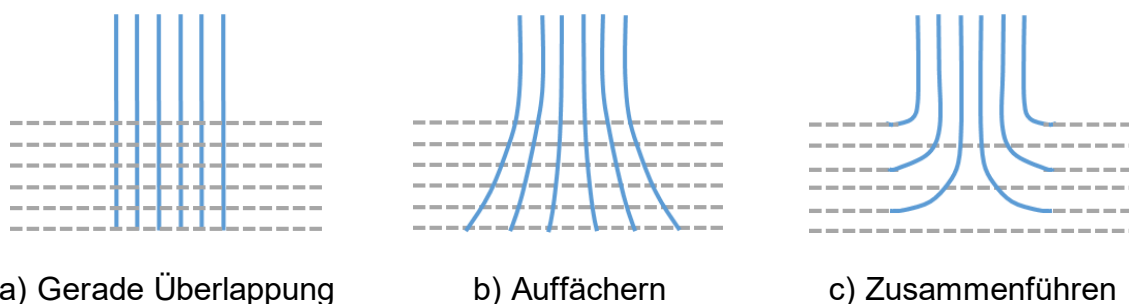


Abbildung 2.19: Ablagestrategien zur Herstellung von Kreuzungspunkten im TFP-Verfahren nach [99]

Bei den in [99] durchgeführten Zugversuchen weist die Kreuzungsstellen-Variante mit aufgefächerten Pfaden die höchsten Struktursteifigkeiten und auch die höchsten maximal erreichten Kräfte aus und wird in [99] daher als zielführendes Kreuzungsstellen-Design für das TFP-Verfahren erachtet. Die Untersuchungen aus [99] beschränken sich jedoch auf die konkret geprüften Probekörper-Geometrien und auf die Belastung, die durch die Zugvorrichtung vorgegeben wird. Es ist davon auszugehen, dass diese nicht alle möglichen Belastungen für Kreuzungspunkte widerspiegelt, sodass unklar ist, ob das für diesen Fall beste Design auch für andere Belastungsfälle die beste Lösung darstellt.

2.3.4 Festlegung der Bauteilquerschnitte

Die Ablagepfade zeigen an, wo die Faserbündel abgelegt werden sollen. Während die Ablagepfade über die Breite der abzulegenden Faserbündel auch die Bauteilbegrenzungen in der Ablageebene definieren, so sind die lokalen Bauteildicken noch festzulegen. Eine zweidimensionale Topologieoptimierung nimmt eine konstante Bauteildicke an. Dies ist weder ein ideales Ergebnis noch lässt sich eine konstante Dicke praktisch umsetzen [1]. Auch eine dreidimensionale Topologieoptimierung liefert keine fertigungsgerechten, mithilfe der Ablage von Faserbündeln praktisch umsetzbaren, Bauteilquerschnitte oder Dickenverläufe, da auch hier die Fertigungstechnologie nicht berücksichtigt wird [1]. Somit kann das Ergebnis einer Topologieoptimierung – unabhängig davon, ob sie zweidimensional oder dreidimensional durchgeführt wird – nur einen groben Designvorschlag darstellen [1].

SPICKENHEUER [1] nutzt in seiner Arbeit zweidimensionale Analysemodelle, um über Parameterstudien günstige Stegdicken zu ermitteln. Dieses Vorgehen ist je nach Komplexität der betrachteten Struktur aufwendig und es werden möglicherweise keine optimalen Bauteilquerschnitte ermittelt. ALMEIDA ET AL. [20] schlagen einen Ansatz vor, bei dem die Anzahl der in jedem Steg abzulegenden Faserbündel auf Basis der zuvor erzeugten Ablagepfade numerisch optimiert wird. Die Anzahl lokal abgelegter Faserbündel bestimmt in Kombination mit dem angestrebten Faservolumenanteil den lokalen Bauteilquerschnitt. Gleichung (2.2) [22] zeigt den Zusammenhang zwischen der lokal abgelegten Faserbündelanzahl, dem Faservolumenanteil und dem lokalen Bauteilquerschnitt auf:

$$A = \frac{n \cdot \left(\frac{m_f}{L}\right)}{\rho_f \cdot \varphi} \quad (2.2)$$

Hier ist A die Querschnittsfläche, n die Anzahl abgelegter Faserbündel, $\frac{m_f}{L}$ ist die Rovingfeinheit in tex, ρ_f ist die Faserdichte und φ ist der relative Faservolumenanteil. Für die Optimierung der Faserbündelanzahlen bzw. Bauteilquerschnitte kommt in [20] ein von SPICKENHEUER [1] entwickelter Ansatz zum Einsatz, bei dem basierend auf den Ablagepfaden und einem zweidimensionalen Basis-Netz der Bauteilkontur automatisiert ein dickenkonturiertes, dreidimensionales FE-Modell mit der entsprechenden Dickenverteilung und Faserorientierung aufgebaut wird. Dieser Ansatz für die automatisierte Modell-Erzeugung wird in [20] mit einem genetischen Algorithmus kombiniert, der die Anzahl an Ablagepfaden je Steg mit dem Ziel einer maximalen gewichtsspezifischen Struktursteifigkeit optimiert. ALMEIDA ET AL. [20] testen den Ansatz für die Optimierung der lokalen Bauteilquerschnitte am Beispiel eines Fahrrad-Brake-Boosters. Mit dem entwickelten Optimierungsansatz wird eine um 22 % höhere gewichtsspezifische Struktursteifigkeit erzielt, als mit der ursprünglichen topologisch optimierten Variante.

2.3.5 Auslegungsansätze auf Basis einer Topologieoptimierung

Für das TFP-Verfahren wird in [1] ein Ansatz zur Auslegung topologisch optimierter FKV-Komponenten vorgestellt. Dieser Ansatz wird am Beispiel der Auslegung eines durch das TFP-Verfahren hergestellten Fahrrad-Brake-Boosters erprobt und ist vereinfacht in Abbildung 2.20 dargestellt.

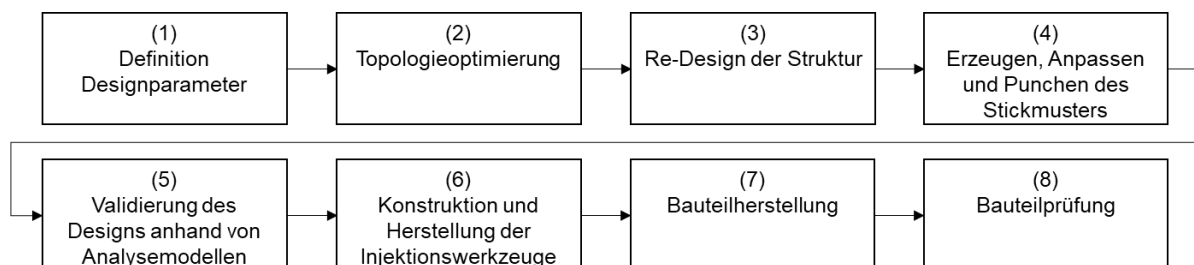


Abbildung 2.20: Ansatz zur Auslegung topologisch optimierter, mittels TFP-Verfahren hergestellter Komponenten nach [1]

Zunächst werden die Designparameter der Strukturkomponente definiert (1). Dies umfasst den verfügbaren Designraum sowie Lasten und Randbedingungen. Anschließend wird eine Topologieoptimierung durchgeführt (2). Deren Ergebnis ist in der Regel

nicht direkt mittels TFP-Verfahren fertigbar. Daher muss ein fertigungsgerechtes Re-Design der Struktur (3) erstellt werden. Dieser Schritt schließt auch die Ermittlung geeigneter Stegdicken innerhalb der Fachwerkstruktur mithilfe der FEA ein. Auf Basis des Re-Designs und unter Berücksichtigung des Spannungszustands wird anschließend ein TFP-Ablagemuster erstellt (4). Speziell beim TFP-Verfahren müssen einzelne Ablagepfade zu einem vollständig geschlossenen Linienzug verbunden und mit Stichdaten versehen werden (sogenanntes „Punchen“). Anhand des Stickmusters wird ein dreidimensionales Simulationsmodell für die FEA aufgebaut. Durch eine in [1] entwickelte Softwarelösung erfolgt dieser Schritt automatisch. Das Modell wird für eine Validierung des Designs in Bezug auf die mechanischen Struktureigenschaften verwendet (5). Im Anschluss an das Design des Bauteils werden die benötigten Injektionswerkzeuge konstruiert und gefertigt (6). Die letzten Schritte umfassen die Bauteilherstellung (7) einschließlich der Herstellung von Preformen mittels TFP-Verfahren und deren Infiltration sowie die abschließende mechanische Prüfung (8) des Bauteils.

Mit dem Ziel den Auslegungsansatz weiter zu automatisieren, wird in [20] der bestehende Ansatz aus [1] dahingehend weiterentwickelt, dass das manuelle Re-Design durch eine Optimierung der Anzahl abzulegender Faserbündel in den einzelnen Stegen ersetzt wird. Dieser neue Schritt schließt sich an das Erstellen eines Ablagemusters an. Das entsprechende Vorgehen ist in Abbildung 2.21 dargestellt.

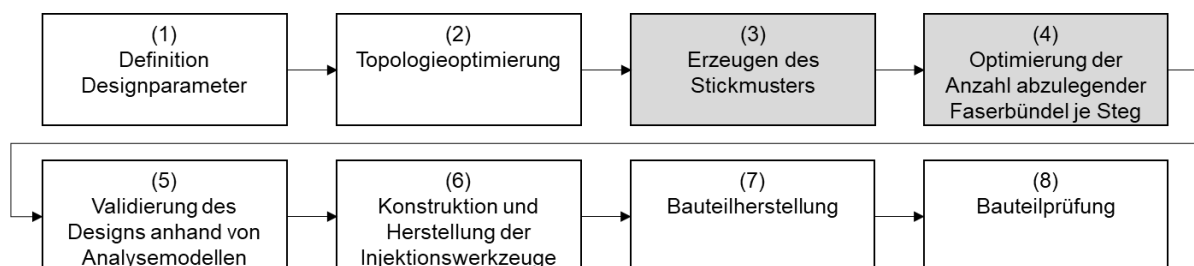


Abbildung 2.21: Weiter automatisierter Auslegungsansatz nach [20]

Für den 3D-Druck mit Faserverstärkung existieren mehrere, jedoch meist ähnliche Auslegungsansätze für die Entwicklung topologisch optimierter Komponenten.

WANG ET AL. [17] legen mittels 3D-Druck mit kontinuierlicher Faserverstärkung hergestellte Komponenten durch einen Ansatz aus, welcher aus den folgenden Schritten besteht:

1. Topologieoptimierung
2. Automatisiertes Ableiten von 3D-Druck-Pfaden

3. Verbinden der Einzelpfade zu einem kontinuierlichen Pfad
4. Drucken des Bauteils

Für das gleiche Fertigungsverfahren entwickeln HUANG ET AL. [19] einen Auslegungsansatz bestehend aus der simultanen Optimierung der Bauteiltopologie und der lokalen Faserorientierung (1), dem automatisierten Ableiten eines kontinuierlichen 3D-Druck-Pfads (2), und dem Drucken der Strukturen (3). Zur Verifizierung wird der Ansatz durch Bauteiltests und FE-Berechnungen ergänzt.

BAUER [54] fertigt in seiner Arbeit einen topologisch optimierten Brake Booster mittels Wickeltechnik. Das Strukturbauteil wird hierbei manuell in Knotenpunkte (die Positionen der zu umwickelnden Pins) und in Kanten, die diese verbinden, eingeteilt. Auch die Einteilung des Bauteils in einzelne, geschlossene Wickelmuster erfolgt manuell. Anschließend wird mit einem mathematischen Ansatz die Reihenfolge und Anzahl der zu wickelnden Muster so optimiert, dass die Materialmengen an den einzelnen Kanten möglichst mit der in der Topologieoptimierung ermittelten Materialmenge übereinstimmen. Im Rahmen der Arbeit erfolgt jedoch keine numerische Analyse der Bauteile, da der Fokus der Arbeit von BAUER [54] auf der Verfahrensentwicklung liegt. In [98] wird ebenso ein Auslegungsansatz für gewickelte Strukturen vorgestellt. Dort wird eine isotrope Topologieoptimierung durchgeführt, aus deren Ergebnis manuell ein zweidimensionales Wickelmuster und ein entsprechendes Werkzeugdesign erstellt werden. Anschließend erfolgt eine FEA des Bauteils, das jedoch weder hergestellt noch experimentell untersucht wird. MINSCH ET AL. [100] stellen einen weiteren Ansatz zur Auslegung topologisch optimierter, gewickelter Strukturen vor. Sie führen eine isotrope, dreidimensionale Topologieoptimierung durch. Aus deren Ergebnis werden manuell die zu wickelnden Pfade abgeleitet. Anschließend wird eine Optimierung der einzelnen Strebendurchmesser unter Verwendung von Balkenelementen durchgeführt. Unter Berücksichtigung dieser Durchmesser und somit der lokal zu wickelnden Materialmengen erfolgt die Programmierung des Roboters, die Bauteilherstellung und die mechanische Prüfung des Bauteils. Insgesamt [54,98,100] werden beim Roboterwickeln die Wickelmuster primär manuell erzeugt.

Für das AFP-Verfahren konnten in Recherchen keine Auslegungsansätze für topologisch optimierte, skelettartige Strukturen mit entlang der Lasten ausgerichteten Faserorientierungen ermittelt werden.

3 Untersuchung des Nassfaserlege-Prozesses

Bei Faser-Kunststoff-Verbunden sind die mechanischen Werkstoffkenngrößen eng mit dem zugrundeliegenden Fertigungsverfahren verbunden. Für das Nassfaserlegen als einem neuartigen Fertigungsverfahren wurden daher die mechanischen Werkstoffkenngrößen bei gerader Ablage experimentell ermittelt. Zum einen erfolgt hierdurch eine Einordnung der durch das Nassfaserlegen erzielten Kenngrößen gegenüber anderen Fertigungsverfahren und den theoretischen Werten und zum anderen dienen die ermittelten Kenngrößen als Eingangsdaten für die spätere Bauteilauslegung. Während auch die mechanischen Eigenschaften quer zur Faserrichtung wie auch die Schub Eigenschaften untersucht wurden, so fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf die faserparallelen Eigenschaften, da diese für die Auslegungsstrategie, bei der die Fasern entlang der Lasten orientiert werden sollen, maßgeblich sind. Eingegangen wird daher nur auf die Ermittlung der Werkstoffkenngrößen für faserparallele Zugbeanspruchung sowie für faserparallele Druckbeanspruchung in Anlehnung an DIN EN ISO 527-5 [101] und DIN EN 2850 [102].

Weiterhin erfolgen Untersuchungen zum Verhalten bei der Ablage in Radien, da vermutet wird, dass es hierbei zu Limitationen bei der Ablage, zu Ablagedefekten und entsprechenden Einbußen bei den mechanischen Eigenschaften kommen kann. Anhand der Untersuchungen werden abschließend Anforderungen an eine topologisch optimierte Bauweise für das Nassfaserlegen abgeleitet.

3.1 Eingesetzte Materialien

Für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften wird ein Kohlenstofffaser-Roving ZOLTEK™ PX3505098T-13 [103] bestehend aus 50,000 Einzelfasern (50K-Roving) eingesetzt. Bei den Untersuchungen zur Radienablage kommt zusätzlich ein 24K-Roving Torayca® T700SC-50C [104] zum Einsatz. Für die Herstellung der Probekörper wird ein unter erhöhten Temperaturen aushärtendes Epoxidharz-System bestehend aus Epoxidharz EPIKOTE™ Resin 04976, Härter EPIKURE™ Curing Agent 04976 und Katalysator EPIKURE™ Catalyst 04976 [105] verwendet. Für die Bauteile, die mithilfe 3D-gedruckter Werkzeuge hergestellt werden (Abschnitt 5), wird ein kalthärtendes Epoxidharzsystem bestehend aus Epoxidharz EPIKOTE™ Resin MGS™ RIMR 135 und Härter EPIKURE™ Curing Agent MGS™ RIMH 137 [106] genutzt. Dies begründet sich durch die geringe thermische Stabilität der 3D-gedruckten Werkzeuge.

3.2 Werkstoffkenngrößen bei gerader Ablage

3.2.1 Herstellung von Probekörpern

Für die Herstellung der benötigten Probekörper werden Platten mittels Nassfaserlegen hergestellt. Die Aushärtung der Platten erfolgt im Autoklaven. Dies soll einen Aufschluss darüber geben, welche mechanischen Kennwerte mit dem Ablageverfahren bei einem Konsolidierungsprozess, mit dem höchste Bauteilqualitäten erzielt werden können [23], möglich sind. Bei der Konsolidierung im Autoklaven wird zudem überschüssiges Harz aus der Preform ausgepresst. Diese Strategie wurde gewählt, da sich der Faservolumenanteil an der Laboranlage bislang nicht gezielt einstellen lässt. An der Anlage wurde daher bei der Imprägnierung mit einer Harz-Übersättigung der Rovings gearbeitet.

Aus den so hergestellten Platten werden die stabförmigen Probekörper mit einer Diamantkreissäge ausgearbeitet. Für die mechanische Prüfung werden Krafteinleitungselemente aus glasfaserverstärktem Kunststoff auf die Probekörper aufgeklebt, um Spannungskonzentrationen im Bereich der Klemmung der Probekörper durch die hydraulischen Klemmbacken zu reduzieren.

Die Ablage der Rovings zur Herstellung der Platten erfolgt automatisiert über ein Ablageprogramm. Gewählt wurde eine geringe Ablagegeschwindigkeit von 500 mm/min. Die Harzpumpe, welche das Harz zur Imprägniereinheit fördert, ist beim Laboraufbau von der Anlagensteuerung entkoppelt. An der Pumpe wird eine konstante Umdrehungszahl von 1/min eingestellt. Der 50K-Roving weist bei gerader Ablage eine Breite von etwa 9 mm auf. Entsprechend wurde dieser Wert als Abstand zwischen zwei benachbarten Bahnen festgelegt. Zum Zeitpunkt der Durchführung der mechanischen Charakterisierung stand noch keine geeignete Schneideinheit an der Anlage zur Verfügung. Daher wurde der Ablageprozess am Ende jeder Bahn unterbrochen, der Roving sorgfältig mit einer Schere durchgeschnitten, und das Programm anschließend fortgesetzt. Im Anschluss an die Ablage wird die Trägerplatte mit der Preform vom Verfahrtschisch demontiert, ein Blech auf die Preform aufgelegt und der gesamte Aufbau in einen Vakuumaufbau verpackt und die Platte im Autoklaven ausgehärtet. Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft eine mittels Nassfaserlegen abgelegte Preform und die im Autoklaven ausgehärtete Platte. Insbesondere an den Rändern sind durch die nicht ausge-

reifte Schneidtechnologie Variationen in der Länge der abgelegten Rovings und Orientierungsfehler zu erkennen. Es ist davon auszugehen, dass die Integration einer geeigneten Schneideinheit diese Fehler reduziert. Die Probekörper werden in der Plattenmitte entnommen, sodass die Randbereiche der Platte möglichst nicht für die Probenherstellung genutzt werden.

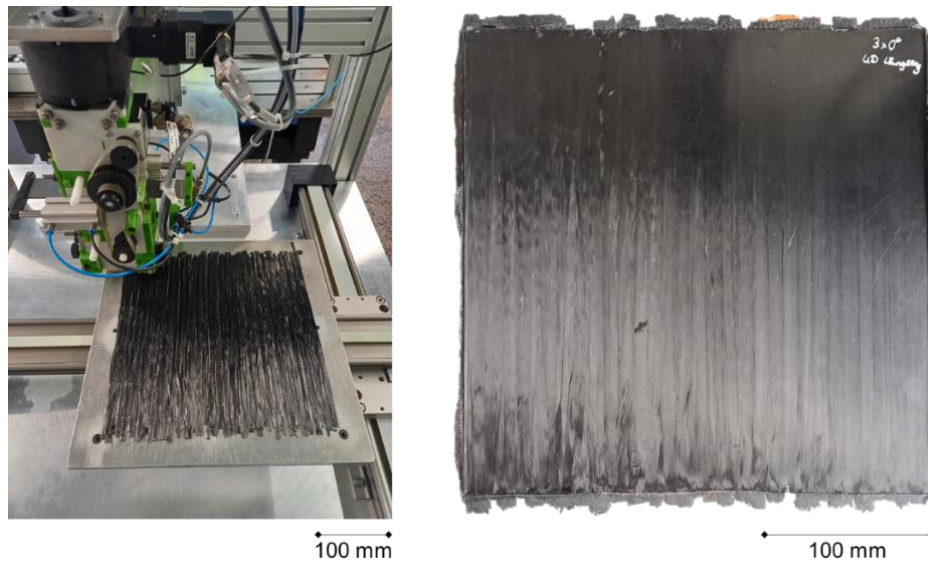


Abbildung 3.1: Abgelegte Preform (links) und ausgehärtete Platte (rechts)

3.2.2 Lichtmikroskopische Untersuchung

Aus den Platten werden Proben entnommen und mittels Lichtmikroskopie untersucht. Mittels Grauwertanalyse werden der Faservolumengehalt und der Porengehalt bestimmt. Ein repräsentatives Schliffbild ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Harzreiche Zonen zwischen Rovings

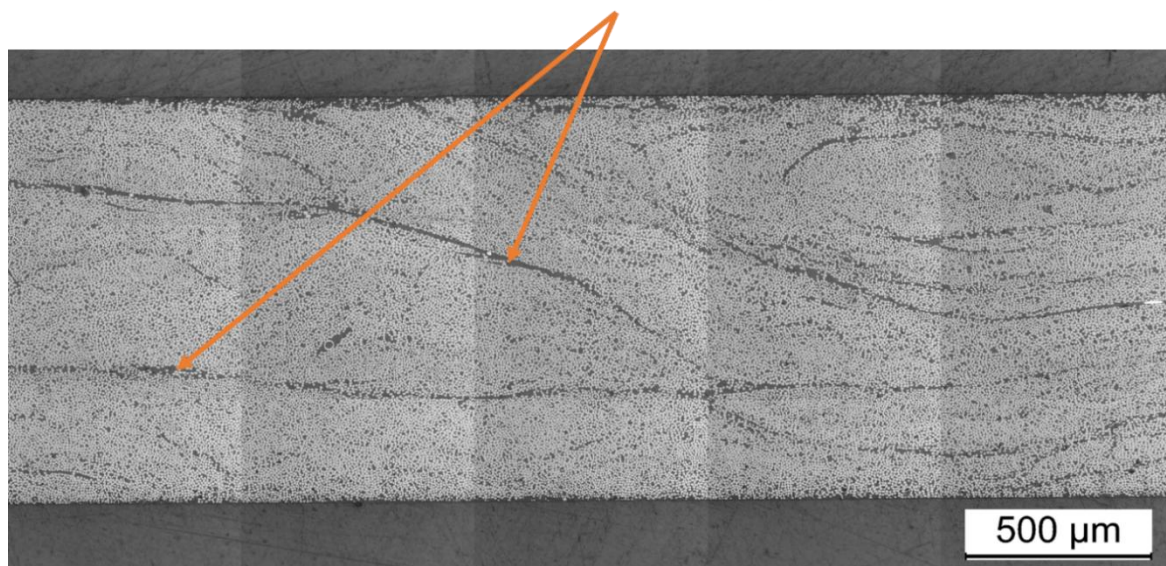


Abbildung 3.2: Schliffbild einer hergestellten Platte

Die im Autoklav-Verfahren hergestellten Platten zeigen eine hohe Qualität. Es sind kaum Poren erkennbar. Zwischen den einzelnen Rovings, die durch die Kompaktierung in ihrer Form sehr stark variieren, befinden sich harzreiche Zonen. Der Faservolumengehalt der Zugproben beträgt $60,9 \pm 3,2 \%$ (27 Bilder ausgewertet), der entsprechende Wert der Druckproben ergibt sich zu $59,2 \pm 4,7 \%$ (15 Bilder). Der zugehörige Porengehalt der Zug- bzw. Druckproben beträgt $1,0 \pm 0,4 \%$ bzw. $1,5 \pm 0,3 \%$.

3.2.3 Mechanische Charakterisierung

Die Zugversuche werden an einer Universalprüfmaschine ZwickRoell AllroundLine Z250 durchgeführt, die Versuche unter Druckbeanspruchung erfolgen an Universalprüfmaschine ZwickRoell 1485. Die Kraft wird in beiden Fällen mittels Kraftmessdosen (max. 250 kN) gemessen. Bei den Zugversuchen erfolgt die Dehnungsmessung optisch, bei den Prüfungen unter Druckbeanspruchung wird die Dehnung nicht aufgezeichnet, da dort nur Festigkeitskennwerte ermittelt werden. Anhand der Ergebnisse der Prüfungen werden die Elastizitätsgrößen sowie die Festigkeitskennwerte der nassfasergelegten Probekörper bestimmt. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die ermittelten Kennwerte.

Tabelle 3.1: Mechanische Kennwerte der mittels Nassfaserlegen hergestellten Probekörper

Prüfung	Prüfung in Anlehnung an	Anzahl Probekörper	Ermittelte Kennwerte (Mittelwert und Standardabweichung)
Faserparallele Zugbeanspruchung	DIN EN ISO 527-5 [101]	7	$E_{\parallel} = 137.608 \text{ MPa} \pm 3.369 \text{ MPa}$ $R_{\parallel}^t = 1.757 \text{ MPa} \pm 147 \text{ MPa}$
Faserparallele Druckbeanspruchung	DIN EN 2850 [102]	6	$R_{\parallel}^c = 1.212 \text{ MPa} \pm 98 \text{ MPa}$

Der verwendete Roving ZOLTEK™ PX3505098T-13 hat laut Datenblatt in Faserrichtung einen Elastizitätsmodul von 242 GPa und eine Zugfestigkeit von 4.137 MPa [103]. Das verwendete Harzsystem verfügt über einen Elastizitätsmodul (E-Modul) von ca. 3 GPa [105]. Über Mischungsregeln (Gleichungen 3.1 und 3.2) [22] können somit der zu erwartende E-Modul in Faserrichtung E_{\parallel} und die Zugfestigkeit in Faserrichtung R_{\parallel}^t abgeschätzt werden. Der Index f steht für die Fasereigenschaften und m für die Matriceigenschaften. Die Variable φ bezeichnet den relativen Faservolumenanteil.

$$E_{\parallel} = E_{f_{\parallel}} \cdot \varphi + E_m \cdot (1 - \varphi) \quad (3.1)$$

$$R_{\parallel}^t \approx R_{f\parallel}^t \cdot \varphi \quad (3.2)$$

Bei einem Faservolumengehalt von 60,9 % beträgt der rechnerische, faserparallele E-Modul 148.551 MPa und die rechnerische, faserparallele Zugfestigkeit 2.519 MPa. Der gemessene Kennwert für den E-Modul liegt somit um 7 % unterhalb berechneten Werts. Die faserparallele Zugfestigkeit hingegen weicht um 30 % vom berechneten Kennwert ab. Mögliche Ursachen hierfür sind die prozessbedingte ungleichmäßige Faserausrichtung und die fehlende Vorspannung der Fasern. Zusätzlich ist es möglich, dass einzelne Fasern im Verarbeitungsprozess, z. B. durch das Führen über die Umlenkrollen, vorgeschädigt werden.

Durch die hohe Ähnlichkeit der Verfahren bietet sich ein Vergleich mit den Werkstoffkenngrößen von TFP-Strukturen an. Auch dort liegen die abgelegten Rovings durch die Fixierung mit einem Nähfaden nicht ideal gestreckt vor. Außerdem können die Fasern durch die Einstiche mit der Nadel beim TFP geschädigt werden, was auch eine Festigkeitsreduktion bewirkt. Für einen Faservolumengehalt von 50 % ermittelt SPICKENHEUER [1] den faserparallelen E-Modul (104 GPa bis 121 GPa) und die faserparallele Zugfestigkeit (1571 MPa bis 1825 MPa) von mit unterschiedlichen Stichparametern im TFP-Verfahren hergestellten Probekörpern. Die mechanischen Eigenschaften des dort verwendeten Rovings sind vergleichbar mit dem in dieser Arbeit verwendeten Roving (Abweichung E-Modul < 1 %; Abweichung Festigkeit 4 %). Skaliert man die für das Nassfaserlegen ermittelten Kennwerte über die Gleichungen 3.3 und 3.4 [22] ebenfalls auf einen Faservolumengehalt von 50 %, so liegt der für das Nassfaserlegen ermittelte, skalierte E-Modul (113 GPa) im Bereich der mit dem TFP erreichten Kennwerte. Die für das Nassfaserlegen ermittelte, skalierte faserparallele Zugfestigkeit (1442 MPa) liegt um ca. -8 bis -21 % unterhalb der für das TFP erzielten Kennwerte. Auch hier sind sehr wahrscheinlich die ungleichmäßige Faserausrichtung und eine eventuelle Schädigung einzelner Fasern bei der Verarbeitung maßgeblich.

$$E_{\parallel, \varphi_2} = E_{\parallel, \varphi_1} \cdot \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (3.3)$$

$$R_{\parallel, \varphi_2} = R_{\parallel, \varphi_1} \cdot \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (3.4)$$

Insgesamt zeigt das Nassfaserlegen somit das Potential, vergleichbare mechanische Eigenschaften zu anderen Fertigungsprozessen für FKV mit Endlosfaserverstärkung

zu ermöglichen, wobei davon ausgegangen wird, dass beim Nassfaserlegen noch Verbesserungspotentiale der mechanischen Eigenschaften durch eine höhere Genauigkeit der Ablage und eine schonendere Handhabung der Rovings (z. B. durch eine Anpassung der finalen Förderwalzen oder der Rollenbeschichtungen) vorhanden sind.

3.3 Verhalten bei Radienablage

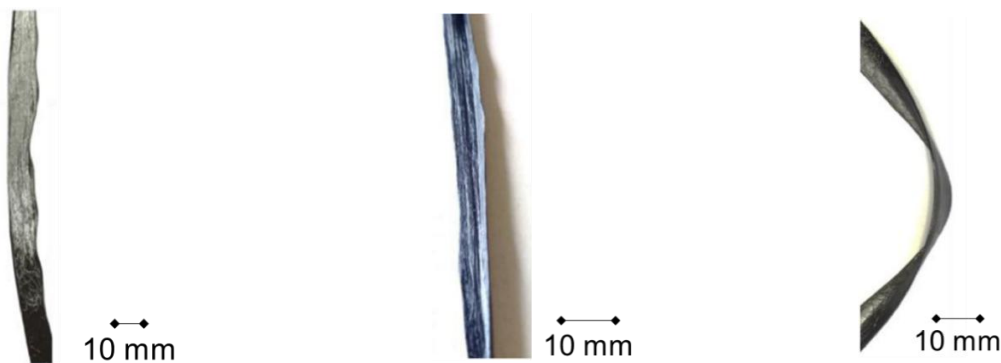
Die vorherigen Untersuchungen der mechanischen Kennwerte beziehen sich ausschließlich auf Probekörper, die mithilfe gerade abgelegter Rovingstränge hergestellt wurden. Wie beim AFP und TFP ist beim Nassfaserlegen davon auszugehen, dass bei der Ablage von Rovings in Radien aufgrund der unterschiedlichen Pfadlängen an den Innen- und Außenseiten des Rovings Defekte auftreten, die die mechanischen Eigenschaften negativ beeinträchtigen können.

Um dies zu untersuchen, werden Ablagestudien an der Laboranlage zum Nassfaserlegen durchgeführt [27]. Verwendet wird ein kalthärtendes Epoxidharzsystem sowie ein 24K- und ein 50K-Roving (vgl. Abschnitt 3.1). Mit beiden Rovings werden die Radien 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 500, 750, 1000, 1500 und 2000 mm auf eine ebene Platte abgelegt. Zusätzlich werden gerade Bahnen als Referenz abgelegt. Abbildung 3.3 zeigt beispielhaft Probekörper, die mit dem 50K-Roving abgelegt wurden.



Abbildung 3.3: Freie Ablage in Radien mit 50K-Roving nach [27]

Je Roving und je Radius werden sechs Probekörper abgelegt. Die Ablage erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 500 mm/min. Am Ende jeder Bahn werden die Rovings manuell vorsichtig mit einer Schere abgeschnitten. Nach der Ablage härten die Proben auf dem Blech ohne Konsolidierung aus. Die Probekörper werden visuell begutachtet und die festgestellten Defekte werden bewertet. An den Rovings werden hauptsächlich die drei Defekte „Faserwelligkeit an der Innenseite“, „Hochziehen der Außenseite“ und „komplettes Umklappen“ ermittelt und mit festgelegten Kategorien bewertet (Abbildung 3.4). [27]



a) Welligkeit an Innenseite b) Hochziehen der Außenseite c) Umklappen

Abbildung 3.4: Auftretende Defekte bei Radienablage nach [27]

Zusätzlich werden senkrechte Fotoaufnahmen der abgelegten Probekörper angefertigt. Mittels Bildverarbeitung werden die Probekörper im Hinblick auf die drei genannten Defekte ausgewertet, wobei die Abweichung der welligen Probeninnenseite von einem idealen Radius und die Abnahme der Rovingbreite bei einem Hochziehen der Außenseite oder bei einem Verdrehen genutzt werden. Das Zusammenführen der Ergebnisse aus den visuellen Begutachtungen und den Bildauswertungen führt zu folgenden Erkenntnissen [27]:

- Die Ablage mit dem 50K-Roving scheint – insbesondere im Hinblick auf Verdrehungen bei der Ablage – grundsätzlich weniger fehleranfällig zu sein.
- Eine leichte Faserwelligkeit an der Innenseite ist selbst bis zu einem Radius von 2000 mm zu beobachten. Sie nimmt mit abnehmendem Radius zu. Signifikante Welligkeiten, die sich auf die mechanischen Eigenschaften auswirken können (zu erwartende lokale Steifigkeitsreduktion $> 10\%$) können für Radien < 500 mm erwartet werden. Bei Radien ≤ 75 mm klappen die Rovings komplett um, eine Ermittlung der Welligkeit erübrigt sich somit.

- Ein leichtes Hochziehen der Außenseite des Rovings tritt beim 24K-Roving selbst bei einem Radius von 2000 mm auf. Für den 50K-Roving ist dies erst für Radien ≤ 1000 mm zu beobachten. Bei Radien ≤ 250 mm ist bei beiden Rovings mit einer starken Ausprägung dieses Defekts zu rechnen.
- Das komplette Umklappen oder Verdrehen der Rovings kann im Fall des 24K-Rovings selbst bei einem Radius von 1500 mm noch auftreten. Für den 50K-Roving wurde dieser Defekt erst für Ablageradien ≤ 500 mm vermehrt beobachtet.

Zusätzlich zur freien Ablage in Radien werden Versuche zur Radienablage in Nuten durchgeführt. Mechanische Prüfungen der mit dem Nutenwerkzeug hergestellten Probekörper sollen zudem einen Aufschluss darüber geben, ob sich die mechanischen Eigenschaften mit kleiner werdenden Ablageradien verringern. Das hierfür verwendete Werkzeug ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

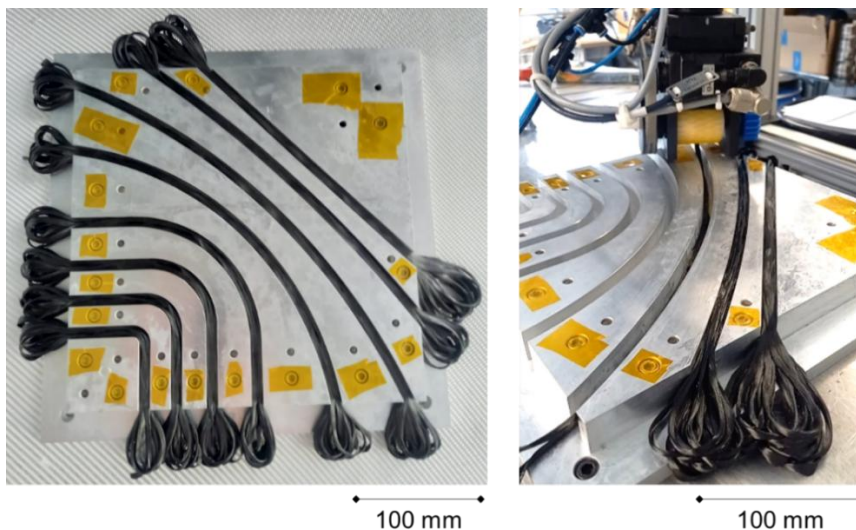


Abbildung 3.5: Durch Nassfaserlegen mit imprägnierten Rovings befülltes Nutenwerkzeug (links) und Ablageprozess (rechts)

Das Werkzeug besteht aus einer Grundplatte mit den Abmessungen 330 mm x 330 mm x 10 mm und darauf verschraubten, über Stifte positionierten Formteilen. Diese bilden Nuten mit Radien 10, 25, 50, 100, 250, 500 und 1000 mm sowie für eine gerade Bahn als Referenz. Die Nuten weisen eine Breite von 9 mm und eine Tiefe von 11 mm auf. Die Zieldicke der Probekörper beträgt 9 mm. Diese Breite wird gewählt, um die Gefahr des Verkippens der Probekörper bei einer Prüfung im Dreipunkt-Biegeversuch zu vermindern. Verwendet für die Ablage wird der vorgenannte 50K-Roving. Bei der Herstellung wird auf ein Schneiden des Rovings verzichtet. Stattdessen wird

er am Ende der Nuten über das Werkzeug hinausgeführt und es werden Schlaufen gebildet. Dies erlaubt eine vollautomatische Prozessführung ohne manuelles Eingreifen.

Insgesamt treten bei der Ablage in die Nuten die gleichen Defekte auf wie bei direkter Ablage auf ein gerades Blech. Folgende Beobachtungen können jedoch festgehalten werden:

- Durch die Ablage ohne Konsolidierung bei einer gleichzeitig anvisierten Dicke der Probekörper von 9 mm türmen sich die aufeinandergelegten Faserbündel stark auf, sodass sie ab einer Anzahl von ca. 20 abgelegten Rovingsträngen über die Nuten hinausstehen (Abbildung 3.6). Entsprechend sollte die Tiefe der Nuten großzügig ausgeführt werden. Sehr tiefe Nuten erhöhen jedoch die freie Länge des Rovings, also die Strecke vom Verlassen des Rollenpaars innerhalb des Ablagekopfes bis zum Auftreffen des Rovings auf den Nutgrund. Hierdurch verringert sich die Ablagegenauigkeit.
- Aufgrund der Trägheit der Rovings ist die Ablage für die Radien 25 mm oder kleiner zu ungenau. Die hierfür vorgesehenen Nuten werden nicht zuverlässig getroffen.

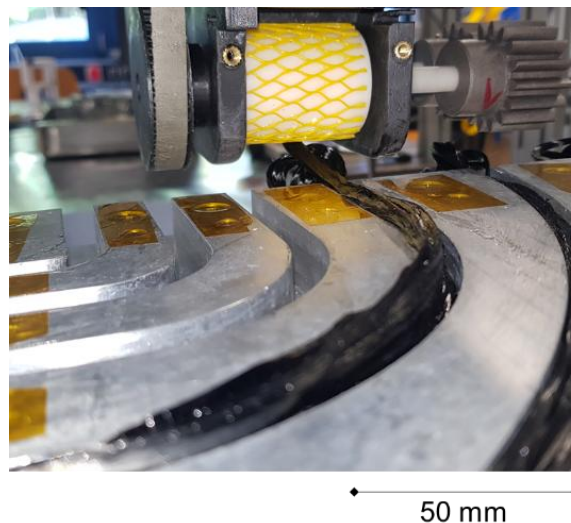


Abbildung 3.6: Über den Nutrand gestapelte Rovings

Für die Konsolidierung und Aushärtung der Probekörper wird ein Stempel, der den Gegenpart zu den Nuten darstellt, auf das Werkzeug gelegt. Die beiden Werkzeughälften werden anschließend sukzessive zwischen zwei Stahlplatten verschraubt. Das Verschrauben erfolgt schrittweise, sodass überschüssiges Harz aus dem Werkzeug ausgepresst wird, bis der Stempel schließlich flächig auf dem Unterteil des Werkzeugs

„auf Block“ aufliegt. In diesem Zustand härtet das Harz bei Raumtemperatur aus. Anschließend werden die Probekörper entformt und die überstehenden Schlaufen mit einer Bandsäge entfernt. Die Prüfung der Probekörper erfolgt im Dreipunkt-Biegeversuch (Abbildung 3.7).

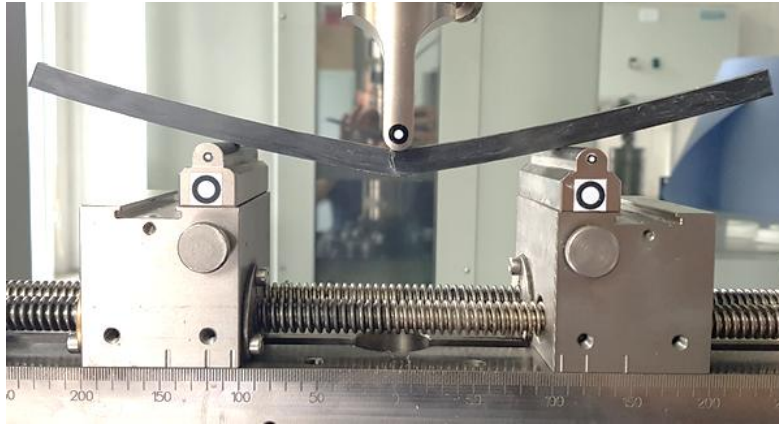


Abbildung 3.7: Versuchsaufbau für die Biegeprüfung gekrümmter Probekörper

Unabhängig vom Radius beträgt der Auflagerabstand für alle Proben 120 mm. Je Radius werden sieben Probekörper geprüft. Die aufgezeichneten Wege und Kräfte werden nach DIN EN ISO 14125 [107] in die Randfaserdehnung ε und die Biegespannung σ_b umgerechnet:

$$\varepsilon = \frac{s \cdot 6 \cdot h}{L^2} \quad (3.5)$$

$$\sigma_b = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3.6)$$

Hierbei ist s die Verschiebung der unteren Auflager, h ist die Probekörperhöhe, L ist der Auflagerabstand, F die gemessene Kraft und b die Probekörperbreite. Für jeden Probekörper wird so eine Spannungs-Dehnungs-Kurve erstellt. Anhand des linearen Bereichs der Spannungs-Dehnungs-Kurve wird die Struktursteifigkeit nach DIN EN ISO 14125 [107] ermittelt. Die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve wird hier bewusst nicht als Biegemodul bezeichnet, da die genannten Formeln nur für gerade Probekörper gelten. Durch den variierenden Krümmungsradius ändert sich der Belastungszustand der Probekörper, sodass hier nicht von einem Biegemodul im Sinne einer Werkstoffkenngröße gesprochen werden kann. Aus diesem Grund werden auch

nicht die absolut für die unterschiedlichen Radien ermittelten Struktursteifigkeiten miteinander verglichen. Stattdessen wird für jeden Radius ein FE-Modell unter Verwendung von dreidimensionalen Solid-Elementen aufgebaut (Abbildung 3.8).

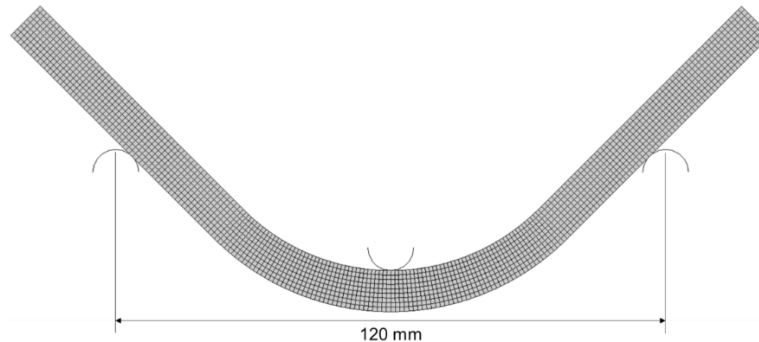


Abbildung 3.8: Beispielhaftes Simulationsmodell für den Ablageradius 50 mm

Die Modelle nehmen eine ideale Faserorientierung entlang der Krümmung an (ohne Berücksichtigung etwaiger Ablagedefekte). Durch den Vergleich, wie sich die Abweichung der Struktursteifigkeit der je nach Radius defektbehafteten Probekörper gegenüber der mittels FEA ermittelten Struktursteifigkeiten (ohne Berücksichtigung von Defekten) entwickelt, soll eine Aussage über den Einfluss der Defekte getroffen werden. Die Ergebnisse für die Struktursteifigkeiten sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Im Fall der experimentell ermittelten Werte sind die mittleren Struktursteifigkeiten inklusive der beidseitig aufgetragenen Standardabweichung angegeben.

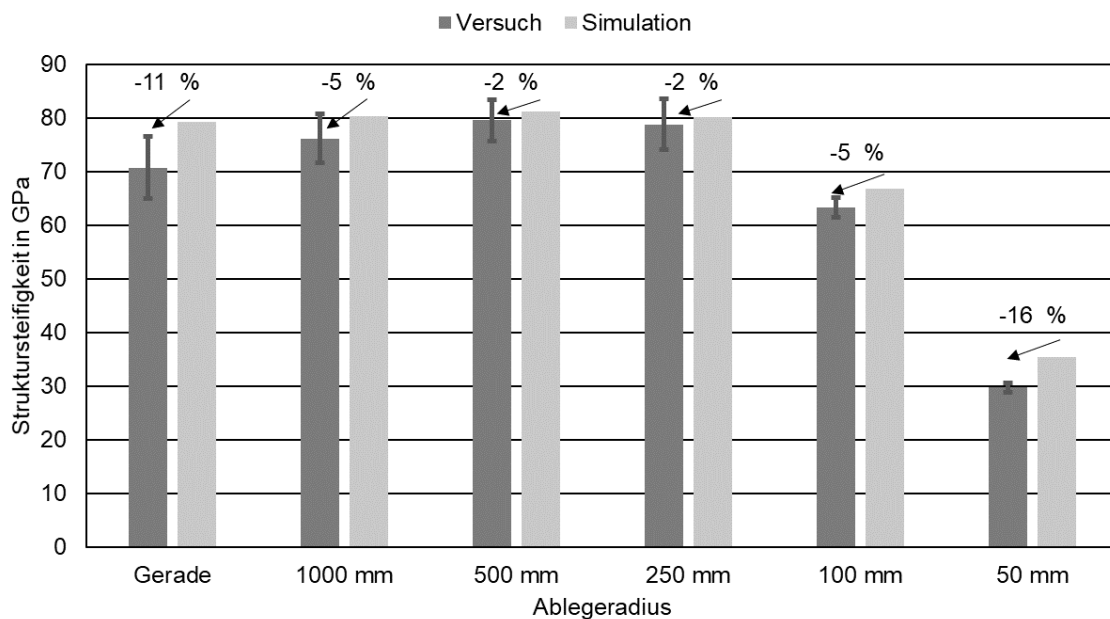


Abbildung 3.9: Struktursteifigkeiten der Probekörper mit unterschiedlichen Radien

Im Fall der geraden Probekörper liegen die experimentellen Ergebnisse um -11 % unterhalb der über die FEA zu erwartenden Struktursteifigkeit. Allerdings konnte dies darauf zurückgeführt werden, dass bei der geraden Nut aufgrund der Toleranzen zwischen Stempel und Nut bei der Konsolidierung Fasern in die Zwischenräume gespült wurden. Bei den anderen Nuten war dieser Effekt nicht in dem Maße zu beobachten. Für die Ablageradien 1000 mm, 500 mm und 250 mm liegen die über die FEA ermittelten Struktursteifigkeiten im Bereich der Standardabweichung der experimentell ermittelten Werte. Somit wird bei diesen Radien kein relevanter Einfluss von durch die Radienablage bedingten Ablagedefekten auf die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu mit dem Nassfaserlegen gerade abgelegten Proben beobachtet. Für den Radius von 100 mm liegt der Wert der FEA bereits oberhalb der Streuung der experimentell ermittelten Werte. Die mittlere Abweichung von -5 % ist gering. Ungeachtet der Fehler bei den geraden Proben, scheinen Ablageradien von 100 mm umsetzbar zu sein, ohne dass signifikante Verschlechterungen der Materialeigenschaften auftreten. Deutlicher ausgeprägt ist die Abweichung zwischen Versuchsergebnissen und FEA für den Ablageradius von 50 mm. Die mittlere Abweichung der experimentellen Werte von der Simulation beträgt -16 %.

Somit zeigen die Ergebnisse, dass beim Nassfaserlegen mit dem betrachteten Roving bis zu einem Radius von einschließlich 100 mm nicht mit erheblichen Einbußen bzgl. der Steifigkeitseigenschaften von gekrümmt abgelegten Strukturen gegenüber der geraden Ablage zu rechnen ist. Die Festigkeit wird hierbei nicht betrachtet. Insgesamt erlaubt das Nassfaserlegen somit kleinere Radien als das AFP (ca. 600 bis 800 mm [66]), Radien wie beim TFP (ca. 5 mm [1]) sind aktuell noch nicht möglich.

3.4 Zusammenfassung und Rückschlüsse für die Auslegung

Bei gerader Ablage in Kombination mit einer Konsolidierung durch Autoklav-Technologie lassen sich mit den Nassfaserlegen faserparallele mechanische Eigenschaften, die auf einem vergleichbaren Niveau zu konventionellen FKV-Fertigungsprozessen liegen, erzielen. Der erreichte Elastizitätsmodul liegt bei gleichem Faservolumenanteil im Bereich von mittels TFP-Technik hergestellten Proben. Die Zugfestigkeit in Faserichtung liegt um -8 bis -21 % unterhalb der TFP-Vergleichswerte.

Die Ablage in Radien führt beim Nassfaserlegen zu unterschiedlichen Ablagedefekten. Diese nehmen erwartungsgemäß mit kleiner werdendem Radius zu. Insbesondere bei

der Ablage in Nuten wird beobachtet, dass die Ablage kleiner Radian (≤ 25 mm) durch die Eigensteifigkeit des verwendeten, imprägnierten 50K-Rovings ungenau ist. Bei Ablageradien ≥ 100 mm konnten in Dreipunkt-Biegeversuchen gegenüber gerade abgelegten Probekörpern keine signifikanten Steifigkeitsreduktionen nachgewiesen werden, sodass solche Ablageradien an der Laboranlage mit dem 50K-Roving zulässig umsetzbar sind. Für Ablageradien von 50 mm muss für den betrachteten Roving mit Reduktionen der Steifigkeiten von ca. 15 % gerechnet werden. Somit sind bei der Auslegung von mit diesem Roving herzustellender Strukturen Ablageradien von 50 mm oder kleiner zu vermeiden.

Durch die Einschränkung bei der Radianablage in Kombination mit dem Stand der Technik zum Pfad-Design im Bereich von Kreuzungsstellen für das TFP-Verfahren (Abschnitt 2.3.3) wird geschlussfolgert, dass im Bereich von Kreuzungspunkten eine überlappende Ablage von Rovings in diesen Bereichen für das Nassfaserlegen die günstige Lösung darstellt.

4 Auslegungsansatz auf Basis einer Topologieoptimierung

Ziel des im Rahmen der Arbeit entwickelten Auslegungsansatz ist es, die Auslegung mittels Nassfaserlegen herzustellender Bauteile mit einer **möglichst hohen masse-spezifischen Struktursteifigkeit** zu ermöglichen. Für die Erreichung dieses Ziels wird eine Vorgehensweise und ein Auslegungsansatz definiert, bei dem das **Bauteildesign möglichst vollständig durch rechnergestützte, automatisierte Auslegungsprozesse** erarbeitet wird, da menschliches Eingreifen in den Auslegungsprozess stets die Gefahr einer subjektiven Einflussnahme auf den Bauteilentwurf erhöht.

In Abschnitt 2.1 wurde ein Überblick über Faserablageverfahren, die sich zur Herstellung topologisch optimierter Strukturen eignen, gegeben. Die meisten Gemeinsamkeiten zum Nassfaserlegen bestehen beim TFP-Verfahren. Mit diesem Verfahren wurden bereits einige topologisch optimierte Bauteile hergestellt. Einen ganzheitlichen Ansatz für die Auslegung topologisch optimierter, mittels TFP-Verfahren hergestellter Strukturen stellt SPICKENHEUER [1] vor. Dieser wurde von ALMEIDA ET AL. [20] weiterentwickelt. Aufgrund der Ähnlichkeit der Verfahren scheint die Vorgehensweise bei der Auslegung auch für das Nassfaserlegen geeignet. Entsprechend wird für den Auslegungsansatz topologisch optimierter, mittels Nassfaserlegen hergestellter Strukturen das in Abbildung 4.1 dargestellte Vorgehen, welches sich weitestgehend an den in [1] und [20] entwickelten Ansätzen für die Auslegung von TFP-Strukturen orientiert, festgelegt.

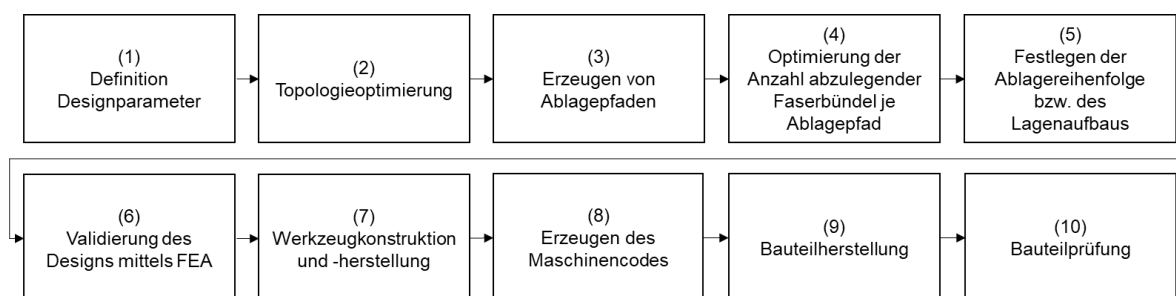


Abbildung 4.1: Auslegungsansatz für mittels Nassfaserlegen hergestellte FKV-Strukturen auf Basis der Topologieoptimierung

Für die einzelnen Funktionen des Auslegungsansatzes werden Anforderungen definiert und auch Festlegungen bzgl. der verfolgten Ansätze getroffen. Tabelle 4.1 gibt hierüber einen Überblick.

Tabelle 4.1: Auslegungsfunktionen inklusive Anforderungen und Festlegungen

Funktion	Anforderungen und Festlegungen
(1) Definition Designparameter	<ul style="list-style-type: none"> • Bauraum der Struktur (2D) und zulässige Dicke • Randbedingungen und Lasten • Steifigkeitsanforderungen
(2) Topologieoptimierung	<ul style="list-style-type: none"> • Minimierung der Nachgiebigkeit bei vorgegebenem Zielvolumen • Berücksichtigung anisotroper Werkstoffeigenschaften • Berücksichtigung biaxialer Faserwinkel im Bereich von Kreuzungspunkten • Zweidimensionale Topologieoptimierung • BESO-Verfahren
(3) Erzeugen von Ablagepfaden	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichst automatisierte Erzeugung auf Basis des Topologieoptimierungsergebnisses (möglichst geringe manuelle Nacharbeit) • Berücksichtigung des Spannungszustands innerhalb des Bauteils • Einstellbarkeit möglichst gleichmäßiger Pfadabstände • Einstellbarkeit zulässiger Radien • Überlappende, kreuzende Pfade im Bereich von Kreuzungsstellen
(4) Optimierung Anzahl abzulegender Faserbündel je Ablagepfad	<ul style="list-style-type: none"> • Übertragen des Modellierungsansatzes für das TFP-Verfahren nach [1] auf nassfasergelegte Strukturen • Numerische Optimierung der Faserbündelanzahlen bzw. lokalen Bauteilquerschnitte gemäß Ansatz für das TFP-Verfahren nach [20]
(5) Festlegen der Ablagereihenfolge	<ul style="list-style-type: none"> • Manuelle Festlegung auf Basis von Voruntersuchungen
(6) Designvalidierung mittels FEA	<ul style="list-style-type: none"> • Übertragen des Modellierungsansatzes für das TFP-Verfahren nach [1] auf nassfasergelegte Strukturen
(7) Werkzeugkonstruktion und -herstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Semi-automatische Werkzeugkonstruktion durch Abformen der Bauteilmodelle in CAD-Software • Auspressen überschüssigen Harzes • Verwendung 3D-gedruckter Werkzeuge
(8) Erzeugen des Maschinencodes	<ul style="list-style-type: none"> • Überführen der Liniendaten (Pfade) in G-Code mittels bereits vorhandener Open-Source Lösungen und manueller Anpassung
(9) Bauteilherstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Ablage mittels Laboranlage zum Nassfaserlegen • Konsolidierung über Verschrauben der Werkzeuge bei Raumtemperatur
(10) Bauteilprüfung	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichst entsprechend des betrachteten Lastfalls • Aufzeichnen Weg und Kraft zur Bestimmung der Struktursteifigkeit

Der Ansatz startet mit der Definition der Designparameter (1). Dies umfasst den Bauraum der Struktur (in 2D) inkl. möglicher Restriktionen oder Anforderungen bzgl. der Bauteildicke, die Randbedingungen und Lasten und die Steifigkeitsanforderungen. Die im Rahmen der Arbeit betrachtete Bauteil实现 fokussiert sich auf die Bauteilsteifigkeit. Die Festigkeit und Stabilitätsversagen wie Knicken werden nicht betrachtet.

Bei der Topologieoptimierung (2) ist die Minimierung der Nachgiebigkeit der Struktur bei vorgegebenem Materialvolumen eine bewährte Methodik. Die Topologieoptimierung soll die anisotropen Werkstoffeigenschaften und zudem auch biaxiale Faserorientierungen im Bereich von Kreuzungspunkten berücksichtigen. Da unklar ist, ob dies beim Nassfaserlegen gegenüber einer isotropen Topologieoptimierung Vorteile liefert, erfolgt in Abschnitt 5 der Vergleich von Strukturen, die mit unterschiedlichen Topologieoptimierungsansätzen ausgelegt wurden. Im Rahmen der Arbeit werden zweidimensionale Topologieoptimierungen durchgeführt. Dies ist dadurch begründet, dass mit dem Nassfaserlegen hauptsächlich zweidimensionale Ablagepfade abgelegt werden können, sodass z. B. Strukturen mit Hinterschnitten in Dickenrichtung nicht hergestellt werden können. Die Ablage auf gekrümmte Werkzeuge ist prinzipiell möglich, wird im Rahmen der Arbeit jedoch zunächst nicht betrachtet. Begründet wird die Wahl einer zweidimensionalen Topologieoptimierung auch dadurch, dass bei einer dreidimensionalen Topologieoptimierung keine fertigungsgerechten, die Ablage von Faserbündel berücksichtigenden Querschnitte erzielt werden können [1]. Für die Topologieoptimierung wird das BESO-Verfahren verwendet. Dieses bietet eine hohe Berechnungseffizienz [90] und den Vorteil, dass diskrete 0-1 („Material“ oder „Void“) erzielt werden [71,80,90]. Weiterhin kann das BESO-Verfahren sehr einfach mit kommerzieller FE-Software verknüpft werden [90] und bietet hierdurch weitreichende Möglichkeiten zur Modifikation.

Im nächsten Schritt sollen auf Basis des Ergebnisses einer Topologieoptimierung möglichst automatisiert, d.h. mit möglichst geringer manueller Nacharbeit, Ablagepfade für das Nassfaserlegen erzeugt werden (3). Diese sollen den Spannungszustand des Bauteils berücksichtigen, zudem sollen die Pfadabstände einstellbar und die Pfade möglichst äquidistant innerhalb des Bauteils angeordnet sein. Weiterhin soll eine Möglichkeit zur Begrenzung der Pfade auf zulässige Radien gegeben sein. Basierend auf dem Stand der Technik zum Design von Kreuzungspunkten bei TFP-Strukturen [1,99] soll der Algorithmus zum Erzeugen von Pfaden ein Kreuzen dieser in solchen Strukturbereichen ermöglichen.

Auf Basis der Pfade wird eine Optimierung der Anzahl je Ablagepfad abzulegender Faserbündel durchgeführt (4). Dieser Schritt hat das Ziel, die massespezifische Struktursteifigkeit gegenüber dem zweidimensionalen Optimierungsergebnis weiter zu steigern. Für das TFP-Verfahren konnte bereits gezeigt werden, dass eine nachträgliche

Optimierung der lokalen Bauteilquerschnitte bzw. Materialmengen zu einer Steigerung der massespezifischen Steifigkeit führen kann [20]. Für die Querschnittsoptimierung nassfasergelegter Strukturen wird eine Variante des für das TFP-Verfahren entwickelten Ansatzes aus [20] implementiert. Die hierfür benötigten FE-Modelle werden entsprechend des Ansatzes aus [1] automatisiert erzeugt. Für das Nassfaserlegen muss jedoch die Funktion zur Modellierung der Rovings angepasst werden.

Basierend auf den Ablagepfaden und lokalen Materialmengen wird die Reihenfolge, in welcher die Faserbündel abzulegen sind, festgelegt (5). Dieser Schritt erfolgt manuell. Im Rahmen der Arbeit werden simulative und experimentelle Studien an Probekörpern und Bauteilen durchgeführt. Anhand der Ergebnisse werden Schlussfolgerungen gezogen, wie die Ablagereihenfolge und der Lagenaufbau im Fall der betrachteten, topologisch optimierten Strukturen im Hinblick auf eine maximale massespezifische Struktursteifigkeit zu gestalten sind.

Mithilfe des festgelegten Lagenaufbaus wird anschließend eine Validierung des Designs mithilfe einer FEA durchgeführt (6). Die hierfür benötigten Modelle werden mit dem Ansatz zur automatisierten Modellerzeugung aus [1] erzeugt. In Abschnitt 5 wird geprüft, ob die Struktursteifigkeit nassfasergelegter Strukturen hiermit hinreichend genau beschrieben werden kann.

Die Werkzeugkonstruktion (7) erfolgt semi-automatisch. Hierfür werden die Bauteilmodelle aus der FEA in eine Computer-Aided Design (CAD)-Software überführt und abgeformt. Die Werkzeuge werden so gestaltet, dass überschüssiges Harz ausgepresst wird. Dies ist dadurch bedingt, dass an der Laboranlage kein gezielter Faservolumenanteil eingestellt werden kann und dass die Schnittlänge an der Laboranlage variiert. Daher wird eine Strategie gewählt, bei der mit Harz übersättigte Rovings leicht über die eigentlichen Ablagepfade und Nuten hinaus verlängert abgelegt werden, um die Ablage zu kurzer Faserbündel zu vermeiden. Die Bauteile weisen komplexe Querschnittsverteilungen auf. Die Werkzeuge werden daher – und aus Kostengründen – im FDM-Verfahren hergestellt (7). Zu Forschungszwecken bei kleinen Stückzahlen ist dies zweckmäßig.

Zur Erzeugung der benötigten Maschinencodes (8) werden die Liniendaten der Ablagepfade in eine dxf-Datei umgewandelt und von dort in einen G-Code überführt. Hierfür wird die Open-Source Lösung „*GRBL-Plotter*“ verwendet. Die erzeugten Codes müssen noch manuell um einzelne Befehle, z. B. zum Nachführen der Drehachse, ergänzt

werden. Generell stellt die Überführung von Liniendaten in Maschinencodes bereits einen etablierten Prozess dar. Es existieren hierfür bereits Softwarelösungen für Fräsprozesse, Cutter oder Laserschneidprozesse (z. B. G-Code Generator für *SolidWorks* oder auch Open-Source Lösungen wie „*dxf2gcode*“).

Die Bauteilherstellung (9) erfolgt mittels Ablage an der Laboranlage zum Nassfaserlegen. Für die Konsolidierung werden die 3D-gedruckten Werkzeuge bei Raumtemperatur zwischen Stahlplatten verschraubt. Dies ist durch die im Vergleich zu metallischen Werkzeugen geringe Druckstabilität und thermische Beständigkeit begründet. In Vorversuchen wurde sichergestellt, dass mit dem verfolgten Konsolidierungsansatz Probekörper mit akzeptablen Porengehalten ($3,0 \pm 1,3$ %; je 9 Schliffbilder von drei Probekörpern analysiert) hergestellt werden können.

Zuletzt erfolgt die Bauteilprüfung (10). Sie ist für jedes Bauteil möglichst entsprechend des betrachteten Lastfalls durchzuführen. Hierbei werden der relevante Weg und die aufgebrachte Kraft aufgezeichnet, um die Struktursteifigkeit zu ermitteln. Im Rahmen der Arbeit wird durch Bauteilprüfungen die grundsätzliche Funktionalität des Auslegungsansatzes geprüft. Hierfür wird auch ein Vergleich zu Referenzstrukturen durchgeführt. Weiterhin wird anhand des Vergleichs zwischen Simulation und Experiment geprüft, ob der Modellierungsansatz aus [1] auch für das Nassfaserlegen eine hinreichend genaue Vorhersage der Struktureigenschaften erlaubt.

Beim betrachteten Auslegungsprozess entsprechen vor allem die Schritte der Topologieoptimierung, dem Erzeugen von Ablagepfaden und der Optimierung der Anzahl abzulegender Faserbündel zumindest semi-automatisierten Ansätzen. Grundsätzlich sind Automatisierungsansätze auch immer im Hinblick auf deren Geschwindigkeit und die Zeitersparnis zu evaluieren. Im Rahmen der Arbeit werden diese Ansätze vorrangig mit dem Ziel implementiert, eine möglichst maximale gewichtsspezifische Bauteilsteifigkeit zu erreichen. Bei der Entwicklung steht somit die Funktionalität der Algorithmen im Fokus. Die entwickelten Skripte wurden nicht im Hinblick auf ihre Recheneffizienz optimiert. Die Geschwindigkeit und die Berechnungseffizienz könnten beispielsweise neben einer Optimierung der Skripte auch durch die Verwendung kompilierter Software oder auch durch Parallelisierung gesteigert werden.

4.1 Topologieoptimierung

4.1.1 BESO-Verfahren

Wie in Tabelle 4.1 gezeigt und in Abschnitt 4 festgelegt und beschrieben, wird im Rahmen der Arbeit ein zweidimensionales BESO-Verfahren verwendet. Das BESO-Verfahren ist in der Forschung bereits etabliert, wird jedoch in Abschnitt 4.1.1 zum besseren Verständnis kurz beschrieben. Als Basis für das im Rahmen der Arbeit entwickelte BESO-Verfahren unter Berücksichtigung biaxialer Faserorientierungen dient der von MEHL ET AL. [4] entwickelte, anisotrope BESO-Algorithmus, der jedoch ausschließlich UD-Orientierungen berücksichtigt. Dieser ist wiederum eine Weiterentwicklung der von ZUO UND XIE [108] vorgestellten isotropen BESO-Implementierung. Der Algorithmus liegt in Form eines *Python*-Skripts vor, das die kommerzielle FE-Software *ABAQUS* steuert.

Im ersten Schritt wird ein Modell des Bauraums erstellt, mit Finiten Elementen vernetzt und mit Randbedingungen sowie den wirkenden Belastungen versehen. Als Beispiel sei ein Abbildung 4.2 ein zweidimensionales, vernetztes Modell einer Scheibe gezeigt, die an ihrem linken Rand eingespannt und an ihrer rechten, unteren Ecke mit einer vertikal wirkenden Kraft belastet ist.

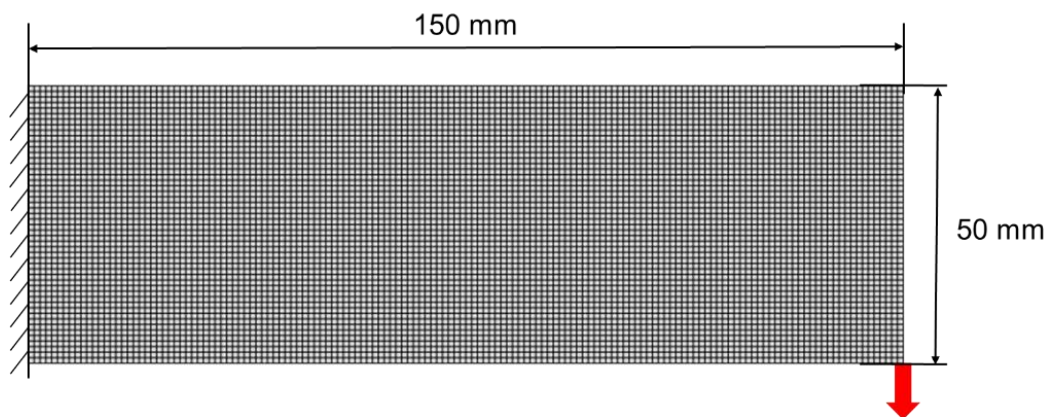


Abbildung 4.2: Beispielhaftes Ausgangsmodell für die Topologieoptimierung nach [109]

Minimiert wird die Nachgiebigkeit der Struktur unter Vorgabe des anteilig in Bezug auf den Bauraum einzusetzenden Materialvolumens. Mathematisch wird dies durch die Gleichungen (4.1) und (4.2) ausgedrückt [4].

$$\min: C = \frac{1}{2} \mathbf{F}^T \mathbf{U} \quad (4.1)$$

$$\text{subject to: } V^* = \sum_{i=1}^N v_i x_i \quad (4.2)$$

Hierbei ist die Nachgiebigkeit C (engl. compliance) die zu minimierende Zielfunktion der Optimierung. F sind die auf das Bauteil wirkenden Kräfte und U die Verschiebungen. V^* ist das Zielvolumen an verbleibendem „festem“ Material im Bauraum, welches vorzugeben ist. Dieses entspricht der Summe der Einzelvolumina aller Elemente im Bauraum, welche durch die Multiplikation der Elementvolumen v_i und ihrer relativen Elementdichten x_i berechnet werden. Beim BESO-Verfahren können Elemente zwei unterschiedliche Werte für die relative Elementdichte annehmen [108]:

- 1 für im Bauraum verbleibendes „Solid-Material“
- einen kleinen Wert für aus dem Bauraum entferntes „Void-Material“, z. B. 0,001.

Die Entscheidung, ob ein Element im Bauraum verbleibt, aus dem Bauraum entfernt, oder gegebenenfalls auch reaktiviert wird, wird auf Basis der elementweisen Sensitivität α_i getroffen. Diese wird über Gleichung (4.3) [108] berechnet:

$$\alpha_i = \frac{\partial C}{\partial x_i} = -p \frac{E_i}{x_i} \quad (4.3)$$

Hier ist p eine Konstante, der sogenannte Penalty-Exponent. E_i ist die elementweise Dehnungsenergie. Sie kann direkt aus den Ergebnissen einer FE-Berechnung mittels *Abaqus* ausgegeben werden. Um Stabilitätsprobleme wie das sogenannte „checkerboarding“ (engl. für Schachbrettmuster) [110] zu vermeiden, und um netzunabhängige Lösungen zu generieren, werden die Elementsensitivitäten gefiltert. Filter können in der Topologieoptimierung auch dazu genutzt werden, Fertigungsrestriktionen einzubinden und so ein fertigungsgerechteres Design zu erzeugen. Um zu vermeiden, dass bei den optimierten Bauteilentwürfen Streben auftreten, deren Breite geringer ist, als die des beim Nassfaserlegen verwendeten Rovings, wird der vorhandene BESO-Algorithmus im Rahmen der eigenen Weiterentwicklung um einen sogenannten Dilationsfilter [111] (lat. dilatare = erweitern, ausdehnen) erweitert. Dieser findet bereits für das SIMP-Verfahren Anwendung. Ziel hierbei ist es, die minimale zulässige Größe von Bestandteilen der Struktur (also z. B. die Breite der Streben innerhalb der Fachwerkstruktur) zu beschränken [111,112]. Beim Filterprozess wird die Sensitivität des betrachteten Ausgangselements (dunkelgrau in Abbildung 4.3) mit den Sensitivitäten

der innerhalb des Filterradius r_{min} liegenden Elemente (hellgrau in Abbildung 4.3) verrechnet.

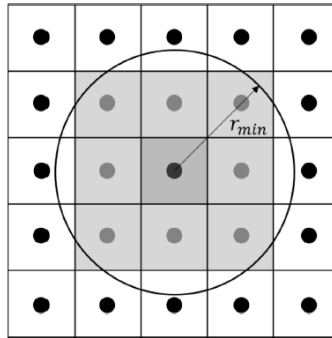


Abbildung 4.3: Ausgangselement und innerhalb Filterradius liegende Elemente nach [109]

Mit dem implementierten Dilatationsfilter berechnet sich die gefilterte Sensitivität $\tilde{\alpha}_i$ für das BESO-Verfahren durch Gleichung (4.4) [109,112]:

$$\tilde{\alpha}_i = \frac{\log(\sum_j w_{ij} e^{\beta \alpha_j})}{\beta} \quad (4.4)$$

Die Gewichtungsfaktoren w_{ij} werden über Gleichung (4.5) berechnet:

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{|N_i|} & \text{for } j \in N_i \\ 0 & \text{for } j \notin N_i \end{cases} \quad (4.5)$$

Hierbei ist $|N_i|$ die Anzahl der innerhalb des Filterradius liegenden Elemente. Bei β handelt es sich um eine frei wählbare Konstante. Für große Werte von β wirkt die in Gleichung (4.4) angegebene Funktion wie ein Maximum-Operator. Für $\beta = 0$ verhält sich der Filter linear und entspricht somit dem klassischen Filter für das BESO-Verfahren. [112]

Durch Variation des Filterradius kann mithilfe des Dilatationsfilters die minimale Größe von Elementen innerhalb einer topologisch optimierten Struktur beschränkt werden. Am Beispiel der in Abbildung 4.2 gezeigten Scheibe wurde festgestellt, dass hiermit die minimale Strebenbreite beschränkt werden kann und Streben, deren Breite kleiner ist als die Ablagebreite des verwendeten Rovings, vermieden werden können [109].

Um das Konvergenzverhalten zu verbessern, wird im BESO-Verfahren neben der örtlichen Filterung auch eine historische Filterung vorgenommen (Gleichung (4.6)) [108]:

$$\tilde{\alpha}_i = \frac{1}{2} (\hat{\alpha}_{i,k} + \hat{\alpha}_{i,k-1}) \quad (4.6)$$

Dabei ist k die Nummer der aktuellen Iteration innerhalb des Optimierungsprozesses. Das BESO-Verfahren startet mit einem vollständig gefüllten Bauraum. Anschließend wird der Anteil an Materialvolumen im Bauraum über Gleichung (4.7) so lange iterativ reduziert, bis das Zielvolumen V^* erreicht ist [108].

$$V_k = V_{k-1}(1 - ert) \text{ for } V_k > V^* \quad (4.7)$$

Bei ert handelt es sich um die festzulegende „Evolution rate“. Diese bestimmt, wie schnell das Materialvolumen reduziert wird. Basierend auf dem für die aktuelle Iteration k berechneten Materialvolumens V_k und den elementweisen, gefilterten Sensitivitäten $\tilde{\alpha}_i$ wird über ein Bisektionsverfahren (auch Intervallhalbierungsverfahren genannt) ein Grenzwert α_{th} berechnet. Elemente, deren Sensitivität größer ist als der Grenzwert werden aktiviert, wohingegen Elemente, deren Sensitivität kleiner als der Grenzwert ist, aus dem Bauraum entfernt bzw. deaktiviert werden. [108]

Nach Erreichen des Zielvolumens wird das Verfahren so lange iterativ fortgeführt, bis das in (4.8) angegebene Konvergenzkriterium für die Zielfunktion erreicht wird.

$$\frac{|\sum_{i=1}^N (C_{k-i+1} - C_{k-N-i+1})|}{\sum_{i=1}^N C_{k-i+1}} \leq \tau \quad (4.8)$$

Hierbei ist N eine Nummer, die festlegt, wie viele der zuletzt durchgeführten Iterationen bei der Berechnung des Konvergenzkriteriums berücksichtigt werden sollen, und τ ist das Konvergenzkriterium.

4.1.2 Berücksichtigung biaxialer Faserorientierungen

Da eine reine UD-Faserorientierung im Bereich von Kreuzungspunkten keine sinnvolle Lösung darstellt, soll beim zu entwickelnden Topologieoptimierungsansatz in solchen Bereichen eine zweite Faserorientierung berücksichtigt werden, während in einachsigen belasteten Bereichen eine UD-Faserorientierung ausreicht. Entsprechend wird ein Ansatz entwickelt, bei dem das Bauraummodell aus zwei mit Schalenelementen vernetzten Lagen aufgebaut wird. Der entwickelte Ansatz und hiermit durchgeführte numerische Studien sind auch in [113] zu finden. Die Modellierung mithilfe zweier Lagen erlaubt die separate Optimierung zweier unterschiedlicher Faserorientierungen in den beiden Lagen. Dabei werden in der ersten Lage (im Folgenden als „Master layer“ m bezeichnet) die Elementorientierungen entsprechend des CAIO-Verfahrens [82] gemäß der Richtung der absolut größten Hauptspannung ausgerichtet. In der zweiten

Lage (im Folgenden als „slave layer“ s bezeichnet) hingegen, werden Elemente nur in Bereichen hinzugefügt bzw. aktiviert, in denen ein mehrachsiger Spannungszustand vorliegt. Hierdurch wird dort eine zweite, von der ersten Lage abweichende Faserorientierung zur Aufnahme des mehrachsigen Spannungszustands hinzugefügt. Durch das bereichsweise Aktivieren der Elemente in der zweiten Lage wird auch die Aufdickung durch das lokale Hinzufügen einer zweiten Faserorientierung berücksichtigt. Bezüglich der Modellerstellung entsteht nahezu kein zusätzlicher Aufwand, da zunächst eine Lage modelliert und diese anschließend mit einer einfachen Kopierfunktion versetzt werden kann. Abbildung 4.4 zeigt ein entsprechendes Bauraummodell am Beispiel einer biegebelasteten Scheibe. Beide Lagen sind über eine sogenannte „Tie-Constraint“ ideal miteinander verbunden. Ist ein symmetrischer Lagenaufbau gewünscht, kann sinnvollerweise eine Symmetrierandbedingung aufgebracht werden.

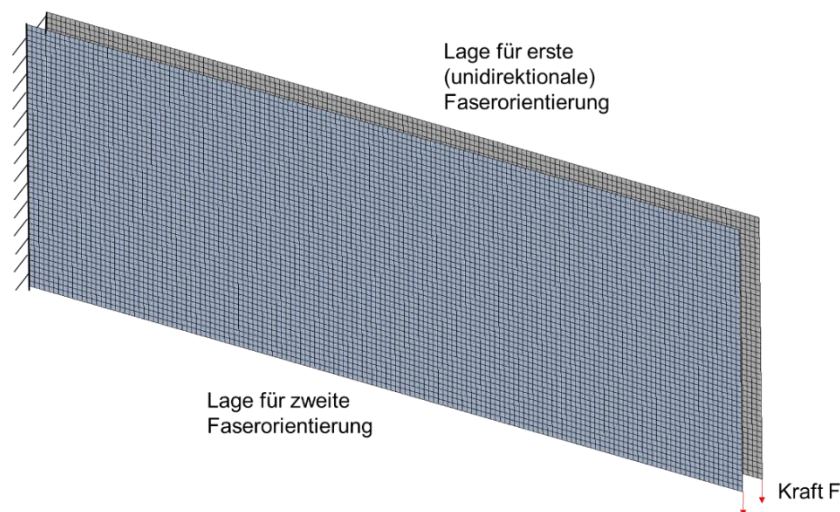


Abbildung 4.4: Modell des Bauraums einer biegebelasteten Scheiben bestehend aus zwei Lagen nach [113] (Lagen sind aus Visualisierungsgründen weiter voneinander versetzt dargestellt)

Innerhalb der Topologieoptimierung werden mithilfe der FEM die im lokalen Elementkoordinatensystem vorliegenden Spannungen σ ermittelt:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Aus diesen werden die Hauptspannungen σ_i und die HS-Richtungen \hat{v}_i , welche den Eigenwerten und Eigenvektoren der Spannungsmatrix entsprechen, berechnet. Hierbei wird $\hat{v}_k(\sigma_k)$ als die Richtung der größten absoluten Hauptspannung $\sigma_k = \max(\text{abs}(\sigma_i))$ definiert. Durch Multiplikation mit einer Rotationsmatrix M wird der Richtungsvektor $\hat{v}_k(\sigma_k)$ ins globale Koordinatensystem des FE-Modells überführt:

$$\tilde{v}_k = \mathbf{M} \cdot \hat{v}_k \quad (4.10)$$

Für alle Elemente **innerhalb der ersten Lage des Modells** m wird der nun im globalen Koordinatensystem vorliegende Richtungsvektor der absolut größten Hauptspannung \tilde{v}_k während jeder Iteration als neuer Orientierungsvektor des betrachteten Elements gesetzt, um die elementweisen Materialorientierungen gemäß der absolut größten HS-Richtung auszurichten. In der **zweiten Lage** s sollen nur Elemente in Bereichen hinzugefügt bzw. aktiviert werden, in denen ein mehrachsiger Spannungszustand vorliegt. Hierfür wird eine Variable sr (engl. „stress ratio“), die das Spannungsverhältnis von erster zu zweiter Hauptspannung innerhalb eines im „master layer“ m befindlichen Elements i beschreibt, eingeführt:

$$sr_i = \frac{|\sigma_{I_i,m}|}{|\sigma_{II_i,m}|} \quad (4.11)$$

Diejenigen Elemente, deren Spannungsverhältnis sr kleiner ist als ein vorzugebender Grenzwert srt (engl. „stress ratio threshold“), werden in einer Liste als Kandidatenelemente, die für eine zweite Faserorientierung infrage kommen, gespeichert. Um das lokale Auftreten einzelner Elemente mit zwei Faserorientierungen zu vermeiden, sondern stattdessen zusammenhängende Regionen mit zwei Faserorientierungen zu generieren, werden nur solche Elemente für das Hinzufügen einer zweiten Faserorientierung berücksichtigt, für die mehr als die Hälfte aller innerhalb des Filterradius r_{min} benachbarten, aktiven Solid-Material-Elemente ebenfalls Kandidatenelemente sind. Um Berechnungsaufwand zu sparen, findet die Berechnung des verwendeten Materialvolumens (Gleichungen (4.2) und (4.7)) nur für die Elemente der ersten Lage (master layer m) statt. Um jedoch das zusätzliche Materialvolumen durch die Bereiche, in denen Elemente in der zweiten Lage aktiviert wurden, zu berücksichtigen, wird der Parameterraum für die relativen Elementdichten x_i erweitert:

- $x_i = 0,001$ für deaktivierte „Void“-Elemente
- $x_i = 1$ für Elemente mit einer Faserorientierung (Element in master layer aktiv, aber entsprechendes Element mit zweiter Faserorientierung in slave layer deaktiviert)
- $x_i = 2$ für Elemente mit zwei Faserorientierungen (Element in master layer aktiv und entsprechendes Element mit zweiter Faserorientierung in slave layer aktiv)

Hierdurch wird sichergestellt, dass bei Vorgabe des gleichen Zielvolumens alle aus mehreren Optimierungen resultierenden Ergebnisse auch stets über das gleiche Gesamtvolumen verfügen (unter Berücksichtigung beider Lagen).

Über die Wahl des Grenzwerts srt lässt sich steuern, wie viele Elemente mit einer zweiten Faserorientierung hinzugefügt werden. Höhere Werte für srt begünstigen das Hinzufügen einer zweiten Faserorientierung. Zu Beginn der Optimierung mit einem vollständig gefüllten Bauraum liegen mehr Bereiche mit mehrachsigen Spannungszuständen vor, als zu einem späteren Zeitpunkt, wenn sich bereits eine skelettartige Struktur ausgebildet hat. Hohe Werte für srt zum Beginn der Optimierung führen dazu, dass in Bezug auf den planaren Bauraum durch das Hinzufügen von Elementen in der zweiten Lage „mehr Material“ entfernt wird. Dies kann zu Beginn der Optimierung zu Instabilitäten führen. Daher wird zunächst nur eine reine UD-Topologieoptimierung bis zum Erreichen des Zielvolumens durchgeführt, und die zweite Faserorientierung erst ab diesem Zeitpunkt schrittweise hinzugefügt. Dieser Ansatz wird dadurch realisiert, dass srt gemäß Gleichung (4.12) während der Optimierung erhöht wird.

$$srt_k = srt_{k-1} + ert_{srt} \text{ für } (srt_k < srt^* \text{ und } V_{k-1} = V^*) \quad (4.12)$$

Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf des Materialvolumenanteils V und den Verlauf des Grenzwerts srt während der Topologieoptimierung.

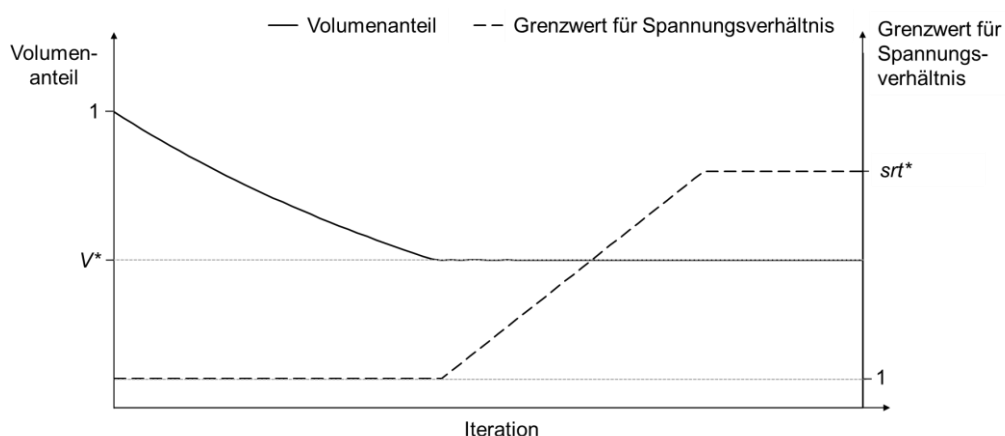


Abbildung 4.5: Verlauf des Materialvolumenanteils und des Grenzwerts für das Spannungsverhältnis nach [113]

In Bereichen, in denen Elemente in der zweiten Lage aktiviert werden, soll eine zweite, von der ersten Lage unterschiedliche Faserorientierung hinzugefügt werden, um die dort vorherrschenden mehrachsigen Spannungszustände aufzunehmen. Zur Wahl der Faserorientierung in der zweiten Lage wird die Netztheorie [22, 114] verwendet. Diese

bietet vor allem im Hinblick auf den mathematischen Aufwand Vorteile gegenüber der klassischen Laminattheorie (CLT) [22]. Für die topologisch optimierten, häufig skelettartigen Strukturen wird die netztheoretische Vereinfachung, nach welcher Verbundwerkstoff-Strukturen als reines Fasernetzwerk begriffen und das Mittragen der Matrix vernachlässigt wird [22] als zweckdienlich erachtet. Für die betrachteten Strukturen mit zwei unterschiedlichen Faserorientierungen lässt sich nach der Netztheorie unter Vorgabe der Faserorientierung in der ersten Schicht die Faserorientierung in der zweiten Schicht nach Gleichung (4.13) bestimmen [22]:

$$\beta_2 = \arctan\left(-\frac{\hat{n}_{II}/\hat{n}_I}{\tan\beta_1}\right) \quad (4.13)$$

Hierbei sind \hat{n}_I und \hat{n}_{II} die in den Hauptrichtungen wirkenden Haupt-Kraftflüsse und die Winkel β_1 und β_2 sind die Faserorientierungswinkel der ersten bzw. zweiten Lage in Bezug auf das Hauptachsensystem [22]. Für den Topologieoptimierungsansatz wird eine gleiche Dicke für die erste und die zweite Lage angenommen. Daher können statt der Haupt-Kraftflüsse die Hauptspannungen eines entsprechenden Elements i der ersten Lage (master layer, m) in (4.13) eingesetzt werden:

$$\beta_2 = \arctan\left(-\frac{\sigma_{II,m}/\sigma_{I,m}}{\tan\beta_1}\right) \quad (4.14)$$

Für ein entsprechendes Element wird der Winkel β_1 als Winkel zwischen dem lokalen Elementkoordinatensystem und der Richtung der absoluten größten Hauptspannung berechnet. Anschließend kann der Winkel β_2 gemäß Gleichung (4.14) bestimmt werden. Der Winkel β_2 wird dann durch Anwenden von Gleichung (4.10) ins globale Koordinatensystem überführt.

Das Aktivieren von Elementen mit einer zweiten Faserorientierung in der zweiten Lage s hat einen Einfluss auf den Spannungszustand und die ermittelten Dehnungsenergien in den zugrundeliegenden Elementen der ersten Lage m . Für Elemente, bei denen die zweite Lage aktiviert ist, wird daher die Sensitivität nicht nach Gleichung (4.3) berechnet, sondern nach Gleichung (4.15):

$$\alpha_{i,m} = -p \frac{(E_{i,m} + E_{i,s})}{x_{i,m}} \quad (4.15)$$

Hierbei ist zu beachten, dass x_i dort wie zuvor beschrieben einen Wert von 2 aufweist. Entsprechend muss dort auch für die Berechnung des Spannungsverhältnisses sr_i und

für die Berechnung des Winkels β_2 das vorhandene Element in der zweiten Lage berücksichtigt werden:

$$sr_i = \frac{|\sigma_{I_i,m}|}{|\sigma_{I_i,s}|} \tag{4.16}$$

$$\beta_2 = \arctan\left(-\frac{\sigma_{I_i,s}/\sigma_{I_i,m}}{\tan \beta_1}\right) \tag{4.17}$$

Zur Nachvollziehbarkeit ist der Ablauf der Topologieoptimierung in Abbildung 4.6 schematisch dargestellt. Zusätzlich ist in [113] ein Pseudo-Code des entwickelten BESO-Ansatzes zu finden.

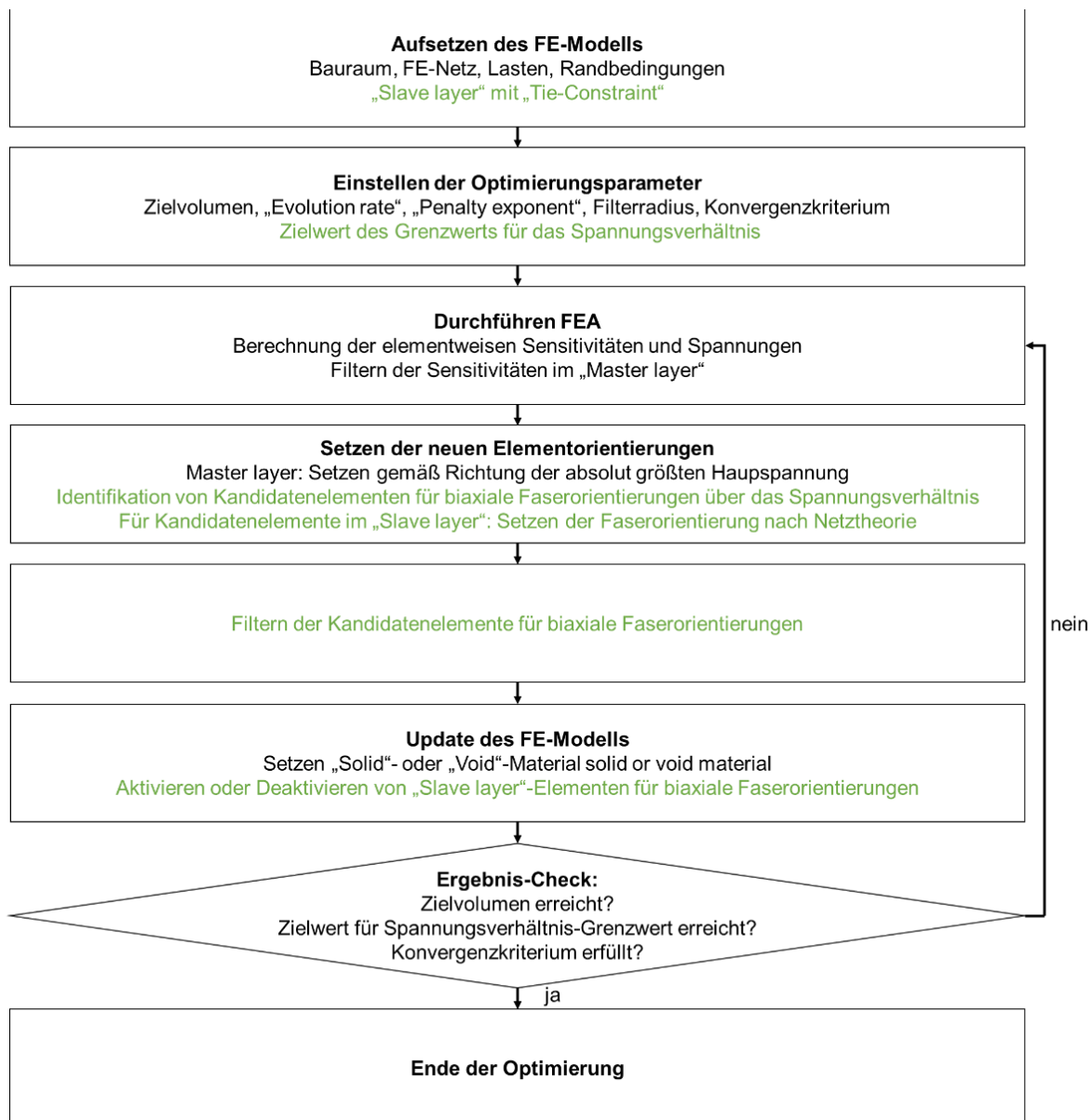


Abbildung 4.6: Ablaufschema des Topologieoptimierungsansatzes nach [113]

4.1.3 Parameterstudien zur biaxialen Topologieoptimierung

Der entwickelte Topologieoptimierungsansatz wird anhand von Beispielstrukturen untersucht. Die Parameterstudien und deren Ergebnisse sind auch in [113] zu finden. Betrachtet werden eine linksseitig eingespannte Scheibe mit einer vertikal angreifenden Kraft und ein winkliger Träger (Abbildung 4.7). Bei beiden Strukturen handelt es sich um Referenz-Strukturen, die häufig zum Testen von Topologieoptimierungsalgorithmen herangezogen werden. Die Scheibe wird bspw. in [2,115] und der winklige Träger wird bspw. in [4,7] untersucht.

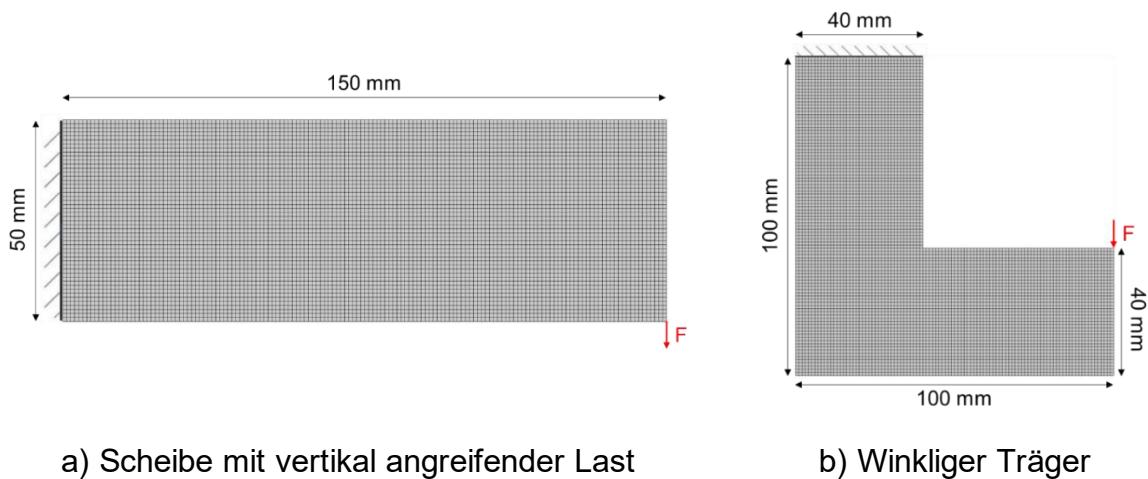


Abbildung 4.7: Strukturen zur Untersuchung des entwickelten Topologieoptimierungsansatzes nach [113]

Für beide Strukturen wird ein Filterradius von 4 mm vorgegeben und ein Zielvolumen von 40 % angenommen. Der Parameter srt^* beeinflusst, wie viele Bereiche der Strukturen mit einer zusätzlichen Faserorientierung versehen werden. Um seinen Einfluss zu untersuchen, wird srt^* zwischen den Werten 1 (entspricht einer reinen UD-Topologieoptimierung), 4, 6, 8, 10 und 12 variiert.

Die für die beiden Strukturen mit unterschiedlichen Werten für srt^* erzielten Ergebnisse, die auch in [113] eingesehen werden können, sind in Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9 dargestellt. Hierbei entsprechen dunkelgraue Elemente Bereichen mit UD-Faserorientierung und hellgraue Elemente entsprechen Bereichen mit zwei Lagen und biaxialen Faserorientierungen.

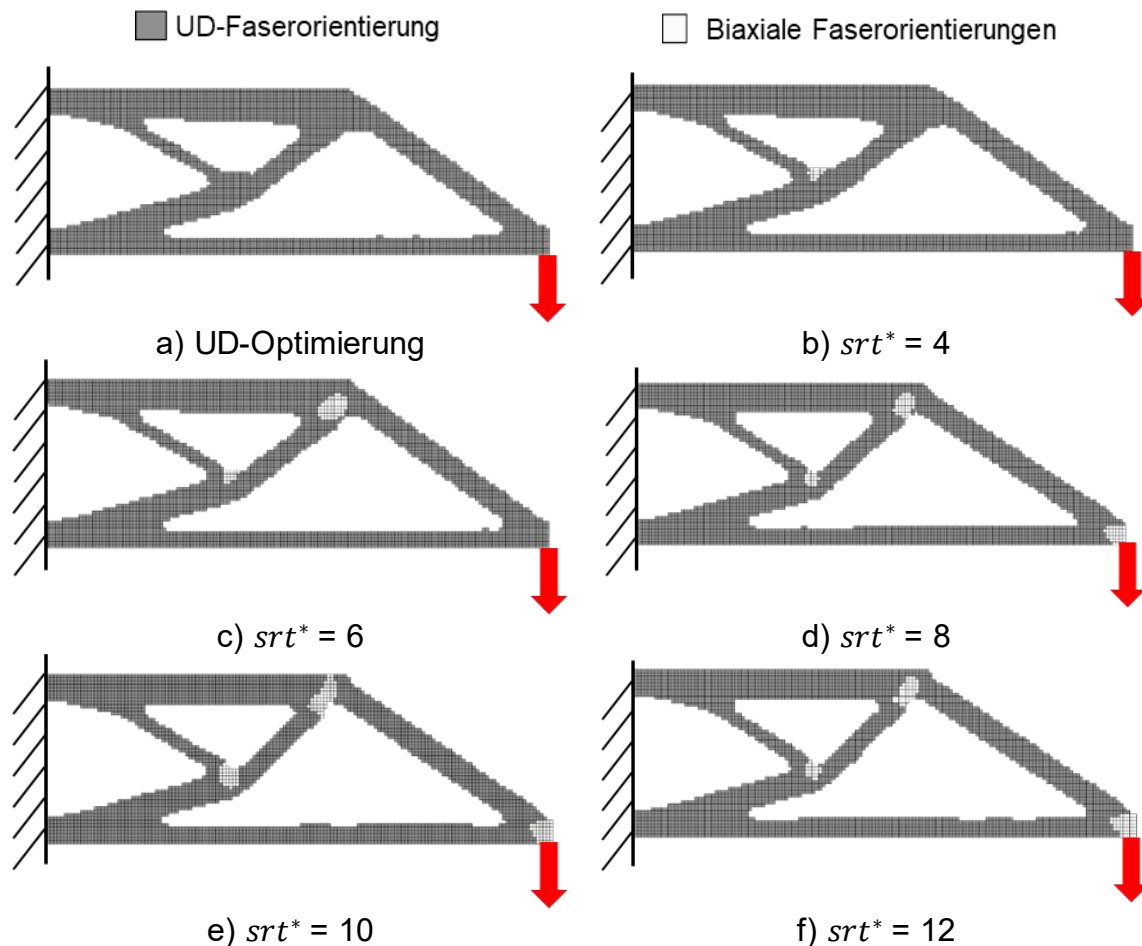


Abbildung 4.8: Optimierte Strukturen für den Fall der mit vertikaler Kraft belasteten Scheibe nach [113]

Im Falle der vertikal belasteten Scheibe (Abbildung 4.8) wird deutlich, dass die grundsätzliche Struktur für unterschiedliche Werte von srt^* erhalten bleibt. Mit einer Erhöhung von srt^* nimmt die Anzahl und Größe von Bereichen mit biaxialen Faserorientierungen zu. Erwartungsgemäß liegen diese in den Kreuzungspunkten der Struktur. Für $srt^* = 4$ liegen nur in einem Bereich der Struktur biaxiale Faserorientierungen vor. Mit zunehmenden Werten für srt^* erhöht sich die Zahl der biaxialen Bereiche und auch deren Größe. Allerdings wird deutlich, dass die Kreuzungsstellen dort, wo eine zweite Faserorientierung hinzugefügt wird, ausgedünnt werden. Dies ist durch die Materialumlagerung, die für die Aufdickung benötigt wird, bei gleichem Gesamtvolumen der Strukturen, zu erklären.

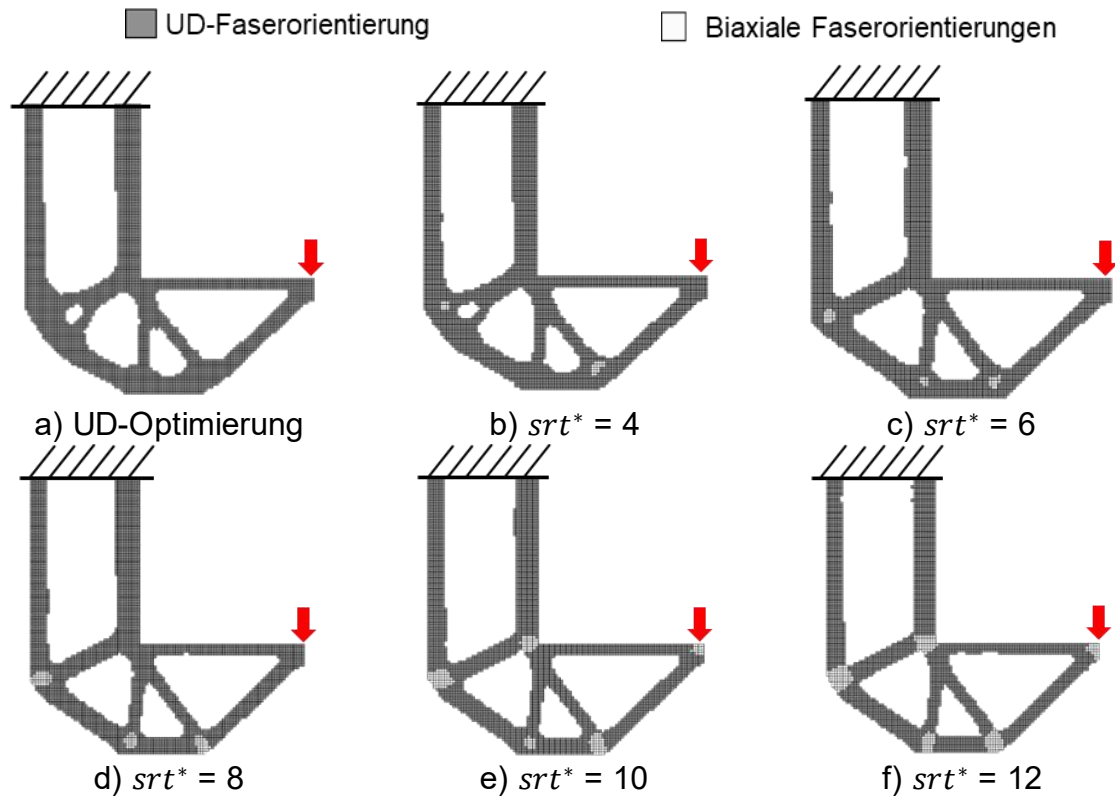


Abbildung 4.9: Optimierte Strukturen für den Fall des winkligen Trägers nach [113]

Auch im Fall des winkligen Trägers (Abbildung 4.9) führt eine Erhöhung von srt^* zu einem Anstieg der Anzahl an Bereichen, in denen eine zweite Faserorientierung hinzugefügt wird. Ab einem Wert von $srt^* = 10$ sind bei dieser Struktur biaxiale Faserorientierungen im Bereich aller Kreuzungspunkte vorhanden. Da alle Ergebnisse das gleiche Zielvolumen aufweisen (die lokale Aufdickung durch die zweite Faserorientierung wird berücksichtigt), reduziert sich bei dieser Struktur die Anzahl an mittleren Streben im Bauteilinneren (vgl. $srt^* = 4$ und $srt^* = 6$) und auch die Kreuzungspunkte selbst werden beim Hinzufügen der zweiten Faserorientierung erneut ausgedünnt. Betrachtet man beide Strukturen, bewirken Werte für srt^* ab 10 und größer, dass alle Kreuzungspunkte durch biaxiale Faserorientierungen abgedeckt werden.

Neben der Verteilung des biaxialen Lagenaufbaus und der gesamten Bauteiltopologie ist insbesondere die Verteilung der Faserorientierungen im Bereich der Kreuzungspunkte von Interesse. Am Beispiel der optimierten Scheibe sind daher die Gesamtstruktur und die lokalen Faserorientierungen im Bereich der Kreuzungspunkte für die UD-Topologieoptimierung (Abbildung 4.10) und für die Topologieoptimierung mit biaxialen Faserorientierungen mit $srt^* = 12$ (Abbildung 4.11) dargestellt.

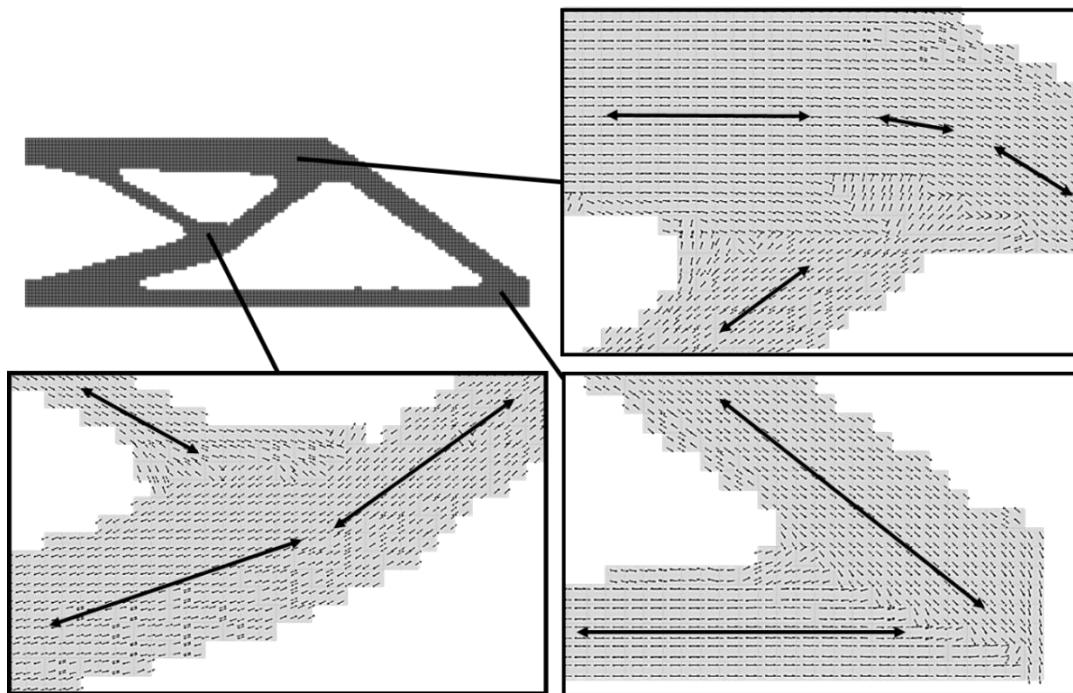


Abbildung 4.10: UD-Topologieoptimierungsergebnis und Faserorientierungen im Bereich der Kreuzungspunkte

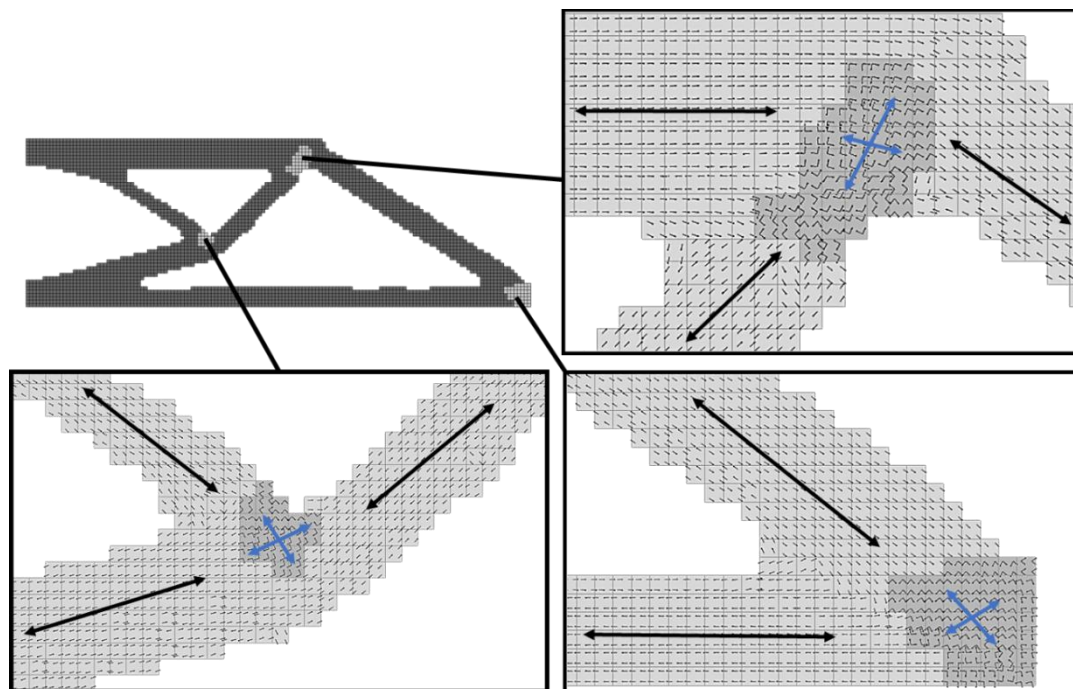


Abbildung 4.11: Biaxiales Topologieoptimierungsergebnis und Faserorientierungen im Bereich der Kreuzungspunkte für $srt^* = 12$

Für den unidirektionalen Fall zeigt sich, dass im Hinblick auf die Faserorientierungen letztlich kein Übergang zwischen den einzelnen strebenförmigen Elementen der Struktur besteht. Stattdessen dominieren im Bereich der Kreuzungsstellen schlicht die

Faserorientierungen des strebenförmigen Elements, welches die absolut höheren Hauptspannungen aufweist. Ein Ablegen auf Stoß – wie man aufgrund der in Abbildung 4.10 ermittelten Faserorientierungen annehmen könnte – ist jedoch mechanisch ungünstig. Es wird daher durch die Optimierung nicht klar, ob die Faserbündel in einem Radius in den anderen Steg übergehen sollten oder ob etwa ein Kreuzen der einzelnen Faserbündel sinnvoll ist. Bei dem Topologieoptimierungsergebnis für $srt^* = 12$ wird im Bereich der Kreuzungspunkte eine zweite Faserorientierung hinzugefügt (Abbildung 4.11). Hierdurch ist nahezu eindeutig ersichtlich, dass die Faserbündel durch Kreuzen abzulegen sind. Mechanisch ist dies sinnvoller als eine Ablage „auf Stoß“.

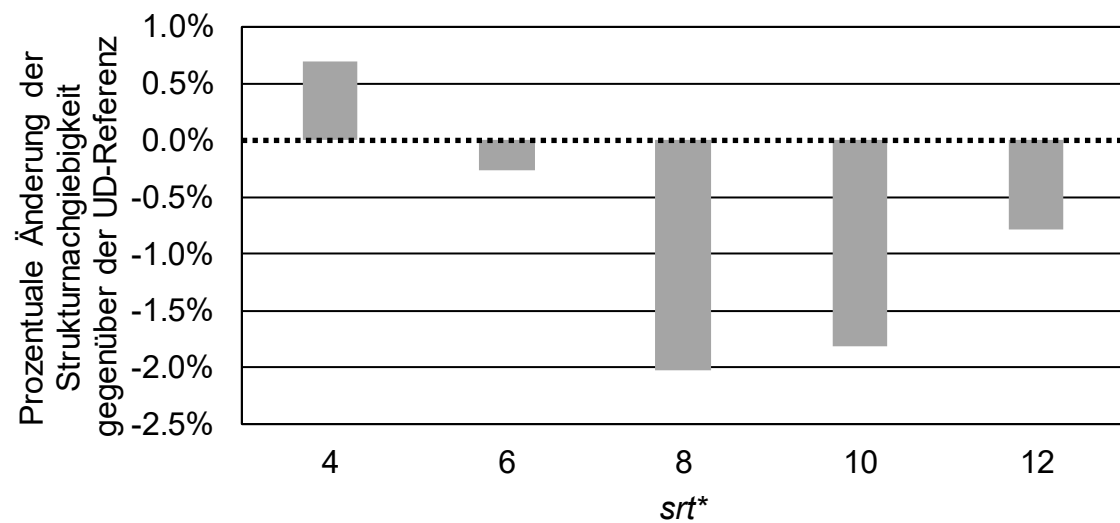
Ogleich die Bauteilsteifigkeit das hier betrachtete Optimierungsziel ist, so kann auch die Bauteilfestigkeit bei der Auslegung von Interesse sein. Im Rahmen der Arbeiten wurde auch ein Vergleich der Bauteilfestigkeiten zwischen der reinen UD-Topologieoptimierung und der Topologieoptimierung mit biaxialen Faserorientierungen unter Verwendung des Versagenskriteriums nach PUCK [116] angestellt. Es wurde festgestellt, dass sich das Risiko für das Auftreten von Zwischenfaserbrüchen unter Verwendung einer zweiten Faserorientierung im Bereich der Kreuzungspunkte deutlich reduzieren lässt. Bei einer reinen UD-Optimierung hingegen sind die Kreuzungspunkte – im Falle einer direkten Umsetzung des Optimierungsergebnisses – im Hinblick auf Zwischenfaserbruchversagen allesamt kritisch zu sehen. Für weitere Details im Hinblick auf die erfolgten Festigkeitsbetrachtungen sei auf [113] verwiesen.

Das Hinzufügen der zweiten Faserorientierung im Bereich der Kreuzungspunkte wirkt sich auf die Struktursteifigkeit aus. In Abbildung 4.12 sind die für die untersuchten Strukturen prozentualen Änderungen der Strukturnachgiebigkeiten (Compliance) in Bezug auf die Referenz der UD-Topologieoptimierung aufgeführt. Das insgesamt eingesetzte Materialvolumen ist für alle Ergebnisse gleich.

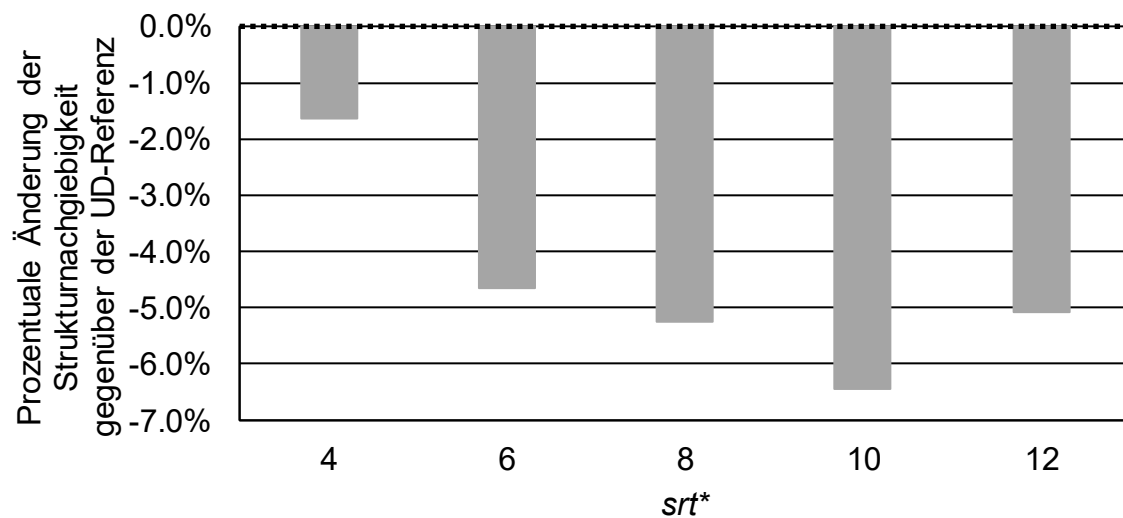
Im Fall der Scheibe unter vertikaler Last sind die Änderungen der Nachgiebigkeiten insgesamt als gering anzusehen (unterhalb von $\pm 2,5\%$). Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass die Struktur bzgl. ihrer Topologie für unterschiedliche Werte von srt^* keine großen Änderungen aufweist (vgl. Abbildung 4.8).

Für den winkligen Träger hingegen weisen alle Strukturen, bei denen eine zweite Faserorientierung hinzugefügt wurde, eine geringere Nachgiebigkeit auf als die UD-

Referenz auf, und dies, obwohl sich durch die Materialumlagerung die Anzahl der Streben innerhalb der Struktur reduziert (vgl. Abbildung 4.9). Der niedrigste Wert für die Änderung Nachgiebigkeit von -6,4 % wird mit $srt^* = 10$ erreicht. Somit kann das Hinzufügen einer zweiten Faserorientierung – neben den fertigungstechnischen und festigkeitstechnischen Vorteilen – durchaus auch im Hinblick auf die in der Topologieoptimierung erreichten Struktursteifigkeiten günstig sein. Anhand weiterer Strukturen [113] wurde jedoch festgestellt, dass das Hinzufügen einer zweiten Faserorientierung bei der Topologieoptimierung nicht in allen Fällen zu geringeren Nachgiebigkeiten führt.



a) Scheibe unter vertikaler Last



b) Winkliger Träger

Abbildung 4.12: Prozentuale Änderung der Strukturnachgiebigkeit für verschiedene Werte von srt^*

4.2 Ableiten von Ablagepfaden für das Nassfaserlegen

Nach der Topologieoptimierung muss deren Ergebnis zur Fertigung mittels Nassfaserlegen in fertigungsgerechte Ablagepfade überführt werden. Für den 3D-Druck oder das TFP-Verfahren wurden hierfür bereits Ansätze entwickelt (vgl. Abschnitt 2.3.2). Diese werden in Tabelle 4.2 im Hinblick auf die für das Nassfaserlegen festgelegten Kriterien zum automatisierten Erzeugen von Ablagepfaden (Tabelle 4.1 in Abschnitt 4) bewertet.

Tabelle 4.2: Bewertung von Verfahren zum Ableiten von Ablagepfaden

Verfahren	Pfade berücksichtigen Hauptspannungen	Einstellbarkeit von Radien / Krümmungen	Überlappende / kreuzende Pfade möglich (Kreuzungspunkte)	Einstellbarkeit gleichmäßiger Pfadabstände
Voronoi-Diagramme [17]	+	+	+	-
Beyer-Verfahren [94]	+	-	+	-
CAIO-Shell-Verfahren [11,12]	+	-	+	-
Orthotrope Wärmeleitung [11,13]	+	-	+	-
Polygonzug- oder Stromlinienverfahren [9,10,14,95]	+	-	-	+
„Stripe patterns on surfaces“ [18]	+	-	-	+
Traveling-Salesman [19]	+	-	-	+
EQS-Verfahren [14]	+	-	-	-
Level-Set-Verfahren [14]	-	-	-	+
Offset-Verfahren [14,15,16]	-	-	-	+

+: Kriterium wird erfüllt
-: Kriterium wird nicht erfüllt

Keines der betrachteten Verfahren erfüllt alle als wichtig erachteten Kriterien. Level-Set- und Offset-Verfahren erfüllen nur ein Kriterium, sie berücksichtigen vor allem nicht die Hauptspannungen und die Pfade werden lediglich als Offset der Bauteilkontur erstellt. Das EQS-Verfahren erfüllt ebenso nur ein Kriterium. Das Traveling-Salesman-Verfahren ist für das im Rahmen der Arbeit betrachtete Nassfaserlegen ungünstig, da hiermit ein kontinuierlicher Ablagepfad mit kleinen Radien erzeugt wird. Der „Stripe

patterns“-Algorithmus lässt keine sich überlappenden Pfade zu und für die Abstandskontrolle werden Pfade, die inmitten des Bauteils enden und die mechanisch ungünstig sind, in Kauf genommen. Aus diesen Gründen werden diese Ansätze für das Nassfaserlegen als nicht zielführend erachtet.

Grundsätzlich geeignet für das Nassfaserlegen scheinen der Ansatz auf Basis von Voronoi-Diagrammen [17], das BEYER-Verfahren [94], das CAIO-Shell-Polygonzugverfahren [11,12] oder auch andere Polygonzug- bzw. Stromlinienverfahren [9,10,14,95] und die orthotrope Wärmeleitung [11,13]. Mit den Voronoi-Diagrammen [17] lassen sich jedoch nur Pfade mit variablem Abstand zueinander erstellen. Somit kommt es unter Umständen zu starken Materialanhäufungen und Aufdickungen. Beim BEYER-Verfahren [94], beim CAIO-Shell-Ansatz [11,12] sowie bei der orthotropen Wärmeleitung [11,13] kann die Krümmung der Pfade nicht beeinflusst werden und die Abstände zwischen den Pfaden variieren unter Umständen erheblich. Auch bei Stromlinienverfahren [9,10,14,95] ist eine gezielte Beeinflussung der Pfadkrümmungen derzeit nicht möglich. Zudem wird meist nur eine UD-Orientierung berücksichtigt, wodurch keine sich kreuzenden Pfade möglich sind. Somit besteht Bedarf, einen Ansatz zur Erzeugung von Ablagepfaden zu entwickeln, der alle vier genannten und als wichtig erachteten Kriterien berücksichtigt.

4.2.1 Algorithmus zum Ableiten von Ablagepfaden

Im Rahmen der Arbeit wird ein Polygonzug-Verfahren angewendet, um Ablagepfade für das Nassfaserlegen abzuleiten. Als Ausgangsbasis dient hierzu eine MATLAB-Implementierung [117] des Stromlinienverfahrens aus [93], die jedoch umfassend modifiziert wurde.

Um Ablagepfade ableiten zu können, müssen zunächst die Ergebnisse der Topologieoptimierung in geeigneter Form übergeben und aufbereitet werden. Diese liegen als Output Database (.odb) vor, dem Dateiformat, in welches *Abaqus* die Ergebnisse einer FE-Berechnung speichert. Durch ein *Python*-Skript werden die benötigten Daten aus der .odb-Datei automatisiert ausgelesen und in Form mehrerer Textdateien (.txt) gespeichert. Die einzelnen Textdateien umfassen hierbei Listen mit:

1. den Elementnummern mit Solid-Material in der ersten Lage (Abschnitt 4.1.2)
2. den Elementnummern mit Solid-Material in der zweiten Lage (Abschnitt 4.1.2)
3. den Elementnummern und den je Element zugehörigen Knotennummern

4. den Knotennummern und den zugehörigen X-, Y- und Z-Koordinaten
5. den Elementnummern und den zugehörigen Orientierungsrichtungen
6. den Elementnummern und den zugehörigen Hauptspannungen

Das *MATLAB*-Skript zum Erzeugen der Ablagepfade liest die Text-Dateien ein. Basierend auf den zu jedem Element gehörigen Knoten und den Koordinaten der einzelnen Knoten werden die Koordinaten der Elementmittelpunkte berechnet und eine Matrix erstellt, welche die Elementnummer, die X- und Y-Koordinaten der Elementmittelpunkte und die X- und Y-Komponenten der Orientierungsrichtung eines jeden Elements enthält. Da in der Topologieoptimierung zwei Lagen an Shell-Elementen berücksichtigt werden, liegen auch zwei unterschiedliche Faserorientierungen im Bereich von Kreuzungspunkten vor. Entsprechend werden für das Ableiten von Ablagepfaden zwei Richtungsfelder erstellt (Abbildung 4.13).

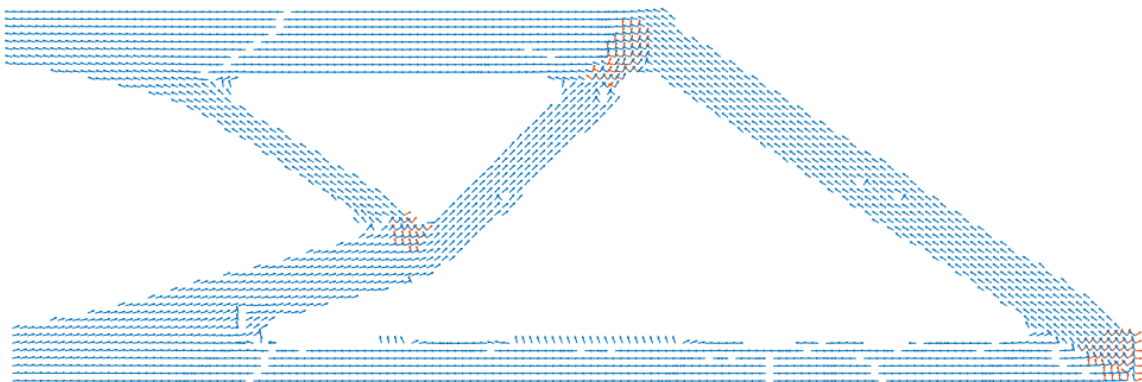
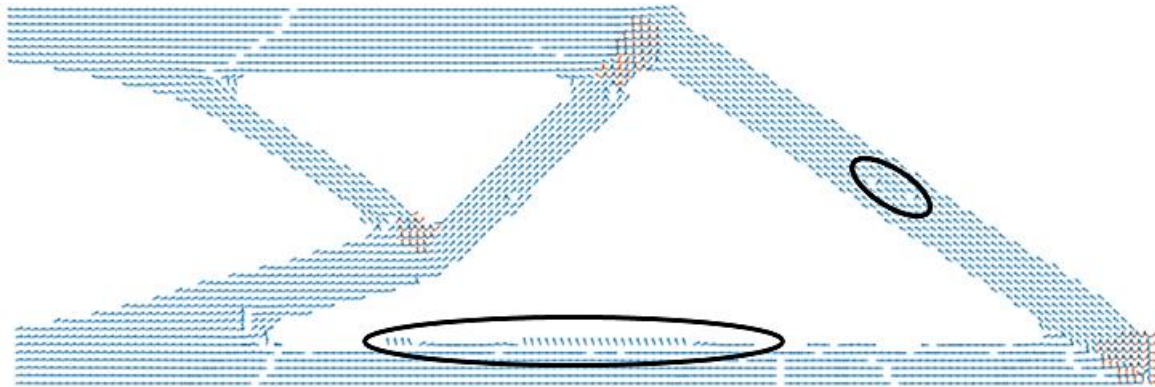
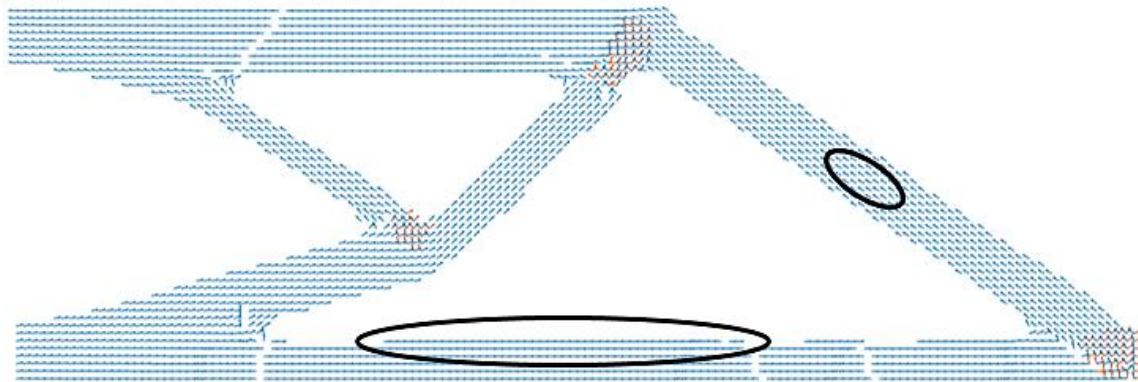


Abbildung 4.13: Richtungsfelder für die optimierte Scheibe unter vertikaler Last (erste Lage in blau, zweite Lage in orange)

Aufgrund von Schwankungen der Orientierungen durch den iterativen Prozess bei der anisotropen Topologieoptimierung und durch die diskrete Vernetzung kann es – vor allem in Randbereichen des Bauteils – zu nicht sinnvoll abweichenden Orientierungen kommen. Diese abweichenden Orientierungen können zu Problemen beim Erzeugen der Ablagepfade führen. Eine Möglichkeit diese Problematik zu umgehen, wäre die Durchführung einer erneuten Optimierung der Faserorientierung auf Basis des Ergebnisses einer Topologieoptimierung. Dies stellt allerdings einen zusätzlichen Berechnungsschritt dar. Um auf diesen Schritt zu verzichten und um dennoch die Problematik abweichender Orientierungen zu umgehen, werden die Orientierungen gefiltert (Abbildung 4.14). Im Anschluss können die Orientierungsrichtungen optional auf ein im Vergleich zum FE-Netz feineres Feld übertragen werden.



a) Ungefilterte Orientierungen



b) Gefilterte Orientierungen

Abbildung 4.14: Filtern der Orientierungen am Beispiel der optimierten Scheibe

Für das Erzeugen der Ablagepfade wird ein simples Integrationsschema – ähnlich dem CAIO-Shell-Ansatz aus [11,12] – angewendet. Ausgehend von einem Punkt $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i$ eines Ablagepfades berechnet sich der nächste Punkt $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+1}$ durch Gleichung (4.18):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+1} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i + \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_i dt \quad (4.18)$$

Hierbei sind u und v die x - bzw. y -Komponenten des Vektorfelds am Punkt i . Weiterhin ist dt die Schrittweite des Integrationsverfahrens. Um ein Wegknicken der Pfade zu vermeiden, wird für jeden neu zu erstellenden Punkt entlang des Pfades auch ein alternativer Punkt unter Zugrundelegung der um 180° gedrehten Orientierungen nach Gleichung (4.19) berechnet:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+1} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i + \begin{pmatrix} -u \\ -v \end{pmatrix}_i dt \quad (4.19)$$

Der Pfad wird zu demjenigen der zwei möglichen Punkte fortgesetzt, für den das normierte Skalarprodukt des neuen Richtungsvektors und des Richtungsvektors des letzten Pfadabschnitts größer ist. Da das normierte Skalarprodukt -1 im Fall antiparalleler Vektoren, 0 für senkrechte Vektoren und 1 für parallele Vektoren ist, wird somit stets die Alternative gewählt, die am ehesten einer parallelen Fortsetzung des vorherigen Pfadsegments entspricht. Hierdurch wird jede Orientierung stets als zweideutige Achse – wie auch in [12] vorgeschlagen – aufgefasst. Das Auffassen der Orientierungen als zweideutige Achse ist mit dem genaueren RUNGE-KUTTA-Verfahren, das auch in Betracht gezogen und getestet wurde, nur schwer möglich, da bei diesem mehrere Zwischenschritte bei der Integration berechnet werden. Dadurch ist das RUNGE-KUTTA-Verfahren anfälliger gegenüber Vorzeichenwechseln zwischen einzelnen Bereichen. Aus diesem Grund wird das beschriebene einfachere Integrationsschema verwendet. Entsprechend des in Abschnitt 4.1.2 vorgestellten Topologieoptimierungsansatzes stehen im Bereich von Kreuzungspunkten zwei Faserorientierungen und somit vier mögliche Alternativen für den nächsten Punkt eines Ablegepfads zur Verfügung (Abbildung 4.15).

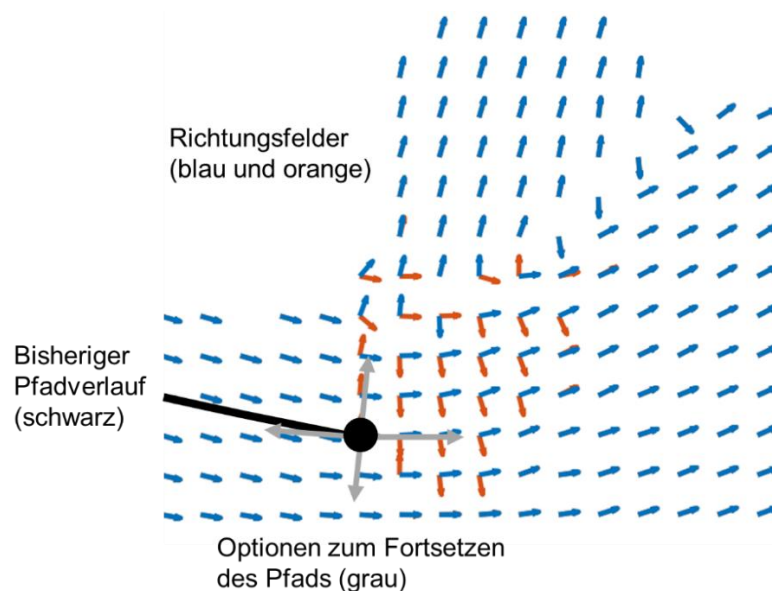


Abbildung 4.15: Mögliche Optionen zum Fortsetzen des Ablegepfads im Bereich eines Kreuzungspunkts

Dies berücksichtigend wird innerhalb des Algorithmus der Abstand des aktuellen Pfadsegments zu den Kreuzungspunkten abgefragt. Nähert sich der Pfad einem Bereich mit zwei Faserorientierungen, so werden nicht mehr nur zwei alternative Punkte unter Berücksichtigung der UD-Orientierungen, sondern noch zwei weitere alternative

Punkte basierend auf dem zweiten Orientierungsfeld berechnet. Von den somit vier zur Verfügung stehenden Punkten wird anschließend der Punkt ausgewählt, bei dem der neue Verbindungsvektor das maximale, normierte Skalarprodukt zum vorherigen Pfadsegment aufweist.

Um eine gewisse Einstellbarkeit der Pfadkrümmungen bzw. der resultierenden Radien der Pfade zu ermöglichen, wird für jeden neuen Punkt eines Ablagepfads der Winkel zwischen dem neuen Pfadsegment und dem vorherigen Pfadsegment berechnet. Ist der Winkel größer, als ein vorzugebender Grenzwert für den zulässigen Winkel, wird der Pfad nicht in Richtung des neuen Punkts, sondern entlang der Richtung des vorherigen Pfadsegments fortgesetzt.

Um starke lokale Aufdickungen durch eine lokal hohe Anzahl überlappender Pfade zu vermeiden, wird eine Abstandsregelung benötigt. In [93] wird ein Ansatz zum Einhalten eines Mindestabstands bei der Erstellung von Stromlinien vorgeschlagen. Bei diesem wird bereits bei der Erzeugung einer neuen Stromlinie der Abstand zu den Punkten aller bisher bereits erzeugten Stromlinien geprüft. Kommt die aktuell zu erstellende Stromlinie bereits vorhandenen Stromlinien zu nahe und unterschreitet den Mindestabstand, so wird sie bei ihrem letzten zulässigen Punkt abgebrochen und gespeichert. Allerdings wird das Stromlinien-Muster direkt durch die Abstandskontrolle beeinflusst. In der vorliegenden Arbeit wird eine andere Strategie gewählt: Mit den zuvor beschriebenen Startpunkten werden zunächst Pfade mit einer sehr hohen Dichte (Abstände der Startpunkte je nach Strukturauflösung 0,25 mm – 0,5 mm) erzeugt. Diese weisen zunächst keine definierten und gleichmäßigen Abstände zueinander auf, sodass auch kreuzende Pfade möglich sind. Erst in einem zweiten, nachgelagerten Schritt wird der Abstand eingestellt, indem aus den Pfaden mit hoher Dichte diejenigen Pfade, die für einen gewünschten Abstand benötigt werden, extrahiert werden. Dies hat zwei Vorteile: Zum einen wird der Abstand der Pfade nicht schon während der Erstellung geprüft, sodass die Pfade ohne eine gegenseitige Beeinflussung erstellt werden. Würde der Abstand schon während der Erstellung geprüft werden, kann dies dazu führen, dass durchaus sinnvolle Pfade durch das Unterschreiten des Abstands in einem kleinen Bereich gelöscht oder unterbrochen werden. Zum anderen erlaubt es der Ansatz, einmalig Pfade mit hoher Dichte zu erstellen und – z. B. falls ein Roving mit einem anderen Titer und entsprechend anderem gewünschtem Pfadabstand verwendet wird

– flexibel und schnell Pfade mit dem neuen Abstand zu extrahieren, ohne dass eine neue Berechnung der Pfade durchgeführt werden muss.

Zum nachträglichen Extrahieren von Pfaden mit den gewünschten Abständen werden die erzeugten Pfade mit hoher Pfaddichte zunächst nach ihrer Länge sortiert. Dies hat den Zweck, dass Pfade mit einer höheren Länge priorisiert werden, um das Auftreten kurzer Ablagepfade, wie sie vorwiegend in Randbereichen der Strukturen aufgrund der diskreten FE-Netzstruktur entstehen können, zu reduzieren.

Der erste Ablagepfad aus der sortierten Liste wird direkt extrahiert. Für jeden weiteren Pfad wird zunächst der Abstand der Pfadpunkte zu den Punkten eines bereits extrahierten Pfads berechnet. Aus den einzelnen Abständen zwischen den Punkten der beiden Pfade wird anschließend der Medianabstand und der Maximalabstand berechnet. Dieser Schritt wird für einen neu zu extrahierenden Pfad in Bezug auf alle bereits extrahierten Pfade durchgeführt. Der Pfad wird anschließend nur dann extrahiert, wenn seine Medianabstände (50 % der Punkte des Pfades weisen zu den Punkten eines anderen Pfads einen kleineren Abstand auf) und Maximalabstände zu allen bereits extrahierten Pfaden größer sind als der gewünschte Pfadabstand und größer als ein Grenzwert für den maximalen Pfadabstand. Diese Strategie wurde entwickelt, da zum einen zwar gleichmäßige Pfadabstände erzielt werden sollen, zum anderen jedoch durchaus Pfade entstehen können, die zwar in einem gewissen Strukturbereich nebeneinander verlaufen und dort auch den gewünschten Abstand unterschreiten, sich dann aber aufteilen, wodurch lokal wiederum ein höherer Abstand entsteht (Abbildung 4.16 links). Solche Pfade stellen – auch wenn lokal der gewünschte Abstand unterschritten wird – eine bessere Lösung dar, als Pfade, die aufgrund einer reinen Abstandsprüfung unterbrochen werden (Abbildung 4.16 rechts).

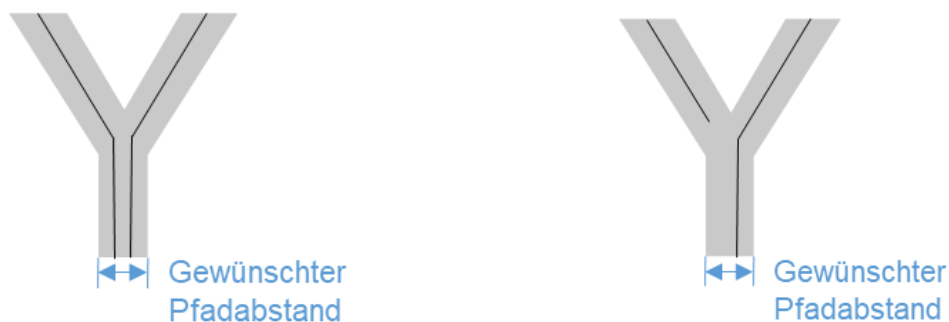
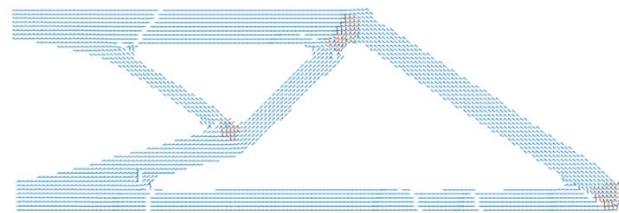


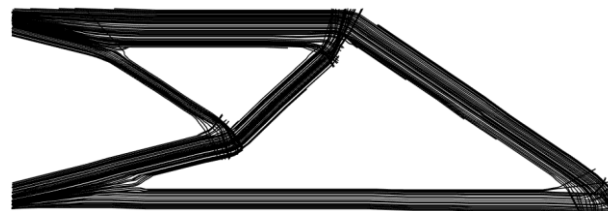
Abbildung 4.16: Abstand zwischen zwei bereichsweise nebeneinander verlaufenden Ablagepfaden (links: gewählte Abstandskontrolle; rechts: strikte Abstandskontrolle)

4.2.2 Studien zum Ableiten von Ablagepfaden

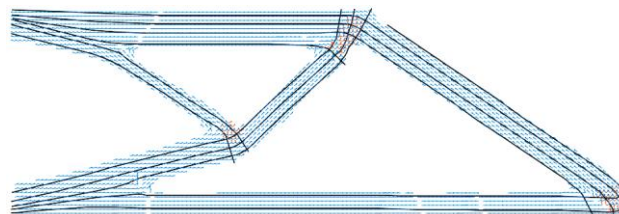
Der entwickelte Ansatz zum Ableiten von Ablagepfaden wird anhand der in Abschnitt 4.1.3 gezeigten Optimierungsergebnisse untersucht. Wie zuvor beschrieben werden für die beiden betrachteten Strukturen zunächst Pfade mit einer hohen Dichte erstellt. Die Schrittweite des Polygonzugverfahrens wird dabei zu 0,25 mm festgelegt. Basierend auf den zunächst mit hoher Dichte erstellten Pfaden werden anschließend für alle Strukturen zuerst Pfade mit einem Soll-Abstand von 2 mm und zum Vergleich anschließend Pfade mit einem Soll-Abstand von 4 mm aus den erstellten Pfaden extrahiert. Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18 zeigen die für die beiden Strukturen betrachteten Orientierungsfelder, die erzeugten Ablagepfade mit hoher Dichte sowie die mit einem Soll-Abstand von 2 mm und 4 mm extrahierten Ablagepfade.



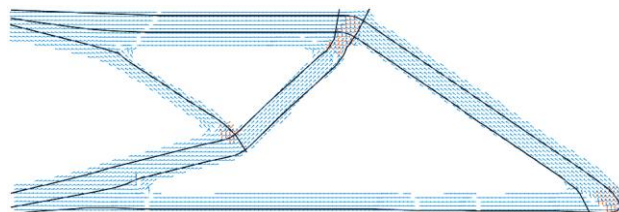
a) Richtungsfelder



b) Pfade hoher Dichte



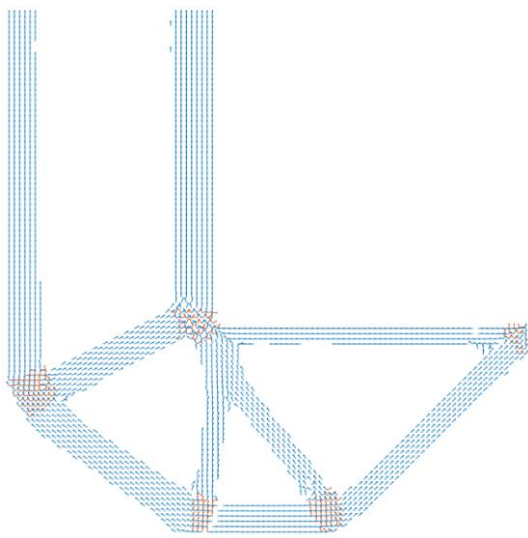
c) Pfade mit Soll-Abstand 2 mm



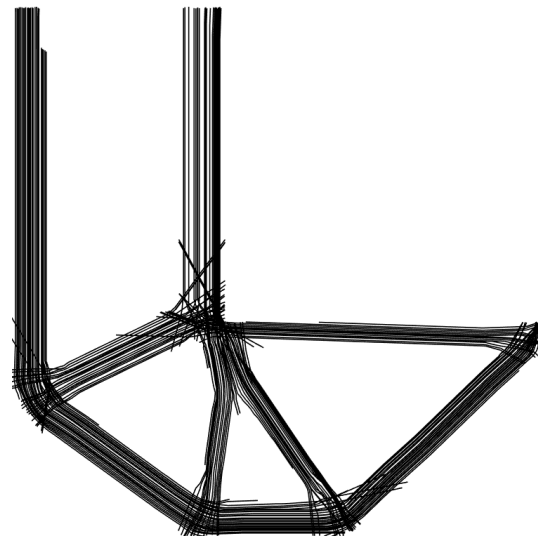
d) Pfade mit Soll-Abstand 4 mm

Abbildung 4.17: Richtungsfelder und Pfade für die Scheibe unter vertikaler Last

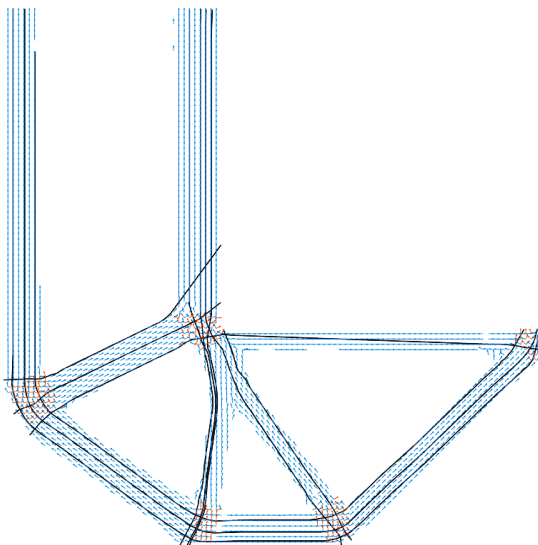
Im Fall der Scheibe unter vertikaler Last werden Pfade erzeugt, die unmittelbar umsetzbar sind. Lediglich für den Soll-Abstand von 2 mm (Abbildung 4.17 c)) liegt ein durch die Bauteilberandung unterbrochener Pfad vor. Hier ist zu entscheiden, ob der Pfad bis zur Einspannung verlängert oder gänzlich weggelassen wird. Während in den einzelnen strebenförmigen Bereichen ein weitgehend definierter Abstand vorliegt, treffen in den Einspannbereichen mehrere Pfade zusammen, wodurch sich die Pfaddichte dort erhöht. Dies liegt an der gewählten Abstandskontrolle. Im betrachteten Fall ist es jedoch besser, dort eine lokale Aufdickung in Kauf zu nehmen, statt – wie bei einer strikteren Abstandskontrolle – Bereiche mit unterbrochenen Pfaden zu riskieren.



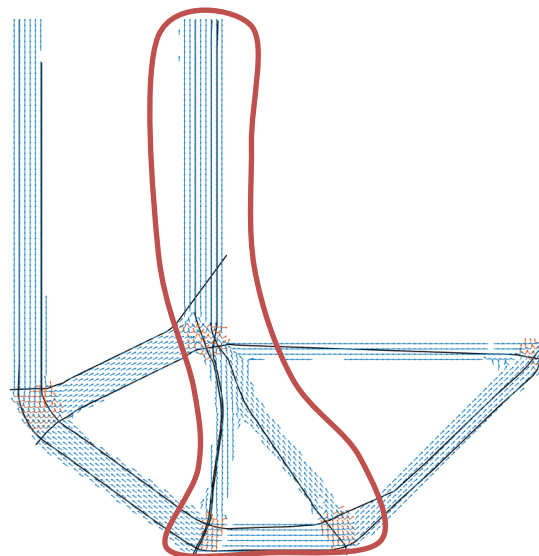
a) Richtungsfelder



b) Pfade hoher Dichte



c) Pfade mit Soll-Abstand 2 mm

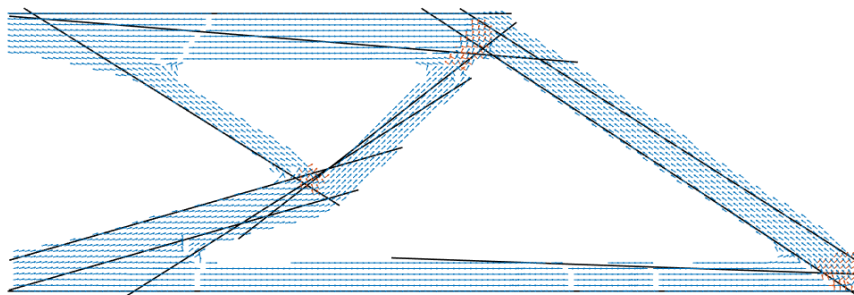


d) Pfade mit Soll-Abstand 4 mm

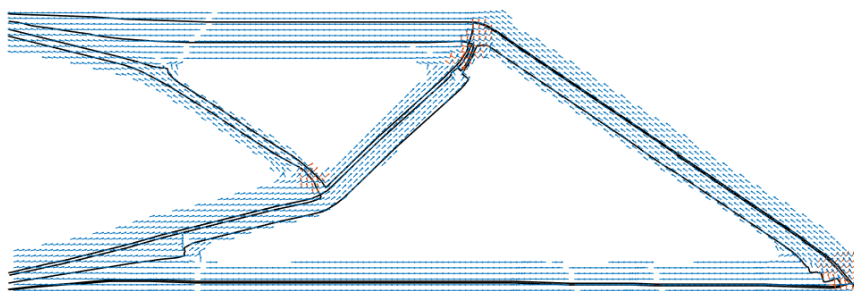
Abbildung 4.18: Richtungsfelder und Pfade für den winkligen Träger

Der winklige Träger weist einen Y-förmigen Bereich auf (rote Markierung), in dem sich die Streben aufgabeln. Durch die gewählte Abstandskontrolle werden in allen Streben Ablagepfade erzeugt (vgl. Abbildung 4.18 c) und d)). Hierdurch kommt es zwar zu einem Bereich mit zwei sehr eng verlaufenden Pfaden und somit zu einer Aufdickung. Eine strengere Abstandskontrolle würde jedoch dazu führen, dass entweder Bereiche des vertikalen Balkens hin zur Einspannung unterbrochen werden, oder auch dazu, dass gar kein oder ein unterbrochener Pfad im nach rechts aufgabelnden Balkensegment erzeugt wird. Auch diese Pfade könnten so direkt gefertigt werden, einzig eine Verlängerung eines durch die Bauteilberandung unterbrochenen Pfads hin zur Einspannung oben links ist sinnvoll. Für die beiden betrachteten Strukturen folgen die erzeugten Ablagepfade auch – zumindest im Sinne der Gesamtstruktur – den als Input dienenden Richtungsfeldern.

Die Begrenzung der zulässigen Winkelabweichung zwischen aufeinanderfolgenden Pfadsegmenten hat ebenfalls einen Einfluss auf die erstellten Pfade. Am Beispiel der Scheibe unter vertikaler Last sind für einen Ziel-Pfadabstand von 4 mm in Abbildung 4.19 die zwei Extremfälle einer zulässigen Winkelabweichung zwischen aufeinanderfolgenden Pfadsegmente von 0° (nur gerade Pfade) und 360° (keinerlei Begrenzung von Winkelabweichungen) dargestellt.



a) Zulässige Winkelabweichung 0°



b) Zulässige Winkelabweichung 360°

Abbildung 4.19: Pfade mit unterschiedlichen zulässigen Winkelabweichungen

Für eine zulässige Winkelabweichung von 0° wird die Struktur erwartungsgemäß ausschließlich mit geraden Pfaden gefüllt. Je nach Fertigungsverfahren kann dies sinnvoll sein. Die Abweichung gegenüber der optimierten Faserorientierung ist jedoch hoch, sodass davon auszugehen ist, dass die mechanischen Struktureigenschaften gegenüber der in Abbildung 4.17 d) gezeigten Variante deutlich reduziert sind. Im anderen Extremfall (zulässige Winkelabweichung von 360°) laufen die Pfade an zwei Kreuzungspunkten mit deutlich erkennbaren Knicken von einem strebenförmigen Segment in das andere über. Solch abrupte Änderungen sind mit dem Nassfaserlegen nicht zu realisieren. Hierdurch wird gezeigt, dass sich durch die implementierte Funktion zur Einstellung der zulässigen Winkelabweichung zwischen aufeinanderfolgenden Pfadsegmenten die Pfadkrümmung und somit die sich ergebenden Radien durchaus beeinflussen lassen. Eine gezielte Vorgabe eines Radius ist mit der Funktion – aufgrund der diskreten Form der Ablagepfade durch aufeinanderfolgende Punkte – aktuell noch nicht möglich.

4.3 Modellierung mittels Nassfaserlegen hergestellter Strukturen

Da der Aufwand für eine experimentelle Validierung hoch ist und im Falle des Nassfaserlegens hierzu Formwerkzeuge benötigt werden, werden die mechanischen Eigenschaften eines durch die Pfade beschriebenen Bauteilentwurfs mittels FEA validiert. Hierfür werden entsprechende Analysemodelle benötigt. Wie beim TFP-Verfahren ist auch beim Nassfaserlegen eine manuelle Modellerstellung durch die komplexen Bauteilgeometrien mit entsprechend konturierten Dickenverläufen und das manuelle zuweisen von Faserorientierungen an die einzelnen Elemente kaum möglich [1]. Für das TFP-Verfahren entwickelt SPICKENHEUER [1] eine Lösung um automatisiert FE-Modelle auf Basis der Ablagepfade zu erzeugen. Der für das TFP-Verfahren entwickelte Ansatz aus [1] erscheint auch für das Nassfaserlegen geeignet und wird im Folgenden implementiert. Allerdings muss die zur Beschreibung der Roving-Querschnitte genutzte Funktion an die beim Nassfaserlegen vorliegenden Querschnitte angepasst werden. Zu deren Ermittlung wird unter Verwendung des 50K-Rovings und des kalthärtenden Epoxidharzsystems (Abschnitt 3.1) ein Gitter mithilfe der Nassfaserlege-Anlage abgelegt (Abbildung 4.20). Die Gitterstruktur wird anschließend in einem Vakuumaufbau konsolidiert und härtet bei Raumtemperatur aus. Im Anschluss werden je fünf Schliff-

proben aus den Kreuzungspunkten sowie aus den UD-Bereichen des Gitters entnommen. Unter Verwendung der Schliffbilder werden die oberen und unteren Begrenzungen der 0° -Rovings durch Polylinienzüge markiert und die Koordinaten der zu den Linien gehörigen Punkte als .csv-Dateien gespeichert. Abbildung 4.21 zeigt beispielhaft repräsentative Schliffbilder der beiden Bereiche und die zugehörigen Polylinien.

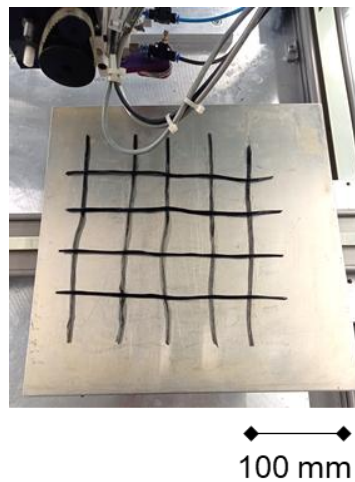
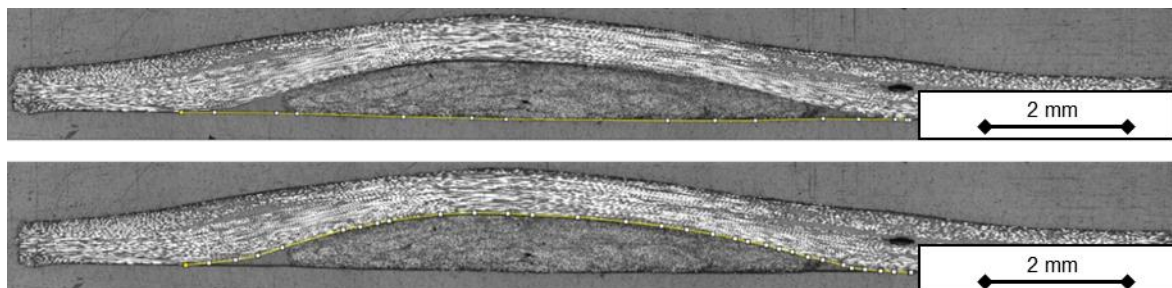
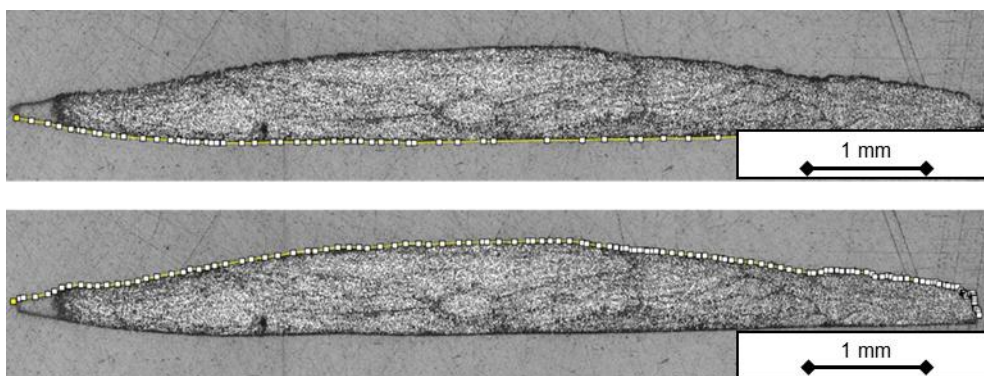


Abbildung 4.20: Abgelegte Gitterstruktur



a) Kreuzungspunkt



b) unidirektionaler Bereich

Abbildung 4.21: Schliffbilder und Polylinien aus unterschiedlichen Bereichen des Gitters

Da die Schliffbilder nicht exakt ausgerichtet sind, wird die Polylinie, die die untere Be-
randung der Rovings beschreibt, durch eine Gerade angenähert. Entsprechend dieser
werden die Koordinaten der beiden Polylinien gedreht, sodass die untere Rovingbe-
randung anschließend möglichst horizontal ausgerichtet ist. Die beiden gedrehten Po-
lylinien werden äquidistant interpoliert. Um die Dickenverteilung der Rovings zu be-
rechnen, wird nun die untere Polylinie von der oberen Polylinie subtrahiert. Die einzel-
nen Dickenverteilungen werden anschließend horizontal so verschoben, dass die ma-
ximale Dicke der Rovings bei der x-Koordinate von 0 mm liegt.

Zur Modellierung der Roving-Querschnitte wird – wie bereits von BITTRICH ET AL. [118]
und ALMEIDA ET AL. [20] für das TFP-Verfahren – eine GAUß-Verteilung angenommen.
Die verwendete Funktion ist in Gleichung (4.20) aufgeführt. Hierbei ist t_{max} ein Para-
meter, der die maximale Roving-Dicke bzw. die maximale Höhe der GAUß-Verteilung
beschreibt und w ein zweiter Parameter, der ihre Breite definiert.

$$t(x) = t_{max} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{w}\right)^2\right) \quad (4.20)$$

Insbesondere bei den Schliffbildern, die an den Kreuzungspunkten entnommen wur-
den, jedoch auch bei den Schliffbildern aus den UD-Bereichen, kann festgestellt wer-
den, dass sich zu den Rändern der Rovings hin harzreiche Zonen ausbilden, in denen
nahezu keine Fasern mehr vorliegen. Entsprechend [1] soll auch hier die Funktion zur
Modellierung der Querschnitte ab dem Unterschreiten einer gewissen Dicke abge-
schnitten werden. Anhand der Schliffbilder wurde die Dicke an den Stellen, an denen
kaum Fasern mehr vorliegen, ausgemessen und ins Verhältnis zur maximalen Dicke
der jeweiligen Rovings gesetzt. Für die zehn analysierten Schliffbilder ergibt sich hier-
für ein Verhältnis von $0,322 \pm 0,082$.

Mithilfe eines *Python*-Skripts wird die Funktion mit der Methode der kleinsten Fehler-
quadrate an die Dickenverteilungen der Rovings angenähert und wie zuvor beschrie-
ben abgeschnitten. Die erzielten Werte für t_{max} und für w betragen 0,790 mm und
2,736 mm. Abbildung 4.22 zeigt die aus den Schliffbildern gewonnenen Verteilungs-
daten der Rovings und die zur Beschreibung verwendete GAUß-Verteilung. Diese wird
bei einem x-Wert von $\pm 4,11$ mm abgeschnitten. In diesem Intervall weisen die Rovings
eine Querschnittsfläche von $4,70 \pm 0,27$ mm² auf. Das Modell erzielt hierbei einen Wert
von $4,71$ mm², sodass die Abweichung bzgl. der Querschnittsfläche im Intervall, in dem

die Fasern hauptsächlich vorliegen, nur 0,2 % beträgt. Somit scheint auch beim Nassfaserlegen ähnlich zum TFP-Verfahren eine Beschreibung der Roving-Querschnitte mittels GAUß-Verteilung zulässig.

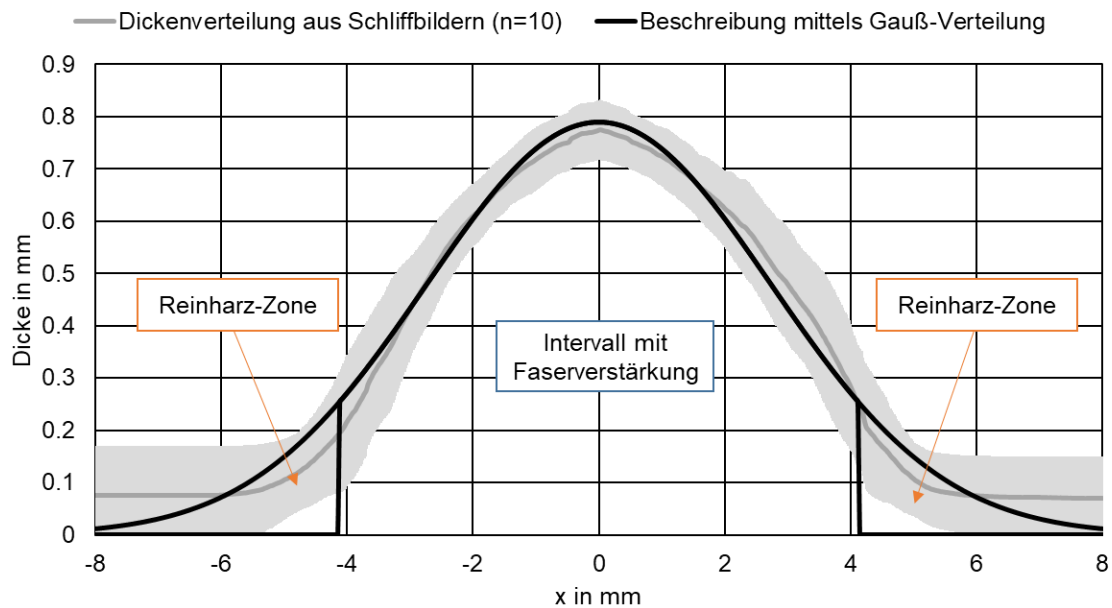


Abbildung 4.22: Beschreibung der Roving-Querschnitte mittels GAUß-Verteilung

Durch die vorliegenden Querschnitte kann der Faservolumengehalt φ über Gleichung (4.21) [22] abgeschätzt werden.

$$\varphi = \frac{n \cdot \left(\frac{m_f}{L}\right)}{A \cdot \rho_f} \quad (4.21)$$

Hierbei ist n die Anzahl an Rovings (im vorliegenden Fall also 1), $\left(\frac{m_f}{L}\right)$ ist die Roving-Feinheit (tex-Zahl), A ist die Querschnittsfläche und ρ_f ist die Dichte der Fasern. Durch Anwendung von Gleichung (4.21) ergibt sich im Intervall $x = \pm 4,11$ mm ein mittlerer Faservolumengehalt der Rovings von $44,2 \pm 2,6$ %. Die Modellierung mittels GAUß-Verteilung liefert in diesem Intervall einen Faservolumengehalt von 44,0 %. Durch Anpassen des Parameters t_{max} kann die gewählte Verteilungsfunktion auf einen anderen Faservolumengehalt skaliert werden.

Die Verteilungsfunktion kann gemeinsam mit den Ablagepfaden verwendet werden, um die zur Validierung eines Bauteilentwurfs benötigten Analysemodelle zu erstellen. Für eine Strukturkomponente wird hierzu zunächst, wie auch beim Ansatz von SPICKENHEUER [1], ein zweidimensionales FE-Netz aus Schalenelementen, das die

Bauteilberandung vorgibt, erstellt. Zusammen mit den Ablagepfaden bildet dieses Netz die Basis zur Modellerzeugung (Abbildung 4.23). In dieser Arbeit werden die Pfade durch Beam-Elemente diskretisiert.

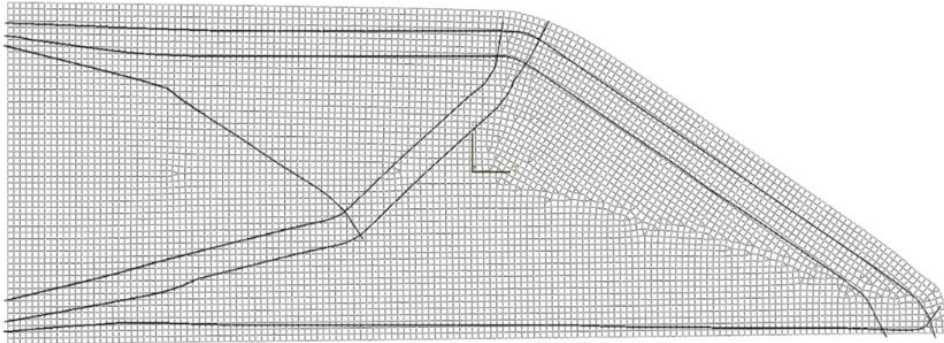


Abbildung 4.23: Beispielhaftes 2D-Netz und Ablagepfade

Für die Modellerzeugung werden die Reihenfolge der Ablagepfade und die Anzahl an Faserbündel, die je Pfad abgelegt werden sollen, als Eingabegröße definiert. Die Anzahl der Faserbündel je Pfad skaliert entsprechend den Funktionswert der in Abbildung 4.22 gezeigten GAUß-Verteilung. Das im Rahmen der Arbeit erstellte *Python*-Skript baut nacheinander für jeden einzelnen Pfad eine vollständige Lage an 3D-Elementen auf. Dabei werden den Elementen Orientierungen gemäß den zugehörigen Ablagepfaden zugewiesen, wobei auch der Gradient in Dickenrichtung berücksichtigt wird. Die zuvor angesprochenen harzreichen Zonen ohne Fasern bekommen Reinharz-Eigenschaften zugeordnet, während den anderen Elementen anisotrope Werkstoffeigenschaften entsprechend des verwendeten FKV-Materials zugewiesen werden. Bezüglich der Implementierung entspricht das Vorgehen dem Ansatz von SPICKENHEUER [1] und kann daher dort im Detail nachgelesen werden. Abbildung 4.24 zeigt ein beispielhaft aufgebautes Modell für das in Abbildung 4.23 gezeigte Ausgangsnetz und die zugehörigen Pfade. Zur besseren Visualisierung sind die Elemente für jeden Pfad in einer anderen Farbe dargestellt. Weiterhin sind die Elemente, denen Harzeigenschaften zugeordnet wurden, ausgeblendet. Zusätzlich werden Ausschnitte gezeigt, welche die Faserorientierungen für einen Modellbereich in der Draufsicht und für den Bereich eines einzelnen Pfades im Detail zeigen.

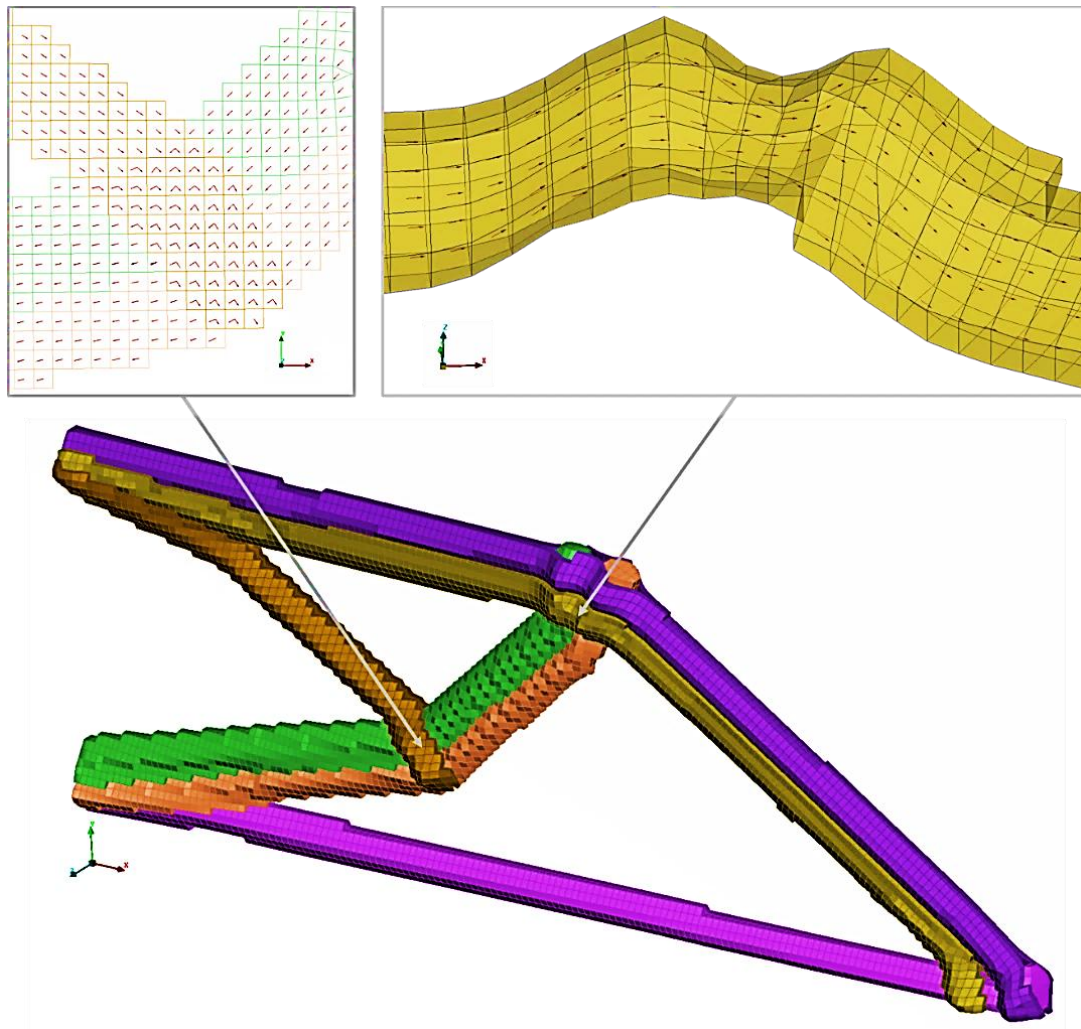


Abbildung 4.24: 3D-Modell und lokale Faserorientierungen

4.4 Optimierung der Anzahl abzulegender Faserbündel

Die zuvor durchgeführte zweidimensionale Topologieoptimierung geht von einer konstanten Bauteildicke aus. In den meisten Fällen wird eine zweidimensionale Topologieoptimierung hierdurch kein optimales Design liefern, da hiermit beispielsweise keine lokalen Dickenausprägungen zur Erhöhung des Flächenträgheitsmoments bei einer Biegebelastung umgesetzt werden können [1]. Weiterhin berücksichtigt die zweidimensionale Topologieoptimierung nicht die späteren lokal variierenden Dickenverteilungen, die sich durch die Ablage von Rovings ergeben [1]. Letzteres gilt auch für die dreidimensionale Topologieoptimierung: Diese kann ebenso keine Designvorschläge mit fertigungsgerechten, die Ablage von Rovings berücksichtigenden Querschnitts- und Dickenverteilungen liefern [1]. Letztlich liegen somit unabhängig von der zuvor durchgeführten Topologieoptimierung (zwei- oder dreidimensional) Ablagepfade vor, die noch keine Aussage über die optimalen lokalen Bauteildicken erlauben. Während

in [1] am Beispiel eines Brake Boosters manuell über numerische Parameterstudien günstige Stegdicken ermittelt werden, wird in [20] eine numerische Optimierung der lokal abzulegenden Faserbündelanzahlen vorgeschlagen. Gegenüber der ursprünglich in [1] entwickelten Variante (massespezifische Struktursteifigkeit $15,14 \text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{g})$) wird durch die numerische Optimierung der Faserbündelanzahlen eine um ca. 20 % höhere massespezifische Struktursteifigkeit ($18,23 \text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{g})$) erreicht [20]. Daher werden auch in der vorliegenden Arbeit die Anzahl je Ablagepfad abzulegender Faserbündel gemäß des in [20] vorgeschlagenen Ansatzes numerisch optimiert, was letztlich einer Optimierung der lokalen Bauteildicken entspricht.

Hierzu wird das im Rahmen der Arbeit erstellte *Python*-Skript für den Modellaufbau und die Simulation mit *ABAQUS* mit der kommerziellen Optimierungssoftware *LS-Opt* gekoppelt. Die Anzahlen an abzulegenden Faserbündeln für jeden Ablagepfad werden im *Python*-Skript als zu optimierende Parameter definiert. Basierend auf der Anzahl an Faserbündeln für den jeweiligen Pfad wird ausschließlich der Funktionswert der in Abschnitt 4.3 beschriebenen GAUß-Verteilung skaliert. Eine Skalierung der Funktion in der die Breite beschreibenden Abszissen-Richtung findet nicht statt, da die Breite bereits durch das Ergebnis der Topologieoptimierung bzw. durch die dieses Ergebnis beschreibenden Ablagepfade festgelegt ist. Für die Optimierung wird wie in [20] ein genetischer Algorithmus verwendet.

Die Funktionalität der Optimierung der je Ablagepfad abzulegenden Anzahlen an Faserbündeln wurde anhand numerischer Beispielstudien getestet. Hiermit konnten gegenüber den initialen Bauteilentwürfen höhere massespezifische Struktursteifigkeiten erreicht werden, wobei das Verbesserungspotenzial naturgemäß von der Güte des manuell festgelegten Ausgangsentwurfs und etwaiger Einschränkungen der in der Optimierung zugelassenen Faserbündelanzahlen abhängt. Die numerischen Studien sollen an dieser Stelle der Arbeit nicht aufgeführt werden. Ein Vergleich eines Strukturbauteils mit manuell festgelegten und numerisch optimierten Faserbündelanzahlen erfolgt in Abschnitt 5.1.

4.5 Zur Wahl des Lagenaufbaus

Durch die Ablagepfade und die Anzahl abzulegender Faserbündel je Pfad ist die Bauteilgestalt inklusive der lokalen Bauteildicken definiert. Die Ablagereihenfolge definiert gleichzeitig den Lagenaufbau. Bei den im Rahmen der Arbeit betrachteten Strukturen

kann in Bereichen von Kreuzungspunkten die Reihenfolge, in der die Faserbündel abgelegt werden, einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ausüben, da später abgelegte Faserbündel in Dickenrichtung ausgelenkt werden (vgl. Abbildung 4.24).

Um zu prüfen, wie hoch der zu erwartende Einfluss lokaler Aufdickungen auf die mechanischen Struktureigenschaften ist und um zu ermitteln, welche Wahl bezüglich des Lagenaufbaus im Bereich von Kreuzungspunkten vorteilhaft ist, werden Simulationsmodelle von kreuzförmigen Probekörpern erstellt. Hierbei kommt die vorgestellte Methode für den automatisierten FE-Modellaufbau zum Einsatz (Abschnitt 4.3). Definiert werden zwei sich rechtwinklig kreuzende Pfade mit einer Länge von je 250 mm. Über das Skript zur automatisierten Modellerzeugung wird die Anzahl abzulegender Faserbündel und deren Reihenfolge bzw. der Lagenaufbau im Bereich der Überlappung variiert. Untersucht werden Modelle mit 8, 12 und 16 Lagen im Überlappungsbereich und jeweils mit einem alternierenden Wechsel zwischen 0°- und 90°-Lagen sowie einer gleichförmigen Anordnung der beiden Lagen. Die geringste Anzahl von 8 Lagen wird daher ausgewählt, da dies die kleinstmögliche Lagenanzahl ist, mit der ein symmetrischer, alternierender Lagenaufbau, der die gleiche Anzahl an sowohl 0°- als auch 90°-Lagen enthält, umgesetzt werden kann. Die Modelle mit 12 und 16 Lagen werden betrachtet, um zu ermitteln, wie sich die beobachteten Effekte bei insgesamt dickeren Kreuzungspunkten entwickeln. Sowohl für den alternierenden als auch für den gleichförmigen Lagenaufbau werden die Modelle zudem um 90° gedreht, um die Eigenschaften der kreuzförmigen Probekörper in beiden Richtungen zu ermitteln.

Die so erzeugten FE-Modelle werden im Hinblick auf eine Zugbeanspruchung entlang einer Richtung untersucht. Abbildung 4.25 zeigt ein entsprechendes Modell für einen kreuzförmigen Probekörper mit Lagenaufbau $(90/0/90/0)_s$ (links) inklusive einer Detailansicht des Überlappungsbereichs (rechts oben) und einer Schnittansicht des Überlappungsbereichs mit eingezeichneten Faserorientierungen (rechts unten). Anhand der Berechnungsergebnisse wird eine Pseudo-Spannung $\sigma_0 = \frac{F}{A_0}$, welche sich nur auf den Querschnitt der in Lastrichtung orientierten Strebe A_0 bezieht (die 90°-Lagen im Kreuzungspunkt werden vernachlässigt) berechnet. Weiterhin wird die Dehnung $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, als Längenänderung des Probekörpers zwischen den Einspannbereichen Δl gegenüber der anfänglichen Länge l_0 ermittelt. Als Quotient der beiden Größen im linearen

Bereich wird die Struktursteifigkeit $S = \frac{\Delta\sigma_0}{\Delta\varepsilon}$ gebildet und für verschiedene Lagenanzahlen und -aufbauten miteinander verglichen.

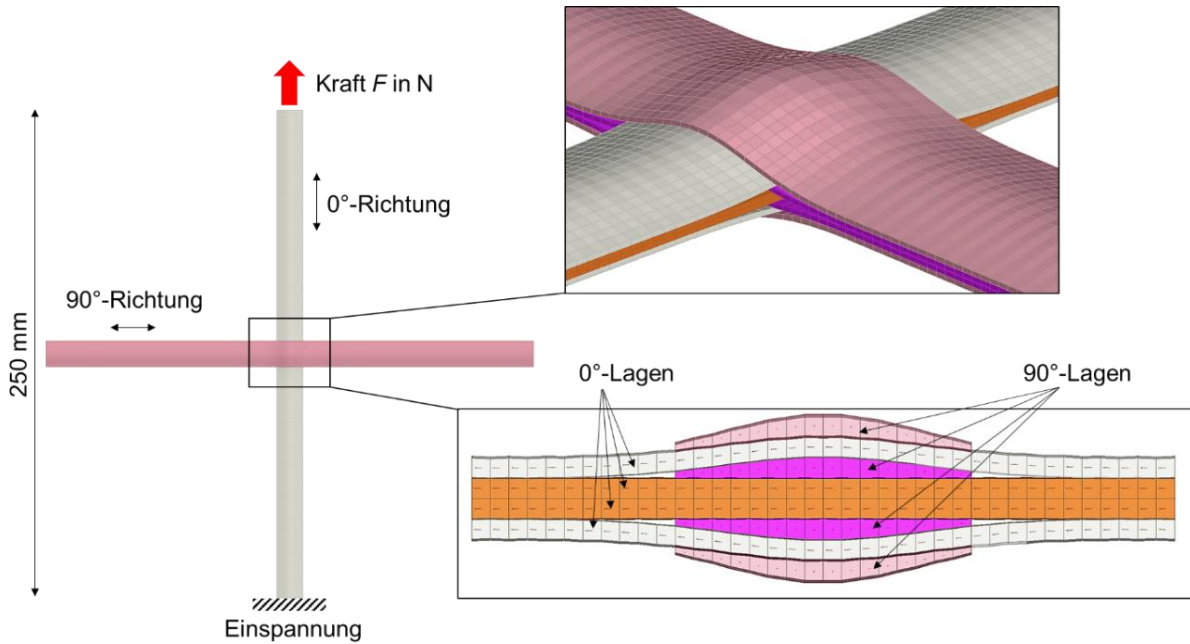


Abbildung 4.25: FE-Modell eines kreuzförmigen Probekörpers

Angegeben wird für die unterschiedlichen Varianten immer der Lagenaufbau im Überlappungsbereich (vgl. Abbildung 4.25). Die Zugrichtung wird als 0°-Richtung definiert. Die Ergebnisse werden dahingehend normiert, dass stets der Lagenaufbau, bei dem die 0°-Lagen und Fasern nicht in Dickenrichtung ausgelenkt werden, als Referenz dient. In Abbildung 4.26 wird die Änderung der Struktursteifigkeit gegenüber der Referenz angegeben.

Bei gleicher Lagenanzahl stellt stets der Lagenaufbau mit innenliegenden 0°-Lagen das beste Ergebnis dar, da hier die 0°-Lagen nicht in Dickenrichtung ausgelenkt werden. Je weiter außen die 0°-Lagen angeordnet werden, desto stärker reduziert sich die Struktursteifigkeit der kreuzförmigen Probekörper. Die alternierend aufgebauten Probekörper stellen in beide Richtungen eines Kreuzungspunkts einen guten Kompromiss dar. Eine Kreuzungsstelle mit gleichförmig angeordneten Faserorientierungen weist zwar in die Richtung mit innenliegenden 0°-Lagen die besten Eigenschaften auf, in der zweiten Richtung der Kreuzungsstelle sind die Eigenschaften jedoch – auch gegenüber den alternierenden Lagenaufbauten – hingegen deutlich reduziert.

Mit zunehmender Lagenanzahl verstärken sich die Effekte: Bei den Probekörpern mit 8 Lagen betragen die zu erwartenden Reduktionen der Steifigkeit unabhängig vom

gewählten Lagenaufbau weniger als 1 %. Bei 12 Lagen beträgt die zu erwartende Reduktion für einen alternierenden Lagenaufbau im Fall der außenliegenden 0°-Lagen 1,1 %. Im Fall des gleichförmigen Lagenaufbaus mit außenliegenden 0°-Lagen beträgt die Reduktion der Steifigkeit hingegen 3,7 %. Bei 16 Lagen beträgt die Reduktion der Steifigkeit für einen alternierenden Lagenaufbau in der Richtung der außenliegenden 0°-Lagen 2,1 % und wäre somit sicherlich für die meisten Anwendungen akzeptabel. Im Fall des gleichförmigen Lagenaufbaus mit außenliegenden 0°-Lagen beträgt die Steifigkeitsreduktion hingegen bereits 8,4 % und ist somit deutlich höher.

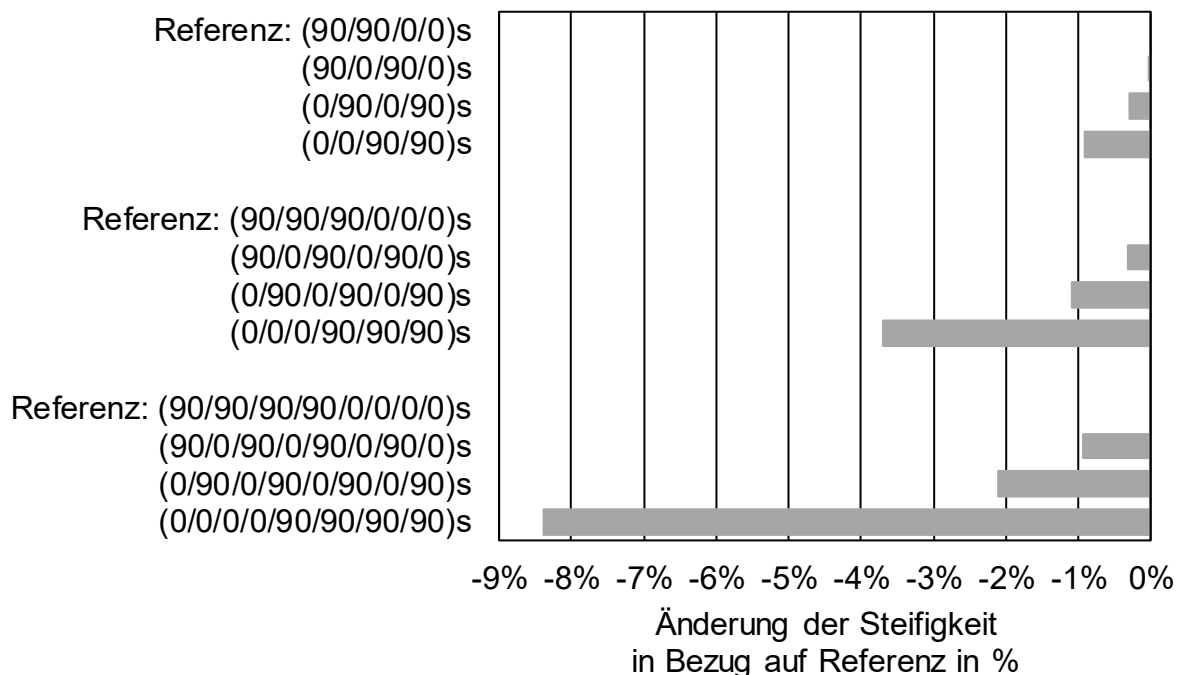


Abbildung 4.26: Änderung der Struktursteifigkeit der kreuzförmigen Probekörper für unterschiedliche Lagenanzahlen und -aufbauten

Da beim Nassfaserlegen auch Strukturen mit durchaus höheren Lagenanzahlen und Bauteildicken angestrebt werden, ist ein alternierender Lagenaufbau im Bereich von Kreuzungspunkten im Hinblick auf die Struktursteifigkeit zu bevorzugen, da in beide Richtungen der Kreuzungsstellen ein guter Kompromiss im Hinblick auf die Steifigkeit erzielt wird. Ein potenzielles Verschwimmen der Fasern im Pressprozess wird bei der Modellierung nicht berücksichtigt. Gemäß dem Auslegungsansatz wird der Lagenaufbau auf Basis der ermittelten Ablagepfade in Kombination mit den abzulegenden Anzahlen an Faserbündeln manuell festgelegt. Für die numerische Bauteilvalidierung mittels FEA wird der festgelegte Lagenaufbau dann entsprechend bei der automatisierten Modellerzeugung berücksichtigt.

5 Untersuchung topologisch optimierter Strukturen

Der in Kapitel 4 anhand numerischer Studien untersuchte Auslegungsansatz soll im Folgenden durch experimentelle Untersuchungen einer topologisch optimierten und mittels Nassfaserlegen hergestellten Strukturkomponente, eines Fahrrad-Brake-Boosters, untersucht und validiert werden. Die Struktur wird gewählt, da es sich um eine anwendungsnahe Struktur handelt, die bereits in anderen Arbeiten untersucht wurde [1,54], wodurch ein Vergleich zu den dort erzielten Ergebnissen getroffen werden kann. Im Gegensatz zu den zuvor numerisch untersuchten Strukturen (Scheibe unter vertikaler Last und winkliger Träger) kann der Brake Booster zudem mit einem vergleichsweise einfachen Prüfaufbau an einer Universalprüfmaschine getestet werden. Die Geometrie des Brake Boosters wird um Faktor 2 vergrößert, da die originale Struktur – zumindest für die Verwendung von Rovings mit einem großen Titer – im Hinblick auf Radien zu klein für eine sinnvolle Herstellung an der Laboranlage ist. Als Basis für die Auslegung dient ein FE-Modell des Bauraums (Abbildung 5.1). Eine entsprechend kleinere Variante des Bauteils wird in [54] für das Roboterwickeln und – mit leicht abweichendem Bauraum – in [1] anhand des TFP-Verfahrens untersucht.

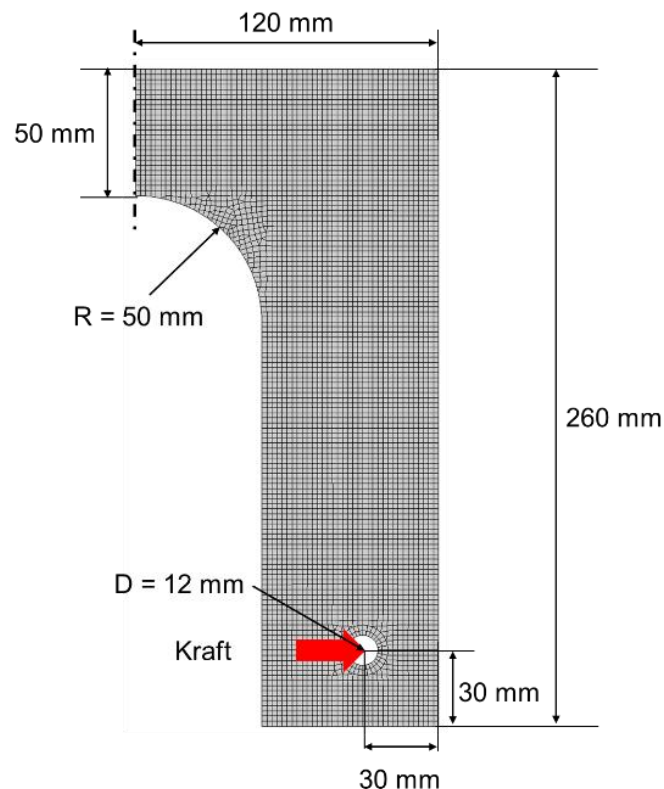


Abbildung 5.1: FE-Modell des Bauraums für einen um Faktor 2 vergrößerten Brake Booster

Für die Komponente wird der in Abschnitt 4 diskutierte Auslegungsansatz durchlaufen. Die hergestellten Strukturen werden anschließend mechanischen Prüfungen unterzogen. Die experimentelle Untersuchung wird in drei Abschnitte aufgeteilt.

Zunächst soll die Frage beantwortet werden, ob eine nachträgliche Optimierung der Faserbündelanzahl je Ablagepfad die Bauteileigenschaften im Hinblick auf die gewichtsbezogene Struktursteifigkeit signifikant ($> 5\%$) verbessern kann. Hierdurch wird geprüft, ob dieser zusätzliche Auslegungsschritt und der damit einhergehende zusätzliche Aufwand sinnvoll ist.

Dann wird geprüft, ob die Wahl des Lagenaufbaus im Bereich von Kreuzungspunkten (vgl. Abschnitt 4.5) bei topologisch optimierten Fachwerkstrukturen tatsächlich einen signifikanten Einfluss ($> 5\%$) auf die gewichtsbezogene Struktursteifigkeit hat.

Anschließend wird untersucht, wie sich die Wahl des Materialmodells in der Topologieoptimierung bei Anwendung des gesamten Auslegungsansatzes auf die gewichtsbezogene Struktursteifigkeit des hergestellten Bauteils auswirkt. Bei der Topologieoptimierung werden drei Varianten untersucht:

- Isotropes Materialmodell
- Anisotropes Materialmodell mit reinen UD-Faserorientierungen
- Anisotropes Materialmodell mit biaxialen Faserorientierungen im Bereich von Kreuzungspunkten

Diese Untersuchung soll zeigen, ob eine Berücksichtigung anisotroper Werkstoffeigenschaften sowie biaxialer Faserorientierungen im Bereich von Kreuzungspunkten zu einer Verbesserung der gewichtsbezogenen Struktursteifigkeit ($> 5\%$) am Bauteil führt, oder ob dieser zusätzliche Berechnungsaufwand in der Topologieoptimierung eingespart werden kann, da er zu keiner nennenswerten Verbesserung führt. Zusätzlich zum Brake Booster wird diese Untersuchung auch an einer Struktur unter Dreipunkt-Biegebelastung durchgeführt. Diese Struktur wird im Folgenden vereinfacht als „Brückenstruktur“ bezeichnet. Das entsprechende Bauraum-Modell ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

Begleitend zu allen Untersuchungen wird geprüft, ob die automatisiert erzeugten Analysemodelle geeignet sind, um die Masse und die Steifigkeit der gefertigten Strukturen hinreichend genau zu ermitteln. Als Zielgröße wird eine Abweichung zwischen Simulation und Experiment $< 10\%$ definiert, da mit dem Modellierungsansatz in [1] bei der Betrachtung von TFP-Strukturen je nach Strukturvariante Abweichungen bzgl. der

Struktursteifigkeit zwischen 0,7 % bis 7,3 % gegenüber dem Bauteilversuch vorliegen und da bei der bei der Herstellung von Strukturen mit komplexen Pfaden an der Laboranlage zum Nassfaserlegen mit experimentellen Streuungen der Ergebnisse zu rechnen ist.

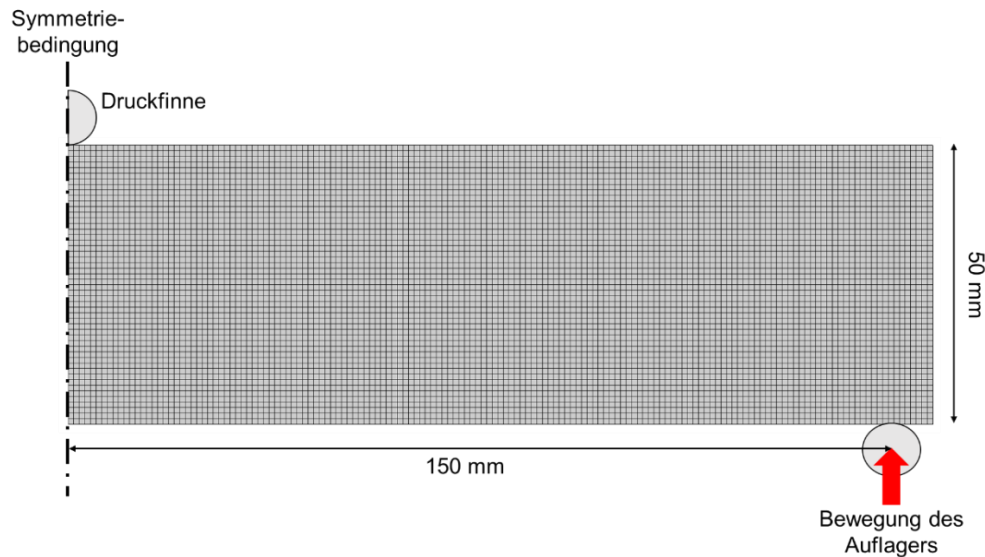


Abbildung 5.2: FE-Modell des Bauraums der „Brückenstruktur“

5.1 Einfluss der Optimierung der Faserbündelanzahl je Ablegepfad

Am Beispiel des Brake Boosters werden die in Abbildung 5.3 dargestellten Vorgehensweisen bei der Auslegung durchlaufen. Bei der ersten Variante wird die Anzahl an Faserbündeln je Ablagepfad durch den Menschen festgelegt. Bei der zweiten Variante wird die Anzahl abzulegender Faserbündel numerisch optimiert.

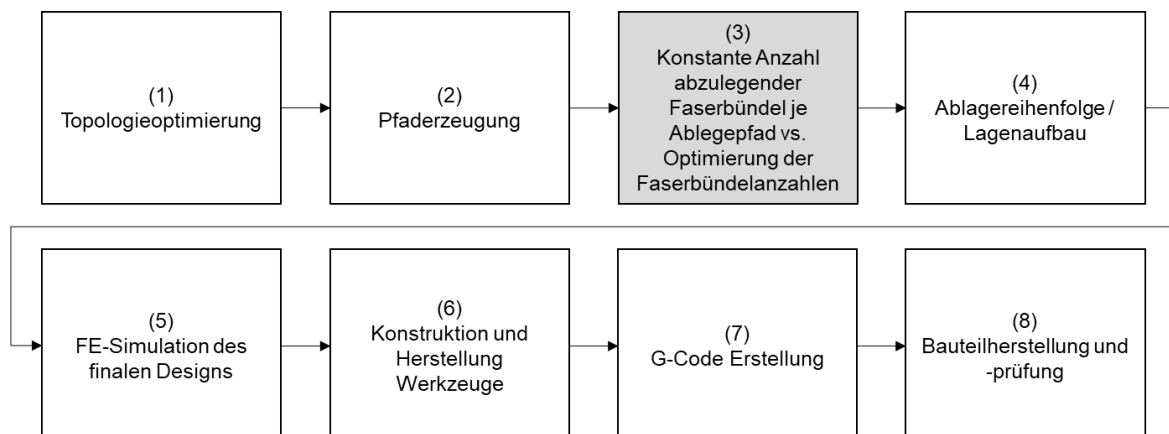
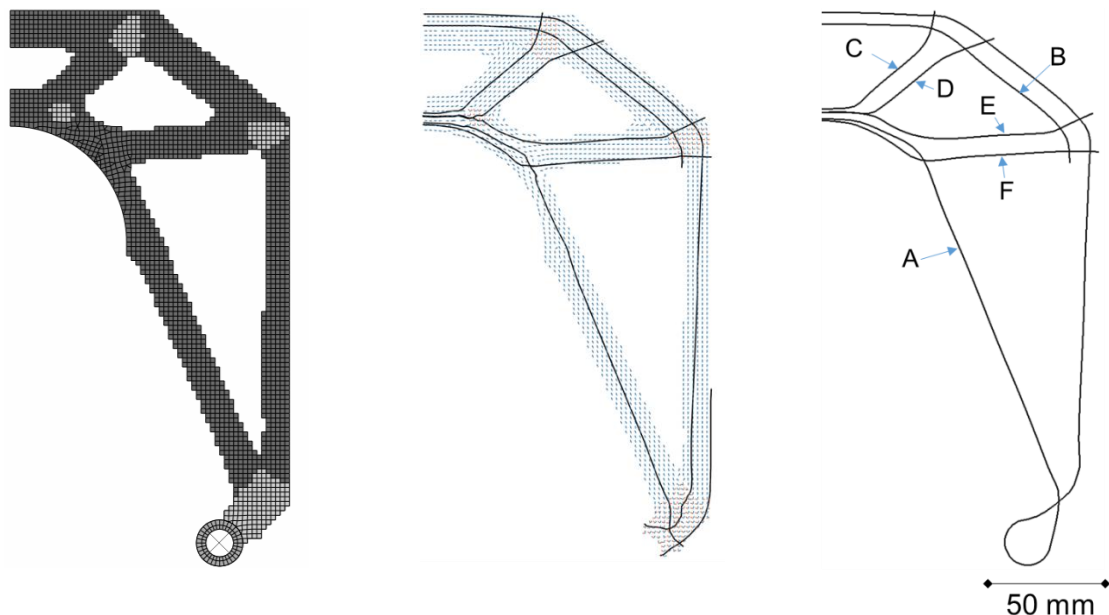


Abbildung 5.3: Vorgehensweise zur Untersuchung des Einflusses der Optimierung der Faserbündelanzahl je Ablagepfad

Zunächst wird eine anisotrope Topologieoptimierung unter Verwendung des in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten biaxialen BESO-Verfahrens durchgeführt. Hierbei werden

ein Zielwert für das Spannungsverhältnis SV^* von 9 und ein Filterradius zur Begrenzung der minimalen Balkenbreite von $r_{min} = 8$ (auf Basis der Ablegebreite mit dem untersuchten 50K-Roving) vorgegeben. Verwendet wird ein Viertelmodell des Bau- raums mit entsprechenden Symmetrierandbedingungen. Das Zielvolumen des FKV- Materials in Bezug auf den Designraum beträgt 40 %.

Basierend auf dem Ergebnis der Topologieoptimierung werden mit dem in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten Ansatz automatisiert Ablagepfade mit einer hohen Dichte erzeugt. Aus diesen werden anschließend Pfade mit einem Soll-Abstand von 8 mm extrahiert. Die Pfade werden für die Fertigung noch minimal manuell nachbearbeitet: So werden einige Pfade leicht verrundet sowie ein Schlaufenanschluss im Bereich der Kraffeinlei- tung ergänzt und ein kurzer Pfad gelöscht. Der Aufwand für die manuelle Nachbear- beitung beträgt weniger als eine halbe Stunde. Die automatisiert abgeleiteten und die nachbearbeiteten Pfade sind in Abbildung 5.4 zusammen mit dem Ergebnis der Topo- logieoptimierung dargestellt. Um klar auf die einzelnen Pfade verweisen zu können und um später die Reihenfolge der abzulegenden Faserbündel bzw. den Lagenaufbau der Strukturen definieren zu können, wird jeder Ablagepfad mit einem Buchstaben ver- sehen.



a) Topologieoptimierungsergebnis

b) Automatisiert abgeleitete Pfade

c) Pfade nach manueller Nachbearbeitung

Abbildung 5.4: Topologieoptimierungsergebnis und Ablagepfade für den Brake Booster

Als Referenz wird eine Struktur mit gleichen Anzahlen an Faserbündeln je Ablagepfad definiert, da auch die Topologieoptimierung zunächst eine konstante Dickenverteilung annimmt. Hierfür werden 24 Faserbündel je Ablagepfad festgelegt. Die in Abschnitt 4.3 vorgestellte Gaußverteilung (Abbildung 4.22) zur Modellierung der Faserbündel wird dabei so skaliert, dass ihre Fläche einem Faservolumengehalt von 60 % entspricht. Für 24 Faserbündel ergibt sich hierdurch eine maximale Dicke am Scheitelpunkt der Gaußverteilung von 13,9 mm sowie eine mittlere Dicke (ohne Berücksichtigung der abzuschneidenden Reinharz-Bereiche, vgl. Abbildung 4.22) von 10,0 mm. Dies entspricht dem doppelten Wert der äußeren Stegdicke der in [1] untersuchten Brake Booster, sodass das in dieser Arbeit untersuchte Bauteil entsprechend in allen Dimensionen einschließlich der Dicke um Faktor 2 gegenüber der in [1] untersuchten Variante vergrößert ist.

Dieser Referenz gegenübergestellt wird eine Struktur, bei der die Anzahl abzulegender Faserbündel je Ablagepfad mithilfe eines genetischen Algorithmus optimiert wird. Ziel der Optimierung ist die Maximierung der massespezifischen Struktursteifigkeit. Hierfür wird eine Kraft von 1 kN angenommen. Zusätzlich wird eine Restriktion bezüglich der Verschiebung des mit der Kraft beaufschlagten Bolzens berücksichtigt: Bei der vorgegebenen Kraft soll sich dieser um maximal 1,8 mm verschieben. In der Optimierung wird die Anzahl abzulegender Faserbündel je Ablagepfad zwischen Werten von 2 bis 24 Faserbündeln variiert. Einzig für den Pfad A wird die Anzahl zulässiger Faserbündel auf 12 bis 24 beschränkt. Dies soll garantieren, dass im Bereich der Bolzenanbindung eine gewisse Dicke vorhanden bleibt.

Die Optimierung der Anzahl abzulegender Faserbündel je Ablagepfad ergibt für den Brake Booster folgendes Ergebnis:

- 24 Rovings für Pfad A
- 14 Rovings für Pfad B
- 22 Rovings für Pfad C
- 16 Rovings für Pfad D
- 22 Rovings für Pfad E
- 22 Rovings für Pfad F

Die Ergebnisse sind plausibel, z. B. werden die meisten Rovings entlang des nicht durch die gesamte Struktur laufenden Pfads B, der sehr wahrscheinlich einen vergleichsweise geringen Beitrag zur Struktursteifigkeit leistet, entfernt.

Für die Fertigung der Strukturen ist die Reihenfolge, in der die Faserbündel abgelegt werden sollen, zu definieren. Basierend auf den Erkenntnissen in Abschnitt 4.5, und um eine Vergleichbarkeit der Strukturen zu gewährleisten, wird für beide Varianten ein alternierender Lagenaufbau definiert. Dieser berücksichtigt die für beide Strukturen zu verwendenden Faserbündelanzahlen. Die Lagenaufbauten der untersuchten Strukturen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Verwendet werden dabei die den einzelnen Pfaden zugewiesenen Buchstaben (vgl. Abbildung 5.4).

Tabelle 5.1: Ablagereihenfolge für die Fertigung mittels Nassfaserlegen

Struktur	Ablagereihenfolge bzw. Lagenaufbau
Brake Booster mit 24 Faserbündeln je Ablagepfad (Referenz)	$[(F/E/D/C/B/A)_{12}]_s$
Brake Booster mit optimierten Faserbündelanzahlen	$[(F,E,D,C,B,A)_7, (F,E,D,C,A),(F,E,C,A)_3,A]_s$

Die Kodierung ist so zu lesen, dass im Fall der Struktur mit 24 Faserbündeln je Ablagepfad die Pfadreihenfolge F-E-D-C-B-A zwölf Mal in Folge abgelegt wird. Anschließend wird die gespiegelte Reihenfolge A-B-C-D-E-F ebenfalls 12-mal abgelegt, was durch das tiefergestellte s gekennzeichnet wird. Im Fall der Struktur mit optimierter Faserbündelanzahl wird zunächst die Pfadfolge F-E-D-C-B-A sieben Mal abgelegt. Anschließend wird die Pfadfolge F-E-D-C-A abgelegt und so weiter. Auch in diesem Fall ist die Ablagereihenfolge symmetrisch zur Mitte gewählt.

Basierend auf den Faserbündelanzahlen und der festgelegten Ablagereihenfolge werden mit dem in Abschnitt 4.3 vorgestellten Ansatz FE-Modelle – unter Berücksichtigung der tatsächlichen Ablagereihenfolge – für beide Strukturvarianten erstellt. Die FE-Modelle (Abbildung 5.5) werden genutzt, um sowohl das Bauteilgewicht wie auch die Steifigkeit rechnerisch zu ermitteln. Die Simulationsergebnisse werden später mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

Zur Herstellung von Werkzeugen werden die in der FE-Software erzeugten Geometrien als STL-Dateien exportiert und in die Konstruktionssoftware *SolidWorks* geladen. Anhand der Bauteilmodelle werden dort die Werkzeuge konstruiert. Da die Werkzeuge komplexe Formen aufweisen und mehrere Bauteilvarianten getestet werden sollen, wird zur Herstellung der Werkzeuge der 3D-Druck, genauer das FDM, eingesetzt. Dies hat gegenüber dem Fräsen den Vorteil, dass die Werkzeuge, die im Rahmen der Arbeit in nur sehr kleinen Serien eingesetzt werden sollen, günstig sind. Außerdem können

die komplexen Geometrien der Strukturen leicht realisiert werden. Nachteilig ist die geometrische Toleranz, die Wärmebeständigkeit der aus PLA bestehenden Werkzeuge, sowie deren geringe Steifigkeit, Oberflächengüte und Beständigkeit gegenüber Verschleiß. Für die Herstellung von Prototypen und für den Vergleich der hiermit durch Nassfaserlegen hergestellten Strukturen, kann dies akzeptiert werden. Abbildung 5.6 zeigt beispielhaft das Werkzeug für den Brake Booster mit optimierten Faserbündelanzahlen. Vor dem Ablageprozess werden die Werkzeuge mit Trennmittel behandelt.

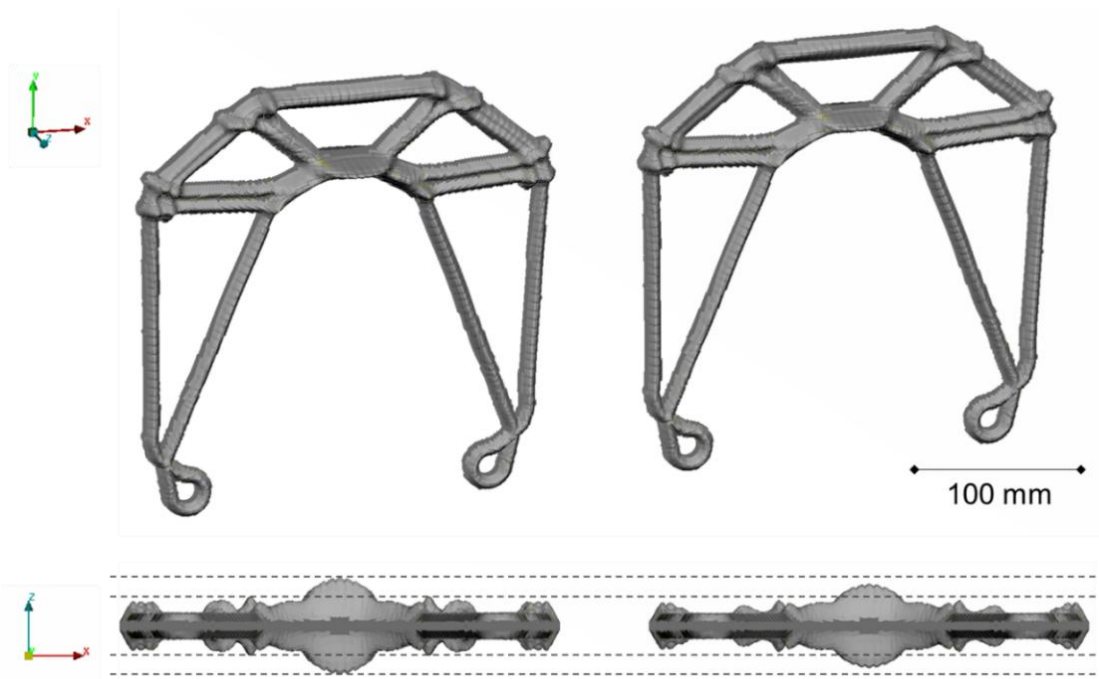


Abbildung 5.5: Brake Booster ohne („Referenz“, links) und mit Optimierung (rechts) der Faserbündelanzahlen

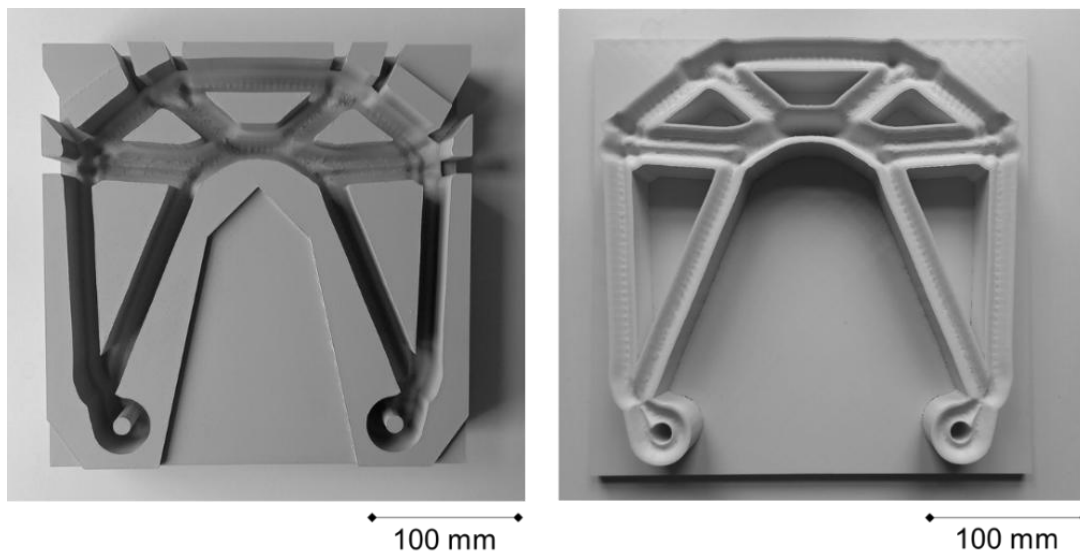


Abbildung 5.6: Im FDM-Verfahren hergestelltes Werkzeug für den Brake Booster mit optimierten Faserbündelanzahlen

Zur Fertigung werden die in Abbildung 5.4 gezeigten Pfade gespiegelt und als .dxf-Datei gespeichert. Diese wiederum kann in Softwarelösungen zum Erstellen eines G-Codes eingelesen werden. Hierzu wurde die Open-Source Software *GRBL-Plotter* benutzt. Die für die einzelnen Pfade erzeugten G-Code Befehle werden um Befehle zur automatischen Nachführung der Drehachse ergänzt. Die Fertigung mittels Nassfaserlegen erfolgt unter Verwendung des 50K-Rovings und des kalthärtenden Epoxidharzsystems (Abschnitt 3.1). Die Rovings werden dabei direkt in das Nutenwerkzeug abgelegt. Nach der Ablage wird der Stempel in das Werkzeug eingelegt und die beiden Werkzeugteile werden zwischen zwei Stahlplatten durch gleichmäßiges Anziehen von 8 Schrauben sukzessive geschlossen, bis ihre planaren Grundflächen aufeinander aufliegen („auf Block“). Das Harzsystem härtet dann für 24 Stunden bei Raumtemperatur aus. Abbildung 5.7 zeigt einen Brake Booster mit 24 Faserbündeln je Ablagepfad sowie die Variante mit optimierten Faserbündelanzahlen. Je Variante werden 3 Teile hergestellt.

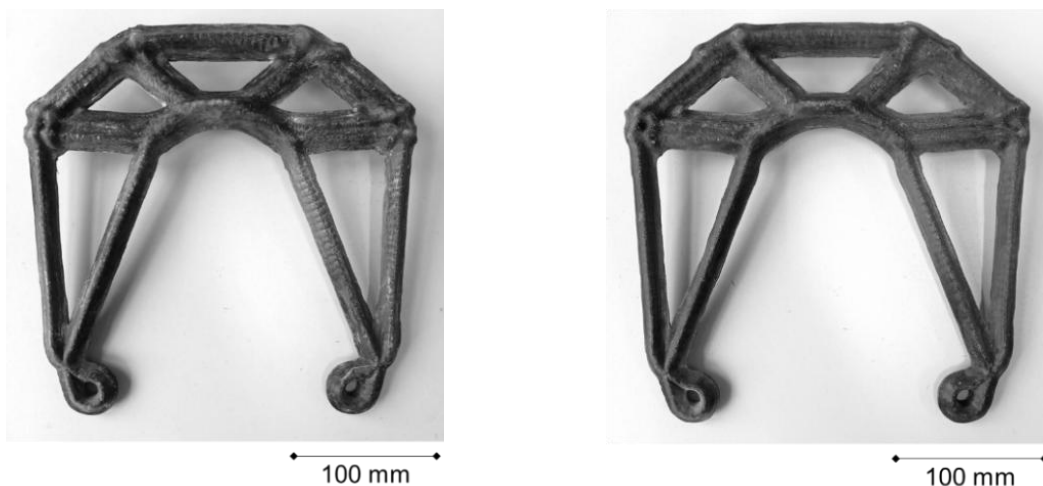


Abbildung 5.7: Durch Nassfaserlegen hergestellte Brake Booster (links: Referenz mit 24 Faserbündeln je Ablagepfad, rechts: optimierte Faserbündelanzahlen)

Die mechanischen Prüfungen der Brake Booster werden an einer Universalprüfmaschine 1485 der Firma Zwick-Roell durchgeführt. Der Prüfaufbau (Abbildung 5.8) umfasst zwei Bolzenanbindungen für die beiden Schlaufenanschlüsse der Brake Booster. Zu Beginn der Prüfung wird eine Vorkraft von 50 N angefahren. Der untere der beiden Bolzen wird dann durch ein Verfahren der unteren Traverse weiter nach unten gezogen. Während des Versuchs wird die Kraft mithilfe einer an der oberen Traverse angebrachten Kraftmessdose (maximale Kraft 10 kN) gemessen. Die vertikale Distanz

der beiden Bolzen zueinander wird mithilfe eines optischen Systems aufgezeichnet. Aus diesen beiden zeitlichen Verläufen wird eine Kraft-Weg-Kurve gebildet. Beispielhaft sind die Kraft-Weg-Kurven der drei Brake Booster mit optimierten Faserbündelanzahlen in Abbildung 5.9 dargestellt. Im linearen Bereich der Kraft-Weg-Kurven wird die Steigung der Kraft über der Verschiebung $\Delta F/\Delta s$ als Struktursteifigkeit in N/mm berechnet. Die Struktursteifigkeit wird anschließend noch auf das Gewicht des betrachteten Brake Boosters bezogen, um die massenspezifische Struktursteifigkeit zu berechnen.

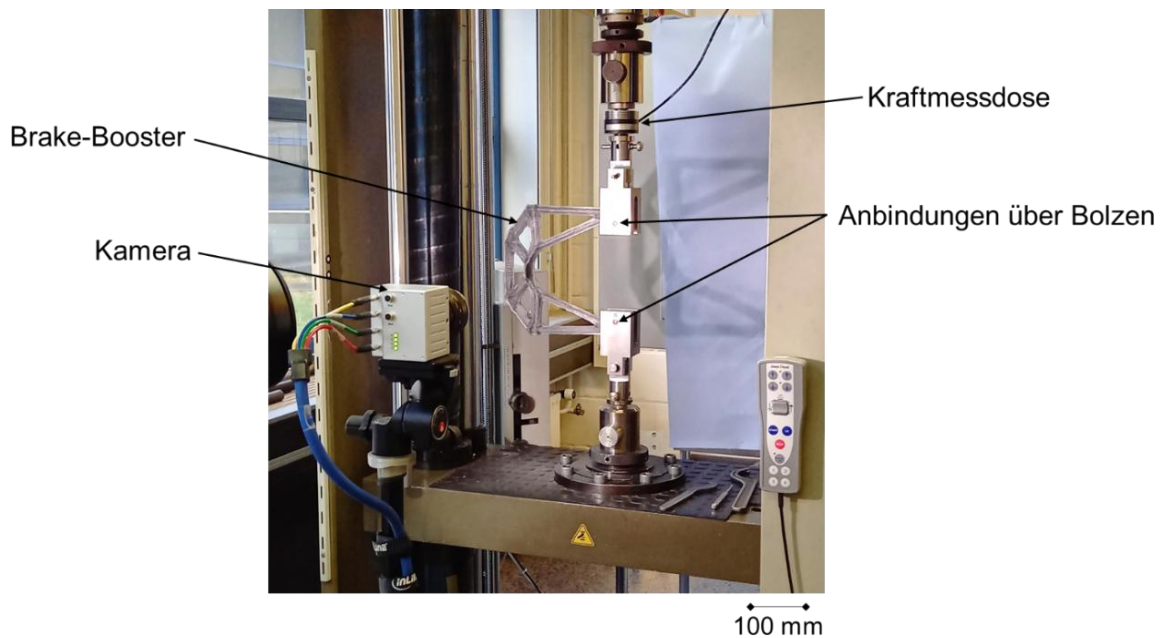


Abbildung 5.8: Aufbau für die mechanische Prüfung der Brake Booster

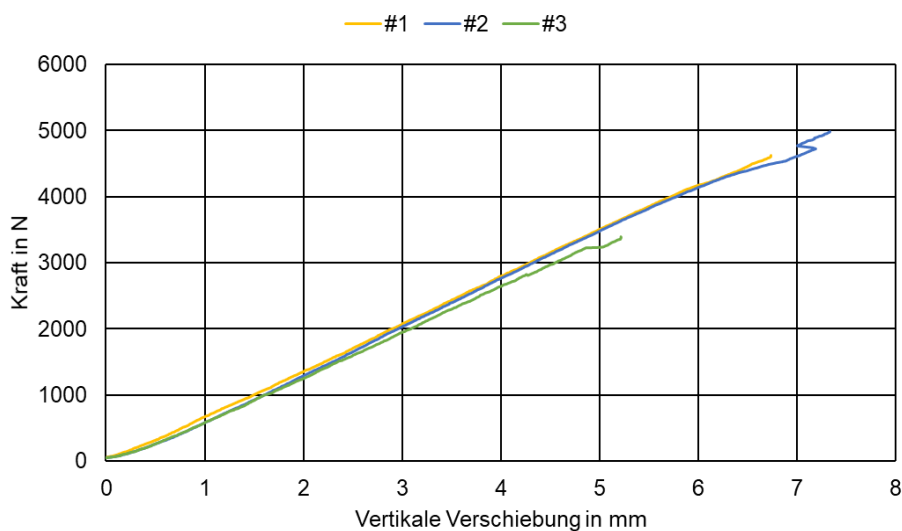


Abbildung 5.9: Kraft-Weg-Kurven für die drei Brake Booster mit optimierten Faserbündelanzahlen

In Tabelle 5.2 sind jeweils die gemessenen und mithilfe der Simulationsmodelle ermittelten Ergebnisse für das Gewicht, die Struktursteifigkeit und die massespezifische Struktursteifigkeit zusammengefasst. Bei den experimentell ermittelten Werten wird jeweils der Mittelwert in Kombination mit der in beide Richtungen aufgetragenen Standardabweichung angegeben.

Tabelle 5.2: Ergebnisse für die Brake Booster mit konstanten und optimierten Faserbündelanzahlen

Variante		Masse in g	Struktursteifigkeit in N/mm	Massespezifische Struktursteifigkeit in N/(mm·g)
Konstante Faserbündelanzahlen	Versuch	376,6 ± 28,4	753,1 ± 38,0	2,01 ± 0,25
	Simulation	364,2	711,7	1,95
Optimierte Faserbündelanzahlen	Versuch	304,1 ± 3,2	709,1 ± 18,3	2,33 ± 0,08
	Simulation	323,3	675,6	2,09

Die als Referenz dienenden Brake Booster mit konstant festgelegten Faserbündelanzahlen weisen ein mittleres Gewicht von 377 ± 28 g auf. Erwartungsgemäß reduziert sich dieses durch die Optimierung der Faserbündelanzahlen und das Weglassen von Faserbündeln auf 304 ± 3 g. Somit wird eine Gewichtseinsparung von ca. 19 % erzielt. Die über die FE-Modelle ermittelten Massen für die beiden Strukturvarianten betragen 364 g bzw. 323 g. Die Abweichung der Modelle zum mittleren Gewicht der jeweiligen Variante beträgt somit etwa 3 % bzw. 6 %.

Alle geprüften Probekörper halten das Ziel einer vertikalen Verschiebung $< 1,8$ mm bei einer Kraft von 1 kN ein (das Ziel entspricht einer geforderten Steifigkeit von 556 N/mm). Auch die Struktursteifigkeit verringert sich durch die Reduktion der Faserbündelanzahlen im Rahmen der Optimierung erwartungsgemäß von 753 ± 38 N/mm auf 709 ± 18 N/mm. Die über die FE-Berechnung ermittelten Steifigkeiten betragen 711 N/mm bzw. 676 N/mm. Somit liegt das Ergebnis der Simulation etwa 6 % bzw. 5 % unter den jeweiligen mittleren Versuchsergebnissen.

In Bezug auf die massespezifische Struktursteifigkeit ergibt sich durch die Optimierung der Faserbündelanzahlen im Experiment eine Steigerung gegenüber den Referenzstrukturen von ca. 16 % ($2,33 \pm 0,08$ N/(mm·g) gegenüber $2,01 \pm 0,25$ N/(mm·g) für die Referenz). Durch die Ergebnisse kann somit bestätigt werden, dass eine numerische Optimierung der Faserbündelanzahlen je Ablagepfad zu verbesserten Werten für

die massespezifische Struktursteifigkeit führen kann. Die erzielte Steigerung der massespezifischen Struktursteifigkeit gegenüber dem Ausgangsentwurf von ca. 16 % liegt deutlich über dem gesteckten Ziel von 5 %. Wie hoch das Potenzial bzgl. einer möglichen Verbesserung grundsätzlich ist, hängt dabei von der konkreten Anwendung und von der Güte des Ausgangsentwurfs inkl. der hier definierten Faserbündelanzahlen ab.

5.2 Einfluss des Lagenaufbaus

Die FE-Simulationen einzelner Kreuzungsstellen (Abschnitt 4.5) legen nahe, dass ein alternierender Lagenaufbau in Bezug auf die maximale Struktursteifigkeit mittels Nassfaserlegen hergestellter Fachwerkstrukturen vorteilhaft sein könnte, da in beide Richtungen der Kreuzungsstelle ein guter Kompromiss gefunden wird. In diesem Abschnitt wird geprüft, ob der Lagenaufbau tatsächlich auch auf Bauteilebene einen signifikanten Einfluss auf die Struktursteifigkeit aufweist und ob ein alternierender Lagenaufbau zu bevorzugen ist.

Als Basis dient die in Abschnitt 5.1 bzgl. der Faserbündelanzahlen optimierte und mit alternierendem Lagenaufbau geprüfte Version des Brake Boosters (Abbildung 5.7 rechts). Die Strukturkomponente wird nun zusätzlich mit einem gleichförmigen Lagenaufbau hergestellt und entsprechend dem Vorgehen in Abschnitt 5.1 geprüft. Die somit vergleichend betrachteten Lagenaufbauten sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Tabelle 5.3: Ablagereihenfolge für den Vergleich zwischen alternierenden und gleichförmigen Lagenaufbauten

Struktur	Ablagereihenfolge bzw. Lagenaufbau
Brake Booster mit alternierendem Lagenaufbau	$[(F, E, D, C, B, A)_7, (F, E, D, C, A), (F, E, C, A)_3, A]_s$
Brake Booster mit gleichförmigem Lagenaufbau	$[F_{11}/E_{11}/D_8/C_{11}/B_7/A_{12}]_s$

Für beide Lagenaufbauten werden FE-Modelle erstellt (Abbildung 5.10). Zur besseren Unterscheidbarkeit sind die einzelnen Lagen mit verschiedenen Farben eingefärbt. Um den alternierenden Lagenaufbau bzgl. der Auslenkung der Rovings in Dickenrichtung möglichst realistisch im Modell abbilden zu können, muss jeder einzelne Roving modelliert werden. Hierdurch steigt der Berechnungsaufwand erheblich. Demgegenüber können beim gleichförmigen Lagenaufbau die in einer Lage enthaltenen Rovings zusammengefasst werden, wodurch weniger Elemente benötigt werden.

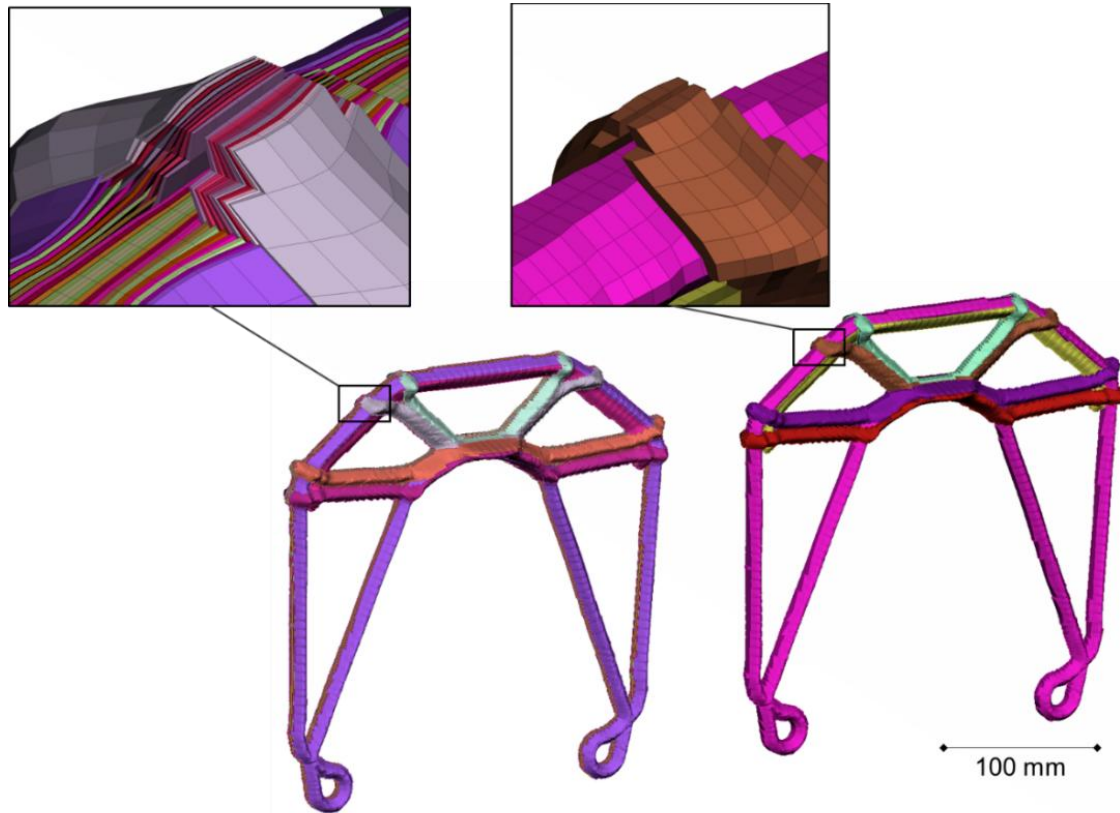


Abbildung 5.10: FE-Modelle des Brake Boosters (links: alternierender Lagenaufbau, rechts: gleichförmiger Lagenaufbau)

Wie im vorherigen Abschnitt werden die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der mechanischen Prüfungen für die zwei verschiedenen Lagenaufbauten verglichen. Die Ergebnisse aus den mechanischen Prüfungen und FE-Berechnungen sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Tabelle 5.4: Ergebnisse für die Brake Booster mit alternierendem und gleichförmigen Lagenaufbau

Variante		Masse in g	Struktursteifigkeit in N/mm	Massespezifische Struktursteifigkeit in N/(mm·g)
Alternierender Lagenaufbau	Versuch	$304,1 \pm 3,2$	$709,1 \pm 18,3$	$2,33 \pm 0,08$
	Simulation	323,3	675,6	2,09
Gleichförmiger Lagenaufbau	Versuch	$321,5 \pm 8,5$	$704,7 \pm 13,36$	$2,19 \pm 0,04$
	Simulation	323,3	691,8	2,14

Bezüglich des Strukturgewichts weisen die Bauteile mit gleichförmigen Lagenaufbau gegenüber den Bauteilen mit alternierendem Lagenaufbau ein leicht höheres Gewicht auf, nämlich 322 ± 9 g gegenüber 304 ± 3 g (Abweichung von ca. 6 %). Da die Menge an abgelegten Faserbündeln für beide Varianten gleich ist, muss dieser Unterschied

auf Toleranzen der gedruckten Werkzeuge oder auf Prozessschwankungen bei der Ablage und im nachfolgenden Konsolidierungsprozess zurückzuführen sein. Die Berechnungsmodelle hingegen weisen für beide Lagenaufbauten ein Gewicht von 323 g aus und stimmen somit gut mit dem Gewicht der mit gleichförmigem Lagenaufbau hergestellten Strukturen überein.

Im Hinblick auf die Struktursteifigkeit lässt sich bei den mechanischen Prüfungen kein relevanter Unterschied zwischen den beiden Lagenaufbauten ermitteln (Abweichung zwischen den beiden Lagenaufbauten $< 1\%$). Auch in der Simulation beträgt der Unterschied der Struktursteifigkeiten zwischen den beiden Lagenaufbauten weniger als 3 %. Die massespezifische Struktursteifigkeit für die beiden Lagenaufbauten liegt in einem ähnlichen Bereich, sie ist für den gleichförmigen Lagenaufbau um etwa 6 % geringer. Allerdings ist dieser Umstand primär auf das höhere Gewicht und somit wahrscheinlich auf Variationen in der Herstellung zurückzuführen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Lagenaufbau im Bereich der Kreuzungspunkte bei der betrachteten Brake-Booster-Struktur keinen signifikanten Einfluss auf die Steifigkeit hat. Eine Festigkeitsbetrachtung wird im Rahmen der Arbeit nicht durchgeführt.

5.3 Einfluss des Topologieoptimierungsansatzes

Zuletzt wird geprüft, inwiefern die Wahl des Topologieoptimierungsansatzes (isotrope oder anisotrope Topologieoptimierung) unter Anwendung der gesamten Auslegungsprozedur einen Einfluss auf das spätere Strukturverhalten ausübt. Hierzu werden der Brake Booster und die Brückenstruktur zusätzlich zum im Rahmen der Arbeit entwickelten biaxialen BESO-Verfahren („BESO-Biaxial“) auch unter Annahme isotroper Materialeigenschaften („BESO-Isotrop“) und mittels anisotroper Topologieoptimierung mit ausschließlich UD-Faserorientierungen („BESO-UD“) optimiert. Der grundsätzliche Topologieoptimierungsalgorithmus wird nicht variiert, sodass die Wahl der Materialeigenschaften das einzige Unterscheidungsmerkmal darstellt. Basierend auf den Topologieoptimierungsergebnissen wird für alle Strukturen der Auslegungsansatz über die Pfaderzeugung, die Optimierung der Faserbündelanzahlen, die Festlegung der Ablagereihenfolge, die Simulation des finalen Designs, die Werkzeugherstellung, das Nassfaserlegen und die Bauteilprüfung durchlaufen. Für die mittels BESO-Isotrop und BESO-UD optimierten Strukturen werden die Pfade nicht durch das entwickelte

MATLAB-Skript automatisiert erstellt, sondern manuell anhand von Bildern der Hauptspannungstensenoren gezeichnet, da zusätzliche Schnittstellen für die Auswertung benötigt werden und da das manuelle Erstellen der Ablagepfade Stand der Technik ist. Es wird jedoch darauf geachtet, spannungs- und fertigungstechnisch sinnvolle Ablagepfade zu erzeugen. Die Ergebnisse der Topologieoptimierungen sowie die zugehörigen Ablagepfade sind in Abbildung 5.11 und in Abbildung 5.12 dargestellt.

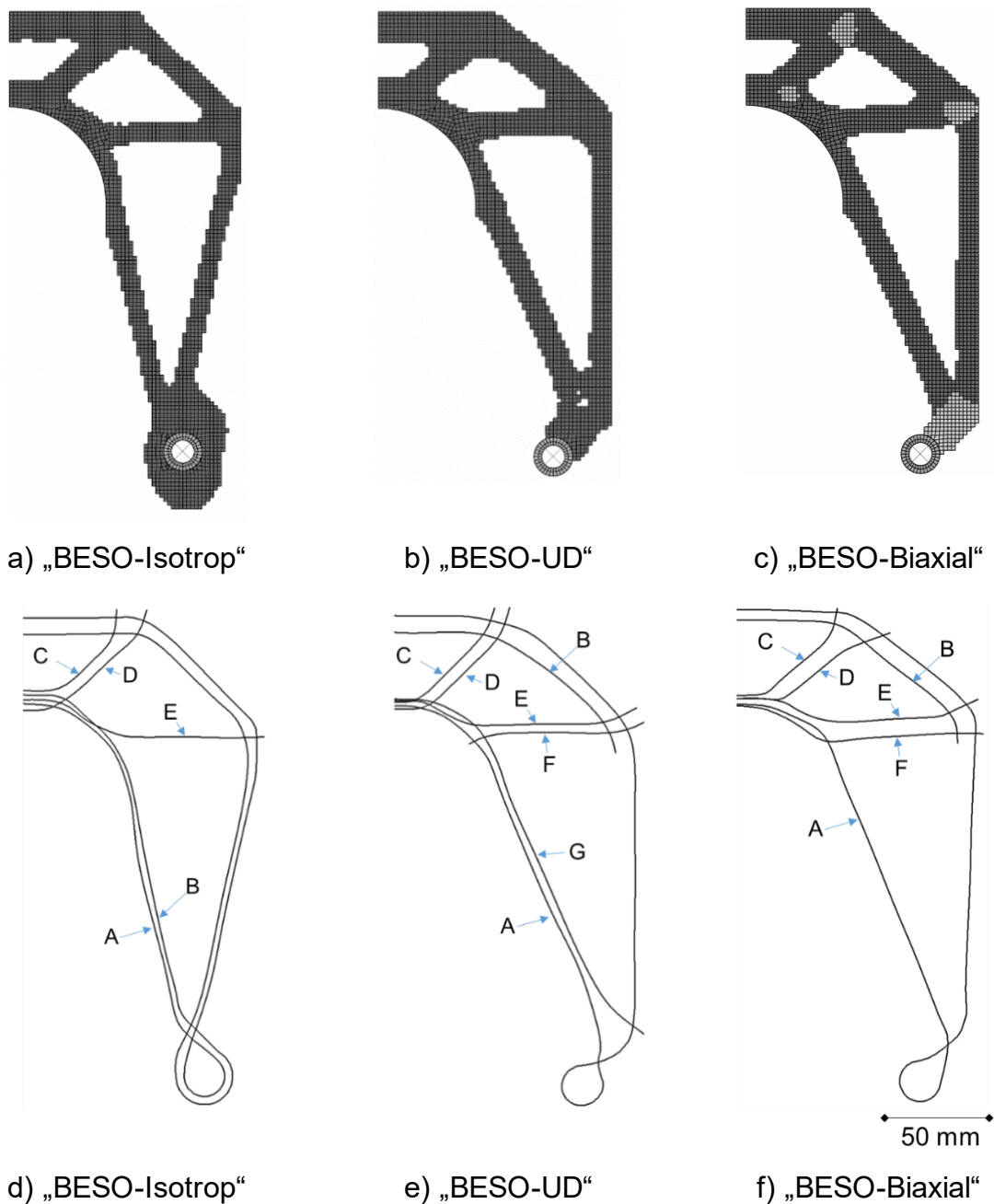


Abbildung 5.11: Topologieoptimierungsergebnisse (a) bis c)) und Ablegepfade (d) bis f)) für den Brake Booster

Insgesamt unterscheiden sich die Topologieoptimierungsergebnisse bei beiden Strukturen nur geringfügig. Beim Optimierungsergebnis für den Brake Booster mit isotropen Materialmodell wird gegenüber der anisotropen Topologieoptimierung mehr Material im Bereich der Bolzenanbindung aufgewendet. Es wurde bei der Pfaderstellung versucht diesem Umstand durch einen zweiten Pfad im Bereich der Schlaufenanbindung Rechnung zu tragen. Weiterhin wird bei der Erstellung der Pfade für die isotrope und unidirektionale Brake-Booster-Variante auf ein Auffächern der Pfade im Bereich von Kreuzungspunkten, wie es bei der automatisierten Pfaderzeugung für die biaxiale Variante auftritt, verzichtet.

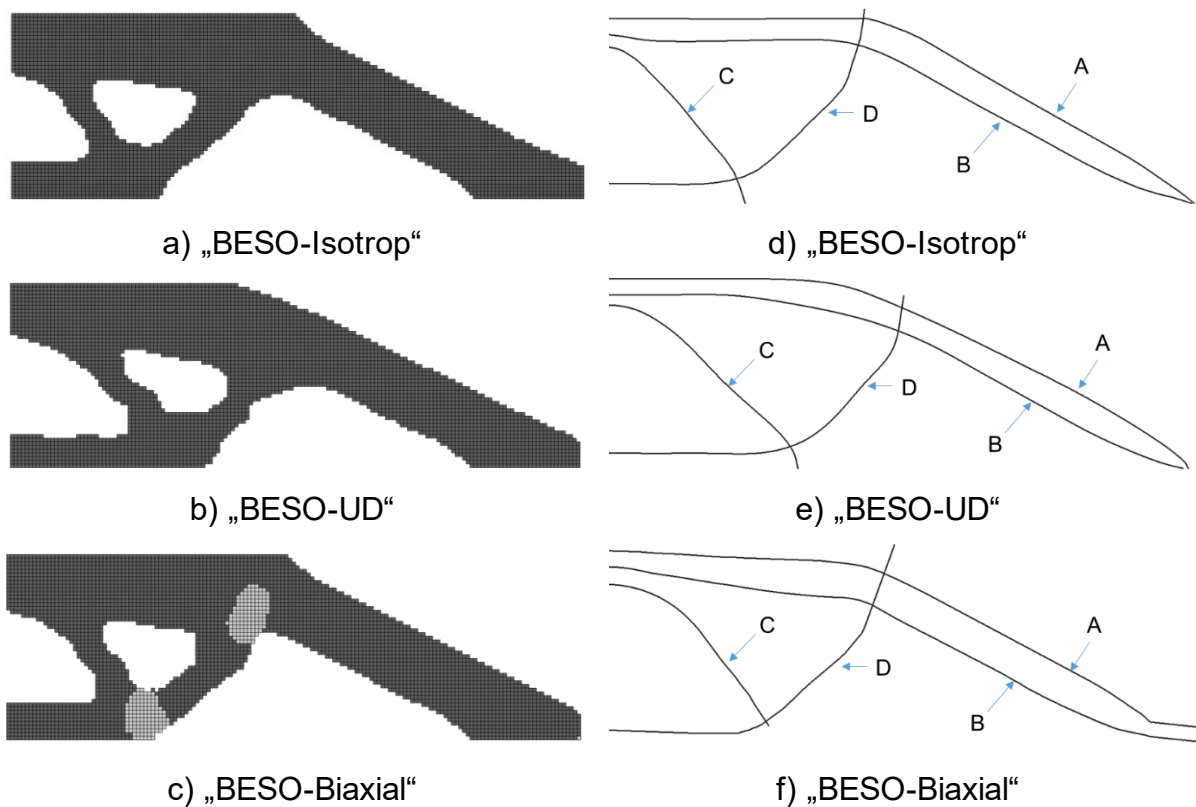


Abbildung 5.12: Topologieoptimierungsergebnisse (a) bis c)) und Ablegepfade (d) bis f)) für die Struktur unter Dreipunkt-Biegebelastung

Für die untersuchten Strukturen wird die Anzahl der je Ablagepfad abzulegenden Faserbündel numerisch optimiert. Anschließend wird zur Vergleichbarkeit für alle Strukturen ein möglichst alternierender Lagenaufbau gewählt. Die jeweilige Ablagereihenfolge ist in Tabelle 5.5 angegeben.

Im Fall der Brückenstruktur fällt auf, dass die Rovinganzahlen je Ablagepfad aufgrund der sehr ähnlichen Pfade auch vergleichbar sind. Entlang der Pfade A und B werden bei allen Varianten gleich viele Faserbündel abgelegt. Entlang des Pfades C werden

bei der Variante „BESO-Biaxial“ acht Rovings abgelegt, bei den anderen beiden Varianten nur sechs. Entlang des Pfades D werden bei der Variante „BESO-UD“ acht Rovings abgelegt. Bei den anderen beiden Varianten sind es hingegen zehn Rovings. Somit weisen die Bauteile neben ähnlichen Ablagepfaden auch recht ähnliche Dickenverteilungen auf, wobei die Variante „BESO-UD“ insgesamt die geringste Anzahl an abzulegenden Rovings aufweist („BESO-UD“: 42 Rovings, „BESO-Isotrop“: 44 Rovings; „BESO-Biaxial“: 46 Rovings).

Tabelle 5.5: Ablagereihenfolge für die Untersuchung des Einflusses der Materialmodellierung in der Topologieoptimierung

Struktur	Ablagereihenfolge bzw. Lagenaufbau
Brake Booster „BESO-Isotrop“	$[(E,D,C,B,A)_2, (E,D,C,A)_4, (E,D,A)_2, (E,A)_3, A]_s$
Brake Booster „BESO-UD“	$[(G,F,E,D,C,B,A), (F,E,D,C,B,A_2)_3, (E,D,C,A), (E,C,A_2), (E,A_2)]_s$
Brake Booster „BESO-Biaxial“	$[(F,E,D,C,B,A)_7, (F,E,D,C,A), (F,E,C,A)_3, A]_s$
Brückenstruktur „BESO-Isotrop“	$[(D,C,B,A_2)_2, (D,C,A_2), (D,A_3)_2]_s$
Brückenstruktur „BESO-UD“	$[(D,C,B,A_3)_2, (D,C,A_3), (D,A_3)]_s$
Brückenstruktur „BESO-Biaxial“	$[(D,C,B,A_2)_2, (D,C,A_2)_2, D, A_4]_s$

Die hergestellten Strukturen mit bereits optimierten Faserbündelanzahlen sind in Abbildung 5.13 und in Abbildung 5.14 dargestellt.

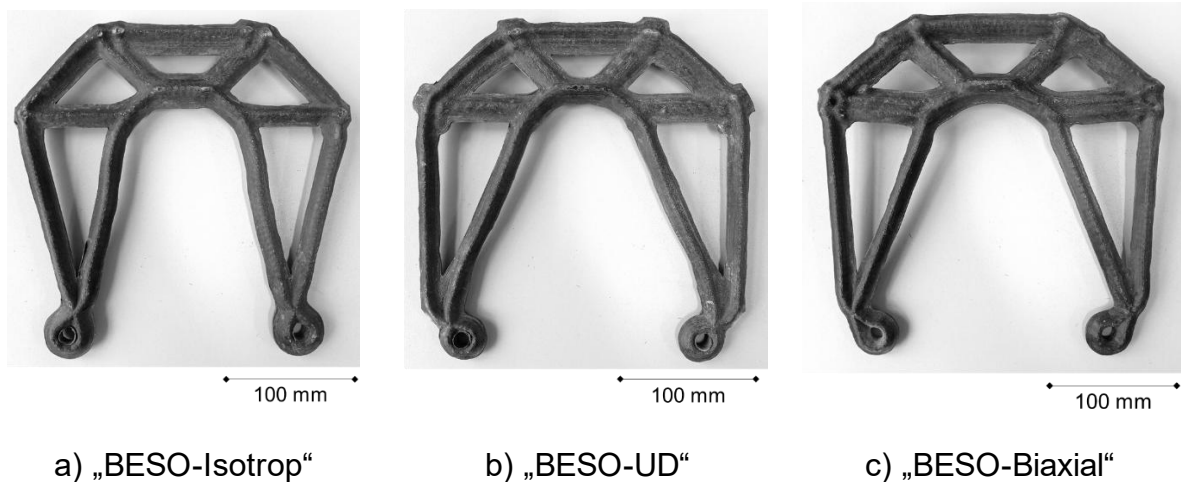


Abbildung 5.13: Brake Booster zur Untersuchung des Einflusses des Materialmodells in der Topologieoptimierung

Für jede Strukturvariante werden drei Strukturen hergestellt und getestet. Das Vorgehen bzgl. der mechanischen Prüfung der Brake Booster erfolgt entsprechend Abschnitt 5.1.

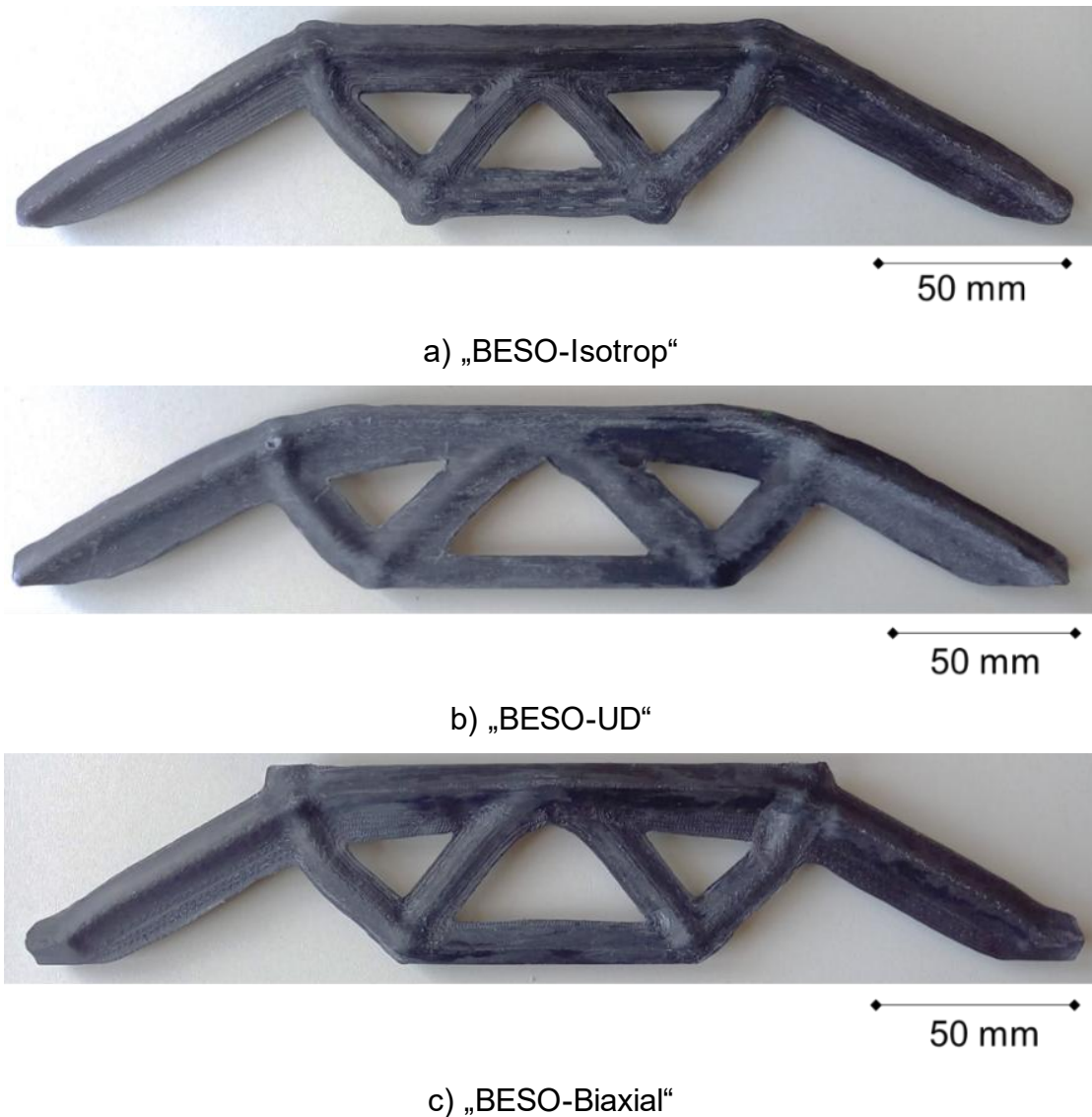


Abbildung 5.14: Brückenstrukturen zur Untersuchung des Einflusses des Materialmodells in der Topologieoptimierung

Der Prüfaufbau für die Brückenstrukturen ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Vor der Prüfung werden die auf den unteren beiden Auflagern sitzenden Flächen der Brückenstrukturen plan geschliffen. Auf diese Auflageflächen werden anschließend Aluminium-Plättchen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 2 mm aufgeklebt, um durch eine Vergrößerung der Auflagefläche einem Verkippen der Strukturen bei der Prüfung entgegenzuwirken. Die Masse der Prüflinge wurde vor dem Bekleben ermittelt, um das Gewicht der Aluminium-Plättchen nicht mitzumessen.

Wie in den vorherigen Abschnitten wird ebenfalls ein Vergleich mit FE-Simulationen der Strukturen durchgeführt. Die Ergebnisse der mechanischen Prüfungen und FE-Berechnungen sind in Tabelle 5.6 und Tabelle 5.7 zusammengefasst.

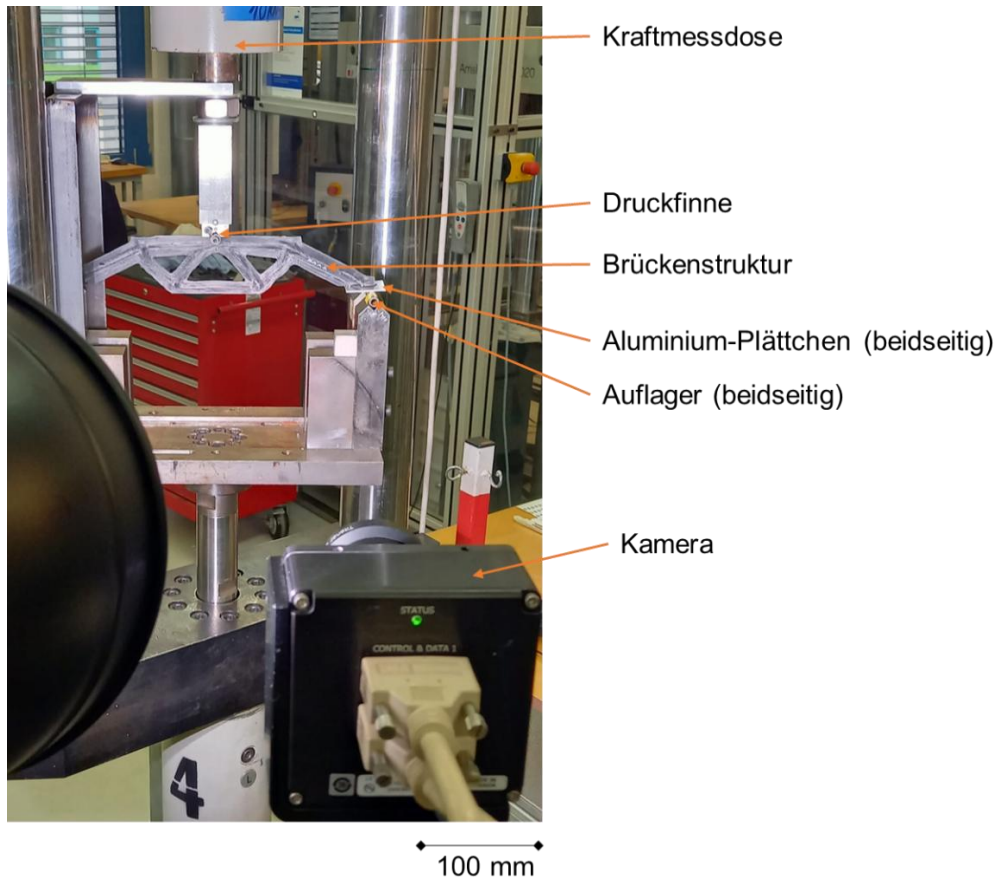


Abbildung 5.15: Aufbau für die mechanische Prüfung der Brückenstrukturen

Tabelle 5.6: Ergebnisse für die Brake Booster mit unterschiedlichen Ansätzen zur Materialmodellierung innerhalb der Topologieoptimierung

Brake Booster Variante		Masse in g	Struktursteifigkeit in N/mm	Massespezifische Struktursteifigkeit in N/(mm·g)
BESO-Isotrop	Versuch	284,0 ± 29,4	619,3 ± 14,9	2,20 ± 0,25
	Simulation	266,2	612,8	2,30
BESO-UD	Versuch	246,0 ± 2,6	681,9 ± 16,8	2,77 ± 0,08
	Simulation	248,7	645,7	2,60
BESO-Biaxial	Versuch	304,1 ± 3,2	709,1 ± 18,3	2,33 ± 0,08
	Simulation	323,3	675,6	2,09

Bei den hergestellten Brake Boostern weist die biaxiale Variante mit 304 ± 3 g das höchste Gewicht auf. Die mit UD-Materialmodell optimierte Variante ist hingegen mit einem mittleren Gewicht von 246 ± 3 g am leichtesten. Die Simulationsmodelle zeigen bei den Brake Boostern die gleichen Tendenzen bezüglich des Gewichts. Die maximale Abweichung zwischen jeweiligem Brake-Booster-Modell und mittlerem Gewicht der betrachteten Variante liegt sowohl für die isotrop wie auch für die biaxial optimierte Variante bei ca. 6 %.

Tabelle 5.7: Ergebnisse für die Brückenstrukturen mit unterschiedlichen Ansätzen zur Materialmodellierung innerhalb der Topologieoptimierung

Brückenstruktur Variante		Masse in g	Struktursteifigkeit in N/mm	Massespezifische Struktursteifigkeit in N/(mm·g)
BESO-Isotrop	Versuch	73,5 ± 1,0	707,7 ± 18,9	9,6 ± 0,2
	Simulation	76,3	652,6	8,6
BESO-UD	Versuch	69,5 ± 3,0	1120,7 ± 111,0	16,1 ± 1,2
	Simulation	70,1	731,3	10,4
BESO-Biaxial	Versuch	72,9 ± 1,4	920,5 ± 103,2	12,6 ± 1,3
	Simulation	80,4	820,3	10,2

Die hergestellten Brückenstrukturen liegen alle im Bereich zwischen 69 g und 74 g. Bei den Modellen für die Brückenstrukturen ist die biaxiale Variante mit einem Gewicht von 80 g am schwersten, da hier auch die meisten Faserbündel abgelegt werden. Bei dieser Variante beträgt jedoch die Abweichung zum mittleren, gemessenen Proben-gewicht 10 %. Für die beiden übrigen Varianten ist die Abweichung der Modelle im Hinblick auf das Gewicht < 5 %.

Bei beiden Strukturen (Brake Booster und Brückenstruktur) wird das Struktur-gewicht durch die Modelle in den meisten Fällen geringfügig überschätzt. Dies kann auf systematische Fehler wie z. B. eine Abweichung der tatsächlichen Dichten gegenüber den anhand der Datenblätter für Fasern und Harz über Mischungsregeln berechneten Dichten des Verbunds, die zur Bestimmung der Modellmassen verwendet werden, hindeuten.

Die biaxiale Brake-Booster-Variante mit dem höchsten Gewicht zeigt gleichzeitig die höchste Struktursteifigkeit (709 ± 18 N/mm). Diese ist beim isotrop optimierten Brake Booster am geringsten (619 ± 15 N/mm). Wie beim Gewicht zeigt sich auch bei der Steifigkeit in der Simulation die gleiche Tendenz wie im Experiment. Die Abweichung zwischen in der Simulation ermittelten Steifigkeiten von den Mittelwerten der Versuche liegt dabei für alle drei Brake Booster Varianten unterhalb von 6 % und ist somit hinreichend genau (Zielsetzung ist eine Abweichung < 10 %). Die errechneten Steifigkeiten sind bei allen Modellen niedriger, als die tatsächlich gemessenen. Dies kann darauf hindeuten, dass die Auslenkung der Fasern in Dickenrichtung in der Realität nicht so stark ausgeprägt ist, d.h. durch Verschiebungen von Faserbündeln bei der Konsolidierung werden die Fasern möglicherweise weniger stark in Dickenrichtung ausgelenkt als dies in den Modellen angenommen wird.

Bei den Brückenstrukturen ist die mittlere Steifigkeit für die UD-Variante (1120 ± 111 N/mm) am höchsten. Auf sie folgt im Hinblick auf die Steifigkeit die biaxiale Variante (921 ± 103 N/mm). Bei beiden Varianten ist die Standardabweichung der Steifigkeiten mit etwa 10-11 % deutlich höher als bei den Brake Boostern. Sowohl im Experiment, wie auch in der Simulation ist die Steifigkeit für die isotrope Variante am niedrigsten. Die in der Simulation ermittelte Steifigkeit der isotropen Variante weicht um -8 % gegenüber dem Mittelwert aus den Versuchen ab. Für die biaxiale Variante liegt das Simulationsergebnis mit einer Abweichung von -11 % gegenüber dem experimentellen Mittelwert noch im Bereich der Standardabweichung der Versuche. Für die UD-Variante hingegen weicht die Simulation mit -35 % deutlich von den experimentell ermittelten Werten ab.

Bei beiden Strukturen (Brake Booster und Brückenstrukturen) wird die Steifigkeit in allen Berechnungen unterschätzt, sodass sehr wahrscheinlich eine systematische Abweichung vorliegt. Dies kann daran liegen, dass das verwendete Materialmodell etwas zu konservativ ist.

Speziell die Prüfungen der Brückenstrukturen im Dreipunkt-Biegeversuch unterliegen einigen Einflussfaktoren, die möglicherweise in den Modellen nicht genau abgebildet werden. Dies legen auch die im Vergleich zu den Brake Boostern höheren Standardabweichungen der experimentell ermittelten Steifigkeiten nahe. Zu den Einflussfaktoren gehören z. B. das Planschleifen der Auflageflächen sowie deren Bekleben mit den Aluminiumplättchen, der Reibungskoeffizient zwischen den Aluminium-Plättchen und den Auflagern, das Ausrichten der Strukturen auf den Auflagern, die Ausrichtung der Auflager gegenüber der Druckfinne sowie ein mögliches Verkippen der Strukturen oder der Druckfinne selbst.

Bei den Brake Boostern, deren Prüfungen insgesamt weniger Unsicherheiten unterliegen, ist die Abweichung der Steifigkeiten in der Simulation gegenüber den Experimenten im Bereich von -1 % bis -5 % zufriedenstellend. Unter Berücksichtigung des wahrscheinlichen systematischen Fehlers bei der Materialmodellierung und der zusätzlichen Einflüsse in der Dreipunkt-Biegeprüfung kann auch die Abweichung bei den isotropen und biaxialen Brückenstrukturvarianten mit -8 % und -11 % als ausreichend bewertet werden, sodass lediglich das Ergebnis bei der UD-Brückenstruktur einen Ausreißer darstellt.

Bei den Brake Boostern ist die massespezifische Struktursteifigkeit im Fall des UD-Materialmodells mit $2,77 \pm 0,08 \text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{g})$ am höchsten. Im Fall des biaxialen Materialmodells und im Fall der isotropen Topologieoptimierung fällt sie um ca. 16 % bzw. 21 % geringer aus. Insbesondere für die beiden anisotropen Varianten sind sich dabei die Topologieoptimierungsergebnisse bzgl. ihrer Gestalt sehr ähnlich (vgl. Abbildung 5.11). Es wird daher geschlussfolgert, dass die erstellten Pfade – insbesondere mit einer nachfolgenden Optimierung der Faserbündelanzahlen und aufgrund der pfadabhängigen Einflüsse bei der Fertigung – einen größeren Einfluss auf die Struktureigenschaften ausüben als die Wahl des Materialmodells in der Topologieoptimierung.

Auch bei den Brückenstrukturen weist die Variante mit UD-Materialmodell die höchste massebezogene Struktursteifigkeit auf ($16 \pm 1 \text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{g})$). Auch hier ist sie bei der isotrop topologisch optimierten Variante am geringsten (Isotrop: -40 % gegenüber UD-Variante; Biaxial: -22 % gegenüber UD-Variante). Optisch sind die Topologieoptimierungsergebnisse und die erstellten Ablagepfade für alle drei Varianten sehr ähnlich. Tendenziell weist die UD-Variante bei den Pfaden C und D die geringste Krümmung auf (vgl. Abbildung 5.12 und Abbildung 5.14). Weiterhin ist dies auch die Variante mit der geringsten Anzahl an abgelegten Rovings und somit mit dem geringsten Gewicht. Dies bestärkt die initiale Schlussfolgerung bei den Brake Boostern, dass weniger die Wahl der Topologieoptimierung, sondern viel mehr die Gestaltung der Ablagepfade und das hierauf basierende Ergebnis der numerischen Optimierung der Faserbündelanzahlen je Ablagepfad eine entscheidende Rolle auf die späteren Bauteileigenschaften ausüben.

Dennoch liefert bei den beiden betrachteten Strukturen eine anisotrope Topologieoptimierung gegenüber der isotropen Topologieoptimierung bessere Ergebnisse. Gegenüber einem unidirektionalen Materialmodell bietet die Berücksichtigung mehrerer Faserwinkel in der Topologieoptimierung im Hinblick auf das später hergestellte Bauteil allerdings keine entscheidenden Vorteile. Somit kann stattdessen eine UD-Topologieoptimierung eingesetzt werden.

5.4 Vergleich mit Referenz-Strukturen

Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Brake Booster werden mit bereits in anderen Arbeiten hergestellten und geprüften Brake-Booster-Varianten verglichen. Da die Auslegung und Herstellung in der vorliegenden Arbeit an einem um Faktor 2 vergrößerten

Designraum durchgeführt wurde (Abschnitt 5), ist ein direkter Vergleich der ermittelten Werte nicht sinnvoll. Daher werden die erstellten Modelle des Brake Boosters um Faktor 2 zurück auf die Originalgröße der Struktur verkleinert und zum Vergleich mit Referenz-Strukturen genutzt. Dies erscheint zulässig, da im Rahmen der Arbeit bereits eine hohe Übereinstimmung zwischen den Simulationsmodellen der Brake Booster und den zugehörigen experimentellen Werten nachgewiesen werden konnte.

In Tabelle 5.8 sind die Werte verschiedener, topologisch optimierter FKV-Brake-Booster aus der Literatur [1,54] und die Simulationsergebnisse der auf die gleiche Größe skalierten, im Rahmen der Arbeit entwickelten Modelle zusammengefasst.

Tabelle 5.8: Vergleich unterschiedlicher Brake-Booster-Varianten

Brake Booster Variante	Masse in g	Massebezogene Struktursteifigkeit in N/(mm·g)
TFP _{Basismaterial: Papier} [1]	19,8	10,1
TFP _{Basismaterial: Kohlenstofffasergewebe} [1]	20,6	11,5
Wickeln [54]	3,5 ± 0,1	5,7 ± 0,5
Hybrid: Wickeln und Spritzguss [54]	14,9 ± 0,1	5,4 ± 0,4
BESO-Isotrop (Simulation)	33,3	9,2
BESO-UD (Simulation)	31,1	10,4
BESO-Biaxial (Simulation)	40,4	8,3

Zunächst kann festgehalten werden, dass die gewickelten Varianten bzgl. der massebezogenen Struktursteifigkeit nicht an die Werte, die beim TFP und auch in den Modellen beim Nassfaserlegen erreicht werden, heranreichen. Allerdings liegt der Fokus der Arbeit von BAUER [54] auf der Prozessentwicklung und nicht auf der Auslegung im Hinblick auf eine maximale massebezogene Struktursteifigkeit.

Erwartungsgemäß bleibt bei einer Skalierung der im Rahmen der Arbeit entwickelten Modelle das Ergebnis, dass die UD-Variante die höchste massespezifische Steifigkeit erreicht, bestehen. Ihre massebezogene Steifigkeit liegt zwischen den beiden mittels TFP-Verfahren hergestellten Referenz-Strukturen. Sie ist somit sogar um 3 % höher als die Steifigkeit der TFP-Variante mit einem Papier als Basismaterial für den Stickprozess. Mögliche Unterschiede bestehen bzgl. der verfahrensspezifischen Materialkennwerte und bzgl. des lokalen Faservolumenanteils sowie hinsichtlich der bei beiden Verfahren unterschiedlichen Einflüssen von Defekten bei der Radienablage. Zusätzlich unterscheiden sich die beiden Strukturen auch leicht im Hinblick auf den verwendeten Designraum.

Die TFP-Variante mit einem Kohlenstofffasergewebe als Basismaterial für den Stickprozess weist die höchste massespezifische Steifigkeit aller Varianten auf. Sie ist um etwa 11 % höher als bei der BESO-UD Struktur. SPICKENHEUER [1] gibt an, dass das Kohlenstofffasergewebe als Basismaterial die intralaminare Schubsteifigkeit der bei der Papier-Variante ausschließlich über eine UD-Orientierung verfügenden Streben erhöht, was sich überproportional positiv auf die Struktursteifigkeit auswirkt. Auch beim Nassfaserlegen wäre es grundsätzlich denkbar, eine solche zusätzliche Verstärkung im Ablageprozess einzubringen, um den gleichen Effekt zu erzielen.

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass mit dem Nassfaserlegen und mit dem verfolgten Auslegungsansatz unter Verwendung einer zweidimensionalen, anisotropen UD-Topologieoptimierung Strukturen mit Eigenschaften realisierbar sind, die an jene von topologisch optimierten TFP-Strukturen heranreichen.

6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zur Auslegung topologisch optimierter, mittels Nassfaserlegen hergestellter FKV-Strukturen zu leisten. Das Ziel des Auslegungsansatzes ist es dabei vor allem, die Entwicklung von Strukturen mit einer möglichst hohen massebezogenen Struktursteifigkeit zu ermöglichen.

Als grundlegende Voraussetzung für die Auslegung wird der Ablageprozess an einer Laboranlage für das Nassfaserlegen untersucht. Zunächst werden mechanische Prüfungen an gerade abgelegten Probekörpern durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei geraden Probekörpern der mit dem Nassfaserlegen erreichbare faserparallele Elastizitätsmodul vergleichbar zu mittels TFP-Verfahren hergestellten Probekörpern ist. Er liegt um 7 % unterhalb des mittels Mischungsregel berechneten Elastizitätsmoduls.

Zusätzlich werden gekrümmt abgelegte Probekörper auf ihre Defekte und mechanische Eigenschaften untersucht. Es zeigt sich eine Zunahme von Ablagedefekten mit kleiner werdendem Ablageradius. Für Radien von 50 mm zeigen sich Einbußen bzgl. der Steifigkeit von etwa 15 %. Kleinere Radien sind zumindest an der Laboranlage nur mit deutlich reduzierter Ablagegenauigkeit herstellbar. Somit ist eine Weiterentwicklung des Verfahrens sinnvoll, um konkurrenzfähiger gegenüber Ablageprozessen wie beispielsweise dem TFP-Verfahren oder auch dem 3D-Druck mit kontinuierlicher Faserverstärkung zu werden.

Der im Rahmen der Arbeit verfolgte Auslegungsansatz umfasst die Durchführung einer Topologieoptimierung, das Ableiten von Ablagepfaden aus deren Ergebnis, eine numerische Optimierung der Anzahl je Ablagepfad abzulegender Faserbündel, die Definition des Lagenaufbaus, die Designvalidierung mittels FEA, das Design und die Herstellung von Formwerkzeugen, die Erzeugung eines G-Codes zur Fertigung sowie die Bauteilherstellung mittels Nassfaserlegen und die experimentelle Bauteilprüfung. Im Rahmen der Arbeit wird ein anisotroper Topologieoptimierungsansatz, der die Berücksichtigung zweier Faserorientierungen im Bereich mehrachsig belasteter Bauteilbereiche ermöglicht, entwickelt und anhand numerischer Studien untersucht. Dieser zeigt zunächst qualitativ eine fertigungstechnisch vorteilhaftere Faserorientierung im Bereich von Kreuzungspunkten. Bezüglich der Pfaderstellung wird ein semi-automatisierter Prozess entwickelt, der auf der Integration der Orientierungssensoren mithilfe einer

einfachen Punktsteigungsformel basiert. Neuartig hierbei ist, dass zunächst Ablagepfade mit sehr hoher Dichte erzeugt werden, aus denen zu einem späteren Zeitpunkt je nach gewünschtem Halbzeug bzw. gewünschter Ablagebreite Pfade mit entsprechenden Abständen extrahiert werden können. Dadurch ist bei einer Änderung der Ablagebreite keine erneute Pfadberechnung vonnöten. Zusätzlich kann über eine Prüfung der Winkeländerung zwischen einzelnen Pfadsegmenten die zulässige Krümmung der Ablagepfade eingestellt werden. Für die Modellierung nassfasergelegter Strukturen wird auf einen für das TFP-Verfahren entwickelten Ansatz [1] zur automatisierten Modellerzeugung auf Basis von Ablagepfaden zurückgegriffen. Mithilfe von Schliffbildern wird dieser Modellierungsansatz auf das Nassfaserlegen angepasst und implementiert. Hiermit kann auch die Anzahl je Ablagepfad abzulegender Faserbündel und somit die lokalen Bauteilquerschnitte numerisch optimiert werden. Anhand numerischer Studien von Kreuzungspunkten mit unterschiedlichen Lagenaufbauten wird festgestellt, dass ein alternierender Lagenaufbau einen guten Kompromiss bzgl. der Steifigkeit in beiden Richtungen eines Kreuzungspunkts darstellt.

Im letzten Abschnitt der Arbeit wird der Auslegungsansatz anhand verschiedener mittels Nassfaserlegen hergestellten Fahrrad-Brake-Booster-Varianten sowie an einer Struktur unter Dreipunkt-Biegebelastung („Brückenstruktur“) untersucht. Anhand des Brake Boosters wird gezeigt, dass die numerische Optimierung der Faserbündelanzahlen bei dieser Struktur eine Steigerung der massespezifischen Struktursteifigkeit gegenüber dem initialen Entwurf von ca. 16 % ermöglicht.

Für eine identische Brake-Booster-Variante werden zudem zwei unterschiedliche Lagenaufbauten untersucht. Bei diesen ist kein signifikanter Unterschied ($< 1\%$) bezüglich der Struktursteifigkeit zu beobachten. Die Ablagereihenfolge scheint bei topologisch optimierten, skelettartigen Strukturen somit einen nachrangigen Einfluss auf die Struktursteifigkeit auszuüben.

Eine Untersuchung von mit isotropem sowie mit anisotropen Materialmodellen mit unidirektionalen und biaxialen Faserorientierungen topologisch optimierten Brake Boostern und Brückenstrukturen zeigt, dass – unter Berücksichtigung der gesamten Auslegungskette – die Wahl des Materialmodells in der Topologieoptimierung eher einen untergeordneten Einfluss auf die spätere Struktursteifigkeit ausübt. Entscheidender sind vor allem die erzeugten Ablagepfade, bei denen kleine Variationen die Struk-

tursteifigkeit deutlich beeinflussen können, und die auf den Pfaden basierende Optimierung der Faserbündelanzahlen. Für die beiden betrachteten Bauteile weisen die mit UD-Faserorientierungen topologisch optimierten Varianten die höchsten masse-spezifischen Struktursteifigkeiten auf ($2,8 \pm 0,1 \text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{g})$ beim Brake Booster; $16,1 \pm 1,2 \text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{g})$ bei der Brückenstruktur). Zudem ist bei beiden Bauteilen die massebezogene Struktursteifigkeit bei den isotrop topologisch optimierten Varianten am geringsten ($2,2 \pm 0,3 \text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{g})$ beim Brake Booster; $9,6 \pm 0,2 \text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{g})$ bei der Brückenstruktur). Hieraus wird gefolgert, dass eine anisotrope Topologieoptimierung zu bevorzugen ist. Die Berücksichtigung biaxialer Faserorientierungen bietet gegenüber der UD-Topologieoptimierung jedoch keine Vorteile, Letztere ist also ausreichend.

Die durchgeführten Simulationen für die unterschiedlichen Brake-Booster-Varianten weisen allesamt Abweichungen bzgl. des Strukturgewichts von unter 7 % sowie Abweichungen bzgl. der Struktursteifigkeit von unter 6 % auf. Die Abweichungen liegen somit im gleichen Bereich wie beim TFP-Verfahren [1].

Bei den Brückenstrukturen betragen die Abweichungen der Simulationsergebnisse gegenüber den experimentell ermittelten Steifigkeiten bei der isotropen und biaxialen Variante -8 % und -11 %, wobei Letztere sogar im Bereich der Standardabweichung liegt. Einzig bei der UD-Variante beträgt die Abweichung -35 %. Dies wird bei den Brückenstrukturen, bei denen die Standardabweichung im Versuch höher ist als bei den Brake Boostern, unter anderem auch auf experimentelle Faktoren, die in den Modellen nicht ausreichend genau abgebildet werden können, zurückgeführt. Da bei allen geprüften Bauteilen die Steifigkeit in der Simulation kleiner ist als im Versuch, werden zudem die Materialkennwerte wahrscheinlich systematisch etwas unterschätzt.

Da mit Ausnahme der UD-Brückenstruktur bei allen anderen Bauteilvarianten die Abweichung der Simulationsergebnisse bzgl. der mittleren Struktursteifigkeit entweder < 10 % ist oder innerhalb der Standardabweichung liegt, wird gefolgert, dass der für das TFP-Verfahren entwickelte Modellierungsansatz generell auch für das Nassfasernlegen geeignet ist.

Neben einer Weiterentwicklung der Anlagentechnik für eine verbesserte Radianablage und Ablagegenauigkeit legen die Ergebnisse der Studien auch nahe, dass für nassfasergelegte Strukturen auch die Entwicklung von Ansätzen, die eine direkte Berücksichtigung von Ablagepfaden innerhalb der Topologieoptimierung erlauben, vielversprechende Ergebnisse liefern könnten.

7 Literatur

- [1] Spickenheuer, A.: Zur fertigungsgerechten Auslegung von Faser-Kunststoff-Verbundbauteilen für den extremen Leichtbau auf Basis des variabelaxialen Fadenablageverfahrens Tailored Fiber Placement. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation, 2014
- [2] Völkl, H.; Klein, D.; Franz, M.; Wartzack, S.: An efficient bionic topology optimization method for transversely isotropic materials. *Composite Structures*, Vol. 204, pp. 359-367, 2018
- [3] Safonov, A. A.: 3D topology optimization of continuous fiber-reinforced structures via natural evolution method. *Composite Structures*, Vol. 215, pp. 289-297, 2019
- [4] Mehl, K.; Schmeer, S.; Motsch-Eichmann, N.; Bauer, P.; Müller, I.; Hausmann, J.: Structural Optimization of Locally Continuous Fiber-Reinforcements for Short Fiber-Reinforced Plastics. *Journal of Composites Science*, Vol. 5, 118, 2021
- [5] Duan, Z.; Yan, J.; Zhao, G.: Integrated optimization of the material and structure of composites based on the Heaviside penalization of discrete material model. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 51, pp. 721-732, 2015
- [6] Nomura, T.; Dede, E. M.; Lee, J.; Yamasaki, S.; Matsumori, T.; Kawamoto, A.; Kikuchi, N.: General topology optimization method with continuous and discrete orientation design using isoparametric projection. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 101, pp. 571-605, 2015
- [7] Jantos, D. R.; Hackl, K.; Junker, P.: Topology optimization with anisotropic materials including a filter to smooth fiber pathways. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 61, pp. 2135-2154, 2020
- [8] Jiang, D.; Høglund, R.; Smith, D. E.: Continuous Fiber Angle Topology Optimization for Polymer Composite Deposition Additive Manufacturing Applications. *Fibers*, Vol. 7, 14, 2019
- [9] Desai, A.; Mogra, M.; Sridhara, S.; Kumar, K.; Sesha, G.; Ananthasuresh, G. K.: Topological-derivative-based design of stiff fiber-reinforced structures with optimally oriented continuous fibers. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 63, pp. 703-720, 2021
- [10] Kubalak, J. R.; Wicks, A. L.; Williams, C. B.: Deposition path planning for material extrusion using specified orientation fields. *Procedia Manufacturing*, Vol. 34, pp. 754-763, 2019

- [11] Moldenhauer, H.: Die orthotrope Wärmeleitung als numerischer Integrator allgemeiner Richtungsfelder mit Anwendung zur optimalen Faserplatzierung und Kraftflussvisualisierung. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2016
- [12] Moldenhauer, H.: Berechnung variabler Faserverläufe zur Optimierung von Compositestrukturen. *Lightweight Design*, Vol. 4, pp. 51-56, 2011
- [13] Moldenhauer, H.: Integration of Direction Fields with Standard Options in Finite Element Programs. *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 23, 24, 2018
- [14] Papapetrou, V. S.; Patel, C.; Tamijani, A. Y.: Stiffness-based optimization framework for the topology and fiber paths of continuous fiber composites. *Composites Part B*, Vol. 183, 107681, 2020
- [15] Liu, J.; Yu, H.: Concurrent deposition path planning and structural topology optimization for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, pp. 930-942, 2017
- [16] Liu, J.; Ma, Y.; Qureshi, A. J.; Ahmad, R.: Light-weight shape and topology optimization with hybrid deposition path planning for FDM parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97, pp. 1123-1135, 2018
- [17] Wang, T.; Li, N.; Link, G.; Jelonnek, J.; Fleischer, J.; Dittus, J.; Kupzik, D.: Load-dependent path planning method for 3D printing of continuous fiber reinforced plastics. *Composites Part A*, Vol. 140, 106181, 2021
- [18] Boddeti, N.; Tang, Y.; Maute, K.; Rosen, D. W.; Dunn, M. L.: Optimal design and manufacture of variable stiffness laminated continuous fiber reinforced composites. *Scientific Reports*, Vol. 10, 16507, 2020
- [19] Huang, Y.; Tian, X.; Zheng, Z.; Li, D.; Malakhov, A. V.; Polilov, A. N.: Multiscale concurrent design and 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites with optimized fiber trajectory and topological structure. *Composite Structures*, Vol. 285, 115241, 2022
- [20] Almeida Jr., J. H. S.; Bittrich, L.; Nomura, T.; Spickenheuer, A.: Cross-section optimization of topologically-optimized variable-axial anisotropic composite structures. *Composite Structures*, Vol. 225, 11150, 2019
- [21] May, D.: Integrierte Produktentwicklung mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin: Springer Vieweg, 2020, ISBN 978-3-662-60286-7
- [22] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, ISBN 978-3-540-72189-5
- [23] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe. 2. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2014, ISBN 978-3-446-43697-8

- [24] Miaris, A.: Experimental and Simulative Analysis of the Impregnation Mechanics of Endless Fiber Rovings. IVW - Schriftenreihe Band 102. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2012
- [25] May, D.; Domm, M.; Mitschang, P.: Wet Fiber Placement: A novel manufacturing technology for continuous fiber reinforced polymer composites. *Journal of Composite Materials*, Vol. 53(4), pp. 521-533, 2019
- [26] May, D; Arrabiyeh, P.; Dlugaj, A.; Eckrich, M.: Topology-Optimized Structural Composites through Wet Fiber Placement. In: 30 Jahre – IVW Kolloquium, Kaiserslautern, 08.-09.09.2021
- [27] Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A.; May, D.: Placement defects in thermoset-impregnated rovings deposited along curved paths. *Polymer Composites*, Vol. 44, pp. 3634-3645, 2023
- [28] Richter, E.; Spickenheuer, A.; Bittrich, L.; Uhlig, K.; Heinrich, G.: Applications of Variable-Axial Fibre Designs in Lightweight Fibre Reinforced Polymers. *Materials Science Forum*, Vol. 825-826, pp. 757-762, 2015
- [29] Iwano, Y.; Wada, A.; Takayama, R.; Tanaka, M.; Zhou, Y.; Ohashi, I.; Yoshikawa, K.; Kawamoto, A.; Nomura, T.: Design and fabrication of an automotive frame model leveraging anisotropic topology optimization and tailored fiber placement. *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 11, Issue 2, No. 24-00008, 2024
- [30] Spickenheuer, A.; Fittkau, N.; Konze, S.; Richter, E.; Stommel, M.: Application of the Tailored Fiber Placement Process in Orthopedic Technology. Special edition from: *ORTHOPÄDIE TECHNIK* 04/22, pp. 41-46, 2022
- [31] Uhlig, K.: Beitrag zur Anwendung der Tailored Fiber Placement Technologie am Beispiel von Rotoren aus kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz für den Einsatz in Turbomolekularpumpen. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation, 2017
- [32] Carosella, S.; Hügler, S.; Helber, F.; Middendorf, P.: A short review on recent advances in automated fiber placement and filament winding technologies. *Composites Part B*, Vol. 287, 111843, 2024
- [33] Domm, M.: Additive Fertigung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste mittels 3D-Extrusion. IVW - Schriftenreihe Band 138. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2020
- [34] Grieder, S.; Zhilyaev, I.; Küng, M.; Brauner, C.; Akermann, M.; Bosshard, J.; Inderkum, P.; Francisco, J.; Willemin, Y.; Eichenhofer, M.: Consolidation of Additive Manufactured Continuous Carbon Fiber Reinforced Polyamide 12 Composites and the Development of Process-Related Numerical Simulation Methods. *Polymers*, Vol. 14(16), 3429, 2022

- [35] Yang, Z.; Fu, K.; Zhang, Z.; Zhang, J.; Li, Y.: Topology optimization of 3D-printed continuous fiber-reinforced composites considering manufacturability. *Composites Science and Technology*, Vol. 230, 109727, 2022
- [36] Chen, Y.; Ye, L.: Topological design for 3D-printing of carbon fibre reinforced composite structural parts. *Composites Science and Technology*, Vol. 204, 108644, 2021
- [37] Fernandes, R. R.; van de Werken, N.; Koirala, P.; Yap, T.; Tamijani, A. Y.; Tehrani, M.: Experimental investigation of additively manufactured continuous fiber reinforced composite parts with optimized topology and fiber paths. *Additive Manufacturing*, Vol. 44, 102056, 2021
- [38] Stumpf, X. S.: Additive Funktionalisierung – Kombination statt Substitution. In: *Forum Additiv 2023 von Niedersachsen Additiv*, Hannover, 18.09.2023
- [39] Nehls, G.: Arris Composites, Airbus collaborate on composites research for lightweight cabin brackets. *CompositesWorld*: <https://www.compositesworld.com/news/arris-composites-airbus-collaborate-on-composites-research-for-lightweighting-cabin-brackets>, 2021 (Zugriffsdatum: 28.02.2025)
- [40] Nehls, G.: Arris wins GOOD DESIGN award for optimized composite structures. *CompositesWorld*: <https://www.compositesworld.com/news/arris-wins-good-design-award-for-optimized-composite-structures>, 2021 (Zugriffsdatum: 28.02.2025)
- [41] Mason, H.: Additive Molding technology revolutionizes autonomous drone design. *CompositesWorld*: <https://www.compositesworld.com/articles/additive-molding-technology-revolutionizes-autonomous-drone-design>, 2021 (Zugriffsdatum: 28.02.2025)
- [42] Vinoski, J: At The Boston Marathon, The Arris-Brooks Partnership Will Test A New Cutting-Edge Shoe. *Forbes*: <https://www.forbes.com/sites/jimvinoski/2023/04/17/at-the-boston-marathon-the-arris-brooks-partnership-will-test-a-new-cutting-edge-shoe/>, 2023 (Zugriffsdatum: 28.02.2025)
- [43] Nehls, G.: Arris co-founder develops composite rock climbing gear. *CompositesWorld*: <https://www.compositesworld.com/news/arris-co-founder-develops-composite-rock-climbing-gear>, 2024 (Zugriffsdatum: 28.02.2025)
- [44] Stelmaszek, M.; Zdroik, P.; Porter-Sobieraj, J.: Automated 3D-printing path generation for parts with holes using continuous fibre filament. *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 19, Issue 1, e2402871, 2024
- [45] Gardiner, G.: Diehl Aviation, 9T Labs present Eco Bracket. *CompositesWorld*: <https://www.compositesworld.com/news/diehl-aviation-9t-labs-present-eco-bracket>, 2024 (Zugriffsdatum: 28.02.2025)

- [46] Belhaj, M.; Hojjati, M.: Wrinkle formation during steering in automated fiber placement: Modeling and experimental verification. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 37(6), pp. 396-409, 2018
- [47] Croft, K.; Lessard, L.; Pasini, D.; Hojjati, M.; Chen, J.; Yousefpour, A.: Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, Issue 5, pp. 484-491, 2011
- [48] Marsh, G.: Automating aerospace composites production with fibre placement. *Reinforced Plastics*, Vol. 55, Issue 3, pp. 32-37, 2011
- [49] Brasington, A.; Sacco, C.; Halbritter, J.; Wehbe, R.; Harik, R.: Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward. *Composites Part C: Open Access*, Vol. 6, 100182, 2021
- [50] Zhao, C.; Donough, M. J.; Prusty, B. G.; Xiao, J.: Influences of ply waviness and discontinuity on automated fiber placement manufactured grid stiffeners. *Composite Structures*, Vol. 256, 113106, 2021
- [51] Schmidt, R.; Zacherl, L.; Shadmehri, F.; Rother, K.: Grid stiffened panel made by Automated Fiber Placement (AFP) in-situ consolidation of thermoplastic composites. *Manufacturing Letter*, Vol. 40, pp. 136-139, 2024
- [52] Huybrechts, S. M.; Meink, T. E.; Wegner, P. M.; Ganley, J. M.: Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures. *Composites: Part A*, Vol. 33, pp. 155-161, 2002
- [53] Sorrentino, L.; Marchetti, M.; Bellini, C.; Delfini, A.; Del Sette, F.: Manufacture of high performance isogrid structure by Robotic Filament Winding. *Composite Structures*, Vol. 164, pp. 43-50, 2017
- [54] Bauer, P.: Lastpfadoptimierte Strukturbauteile aus duroplastischen Wickelstrukturen mit thermoplastischem Spritzguss. Kaiserslautern, Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Dissertation, 2023
- [55] Arrabiyeh, P. A.; May, D.; Eckrich, M.; Dlugaj, A. M.: An Overview on Current Technologies for Continuous Thermoset Impregnation and Processing of Rovings. *Polymer Composites*, Vol. 42, pp. 5630-5655, 2021
- [56] Sorrentino, L.; Marchetti, M.; Bellini, C.; Delfini, A.; Albano, M.: Design and manufacturing of an isogrid structure in composite material: Numerical and experimental results. *Composite Structures*, Vol. 143, pp. 189-201, 2016
- [57] Stauß, O.: Fachwerk aus der Wickelmaschine. *Industrieanzeiger*: <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/entwicklung/fachwerk-aus-der-wickelmaschine/>, 2014 (Zugriffsdatum 04.03.2025)

- [58] Stauß, O.: Endlos gewickelt aus Carbon. *Industrieanzeiger*: <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/entwicklung/fachwerk-aus-der-wickelmaschine/>, 2017 (Zugriffsdatum 04.03.2025)
- [59] Reichert, S.; Schwinn, T.; La Magna, R.; Waimer, F.; Knippers, J.; Menges, A.: Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles. *Computer-Aided Design*, Vol. 52, pp. 27-39, 2014
- [60] Früh, N.; Knippers, J.: Multi-stage filament winding: Integrative design and fabrication method for fibre-reinforced composite components of complex geometries. *Composite Structures*, Vol. 268, 113969, 2021
- [61] Estrada, R. D.; Kannenberg, F.; Wagner, H. J.; Yablonina, M.; Menges, A.: Spatial winding: cooperative heterogeneous multi-robot system for fibrous structures. *Construction Robotics*, Vol. 4, pp. 205-215, 2020
- [62] Bovensiepen, C.: BMW M Visionary Materials Seat wins 2024 Altair Enlighten Award in the Sustainable Process category. BMW Group, <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0444138EN/bmw-m-visionary-materials-seat-wins-2024-altair-enlighten-award-in-the-sustainable-process-category?language=en>, 2024 (Zugriffsdatum 04.03.2025)
- [63] Spickenheuer, A.; Leipprand, A.; Bittrich, L.; Uhlig, K.; Richter, E.; Heinrich, G.: Process-Dependent Material Properties for Structural Simulation of Composites Made by Tailored Fibre Placement. In: ECCM16, Sevilla (Spanien), 22.-26.06.2014
- [64] Bakhshi, N.; Hojjati, M.: An experimental and simulative study on the defects appeared during tow steering in automated fiber placement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 113, pp. 122-131, 2018
- [65] Beresheim, G.: Thermoplast-Tapelegen – Ganzheitliche Prozessanalyse und -entwicklung. IVW - Schriftenreihe Band 32. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2002
- [66] Clancy, G.; Peeters, D.; Oliveri, V.; O’Higgins, R.; Jones, D.; Weaver, P. M.: Steering of Carbon Fiber/Thermoplastic Pre-preg Tapes using Laser-Assisted Tape Placement. In: 2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Kissimmee (Florida), 08.-12.01.2018
- [67] Kim, B. C.; Potter, K.; Weaver, P. M.: Continuous tow shearing for manufacturing variable angle tow composites. *Composites: Part A*, Vol. 43, pp. 1347-1356, 2012
- [68] Bujny, M.: Level Set Topology Optimization for Crashworthiness Using Evolutionary Algorithms and Machine Learning. München, Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Dissertation, 2020

- [69] Sigmund, O.; Maute, K.: Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 48, pp. 1031-1055, 2013
- [70] Rozvany, G. I. N.: A critical review of established methods of structural topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 37, pp. 217-237, 2008
- [71] Huang, X.; Xie Y. M.: *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures*. 1. Aufl., Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2010, ISBN: 978-0-470-74653-0
- [72] Bendsøe, M. P.; Kikuchi, N.: Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 71, Issue 2, pp. 197-224, 1988
- [73] Du, Z.; Zhang, W.; Zhang, Y.; Xue, R.; Guo, X.: Structural topology optimization involving bi-modulus materials with asymmetric properties in tension and compression. *Computational Mechanics*, Vol. 63, pp. 335-363, 2019
- [74] Völkl, H.: Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 393. Erlangen: FAU University Press, 2022, ISBN: 978-3-96147-523-0
- [75] Bendsøe, M. P.: Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural optimization*, Vol. 1, pp. 193-202, 1989
- [76] Deaton, J. D.; Grandhi, R. V.: A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 49, pp. 1-38, 2014
- [77] Xie, Y. M.; Steven, G. P.: A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures*, Vol. 49, Issue 5, pp. 885-896, 1993
- [78] Querin, O. M.; Steven, G. P.; Xie, Y. M.: Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm. *Engineering Computations*, Vol. 15, No. 8, pp. 1031-1048, 1998
- [79] Yang, X. Y.; Xie, Y. M.; Steven, G. P.; Querin, O. M.: Bidirectional Evolutionary Method for Stiffness Optimization. *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 11, pp. 1483-1488, 1999
- [80] Huang, X.; Xie, Y. M.: Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method. *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 43, pp. 1039-1049, 2007
- [81] Baumgartner, A.; Harzheim, L.; Mattheck, C.: SKO (soft kill option): the biological way to find an optimum structure. *International Journal of Fatigue*, Vol. 14, Issue 6, pp. 387-393, 1992

- [82] Mattheck, C.; Baumgartner, A.; Kriechbaum, R.; Walther, F.: Computational methods for the understanding of biological optimization mechanisms. *Computational Materials Science*, Vol. 1, pp. 302-312, 1993
- [83] Cheng, G.; Pedersen, P.: On sufficiency conditions for optimal design based on extremum principles of mechanics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 45, pp. 135-150, 1997
- [84] Luo, J. H.; Gea, H. C.: Optimal orientation of orthotropic materials using an energy based method. *Structural Optimization*, Vol. 15, pp. 230-236, 1998
- [85] Stegmann, J.; Lund, E.: Discrete material optimization of general composite shell structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 62, pp. 2009-2027, 2005
- [86] Schmidt, M.-P.; Couret, L.; Gout, C.; Pedersen, C. B. W.: Structural topology optimization with smoothly varying fiber orientations. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 62, pp. 3105-3126, 2020
- [87] Kim, D.; Lee, J.; Nomura, T.; Dede, E. M.; Yoo, J.; Min, S.: Topology optimization of functionally graded anisotropic composite structures using homogenization design method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 369, 113220, 2020
- [88] Schwingel, J.; Middendorf, P.: Topological design using multivariate laminate stackings for tailored fiber placement. *Journal of Composite Materials*, Vol. 56, pp. 2047-2061, 2022
- [89] Tsai, S. W.; Pagano, N. J.: *Invariant Properties of Composite Materials*, Technical Report AFML-TR-67-349, Air Force Materials Laboratory, 1968
- [90] Lang, M. C.: *Simultaneous Structural and Material Optimization*, Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Konstruieren in Kunst- und Verbundstoffen, Dissertation, 2021
- [91] Mori, T.; Tanaka, K.: Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, Vol. 21, pp. 571-574, 1973
- [92] Michell, A. G. M.: LVIII. The limits of economy of material in frame-structures. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 8, pp. 589-597, 1904
- [93] Jobard, B.; Lefer, W.: *Creating Evenly-Spaced Streamlines of Arbitrary Density*. In: *Visualization in Scientific Computing '97*. Wien: Springer, 1997, ISBN 978-3-211-83049-9
- [94] Beyer, F. R.: *Hauptspannungstrajektorien in der numerischen Festkörpermechanik*. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2015

- [95] Wulle, F.: Untersuchung der belastungsgerechten Bahnplanung für das mehrachsige Schmelzschichtverfahren für Bauteile mit Zugspannungen. Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau Band 15. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2023
- [96] Knöppel, F.; Crane, K.; Pinkall, U.; Schröder, P.: Stripe patterns on surfaces. ACM Transactions on Graphics, Vol. 34, pp. 1-11, 2015
- [97] Döbrich, O.; Steiner, S.; Böhler, P.; Radis, R.: Planar fibre winding for topological optimized composite structures. Composites Part C: Open Access, Vol. 16, 100545, 2025
- [98] Hu, Z.; Vambol, O.: Topological Design for Robotic Filament Winding of Composite Beam Structures. In: Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022, ISBN 978-3-030-94258-8
- [99] Richter, E.; Spickenheuer, A.; Bittrich, L.; Uhlig, K.; Heinrich, G.: Mechanical Design of Intersection Points of Tailored Fiber Placement Made Carbon Fiber Reinforced Plastic Truss-Like Structures. Key Engineering Materials, Vol. 809, pp. 452-460, 2019
- [100] Minsch, N.; Müller, M.; Gereke, T.; Nocke, A.; Cherif, C.: 3D truss structures with coreless 3D filament winding technology. Journal of Composite Materials, Vol. 53, Issue 15, pp. 2077-2089, 2019
- [101] DIN EN ISO 527-5: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 5: Prüfbedingungen für unidirectional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-5:2009), DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2010
- [102] DIN EN 2850: Luft- und Raumfahrt – Unidirektionale Laminate aus Kohlenstofffasern und Reaktionsharz – Druckversuch parallel zur Faserrichtung; Deutsche und Englische Fassung EN 2850:2017, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2018
- [103] Zoltek Corporation / Toray Group: Zoltek PX35 Commercial Carbon Fiber. https://zoltek.com/wp-content/uploads/TDS_PX35_Continuous_Tow-1.pdf, 2021 (Zugriffsdatum: 03.04.2025)
- [104] Toray Composite Materials America, Inc.: T700S – Standard Modulus Carbon Fiber. <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T700S-Data-Sheet-10.24.2024.pdf>, 2024 (Zugriffsdatum: 03.04.2025)
- [105] Hexion Inc.: HEXION™ Technical Data Sheet: EPIKOTE™ Resin 0497, EPIKURE™ Curing Agent 04976, EPIKURE™ Catalyst 04976, 2017
- [106] Hexion Inc.: HEXION™ Technical Data Sheet: EPIKOTE™ Resin MGS™ RIMR 135 and EPIKURE™ Curing Agent MGS™ RIMH 134-RIMH137, 2015

- [107] DIN EN ISO 14125: Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 14125:1998 + Cor.1:2001 + Amd.1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1:2011, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2011
- [108] Zuo Z. H.; Xie, Y. M.: A simple and compact Python code for complex 3D topology optimization. *Advances in Engineering Software*, Vol. 85, pp. 1-11, 2015
- [109] Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A.; May, D.: Structural topology optimization and path planning for composites manufactured by fiber placement technologies. *Composite Structures*, Vol. 289, 115488, 2022
- [110] Sigmund, O.; Petersson, J.: Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. *Structural Optimization*, Vol. 16, pp. 68-75, 1998
- [111] Sigmund, O.: Morphology-based black and white filters for topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 33, pp. 401-424, 2007
- [112] Svanberg, K.; Svärd, H.: Density filters for topology optimization based on the Pythagorean means. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 48, pp. 859-875, 2013
- [113] Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A.; May, D.: An anisotropic topology optimization procedure for continuous fiber reinforced polymer structures with biaxial fiber layout for improved intersection point design. *Composite Structures*, Vol. 337, 118064, 2024
- [114] Klein, D.; Malezki, W.; Wartzack, S.: Introduction of a computational approach for the design of composite structures at the early embodiment design stage. In: *International Conference on Engineering Design (ICED15)*, Mailand (Italien), 27.-30.07.2015
- [115] Høglund, R.; Smith, D. E.: Continuous Fiber Angle Topology Optimization for Polymer Fused Filament Fabrication, In: *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin (Texas), 08.-10.08.2016
- [116] Puck, A.; Schürmann, H.: Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1633-1662, 2002
- [117] Thissen, C. J.: *estream2: Evenly spaced streamlines (2D)*. <https://github.com/cthissen/estream2>, 2016 (Zugriffsdatum: 23.04.2024)
- [118] Bittrich, L.; Spickenheuer, A.; Almeida Jr., J. H. S.; Müller, S.; Kroll, L.; Heinrich, G.: Optimizing Variable-Axial Fiber-Reinforced Composite Laminates: The Direct Fiber Path Optimization Concept. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2019, 8260563, 2019

Betreute studentische Arbeiten

Natter, Bastian: Untersuchung gekrümmter mittels Nassfaserlegen hergestellter CFK-Strukturen. IVW-Bericht 21-037, Diplomarbeit, 2021

Favier, Fynn: Auslegung eines additiv gefertigten FKV-Bremspedals mittels Topologieoptimierung. IVW-Bericht 21-044, Bachelorarbeit, 2021

Shahpasandi, Mansour: Simulative Untersuchung und konstruktive Gestaltung von Kreuzungsstellen für das Nassfaserlegen. IVW-Bericht 21-049, Masterarbeit, 2022

Gilla, Christopher: Nachhaltigkeit additiv gefertigter Faser-Kunststoff-Verbunde: Eine Energiebetrachtung des Nassfaserlegens. IVW-Bericht 22-015, Masterarbeit, 2022

Pereira Illing, Bernhard: Experimentelle Charakterisierung des Ablageverhaltens und der mechanischen Eigenschaften beim Nassfaserlegen. ILR-LFT DA 22-09 (Technische Universität Dresden), Diplomarbeit, 2022

Schulz, Alexander: Ableiten von Ablegepfaden für die additive Fertigung topologieoptimierter Komponenten aus Faser-Kunststoff-Verbund. IVW-Bericht 23-013, Masterarbeit, 2023

Wisser, Nicolas: Prozessgrenzen bei der dreidimensionalen Ablage in-line imprägnierter Kohlenstofffasern. IVW-Bericht 23-021, Projektarbeit, 2023

Heil, Georg: Experimentelle Charakterisierung der Anbindung von Befestigungselementen mittels Nassfaserlegen. IVW-Bericht 23-022, Diplomarbeit, 2023

Schwalb, Julius: Einfluss von Ablagedefekten auf die mechanischen Eigenschaften gekrümmt abgelegter Probekörper aus Faser-Kunststoff-Verbund. IVW-Bericht 23-042, Bachelorarbeit, 2023

Publikationen

Zeitschriften (mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung)

Arrabiyeh, P. A.; May, D.; Eckrich, M.; Dlugaj, A. M.: An Overview on Current Technologies for Continuous Thermoset Impregnation and Processing of Rovings. *Polymer Composites*, Vol. 42, pp. 5630-5655, 2021

Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A. M.; May, D.: Structural Topology Optimization and Path Planning for Composites Manufactured by Fiber Placement Technologies. *Composite Structures*, Vol. 289, 115488, 2022

Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A. M., May, D.: Placement Defects in Thermoset-Impregnated Rovings Deposited Along Curved Paths. *Polymer Composites*, Vol. 44, pp. 3634-3645, 2023

Dlugaj, A. M.; Arrabiyeh, P. A.; Eckrich, M.; May, D.: Influence of Stoichiometry and Ratio between a Reactive and Latent Curing Agent on the Properties of Dual-Curable Epoxy Resin Formulations. *ACS Applied Polymer Materials*, Vol. 6, pp. 2902-2912, 2024

Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A. M.; May, D.: An anisotropic topology optimization procedure for continuous fiber reinforced polymer structures with biaxial fiber layout for improved intersection point design. *Composite Structures*, Vol. 337, 118064, 2024

Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A. M.; Eckrich, M.; May, D.: Designing an End Effector and a Thickness Adaptive Compression Molding Process for Wet Fiber Placement. *Applied Composite Materials*, Vol. 31, pp. 1237-1258, 2024

Arrabiyeh, P. A.; Bobe, M.; Duhovic, M.; Eckrich, M.; Dlugaj, A. M.; May, D.: Implementing Low Budget Machine Vision to Improve Fiber Alignment in Wet Fiber Placement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 0(0), pp. 1-11, 2024

Buchbeitrag (ohne wissenschaftliche Qualitätssicherung)

May, D.; Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A.: Wet fiber placement for additive manufacturing with thermoset resins. In: Additive Manufacturing of Polymer-Based Composite Materials – Materials, Processes, and Properties. Elsevier, 2024, ISBN: 9780443159176

Symposien- und Konferenzbeiträge (Vorträge)

May, D.; Eckrich, M.; Dlugaj, A. M.; Arrabiyeh, P. A.: Topology-optimized structural components through wet fiber placement. 30 Jahre – IVW Kolloquium, 08.-09.09.2021, Kaiserslautern

Arrabiyeh, P. A.; Eckrich, M.; Dlugaj, A. M.; May, D.: Additive Manufacturing of Composites Using Continous Rovings Impregnated with Thermoset Resin. 2nd International Conference on Additive Fabrication of Composites (ADDFABCOMP 2), 23.-24.11.2021, Online-Konferenz

Eckrich, M.; May, D.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A. M.: Topology-Optimized Design to Manufacture for Wet Fiber Placement. 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20), 26.-30.06.2022, Lausanne (Schweiz)

Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A. M.; May, D.: Wet Fiber Placement: Deposition of in-line impregnated rovings for manufacturing of material-efficient composite structures. CU Innovation Day “Tailored Structures”, 19.10.2023, Online-Konferenz

Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A. M.; May, D.: Anisotropic topology optimization considering multi-axial fiber orientations for composite truss structures with improved intersection point design. 21st European Conference on Composite Materials (ECCM21), 02.-05.07.2024, Nantes (Frankreich)

Röder, F.; Eckrich, M.; Krämer, A.; May, D.; Gebhard, A.: Statische Pressversuche zur ressourcenschonenden Werkzeugauslegung für Intervallheißpressen von Preforms aus thermoplastischen Tapes. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2024 (DLRK 2024), 30.09.-02.10.2024, Hamburg

Eckrich, M.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A. M.; May, D.: Topology-optimized Design of Composite Structures Manufactured by Wet Fiber Placement. Leibniz MMS Days 2025, 26.-28.03.2025, Rostock

Symposien- und Konferenzbeiträge (Poster)

Eckrich, M.; May, D.; Arrabiyeh, P. A.; Dlugaj, A. M.: Topology-Optimized Design for Manufacturing Components by Wet Fiber Placement Process. Expert*innen-Tage Verbundwerkstoffe 2021, 29.-30.06.2021, Online-Konferenz

Arrabiyeh, P. A.; Eckrich, M.; Dlugaj, A. M., May, D.: Wet Fiber Placement – Additive Manufacturing with Fiber Bundles Impregnated with Thermoset Resin. Fifth International Symposium on Automated Composites Manufacturing (ACM5 2022), 06.-07.04.2022, Bristol (England)

Eckrich, M.; Schommer, D.; Röder, F.; Duhovic, M.; May, D.: Decoupled Simulation Approach for the Continuous Compression Molding (CCM) Process. Leibniz MMS Days 2024, 10.-12.04.2024, Kaiserslautern

Eckrich, M.: The „Teufelstisch“ – Did the devil use topology optimization for the design? Young Researcher Symposium 2024 (YRS 2024), 01.08.2024, Kaiserslautern

Lebenslauf

Name Maximilian Eckrich

Berufliche Stationen

Seit 05/2025 Berechnungsingenieur,
VAG GmbH,
Engineering IPO,
Mannheim

04/2020 – 04/2025 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH,
Programmbereich Digitalisierung,
Digitalisierte Prozess- und Materialentwicklung &
Nachwuchsforschungsgruppe TopComposite,
Kaiserslautern

02/2019 – 03/2020 Simulationsingenieur,
Borgwarner Drivetrain Engineering GmbH,
DualTronic™ and Clutch Systems Engineering,
Analysis & Simulation,
Ketsch

Studium und Ausbildung

10/2012 – 01/2019 Diplom Maschinenbau und Verfahrenstechnik,
Technische Universität Kaiserslautern

Schulbildung

08/2003 – 03/2012 Allgemeine Hochschulreife,
Hannah-Arendt-Gymnasium Haßloch