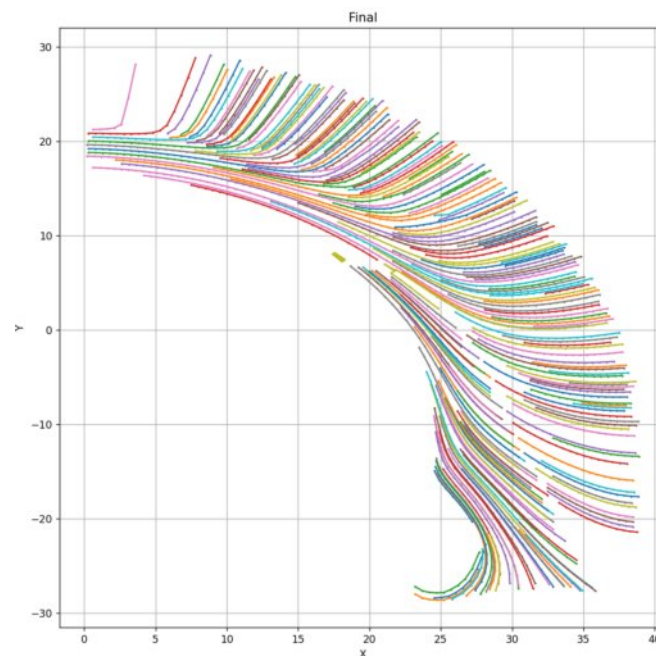


Optimierung von 3D-Druckpfaden mittels Spannungsanalyse für höhere Bauteilstabilität



Cornelius Baumgartner und Richard Schütz, Kurs KA 19

Abschlussbericht der Kooperationsphase 24/25

betreut von Dr. Iwiza Tesari und Dr. Roland Kappel

Durchgeführt am IAM-MMI - Werkstoff- und Grenzflächenmechanik KIT -
Karlsruher Institut für Technologie

Abstract

This study investigates the potential of enhancing the mechanical performance of FDM 3D-printed components by optimizing toolpaths based on stress analysis. Standard infill patterns often lead to inefficient load transfer due to the anisotropic properties inherent in the FDM process. The aim of this project was to derive infill structures aligned with the principal stress trajectories within a part, thereby improving strength and material efficiency.

A finite element analysis (FEA) was used to calculate the principal stress directions, which then served as the basis for a custom Python-based toolpath generator. These optimized paths were integrated into the G-code and used to manufacture PLA specimens of a symmetric brakebooster geometry. The printed parts were tested under identical tensile conditions and compared to conventional infill patterns.

Results indicate that the stress-aligned infill structures yield significantly higher structural performance at comparable or even reduced material density. The approach demonstrates a strong potential for lightweight applications and highlights the importance of considering stress-specific filament placement in FDM printing. Furthermore, these findings underscore the necessity of carefully accounting for material variability and print conditions when evaluating infill strategies.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Hintergrund und Motivation	1
1.2. Zielsetzung des Projekts	2
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1. FDM-Druck und Infill-Konzepte	3
2.2. Anisotropie von FDM-Bauteilen	3
2.3. Spannungsanalyse und Hauptnormalspannung	4
3. Methodik	6
3.1. Spannungs-Analyse über ANSYS-Simulation	6
3.2. Datenaufbereitung und Filterung	10
3.3. Druckpfad-Generierung	14
4. Fallstudie: Fahrrad-Brakebooster	16
4.1. Geometrie und Simulationsergebnisse	16
4.2. Druckparameter und Materialwahl	20
4.3. Testaufbau und Versuchsprotokoll	21
4.4. Ergebnisse	22
5. Diskussion und Analyse der Ergebnisse	25
5.1. Analyse des modifizierten Infill-Musters	25
5.2. Mechanische Prüfungen und Vergleich mit Standard-Infill	26
5.3. Bewertung der Stabilitätsverbesserung	33
6. Fazit	34
6.1. Zusammenfassung der Erkenntnisse	34
6.2. Ausblick und Potenziale für weitere Optimierungen	35
7. Danksagungen	36
A. Anhang	37
A.1. Herkömmliche Infill-Muster	37
A.2. APDL-Skript zur Auslese der Spannungslinien	40
A.3. ADPL-Skript zur Bauteil Erstellung	40
A.4. Startpunktverteilungs-Skript	41
A.5. Datenaufbereitungs-Skript	41
A.6. gCode-Converter-Skript	42
A.7. Ergebnisse der Belastungstests	42

1. Einleitung

1.1. Hintergrund und Motivation

Der Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-Druck hat sich sowohl in der Industrie als auch im Hobbybereich etabliert und ermöglicht die schnelle Herstellung komplexer Bauteilgeometrien. Ein zentrales Merkmal des FDM-Verfahrens ist die Innenstruktur (Infill): Statt einen Volumenkörper vollmassiv zu drucken, wird ein Muster aus Hohlräumen und Stegen im Inneren erzeugt, um Material und Gewicht zu sparen. Die Wahl des Infill-Musters und der Infilldichte beeinflusst die Festigkeit, die Steifigkeit und das Gewicht des Bauteils maßgeblich.¹

Ein wesentliches Problem konventionell gedruckter FDM-Bauteile ist ihre Anisotropie. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus und der Orientierung der extrudierten Filamente sind die resultierenden Materialeigenschaften richtungsabhängig. Entlang der gedruckten Fasern (Druckbahnen) ist die Festigkeit am höchsten, während sie in Richtungen quer dazu deutlich abnimmt.² Insbesondere die Verbindung zwischen den Schichten (Z-Richtung) ist eine Schwachstelle; ein Teil kann unter Belastung senkrecht zur Schichtebene wesentlich früher versagen als bei Belastung innerhalb der Schichten. So liegen die Zugfestigkeiten in der XY-Ebene typischerweise um ein Vielfaches höher als in Z-Richtung – Unterschiede um den Faktor 4–5 sind veröffentlicht.³

Standard-Infill-Muster (etwa Grid, Gyroid oder Konzentrisch) sind ein Kompromiss – sie werden universell für beliebige Bauteile und Belastungen eingesetzt, ohne spezifisch an einen vorgesehenen Lastfall angepasst zu sein. In der Praxis muss daher mit hohem Infill-Anteil oder dicken Außenwänden gearbeitet werden, um ausreichende Festigkeit zu erzielen, was den Leichtbau-Gewinn teilweise wieder zunichte macht. Infill-Optimierung bedeutet, die innere Struktur gezielt auf die auftretenden Lasten und Anforderungen abzustimmen, um mit minimalem Materialeinsatz eine maximale Belastbarkeit zu erreichen.⁴ Sie ist für die Herstellung von Leichtbauteilen wichtig, die trotz geringerem Materialeinsatz die erforderlichen mechanischen Eigenschaften aufweisen und im Idealfall überall gleichmäßig ausgelastet sind (Bionik-Prinzip der konstanten Spannung).

Hier setzt das Konzept der lastpfadgerechten Infill-Optimierung an: durch Ausrichtung der inneren Struktur entlang der Hauptspannungsrichtungen im Bauteil – also entlang jener Trajektorien, auf denen das Material im Betrieb hauptsächlich belastet wird – lässt sich die Anisotropie gezielt zu Gunsten der Festigkeit ausnutzen. Die gedruckten Filamente wirken dann ähnlich wie kontinuierliche Fasern in faserverstärkten Verbundwerkstoffen, die entlang des Kraftflusses angeordnet sind und Lasten effizient aufnehmen. Dieses Vorgehen ist inspiriert von natürlichen Vorbildern: Bäume und Knochen lagern Material nach dem Prinzip der wachstumsbedingten Anpassung genau dort an, wo Spannungen auftreten, und orientieren ihre Faserstrukturen entlang dieser Spannungstrajektorien. In der technischen Anwendung finden sich ähnliche Ansätze in der Bionik und Leichtbauoptimierung – etwa die Soft-Kill-Option (SKO) und Computer Aided Optimization (CAO) nach Mattheck, welche Material an wenig beanspruchten Stellen entfernen oder an hoch belasteten Stellen anlagern, um eine gleichmäßige Spannungsverteilung zu erreichen.⁵

Die Übertragung dieser Ideen auf den 3D-Druck verspricht erhebliche Vorteile: wenn die Druckpfade dem Lastverlauf folgen, können Spannungen homogener verteilt und Spitzen reduziert werden, was höhere Festigkeit und Lebensdauer der Bauteile zur Folge hat.

Unter zyklischer Belastung zeigt sich eine verbesserte Dauerfestigkeit, da Spannungsspitzen reduziert und Rissinitiierung verzögert werden. Für die Verhinderung von Versagensarten wie Delamination oder interlaminare Rissbildung wird gezielt die anisotrope Druckstruktur genutzt. Mechanische Kennwerte wie Zugfestigkeit,

Bruchdehnung und Biegefestigkeit lassen sich so signifikant steigern – ohne zusätzliche Werkstoffverstärkung. Erste Untersuchungen zeigen, dass eine an den Hauptspannungen orientierte Pfadplanung die Bauteilfestigkeit gegenüber konventionellen Füllmustern deutlich steigern kann – in einer Studie wurde eine Erhöhung der Zugfestigkeit um etwa 17–20 % im Vergleich zu Standard-Zickzack-Infill erreicht.⁵ Darüber hinaus eröffnet ein solches Verfahren die Möglichkeit, Material einzusparen, da Verstärkungen nur dort erfolgen, wo sie tatsächlich gebraucht werden, anstatt das gesamte Volumen mit einem hohen Füllgrad auszusteifen.⁴ Zusammengefasst liegt die Motivation darin, die Einschränkungen des FDM-Drucks (Anisotropie und suboptimale Standard-Infill-Strukturen) zu überwinden, um leichtere und gleichzeitig belastbarere Bauteile herzustellen. Dieser innovative Ansatz hat das Potenzial, die Nutzung des kostengünstigen FDM-Verfahrens auf anspruchsvollere, lasttragende Anwendungen auszuweiten.

1.2. Zielsetzung des Projekts

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projekt das Ziel eine Methode zur Optimierung von Druckpfaden im FDM-Verfahren mittels Spannungsanalyse zu entwickeln und zu erproben. Konkret soll untersucht werden, ob sich durch die Verwendung eines an die Hauptspannungen angepassten Infill-Musters widerstandsfähigere Bauteile herstellen lassen als mit einem einfachen, standardisierten Füllmuster.² Die mechanischen Eigenschaften des Bauteils (wie maximale Festigkeit und Steifigkeit) sollen gezielt an den jeweiligen Anwendungszweck und Lastfall angepasst werden können. Dabei soll für Leichtbauanwendungen eine maximale Stabilität bei möglichst geringem Gewicht erreicht werden.

Der Ansatz, dieser Arbeit, sieht eine enge Kopplung von Simulation und Fertigung vor. Zunächst wird per Finite-Elemente-Analyse eine Spannungsanalyse des Bauteils unter definierten Lastbedingungen durchgeführt. Auf Basis der berechneten Spannungsverteilung – insbesondere der Orientierung der Hauptspannungen – wird anschließend ein individuelles Infill-Pfadmuster abgeleitet, das die Filamentbahnen entlang dieser Hauptspannungsrichtungen führt (spannungsgerechte Pfadplanung). Diese druckbaren Spannungslinien bilden das Rückgrat der inneren Struktur und sollen sicherstellen, dass jeder Faserstrang im späteren Bauteil eine möglichst große Last trägt. Die Umsetzung erfordert die Entwicklung geeigneter Software-Werkzeuge: Im Rahmen des Projekts werden Programmroutinen in Python erstellt, welche die Ergebnisse der bionischen Strukturoptimierung (insbesondere die lokalen Hauptspannungsrichtungen in jedem Bereich des Bauteils) einlesen und in druckspezifische Bahnbefehle (G-Code) für den 3D-Drucker umwandeln. Dabei müssen bestehende Slicer-Programme erweitert oder umgangen werden, da herkömmliche Slicer eine derartige freie Pfadplanung nicht von Haus aus unterstützen.

Im Anschluss an die algorithmische Generierung der optimierten Druckpfade werden Prototyp-Bauteile gedruckt, um den Ansatz praktisch zu validieren. Geplant ist ein Vergleich zwischen konventionell gedruckten Referenzteilen (mit Standard-Infill) und den nach dem neuen Verfahren gedruckten Proben. Durch mechanische Tests – Zug- oder Biegeversuche – wird die Belastbarkeit der optimierten Bauteile quantifiziert und den konventionellen gegenübergestellt. Durch diese Vorgehensweise soll gezeigt werden, dass die entlang der Hauptspannungen ausgerichteten Infill-Pfade zu einer messbaren Verbesserung der Bauteilfestigkeit und Steifigkeit führen. Ein positiver Nachweis würde das enorme Innovationspotenzial dieses Ansatzes untermauern: die Ergebnisse könnten den Weg hin zu neuen Software-Werkzeugen ebnen, die in Zukunft eine automatische lastfalladaptive Innenstrukturierung von FDM-Bauteilen erlauben. Langfristig ließe sich die Gestaltung additiv

gefertigter Teile fundamental verbessern – weg von simplen, isotropen Füllmustern hin zu „intelligenten“ Infill-Strukturen, die mechanisch effizient und materialsparend genau dort verstärken, wo es nötig ist. Dieses Projekt legt den Grundstein, um FDM-3D-Druck für anspruchsvollere technische Anwendungen nutzbar zu machen, in denen bislang aus Festigkeitsgründen eher Metall- oder Faserverbundbauteile zum Einsatz kommen würden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. FDM-Druck und Infill-Konzepte

Das Fused Deposition Modeling (FDM) ist eines der am weitesten verbreiteten additiven Fertigungsverfahren. Dabei wird thermoplastisches Filament schichtweise extrudiert, um komplexe Bauteilgeometrien schnell und kostengünstig aufzubauen. Ein zentrales Element zur Steuerung von Materialeinsatz, Druckdauer und mechanischen Eigenschaften ist das sogenannte *Infill* – die wiederkehrende Innenstruktur eines Bauteils.

Zu den gebräuchlichsten Infill-Mustern gehören Linien-, Gitter- und Dreiecksmuster, Wabenstrukturen sowie dreidimensionale Formen wie Gyroid oder Cubic. Linien- und Gittermuster sind einfach zu implementieren, verstärken jedoch nur in wenigen Raumrichtungen. Waben- (Honeycomb-)Infill bietet eine hohe Steifigkeit bei moderatem Materialeinsatz, verliert aber unter komplexen Lastfällen an Effizienz. Der Gyroid-Infill schließlich besitzt eine durchgehende, wellenförmige Struktur, die Lasten nahezu isotrop verteilt und so eine gleichmäßige Belastbarkeit in alle Richtungen ermöglicht. Die Auswahl des Infill-Typs und der Füllgrad (Prozentanteil des Innenvolumens) bestimmt das Zusammenspiel aus Gewicht, Druckzeit und mechanischer Leistungsfähigkeit des Bauteils maßgeblich.^{1,4}

Eine Übersicht der gängigen Infill-Arten ist im Anhang unter A.1 zu finden.

2.2. Anisotropie von FDM-Bauteilen

Die Schicht-für-Schicht-Ablagerung beim FDM führt zu ausgeprägter Materialanisotropie. Innerhalb einer Schichtebene (XY-Ebene) werden die Filamente als kontinuierliche Fasern angeordnet, was hohe Zug- und Biegefestigkeiten bewirkt. Quer zu den Schichten (Z-Richtung) wird die Bauteilfestigkeit hauptsächlich durch die adhäsiven Grenzflächen zwischen den Drucklagen limitiert, deren Tragfähigkeit nur einen Bruchteil der in-plane Festigkeit beträgt. Messungen zeigen, dass die Zugfestigkeit in der XY-Ebene typischerweise um den Faktor 4–5 über der in Z-Richtung liegt.³

Diese Richtungsabhängigkeit macht die Bauteilorientierung im Druck sowie die interne Struktur besonders kritisch: ohne Anpassung an den tatsächlichen Lastfall entstehen Bereiche mit Überlast (lokale Spannungsspitzen) und andere, in denen Material ungenutzt ist. Klassische Infill-Muster mindern dieses Phänomen nur unzureichend, da sie universell und nicht an den spezifischen Kraftfluss im Bauteil angepasst sind. Eine gezielte Infill-Optimierung kann diese Anisotropie nutzen, um dort zu verstärken, wo Lasten auftreten, und Gewicht einzusparen, wo wenig beansprucht wird.²

2.3. Spannungsanalyse und Hauptnormalspannung

Was ist mechanische Spannung? Spannung ist die *Kraft pro Fläche*, die *im Inneren eines Materials* wirkt. Ihre einfache Grunddefinition lautet:

$$\sigma = \frac{F}{A},$$

wobei F die angreifende Kraft und A die zugehörige Flächengröße ist. Man unterscheidet dabei:

- *Normalspannung* σ : wirkt senkrecht auf eine Fläche und zieht oder drückt das Material.
- *Schubspannung* τ : wirkt parallel zur Fläche und versucht, benachbarte Materialschichten gegeneinander zu verschieben.

Dabei darf Spannung jedoch nicht mit *Druck* verwechselt werden. Druck bezeichnet ebenfalls eine Kraft pro Fläche, wirkt aber stets als gleichmäßig verteilte, von außen auf eine Oberfläche ausgeübte Belastung und ist immer *hydrostatisch* (d.h. richtungsunabhängig). Spannung hingegen beschreibt den inneren Zustand eines Körpers: Sie kann je nach Richtung unterschiedlich groß sein (Normal- und Schubspannungen) und resultiert aus den inneren Reaktionen des Materials auf äußere Kräfte oder Verformungen.

Der Spannungstensor als Tabelle der Spannungen Der *Spannungstensor* σ beschreibt die Normal- und Schubspannungen in allen Raumrichtungen gleichzeitig. Er fasst alle Spannungskomponenten in Form einer *Matrix* zusammen. Im dreidimensionalen Raum schreibt man:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix}.$$

Hier steht zum Beispiel σ_x für die Normalspannung auf einer Fläche senkrecht zur x -Achse und τ_{xy} für die Schubspannung auf der gleichen Fläche in Richtung der y -Achse.

Was ist der Spannungstensor? Der Spannungstensor ist eine Matrix, die die mechanische Spannung in einem Werkstück/Körper in den drei Raumrichtungen beschreibt. Bei einer Rotation des Koordinatensystems um den Winkel ϕ ändert sich der Tensor nach der Regel:

$$\sigma' = Q \sigma Q^T$$

Hier ist Q die *Rotationsmatrix*, die alle Vektoren im Raum um ϕ dreht. Q^T ist die transponierte *Rotationsmatrix* Q .

Ebener Spannungszustand In vielen Fällen, wie dünne Bauteile oder Schnitte durch das Modell, genügt eine Betrachtung in der xy -Ebene. Dann entfallen τ_{xz} und τ_{yz} und der Tensor reduziert sich auf

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix}.$$

Hauptnormalspannungen Die *Hauptnormalspannungen* σ_1 und σ_2 sind genau die Normalspannungen in denjenigen Richtungen, in denen keine Schubspannung mehr auftritt. Man kann sich vorstellen, dass man das Koordinatensystem so lange dreht, bis die Schubanteile verschwinden und nur noch ein „Zug-/Druck“-Effekt vorhanden ist. Die Werte σ_1 und σ_2 lassen sich mit der Formel

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

berechnen.

Richtungswinkel der Hauptspannungen Der Winkel θ_p zwischen der ursprünglichen x -Achse und der Richtung von σ_1 folgt aus

$$\tan(2\theta_p) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}.$$

Das bedeutet, man dreht das Koordinatensystem um θ_p , um in die Lage zu kommen, in der der Spannungstensor diagonal ist (nur noch Normalspannungen, keine Schubspannungen).

Mohrscher Spannungskreis Eine anschauliche Methode, diese Werte zu ermitteln, ist der *Mohrsche Spannungskreis*. Dabei trägt man σ_x und σ_y auf der horizontalen Achse und τ_{xy} auf der vertikalen Achse eines Kreises auf. Die Schnittpunkte des Kreises mit der horizontalen Achse entsprechen σ_1 und σ_2 ; die Kreisradien sind die maximalen Schubspannungen $\tau_{\max}$.

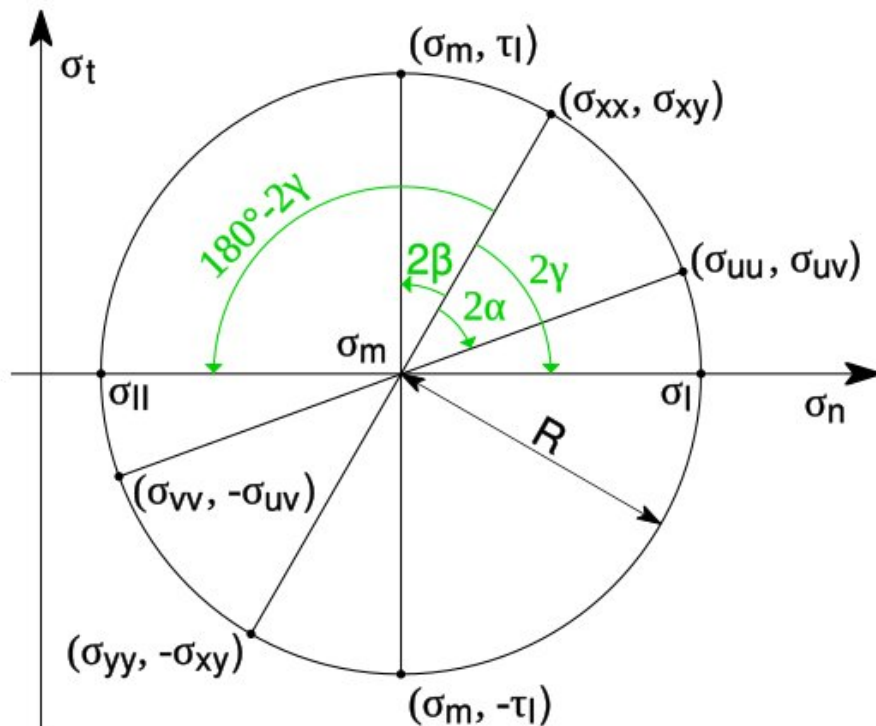


Abb. 1: Mohrscher Spannungskreis zur Bestimmung der Hauptspannungen und Maximalschubspannungen - Quelle unter Bildquellen

Konkrete Anwendung in ANSYS Die Hauptnormalspannungen werden zur Berechnung der Spannungslinien im Bauteil benötigt und bilden die Grundlage für die anschließende, spannungsgerechte Pfadplanung im 3D-Druck. In ANSYS lässt sich dieser Vorgang automatisieren: Mittels des verwendeten Programms aus 3.1.4 kann die Richtung der Hauptnormalspannung σ_n effizient bestimmt werden.⁷

3. Methodik

3.1. Spannungs-Analyse über ANSYS-Simulation

3.1.1. Was ist eine FEM Analyse in ANSYS?

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur Lösung physikalischer Gleichungen, die in komplexen Geometrien auftreten – insbesondere bei mechanischen Spannungen, Verformungen und Temperaturverteilungen. In ANSYS werden dabei die untersuchten Bauteile in eine Vielzahl kleiner, einfacher Elemente zerlegt, auf denen die Gleichungen lokal gelöst werden. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse der Spannungsverteilung unter gegebenen Last- und Randbedingungen. Im vorliegenden Projekt dient die FEM-Analyse dazu, die Hauptnormalspannungen innerhalb des Brakeboosters unter realitätsnaher Belastung zu ermitteln. Diese Spannungsdaten bilden die Grundlage für die anschließende Pfadplanung im 3D-Druck: Die Druckbahnen sollen möglichst entlang der Hauptspannungsrichtungen verlaufen, um das Material gezielt dort zu verstärken, wo es tatsächlich belastet wird. Damit stellt die FEM-Simulation in ANSYS den zentralen Ausgangspunkt für die gesamte Optimierungsmethodik dar.

3.1.2. Modellierung des Bauteils in Ansys

Die 2D-Geometrie des Fahrrad-Brakeboosters wird im Präprozessor (/PREP7) über Keypoints, Linien und Bögen aufgebaut und anschließend mit PLANE182-Elementen vernetzt. Materialparameter (Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl) und Randbedingungen (Einspannungen in x und y , Drucklast auf definierten Linien) werden definiert. Der vollständige APDL-Code zum Geometrie- und Netzaufbau ist im Anhang A.3 dokumentiert.

3.1.3. Startpunkt Verteilung der Spannungslinien

Für die Erzeugung gleichmäßig verteilter Startpunkte der Spannungslinien im Bauteil kommt ein Python-Skript zum Einsatz (siehe Anhang A.4). Das Vorgehen umfasst:

1. Einlesen der Rohkoordinaten aus `NLIST.txt` (Knotenliste aus ANSYS).
2. Berechnung des *Alpha-Shapes* zur Bestimmung der geschlossenen Umrandung.
3. Schrumpfen der Hülle um einen Sicherheitsabstand s , um Randartefakte zu vermeiden.
4. Generierung eines gleichmäßigen Punktgitters im geschrumpften Bereich und Auswahl von n Punkten mit gleichem Abstand zu einander.
5. Ausgabe der Punkte in `concave_hull_points.txt` und Erzeugung eines `output.txt`-Skripts mit Ansys-Eingabezeilen.

Beispielauszug aus output.txt

```
XS0_=22.9892      $ YS0_=-28.7966    $ Ls_=.1    $ NS_=100
/INPUT,SKRIPT_Spannungslinien.txt,C:\...\Spannungsfluss\

XS0_=23.7960      $ YS0_=-28.7966    $ Ls_=.1    $ NS_=100
/INPUT,SKRIPT_Spannungslinien.txt,C:\...\Spannungsfluss\

...
```

Diese Zeilen dienen als Eingabe für das Ansys-Skript zur sequenziellen Pfaderzeugung.

3.1.4. Erstellung der Spannungslinien (ANSYS-Skript)

Zur Ermittlung der spannungsgerechten Druckpfade setzen wir ein eigenes APDL-Skript ein. Dieses geht bei der Erstellung der Spannungslinien folgendermaßen vor: Zunächst müssen wie beschrieben eine Zahl von n Startpunkten innerhalb des Bauteils definiert werden. Wir haben $n = 750$ gewählt, da man über diese Menge eine sehr hohe Dichte an resultierenden Linien erhält. Mehr zu wählen wäre nicht sinnvoll, da die zusätzlich hinzugefügten Linien bei der späteren Filterung wieder herausfallen würden. Aus jedem der am Anfang festgelegten Punkte wird am Ende eine vollwertige Spannungslinie erstellt.

Zur Veranschaulichung lässt sich der Ablauf des Programms wie folgt beschreiben: Zunächst wird ein Punkt innerhalb des Bauteils gewählt. Am aktuellen Punkt wird die Richtung der Hauptnormalspannung σ_n bestimmt, indem der Winkel φ aus den Spannungswerten berechnet wird (siehe Abschnitt 2.3). Entlang dieser Richtung wird nun ein kleiner Schritt der Länge x gemacht, um zum nächsten Punkt zu gelangen. Dort wird die Analyse wiederholt, sodass Schritt für Schritt eine vollständige Spannungslinie entsteht. Dieser Vorgang wird ausschließlich in der Ebene durchgeführt, sodass die Richtungsinformation durch einen Winkel ausreichend beschrieben werden kann. In einem dreidimensionalen Raum müsste dagegen ein Vektor verwendet werden, um die Richtung der Hauptspannung zu beschreiben.

Konkret liest das Skript lokal die Hauptnormalspannungen aus und gibt sie in eine Textdatei aus. Die vollständige Implementierung ist im Anhang A.2 dokumentiert. Im Folgenden findet sich eine Zusammenfassung des genauen Analyseablaufs:

1. **Startpfad definieren:** Ein initialer Zweipunkt-Pfad wird mit festen Koordinaten (z. B. Startpunkt (21,2, 0,1) und (X_{S0}, Y_{S0})) über die Befehle PATH und PPATH angelegt. Mit PDEF werden die Normalspannungen σ_x und σ_y im Arbeitsarray PFADDATA abgelegt und mit PAGET geladen.
2. **Makro für Datelexport:** Das Unterprogramm write_HSLinie öffnet die Datei HSLinie.txt, schreibt die aktuellen Koordinaten und Spannungswerte (σ_x, σ_y) aus PFADDATA und schließt die Datei wieder.
3. **Iterative Pfaderweiterung:** In einer *DO-Schleife über NS_ Schritte werden nacheinander die Spannungskomponenten σ_x , σ_y , τ_{xy} und σ_z ausgelesen. Aus

$$\tan(2\varphi) = \frac{2 \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

wird der Winkel φ zu den Hauptnormalspannungen berechnet. Die neuen Pfadkoordinaten

$$X_{\text{neu}} = X + \cos \varphi, \quad Y_{\text{neu}} = Y + \sin \varphi$$

werden erneut mit `PATH/PPATH` definiert, und die entsprechenden Spannungsdaten wieder per `write_HSLinie` ausgegeben.

4. **Abbruchbedingungen:** Verschwindet die Schubspannung ($\tau_{xy} = 0$) und die Querkomponente ($\sigma_z = 0$), bricht das Skript vorzeitig ab.

Der vollständige APDL-Code zur Auslese der Spannungslinien ist im Anhang A.2 abgelegt.

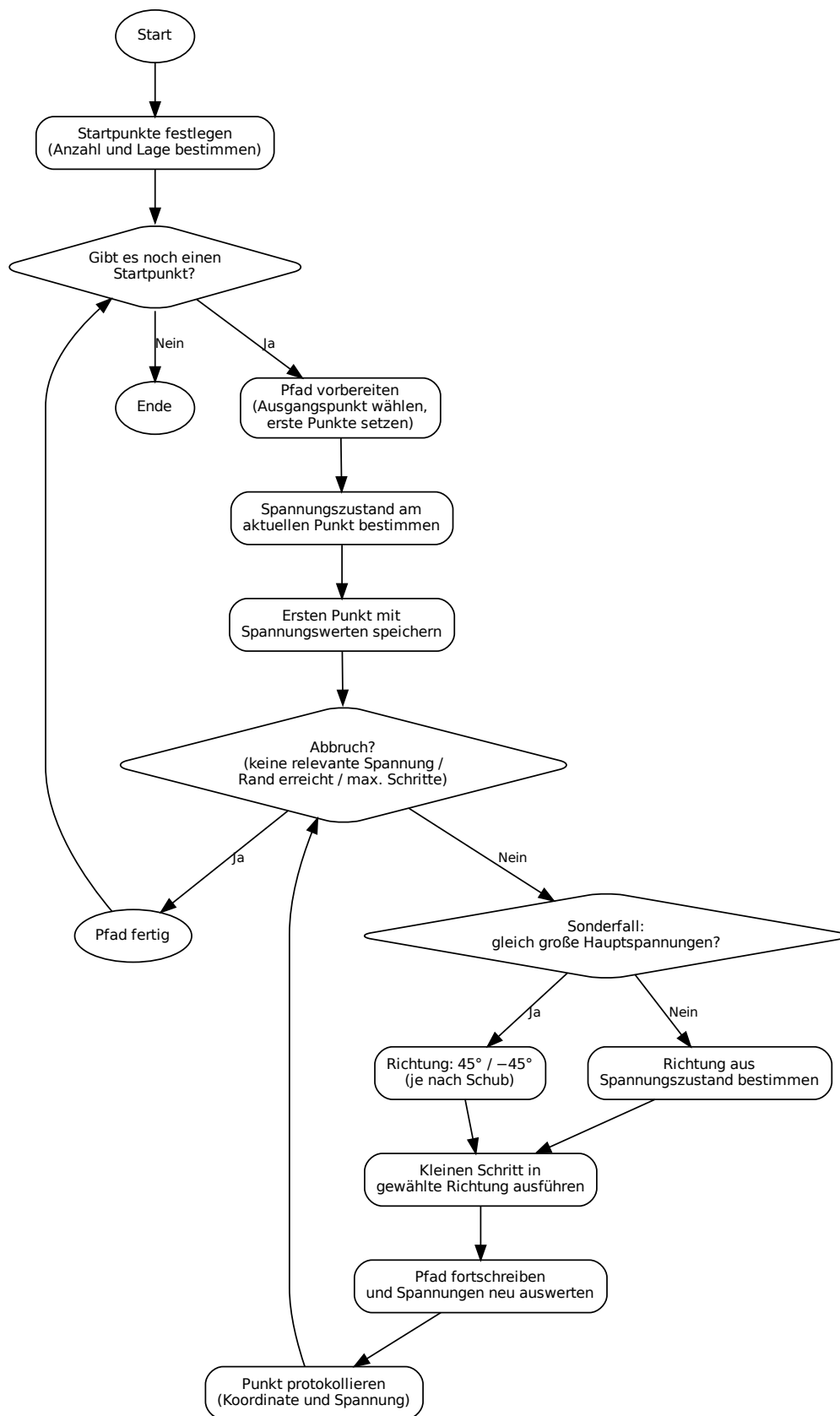


Abb. 2: Flussdiagramm: Erstellung einer Spannungslinie je Startpunkt

3.1.5. Export der Pfaddaten (HSLinie.txt)

Für den späteren Druck des analysierten Bauteils mit den optimierten Infill-Pfaden ist die Ausgabe der Pfade entlang der Hauptnormalspannung ein essenzieller Schritt. Die einzelnen Punkte entlang des Pfades werden über das Analyse Skript A.2 in die Datei *HSLinie.txt* geschrieben.

Tabellarische Anordnung

1. **Spalte 1:** X-Koordinate (in mm)
2. **Spalte 2:** Y-Koordinate (in mm)
3. **Spalte 3:** σ_x in Elementmitte (in MPa)
4. **Spalte 4:** σ_y in Elementmitte (in MPa)

Beispielauszug Ein Ausschnitt der ersten Zeilen könnte etwa so aussehen:

```
22.989200E+00 -28.796600E+00 -0.178700E-03 0.216764E-01
22.363500E+00 -28.016600E+00 -0.440997E-01 0.537901E-01
22.033400E+00 -27.072600E+00 -0.638177E-01 0.107398E+00
...
```

Nachbearbeitung der Rohdaten Aufgrund numerischer Rundungen und Vernetzungsartefakte in ANSYS können einzelne Ausreißer oder eng benachbarte Punkte mit nahezu identischen Spannungswerten auftreten. Deshalb wird im nächsten Schritt (Kapitel 3.2) eine Python-Routine angewendet, deren Ziel es ist die erhaltenen Spannungslinien zu bereinigen.

3.2. Datenaufbereitung und Filterung

Nach dem Export der rohen Pfaddaten aus ANSYS (*HSLinie.txt*) werden diese in einem einzelnen Python-Skript schrittweise bereinigt, segmentiert und zu glatten Pfaden verdichtet. Die Hauptschritte sind:

3.2.1. Globaler Proximity-Filter

Ziel ist es, Punkte, die sich näher als PROXIMITY_RADIUS an bereits akzeptierten Punkten befinden, zu entfernen, ohne die Startpunkte zu verlieren.

- Eingabe: X- und Y-Koordinaten aller Pfadpunkte sowie die Startpunkte aus *concave_hull_points.txt*.
- Umsetzung: `global_filter_points_numba` (Numba-beschleunigt) vergleicht jedes neue Paar (x, y) mit den bisherigen und hält nur Punkte, die weiter entfernt sind als PROXIMITY_RADIUS.
- Ausgabe: Gefilterte Punktlisten $\{f_x, f_y\}$.

3.2.2. Segmentierung und Verschiebung

Die gefilterten Punkte werden entlang der definierten Startpunkte in Segmente aufgeteilt und in X verschoben, um die Ausrichtung an den Druckursprung anzupassen.

- **segment_filtered_points**: Teilt die Liste (f_x, f_y) bei jedem Startpunkt in ein neues Segment und verwirft kurze Abschnitte mit weniger als `MIN_POINTS_PER_SEGMENT`.
- **X-Verschiebung**: Auf alle X-Koordinaten wird ein konstanter Versatz `X_SHIFT` addiert.

3.2.3. Dichte- und Konflikt-Split

Um nur hochwertige Segmente zu behalten und Kollisionen zu vermeiden, folgen zwei Filter:

- **Dichte-Filter** (`filter_segments_by_density`): Entfernt Segmente mit Punktdichte (Anzahl Punkte / Segmentlänge) unter `MIN_POINT_DENSITY`.
- **Konflikt-Split** (`split_segments_by_conflict`): Erkennt überlappende Segmente in einem Umkreis von `CONFLICT_SPLIT_RADIUS` und teilt sie an Konfliktpunkten, um Überschneidungen zu eliminieren.

3.2.4. Alpha-Shape-Basierte Innenbereichs-Filterung

Zur Entfernung von Segmentabschnitten außerhalb der modellierten Bauteilkontur wird ein Alpha-Shape der ursprünglichen Knoten getestet:

- **alpha_shape**: Berechnet aus den Knotenkoordinaten (Delaunay-Triangulation) die konkave Hülle mit Parameter $\alpha = \text{ALPHA_SHAPE_ALPHA}$.
- **Pufferung**: Innenbereich um `ALPHA_BUFFER_MARGIN` verkleinert.
- **filter_segments_by_alpha_parallel**: Entfernt alle Segmentpunkte, die außerhalb dieses gepuffer-ten Polygons liegen.

3.2.5. Monotonie- und Funktions-Filter

Zur weiteren Qualitätssteigerung werden

- **Monotonie-Split** (`split_segments_by_monotonicity`): Segmente, die in X nicht streng monoton sind (mit Toleranz `MONOTONIC_SPLIT_TOL`), werden in monotone Teilstücke aufgespalten.
- **Funktionaler Filter** (`filter_segments_by_function_distance`): Über PCHIP-Interpolation werden segment-übergreifende Kurvenvergleiche durchgeführt und Überlappungsbereiche ($< \text{MIN_FUNCTION_DISTANCE}$) ausgeschlossen.

3.2.6. Auto-Connect und Polygon-Clip

Zum Schließen noch offener Pfadsegmente und finalen Zuschnitt:

- `auto_connect_segments`: Verbindet benachbarte Segmente automatisch anhand ihrer Tangenten, wenn Steigungsdifferenz $< \text{SLOPE_DIFF_TOLERANCE}$ und weitere Kriteriendurchläufe erfüllt sind.
- `filter_segments_by_polygon`: Schneidet alle verbleibenden Segmente gegen die ursprüngliche Alpha-Shape-Kontur.

3.2.7. Ausgabe und Visualisierung

Am Ende werden die bereinigten und zusammengeführten Segmente in `Segments.txt` ausgegeben. Optionale Plots mit `plot_segments` und `plot_splines` erlauben die visuelle Kontrolle. Der vollständige Python-Quellcode ist in Anhang A.5 dokumentiert.

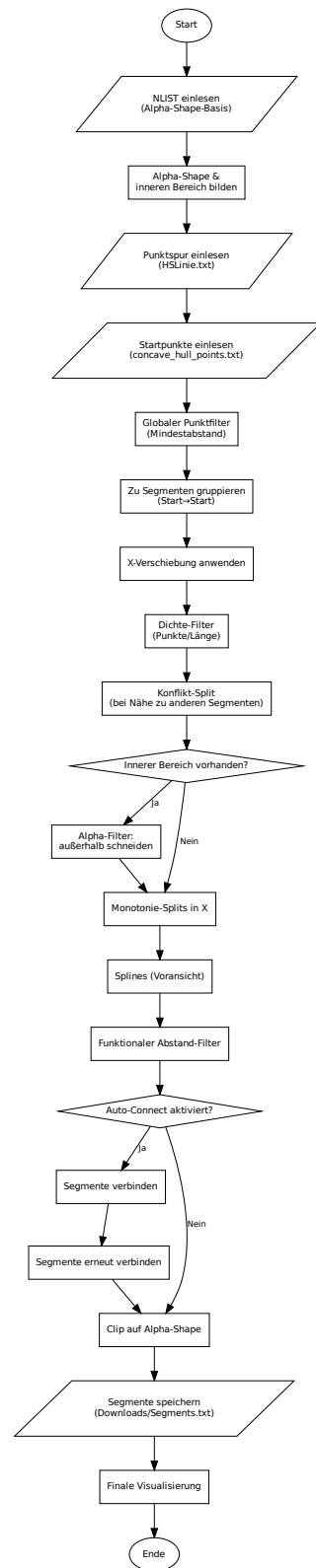


Abb. 3: Flussdiagramm: Zur Filterung der Rohdaten

3.3. Druckpfad-Generierung

Gcode ist ein Format an Maschinenanweisungen die grundlegend dafür sorgen, dass ein 3D-Drucker funktioniert. Das 3D-Objekt wird in Ebenen unterteilt. Anschließend wird jede in dieser Ebene zu druckende Strecke in einzelne, zu besuchende Punkte unterteilt. Ein Ausschnitt Gcode kann zum Beispiel so aussehen:

```
G1 X87.115 Y105.84 E3.40721
G1 X86.997 Y104.733 E3.44424
G1 X86.924 Y103.63 E3.48101
```

Dabei steht G1 für die Art des sogenannten Gcode-Befehls. In diesem Fall ist es eine Druckbewegung, bei der Filament extrudiert wird. X und Y sind die Koordinaten des nächsten Punktes, der vom Druckkopf besucht werden soll. E steht für die Menge an Filament, die bei dieser Druckbewegung extrudiert wird. Bei dem von Cura, dem in diesem Fall verwendeten Open-Source-Slicer, generierten Gcode bezieht sich aber die Zahl hinter dem E nicht auf die in diesem Schritt extrudierte Menge an Filament, sondern auf die Distanz, die sich das Filament in den Druckkopf bewegt. Bei Cura ist das aber nicht die Distanz für die einzelne Druckbewegung, sondern die gesamte Distanz, die das Filament bis zu diesem Schritt zurückgelegt hat.

Das Objekt, in das später optimierte Pfade eingesetzt werden sollen, wird zuerst konventionell von Cura gesliced. Das heißt, dass das Bauteil in Gcode-Befehle zerlegt wird, damit es vom Drucker verarbeitet werden kann. Daraufhin folgen weitere Schritte:

3.3.1. Cura-Gcode-Vorbereitung

1. **Relative Extrusion berechnen:** Da in weiteren Schritten Teile des von Cura generierten Gcodes entfernt wird, und die Extrusions-Distanz der einzelnen Schritte aufeinander aufbauend ist, muss die Extrusion in relative Extrusion umgerechnet werden. Das heißt einfach nur, dass hinter dem E nicht die Distanz bis zu diesem Schritt extrudierten Filaments stehen muss, sondern die allein in diesem Schritt extrudierte Distanz. Um zu bestimmen, wie viel in einem einzigen Schritt extrudiert wird, muss man die Differenz aus der letzten extrudierten Distanz und der jetzigen extrudierten Distanz bilden.
2. **Altes Infill entfernen:** In jeder zu druckenden Schicht, die Infill enthält, wird das von Cura generierte Infill-Muster entfernt. Dabei wird der Kommentar, der das Infill einleitet gelassen, um in späteren Schritten die neuen Pfade an der richtigen Stelle einzufügen.

3.3.2. Koordinatensysteme verbinden

1. ANSYS verwendet ein anderes Koordinatensystem als Cura. ANSYS: Spiegelachse des Objekts befindet sich an der Y-Achse. Cura: Mittelpunkt des Objekts ist am Mittelpunkt der Druckplatte.
2. **Berechnung der Koordinatendifferenz:**
 - a) **Mittelpunkt des Bauteils berechnen:** Eine Ebene des Gcodes wird durchgegangen und dabei werden vier verschiedene Koordinaten herausgefiltert: die jeweils größte X- und Y-Koordinate und die kleinste X- und Y-Koordinate. Aus den X- und Y-Koordinaten wird jeweils das arithmetische Mittel gebildet. Diese gemittelten Koordinaten sind die X- und Y-Koordinaten des Mittelpunkts des Bauteils.

- b) **Mittelpunkt der Spannungslinien:** Aus allen Punkten aller Spannungslinien wird das arithmetische Mittel der Y-Koordinaten gebildet. Da die Spannungslinien noch nicht gespiegelt worden sind, ist $X_M = 0$.

3. **Verschieben der Spannungslinien:** Die Spannungslinien werden um die Differenz der beiden berechneten Mittelpunkte verschoben.

3.3.3. Spannungslinien zurechtschneiden

1. **Polygon aus Gcode erstellen:** Die Punkte der inneren Wand der ersten Schicht werden der Reihe nach als Eckpunkte eines Polygons hinzugefügt.
2. **Spannungslinien abschneiden:** Alle Punkte der Spannungslinien, die außerhalb des Polygons liegen, werden aus den Linien gelöscht. Die Spannungslinien werden erst in diesem Teil des Codes abgeschnitten und nicht in den vorherigen Schritten der Filterung der Spannungslinien, um zu garantieren, dass die gedruckten Linien an den Innenwänden des Objekts enden.

3.3.4. Spiegeln von Spannungslinien

Da in ANSYS aufgrund der numerischen Berechnung von Spannungswerten Rundungsfehler entstehen können, wird bei einem symmetrischen Bauteil nur bei der Hälfte eine Spannungsanalyse ausgeführt. Dadurch soll erreicht werden, dass bei einem symmetrischen Problem keine asymmetrische Lösung entsteht. Für die Gcode-Generierung werden die Spannungslinien der rechten Seite des Bauteils an der Y-Achse gespiegelt. Dafür werden alle X-Koordinaten der Punkte der Spannungslinien mit -1 multipliziert. Zur Erhöhung der Zugfestigkeit der gedruckten Spannungslinien werden Spannungslinien, die in der Nähe der Y-Achse enden, mit ihrer gespiegelten Version verbunden und als ein Strang gedruckt. Die Distanz, in der die endenden Spannungslinien mit ihrem gespiegelten Gegenstück verbunden werden, wird mit der Variabel "mirror_fuse_distance" festgelegt.

3.3.5. Druckreihenfolge der Spannungslinien

Die Druckreihenfolge der Spannungslinien hat einen großen Einfluss auf die Druckdauer und Druckqualität des zu druckenden Objekts. In diesem Fall werden die Spannungslinien im Gegenuhrzeigersinn gedruckt. Dies verhindert das Wandern des Druckkopfes über große leere Bereiche.

3.3.6. Generierung von Druckpfaden

Nach der Vorbereitung müssen die als Array von Punkten gespeicherten Spannungslinien in Druckpfade umgewandelt werden. Innerhalb einer Spannungslinie werden die einzelnen Punkte durch G1-Druckbewegungen verbunden. Dabei werden hinter das X und das Y die Koordinaten des nächsten zu erreichenden Punktes der Spannungslinie geschrieben. Die Distanz, um die das Filament weiter in den Druckkopf geschoben wird, wird folgendermaßen berechnet:

$$E = l * d * (e + f) \quad (1)$$

l : "Schichthöhe" in mm

e : "minimale Extrusion" in $\frac{1}{mm}$

d : “Abstand der Punkte“ in mm

f : “relative Belastung“

‘extrusion‘ ist ein, durch Tests vorher bestimmter, Parameter, der die Menge an Material in jedem Extrusions-Schritt gleich verändert. Die “relative Belastung“ wird berechnet, indem die Kraft, die auf den Teil der Spannungslinie wirkt, durch die durchschnittliche Kraft, die an allen Punkten des Bauteils wirkt, geteilt wird. Das heißt, bei überdurchschnittlicher Belastung wird das Infill deutlich dicker, und an weniger belasteten Stellen wird es kaum dicker. Die Kräfte an den Punkten werden aus der Spannungsanalyse von Ansys übernommen. f kann maximal 1,5 mal so groß sein, wie die “minimale Extrusion“, da die Druckdüse nicht mehr Material extrudieren kann.

Nach dem Beenden einer Spannungslinie wird der Druckpfad mithilfe eines Schrittes, in dem nicht extrudiert wird, zum Startpunkt der nächsten Spannungslinie bewegt. Das wird so lange gemacht, bis aus allen Spannungslinien Druckpfade generiert worden sind. Diese Druckpfade werden an jeder Stelle eingefügt, wo vorher das generische, von Cura generierte Infill war.

Am Ende werden in der ganzen Gcode-Datei die Extrusionswerte wieder in absolute Extrusion umgerechnet.

4. Fallstudie: Fahrrad-Brakebooster

4.1. Geometrie und Simulationsergebnisse

Zur Erprobung des entwickelten Konzepts unter möglichst realitätsnahen Bedingungen zu erproben, musste ein Bauteil ausgewählt werden, das sich für eine erste Fallstudie eignet. Dieses sollte als Versuchsobjekt folgende Kriterien erfüllen:

1. **Einfache Geometrie:** Damit die Effektivität der optimierten Anordnung der Filamentfasern deutlich wird und das Bauteil einfacher zu berechnen und zu bearbeiten ist, sollte es eine möglichst schlichte und detailarme Geometrie aufweisen.
2. **Alltagsbezug:** Die praktische Anwendbarkeit sowie ein potenzielles Marktpotenzial der bionisch optimierten Druckpfade sollten durch die Auswahl eines alltagsnahen Bauteils aufgezeigt werden.
3. **Hohe Belastung:** Die Optimierung der Druckpfade zielt auf eine höhere Belastbarkeit und eine höherer Bruchfestigkeit ab. Eine Optimierung ist daher nur sinnvoll, wenn das Bauteil tatsächlich relevanten mechanischen Belastungen ausgesetzt ist. Besonders aussagekräftig ist die Optimierung, wenn die auf das Bauteil wirkenden Kräfte im nicht optimierten Zustand zu einer stark verkürzten Lebensdauer führen würden. In diesem Fall wird die Notwendigkeit einer strukturellen Verbesserung besonders deutlich.
4. **Definierte Belastungsrichtung:** Die Richtung der einwirkenden Kräfte ist ein entscheidender Faktor. Je nach Anzahl der Lasten, ihrer Orientierung und der geometrischen Gestaltung des Bauteils ergeben sich unterschiedliche Hauptspannungsverläufe. Besonders in der Entwicklungsphase ist es vorteilhaft, wenn sich die zu erwartenden Spannungspfade möglichst einfach visualisieren lassen.
5. **Reproduzierbarkeit:** Das Bauteil sollte so gewählt sein, dass es einfach und konsistent herstellbar ist. Dies ermöglicht eine kontrollierte Versuchsdurchführung und Vergleichbarkeit zwischen optimierten und nicht-optimierten Varianten – z.B. für Bruchtests oder zyklische Belastungen.

6. **Skalierbarkeit:** Ein Versuchsbauteil mit Übertragbarkeit auf größere, komplexere Anwendungen bietet einen höheren Erkenntnisgewinn. So kann bereits im frühen Stadium untersucht werden, inwiefern sich die Erkenntnisse auf Bauteile mit höherem Konstruktionsaufwand oder aus anderen Anwendungsfeldern übertragen lassen.
7. **Wirtschaftlichkeit:** Wenn das Bauteil typischerweise in großen Stückzahlen gefertigt wird, wie bei Ersatzteilen, ist die potenzielle wirtschaftliche Relevanz einer Optimierung besonders hoch. Eine erfolgreiche bionische Optimierung kann dann nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich attraktiv sein.
8. **Möglichkeit der messtechnischen Validierung:** Es sollte möglich sein, die im Simulationsmodell angenommenen Belastungs- und Spannungsverläufe experimentell zu verifizieren. Dies erhöht die Aussagekraft und Glaubwürdigkeit der Ergebnisse wirklicher Bruchtests.

Auf Grundlage der angeführten Beurteilungsaspekte lag die Wahl eines Fahrradbauteils nahe. Dieses wird bei einem Fahrrad ohne Scheibenbremsen zur zusätzlichen Leistungssteigerung der herkömmlichen Felgenbremse eingesetzt - ein sogenannter Brakebooster.



Abb. 4: handelsüblicher Brakebooster - Quelle unter Bildquellen

Nach dem Festlegen auf ein sich eignendes Bauteil wurde dieses in ANSYS modelliert. Die dafür verwendete Methodik lässt sich im Kapitel 3.1.2 finden. Zusätzlich lässt sich der verwendete madpl-Code im Anhang unter A.3 begutachten.

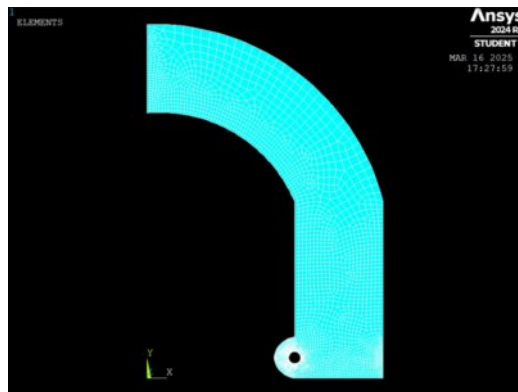


Abb. 5: Hälfte des in Ansys modellierten Brakeboosters

Beim Blick auf die obige Abbildung fällt sofort auf, dass in Ansys lediglich eine Hälfte des vollständigen Brakeboosters modelliert und analysiert wurde. Dieses Vorgehen lässt sich durch die Funktionsweise von Ansys als numerische Simulationssoftware erklären: Obwohl das Bauteil spiegelsymmetrisch aufgebaut ist, können aufgrund numerischer Rundungsfehler oder unterschiedlicher Diskretisierungen auf beiden Seiten der Symmetrieachse minimale Abweichungen in den Ergebnissen auftreten. Diese Abweichungen sind zwar sehr gering, könnten aber dennoch die Aussagekraft nachfolgender Belastungstests verfälschen. Zur Vorbeugung solcher Ungenauigkeiten, wurde bewusst nur eine Hälfte des Bauteils analysiert. Dies reduziert potenzielle Fehlerquellen und vereinfacht die Auswertung. Die Druckpfade, die aus dieser Analyse resultieren, müssen jedoch vor dem Druckvorgang gespiegelt werden, um ein vollständiges Infill auch für die gegenüberliegende Seite zu erzeugen.

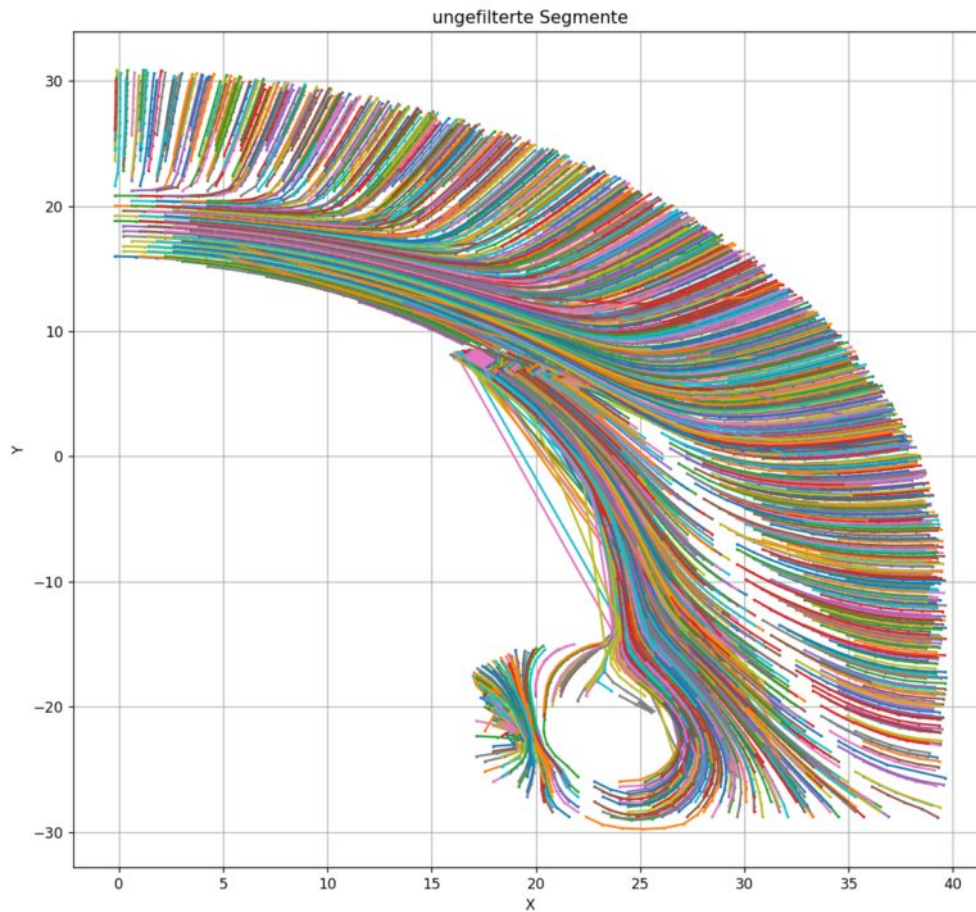


Abb. 6: simulierte und ungefilterte Spannungspfade des Brakeboosters

Nach der Simulation der Bauteilbelastung und der Übertragung der resultierenden Spannungspfade in ein Koordinatensystem ergibt sich das oben dargestellte Diagramm. In diesem sind insgesamt 750 Spannungslinien visualisiert. Aufgrund der hohen Dichte dieser Linien ist es jedoch nicht möglich, die Pfade direkt für den 3D-Druck zu verwenden. Zudem führen numerische Ungenauigkeiten in der Ansys-Berechnung zu signifikanten Verzerrungen in der Darstellung der Druckpfade. Aus diesem Grund ist eine Vorfilterung der Spannungslinien notwendig, um eine zuverlässige und präzise Grundlage für den späteren Druckprozess zu schaffen. Infolgedessen ist das Filter-Skript A.5 entwickelt worden.

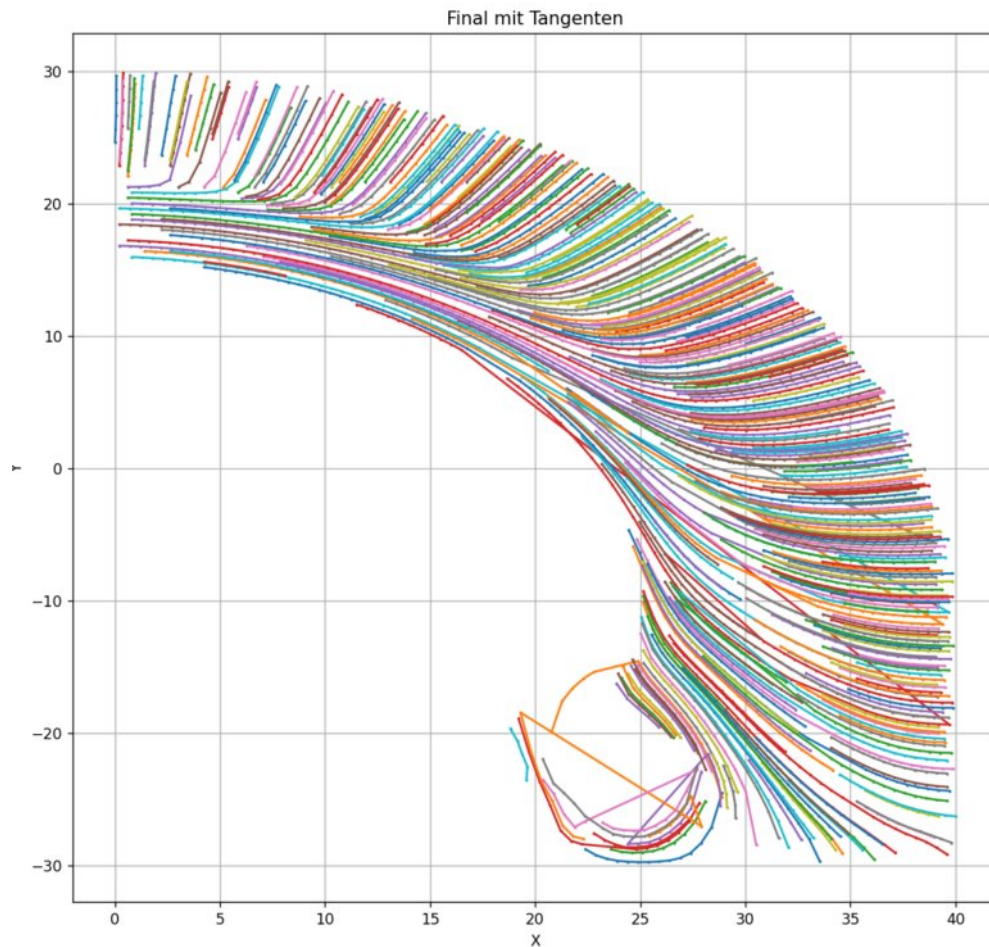


Abb. 7: gefilterte Spannungspfade des Brakeboosters

Nach Anwendung des Filter-Skripts hat sich die Dichte der Spannungspfade deutlich reduziert. Gleichzeitig wurden zuvor getrennte Pfade zu durchgehenden Segmenten zusammengeführt, während unvollständige oder fehlerhafte Linien konsequent entfernt wurden. Die resultierenden, bereinigten Segmente eignen sich nun als vollwertige Infill-Struktur für den 3D-Druck.

Die Spannungspfade, die quer durch das Befestigungsloch verlaufen, entstehen durch das Aneinanderhängen mehrerer benachbarter Segmente und werden im späteren Verlauf bei der G-Code-Erstellung entfernt.

4.2. Druckparameter und Materialwahl

- **Material:** Für unsere Versuche wurde PLA (Polylactic Acid) verwendet. Es weist weder eine besonders hohe Steifigkeit noch andere besondere Mechanische Eigenschaften auf. Es wird häufig verwendet, da es sehr einfach zu drucken ist und relativ preiswert ist. PLA kann aus nachwachsenden Rohstoffen produziert werden, wie Maisstärke oder Zuckerrohr. Es kann unter bestimmten Bedingungen von Mikroorganismen zersetzt werden.

- **Druckparameter:**

- Es wurde die Schichthöhe 0,2 mm verwendet. Daraus ergeben sich für ein 5 mm hohes Bauteil 25 zu druckende Schichten.
- Die Drucktemperatur von PLA liegt zwischen 190°C und 220°C. Der Bremsbügel wurde bei 205°C gedruckt.
- Der Drucker extrudiert das Filament durch eine 0,4 mm dicke Öffnung der Düse. Daraus ergibt sich eine Liniendicke von ca. 0,4 mm.

4.3. Testaufbau und Versuchsprotokoll

Die gedruckten Versuchsobjekte werden für einen iterativen Verbesserungsprozess der Spannungspfadverläufe und Filterstrategien und auch eine Vergleichsmöglichkeit zu anderen Infill-Mustern zu haben getestet. Für die Reproduzierbarkeit der aufgenommenen Werte, wählten wir einen stabilen Versuchsaufbau, mit dem alle Bauteile unter identischen Bedingungen geprüft werden konnten. Hierfür kam eine Kraftzugmaschine mit einer maximalen Zugkraft von 300 N zum Einsatz.



Abb. 8: Zugmaschine mit eingespanntem Brakebooster

Sobald die Messung an der Prüfmaschine gestartet wird, beginnt sich die Distanz zwischen dem oberen und unteren Befestigungspunkt des Versuchsobjekts zu vergrößern. Dies erfolgt in zuvor definierten Schrittlängen, die mit einer einstellbaren Vorschubgeschwindigkeit v abgefahren werden. Die gewählten Parameter blieben während der Tests unverändert, da sie im Rahmen unseres Versuchsaufbaus nur einen marginalen Einfluss auf die tatsächliche Belastbarkeit des Bauteils haben. Im Verlauf der Messung wird bei jedem Schritt der Länge x die aktuelle Distanz d zwischen den Aufhängungspunkten sowie die darauf wirkende Zugkraft aufgezeichnet. Diese Messwerte lassen sich anschließend leicht in einem Weg-Kraft-Diagramm darstellen, um das mechanische Verhalten der Probe anschaulich zu visualisieren. Es war darauf zu achten, im Vorfeld eine möglichst kleine Schrittlänge x zu wählen, um eine hohe Messwertdichte für die spätere Auswertung zur Verfügung zu haben.

Tabelle 1: Auszug aus den Weg-Kraft-Messdaten der Zugprüfung

Dehnungsschritt x [mm]	Kraft F [N]
0,00	2,63
0,05	4,24
0,10	5,77
0,15	7,33
0,20	8,71
0,25	10,09
0,30	11,43
0,35	12,62
0,40	13,77

4.4. Ergebnisse

Im Rahmen der praktischen Untersuchungen erfolgte die Erfassung der mechanischen Eigenschaften in vier getrennten Testreihen. Ziel war zum einen die Dokumentation der Entwicklung und Iteration des optimierten Infill-Verfahrens, zum anderen der Vergleich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Infill-Muster unter identischen Bedingungen. Die später durchgeführten dritten und vierten Testreihe hatten das Ziel, den Einfluss eines zusätzlich optimierten Extrusionsflusses auf die bereits angepasste Infill-Struktur zu untersuchen.

1. Entwicklungsreihe: In der ersten Phase standen die algorithmische Generierung, Filterung und Integration der spannungsgerechten Pfade im Vordergrund. Da der Schwerpunkt auf der methodischen Optimierung lag, wurden hier sukzessive unterschiedliche Versionen des Infill-Algorithmus getestet (siehe Anhang A.7, Tabelle 2). Diese Werkstücke unterschieden sich teils deutlich in ihrer internen Struktur, jedoch sollten andere Einflussgrößen möglichst konstant gehalten werden: Verwendet wurde durchgängig PLA-Filament, es wurde unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) gedruckt, und der Materialeinsatz wurde durch einheitliches oder sehr ähnliches Bauteilgewicht kontrolliert. Zu beachten ist, dass im Rahmen der Entwicklungsreihe auch Vergleichsmessungen mit Filamenten durchgeführt wurden, die denselben Typ aufwiesen und von unterschiedlichen Herstellern stammten. Diese Auswahl beruhte auf der anfänglichen Fehleinschätzung, dass Unterschiede zwischen Herstellern keine signifikanten Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Filaments hätten. Im Nachhinein stellte sich jedoch heraus, dass dies die Aussagekraft und

Vergleichbarkeit einzelner Ergebnisse deutlich beeinträchtigt.

2. Vergleichsreihe: In einer abschließenden Messreihe (siehe Tabelle 4) wurden verschiedene Infill-Muster unter identischen Versuchsbedingungen getestet. Hierbei kamen ausschließlich Werkstücke aus demselben PLA-Filament zum Einsatz, um Materialeinflüsse weitestgehend zu eliminieren. Die Druckparameter (z.,B. Düsentemperatur, Schichthöhe, Geschwindigkeit) und die Umgebungsbedingungen wurden kontrolliert konstant gehalten. Ziel war es, eine isolierte Bewertung des Einflusses der Infill-Geometrie auf die Bruchfestigkeit zu ermöglichen. In der Entwicklungsreihe und in der Vergleichsreihe wurde unterschiedliches PLA-Filament verwendet, da das ursprünglich verwendete Filament nicht mehr verfügbar war. Es handelte sich weiterhin um PLA mit vergleichbaren Spezifikationen, aber unterschiedlichen Herstellern und Lagerungszeiten. Diese Unterschiede wirken sich potenziell auf die Materialkennwerte aus und erschweren auch hier einen direkten Vergleich zwischen Entwicklungs- und Vergleichsreihe.

3. konstante Extrusionsreihe: Niedrige Extrusion bei erhöhter Pfaddichte Zur Prüfung der Wechselwirkung zwischen reduziertem Materialfluss und erhöhter Pfaddichte wurde eine dritte, explorative Messreihe durchgeführt. Ziel war es, zu untersuchen, ob eine dichtere, spannungsgerechte Pfadföhrung die durch eine abgesenkte Extrusionsmenge potenziell verschlechterte Schichthaftung kompensieren kann und welchen Einfluss diese Kombination auf die Bruchfestigkeit hat.

4. variable Extrusionsreihe: Niedrige Extrusion bei erhöhter Pfaddichte In einer vierten Testreihe wurde der Materialfluss nicht konstant abgesenkt, sondern variabel an den lokalen Spannungsbetrag angepasst. Untersucht werden sollte, inwiefern eine erhöhte Extrusion in hochbelasteten Bereichen und eine reduzierte Extrusion in weniger beanspruchten Zonen eine optimierte Materialverteilung zu erreichen. Dadurch sollte geprüft werden, ob eine adaptive Anpassung des Extrusionsflusses sowohl die Bauteilfestigkeit als auch die Materialeffizienz verbessern kann.

Limitationen: Die Extrusionsreihen sind als explorativ zu werten: Kleinere Abweichungen im realen Flow und in der lokalen Kühlung können die Interlayer-Haftung überproportional beeinflussen. Zudem erzeugt eine erhöhte Pfaddichte mehr Linienkreuzungen und potenzielle Start/Stop-Artefakte, die als Schwachstellen wirken können. Daher sind sie methodisch nicht 1:1 mit den ersten beiden Reihen vergleichbar.

Materialkonstanz: Für alle Versuche wurde als Filament PLA verwendet, lediglich bei einem Sondertest kam PLA-CF (Kohlenstoffaserverstärkt) zum Einsatz. Die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften sind nicht zu unterschätzen: In einzelnen Fällen kam es trotz gleichem Typus (PLA) zu erheblichen Abweichungen in den Messergebnissen, was insbesondere bei älterem oder feucht gelagertem Filament auf hygroskopische Alterung zurückgeführt werden kann.⁸

Bewertung der relativen Infill-Effizienz: Obwohl das optimierte Infill in der finalen Vergleichsreihe nicht die höchsten absoluten Bruchfestigkeiten aufwies, deuten die Ergebnisse der Entwicklungsreihe darauf hin, dass seine Effizienz insbesondere bei geringerem Materialeinsatz deutlich wird. Bei vergleichbarem Gewicht und

Infill-Anteil zeigte sich, dass die Spannungspfad-orientierten Muster mit einer geringeren Dichte, aber gezielterer Strukturierung, mechanisch überdurchschnittlich belastbar waren. Dies legt nahe, dass Standard-Infill bei zunehmender Dichte zwar ebenfalls an Festigkeit gewinnt, jedoch mit ineffizientem Materialeinsatz, während das optimierte Infill durch seine lastpfadgerechte Anordnung bei gleicher Masse feiner strukturiert bleibt. Dadurch entsteht insbesondere in Leichtbauanwendungen ein Vorteil, der durch rein absolut gemessene Kraftwerte allein nicht angemessen erfasst wird. Das bedeutet, dass das Bauteil durch die Optimierung insbesondere bei geringem Gewicht die höchste gemessene Belastbarkeit erreicht.

Zusammenfassung: Die Ergebnisse zeigen, dass der entwickelte Optimierungsansatz das Potenzial besitzt, die mechanische Belastbarkeit von FDM-Bauteilen effizienter auszuschöpfen als klassische Infill-Strategien – insbesondere bei reduzierter Dichte und gleichem Gewicht. Gleichzeitig verdeutlichen die Messreihen die hohe Sensitivität der Messergebnisse gegenüber filamentbezogenen Variablen. Eine kritische Betrachtung und Protokollierung aller Materialparameter ist daher für zukünftige Versuchsserien unverzichtbar.

Ausblick auf die Diskussion: Die folgenden Kapitel analysieren die konkreten mechanischen Auswirkungen der unterschiedlichen Infill-Muster detaillierter. Dabei werden die in den Tabellen erfassten Bruchfestigkeiten, Auslenkungen und Gewichtswerte systematisch miteinander verglichen und im Kontext ihrer strukturellen Effizienz interpretiert. Insbesondere soll geklärt werden, unter welchen Bedingungen das spannungsgerechte Infill gegenüber klassischen Mustern Vorteile bietet und wo seine derzeitigen Grenzen liegen.

5. Diskussion und Analyse der Ergebnisse

5.1. Analyse des modifizierten Infill-Musters

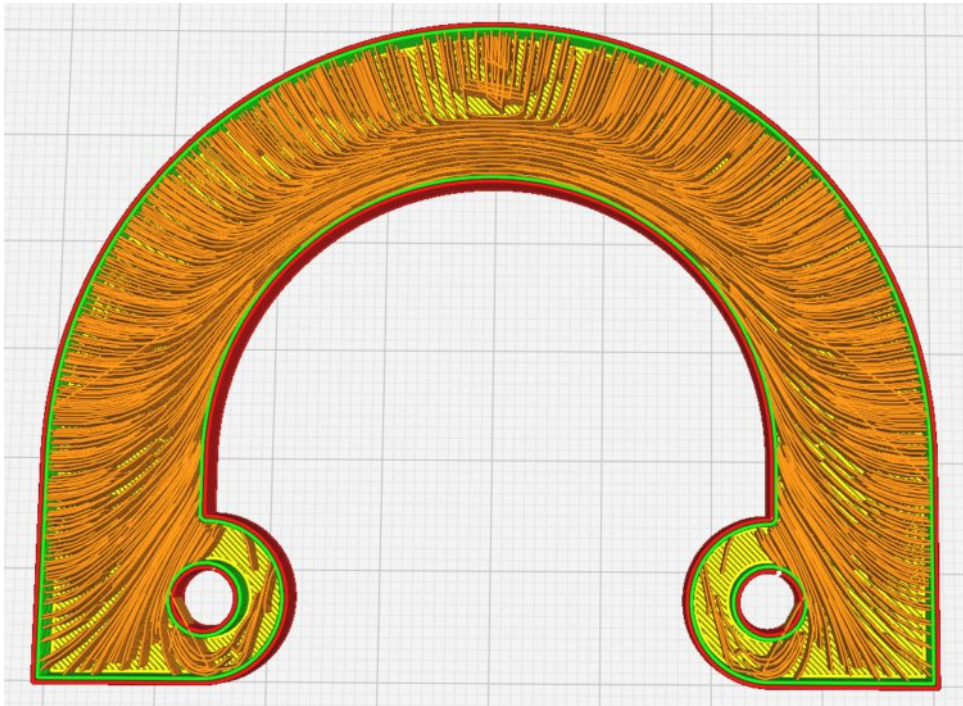


Abb. 9: Optimiertes Infill-Muster

Das in Abbildung 9 zu sehende Infill, ist die aktuelle Version des optimierten Infill-Musters. Die orangefarbenen Linien stellen die durch das Skript generierten internen Strukturen des Bauteils dar. Im unteren Bereich des Brake-Boosters befinden sich zwei Bohrungen, an denen das Bauteil im Rahmen der Tests mechanisch auf Zug beansprucht wird. Die internen Strukturen verlaufen nahezu spiegelsymmetrisch; die leichte Asymmetrie im oberen Bereich ist auf das algorithmische Zusammenführen von Linien während der Spiegelung zurückzuführen. Die Infill-Linien orientieren sich an der Verteilung der Hauptnormalspannungen, die bei der spezifischen Belastung durch Zugbeanspruchung im Material auftreten. Rund um die beiden Bohrungen ist kaum Infill vorhanden, da dort nur geringe Spannungen auftreten und die entsprechenden Linien bei der Spannungsfilterung verworfen wurden. Die längsten Infill-Linien verlaufen entlang der Unterseite im Zentrum des Bauteils. Es ist entscheidend, dass diese Linien durchgehend, also ohne Unterbrechung, gedruckt werden, um eine potenzielle Schwächung in Form einer Sollbruchstelle im Bereich maximaler Spannung zu vermeiden.

Im darüberliegenden asymmetrisch aufgebauten Bereich treten zwar kaum Zugspannungen auf, allerdings entsteht dort bei einer zusätzlichen Biegebelastung eine relevante Druckbeanspruchung. Damit die daraus resultierende Kompression mechanisch abgefangen und die strukturelle Integrität der Spannungslinien erhalten wird, erfolgt in diesem Bereich gezielt ein erhöhter Materialeinsatz.

5.2. Mechanische Prüfungen und Vergleich mit Standard-Infill

Zur Bewertung der entwickelten Infill-Strategie wurde eine umfassende Testreihe mit mechanischen Zugversuchen durchgeführt. Ziele waren, die mechanischen Leistungsdaten wie Bruchfestigkeit und Steifigkeit der iterativ entwickelten Spannungspfadmuster zu erfassen und einen systematischen Vergleich mit gängigen Standard-Infill-Geometrien zu ermöglichen.

Iterationsverlauf und Trendanalyse Abbildung 10 illustriert den Verlauf der Bruchfestigkeit über mehrere Versionen der optimierten Pfadstruktur. Eine klare Tendenz ist erkennbar: mit fortschreitender Optimierung (von V1 bis V6) nimmt die maximale Bruchkraft signifikant zu, von ca. 125 N (V1) bis hin zu über 216 N (V6). Gleichzeitig sinkt die Auslenkung bei Bruch (von über 14 mm auf unter 11 mm), was auf eine erhöhte Steifigkeit hindeutet. Diese Entwicklung lässt sich plausibel mit einer zunehmenden Orientierung der Druckpfade entlang der Hauptspannungslinien erklären: Durch besser ausgerichtete Filamentbahnen wird die Last effizienter aufgenommen und verteilt.

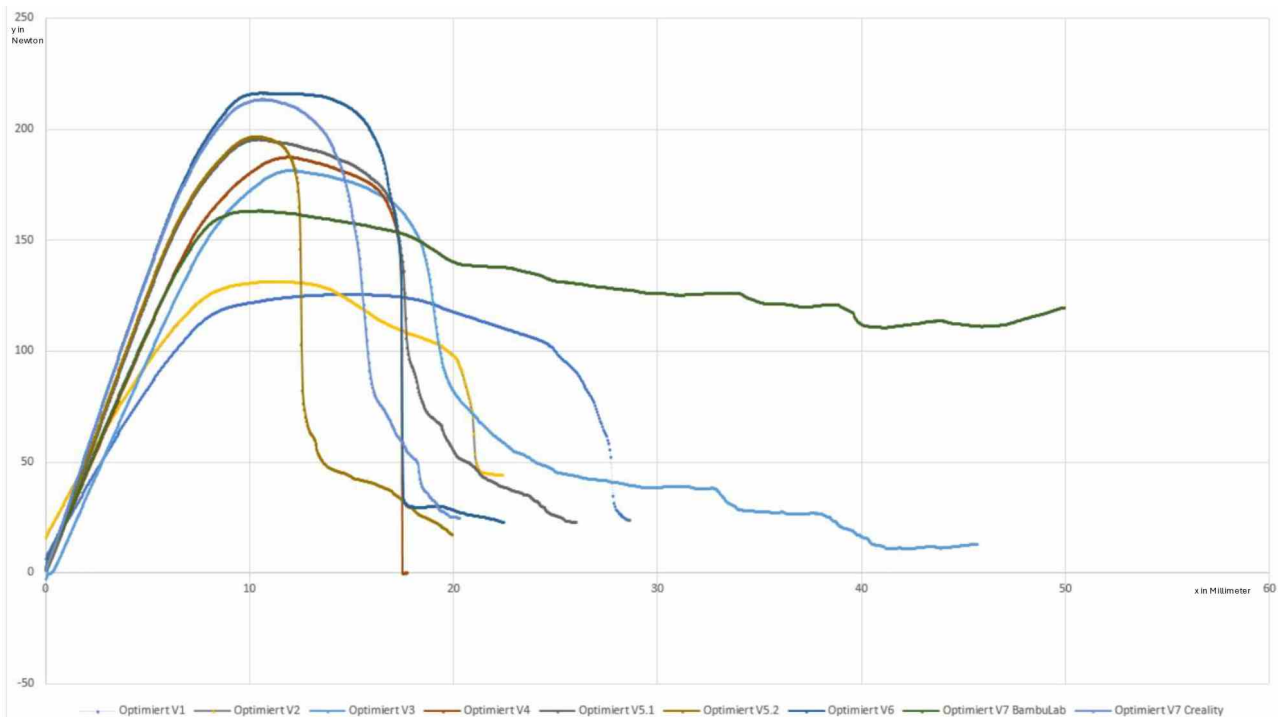


Abb. 10: Iterationsverlauf des optimierten Infills

Vergleich mit Standardmustern Ein direkter Vergleich mit konventionellen Infill-Geometrien zeigt interessante Ergebnisse: in der Entwicklungsreihe (Abb. 11) schneiden klassische Muster wie „Hexagon“ oder „Grid“ bei vergleichbarem Gewicht deutlich schlechter ab als die optimierten Varianten ab Version V3. Die Kraft-Weg-Kurven zeigen ein frühzeitigeres Versagen und eine weichere Charakteristik. Besonders deutlich wird dies im Vergleich mit den „Archimedischen Akkorden“ – einem Muster mit scheinbar guter Kraftverteilung, das in der Standardimplementierung ohne Spannungsausrichtung jedoch nur rund 118 N erreichte. Dies entspricht etwa 45 % und liegt damit deutlich unter dem Maximum der optimierten Variante.

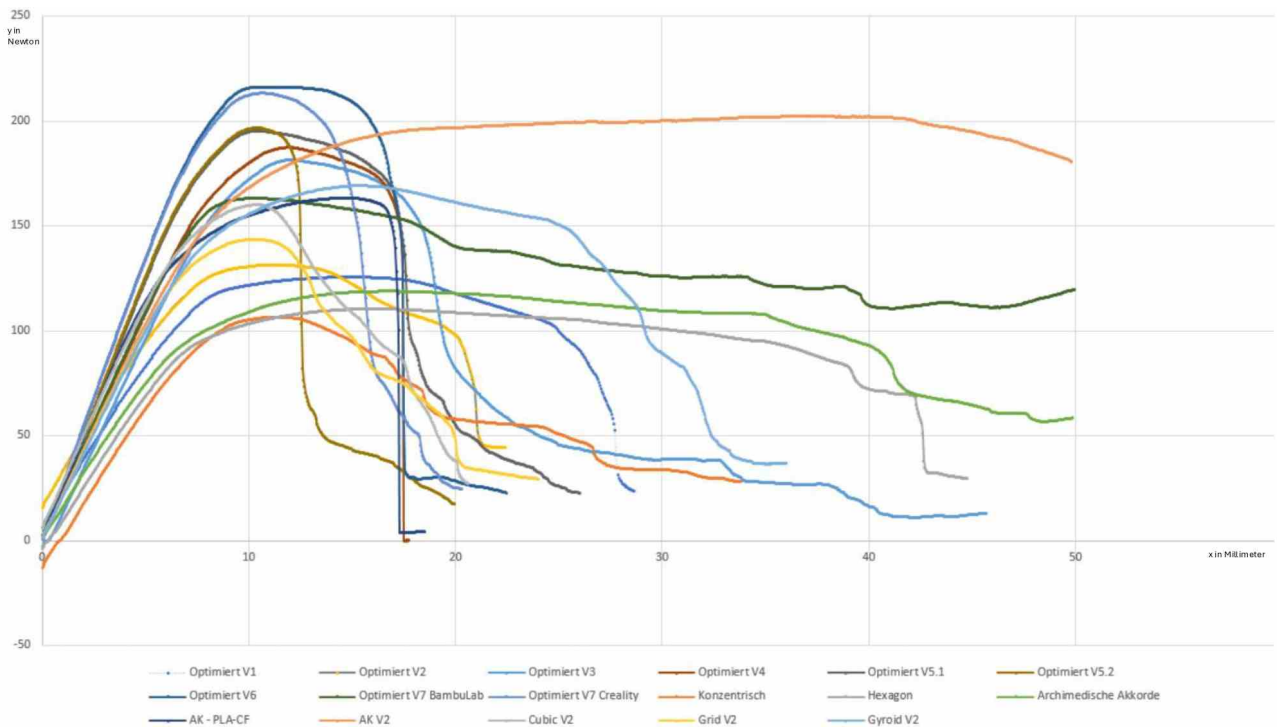


Abb. 11: Übersicht der Entwicklungsmessreihe

Vergleichsreihe: robuste Validierung In der unabhängigen Vergleichsreihe (Abb. 14) wurden alle Proben aus derselben Rolle Filament gedruckt und hinsichtlich Gewicht standardisiert (12,8 g–12,9 g). Trotz dieser Homogenität erreicht die optimierte Version V7.1 mit 214,4 N eine höhere Festigkeit als z.,B. Grid2 (175,3 N) oder Hexagon2 (183,2 N). Nur das konzentrische Muster (Konzentrisch1: 294,9 N) übertraf alle anderen deutlich – allerdings mit einer stark veränderten Kraft-Weg-Kurve, die auf ein völlig anderes Bruchverhalten hinweist (extreme Verformung bei gleichzeitig hoher Belastung). Dies deutet auf eine hohe Duktilität, jedoch möglicherweise auf Kosten der strukturellen Integrität.

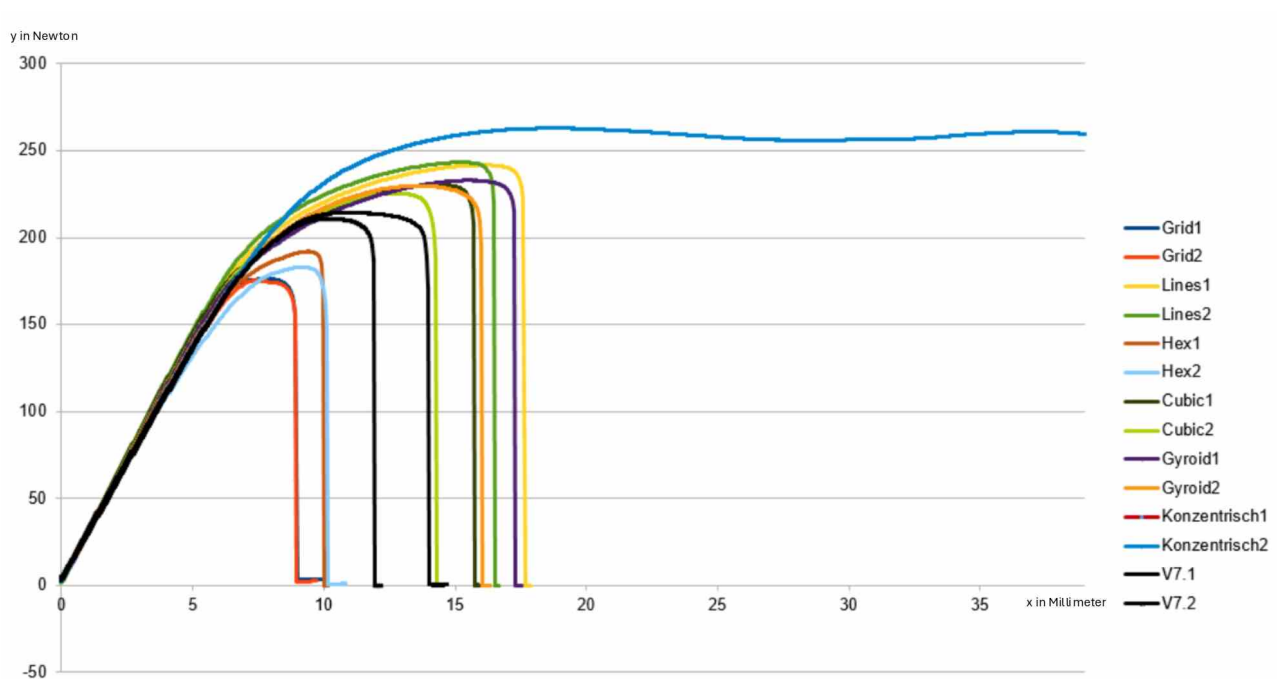


Abb. 12: Übersicht der Vergleichsmessreihe

konstant niedrigere Extrusion bei höherer Pfaddichte Die dritte Messreihe (konstante Extrusion bei erhöhter Pfaddichte) liefert zwei zentrale Beobachtungen. Im ersten Vergleichsdiagramm wird deutlich, dass sich die Stabilität der Proben mit fortschreitender Version sukzessive verbessert. Dieser Trend lässt sich plausibel mit der steigenden Anzahl an Pfaden erklären: Mit jeder neuen Version wurde die Pfaddichte erhöht, wodurch das Lastabtragungsnetz feiner und homogener wurde. Dadurch können auftretende Spannungen gleichmäßiger verteilt und lokale Überlastungen vermieden werden. Die steigende Bruchfestigkeit im Verlauf der Versionen ist somit weniger allein auf die Materialmenge zurückzuführen, sondern vor allem auf die gezieltere Anordnung und Dichte der Pfade.

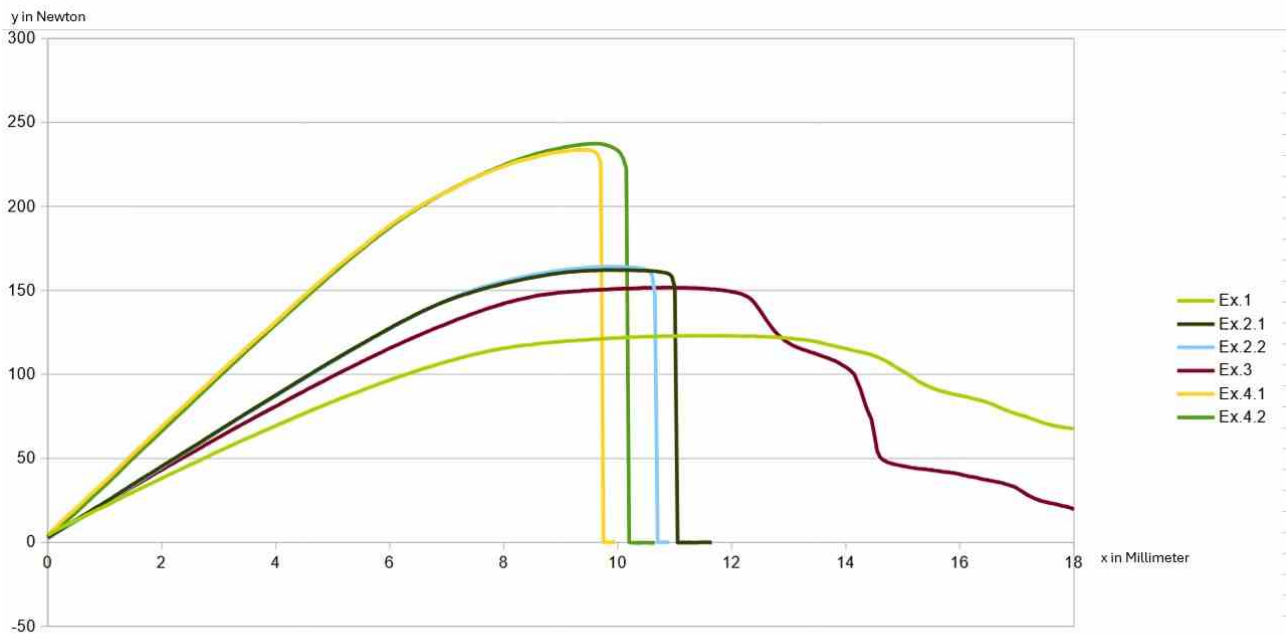


Abb. 13: Übersicht der konstanten Extrusionsreihe

Das zweite Diagramm stellt die konstant unterextrudierten, aber pfaddichten Proben den Vergleichsproben mit normaler Extrusion (bei identischem Infill) sowie klassischen Standardmustern gegenüber. Auffällig ist hier, dass die unterextrudierten Proben trotz nahezu gleicher Materialmenge eine deutlich höhere Bruchfestigkeit erreichen. Noch bemerkenswerter ist ihre größere Steifigkeit, die sich im steileren Verlauf des elastischen Bereichs zeigt. Dies legt nahe, dass die erhöhte Pfaddichte nicht nur den Nachteil der reduzierten Extrusion kompensiert, sondern die mechanische Kopplung der Linien sogar verbessert. Während Standardmuster wie „Grid“ oder „Hexagon“ früher versagen und weichere Kurvenverläufe aufweisen, zeigen die angepassten Infill-Proben mit niedrigerer Extrusion eine klar höhere Tragfähigkeit und Steifigkeit.

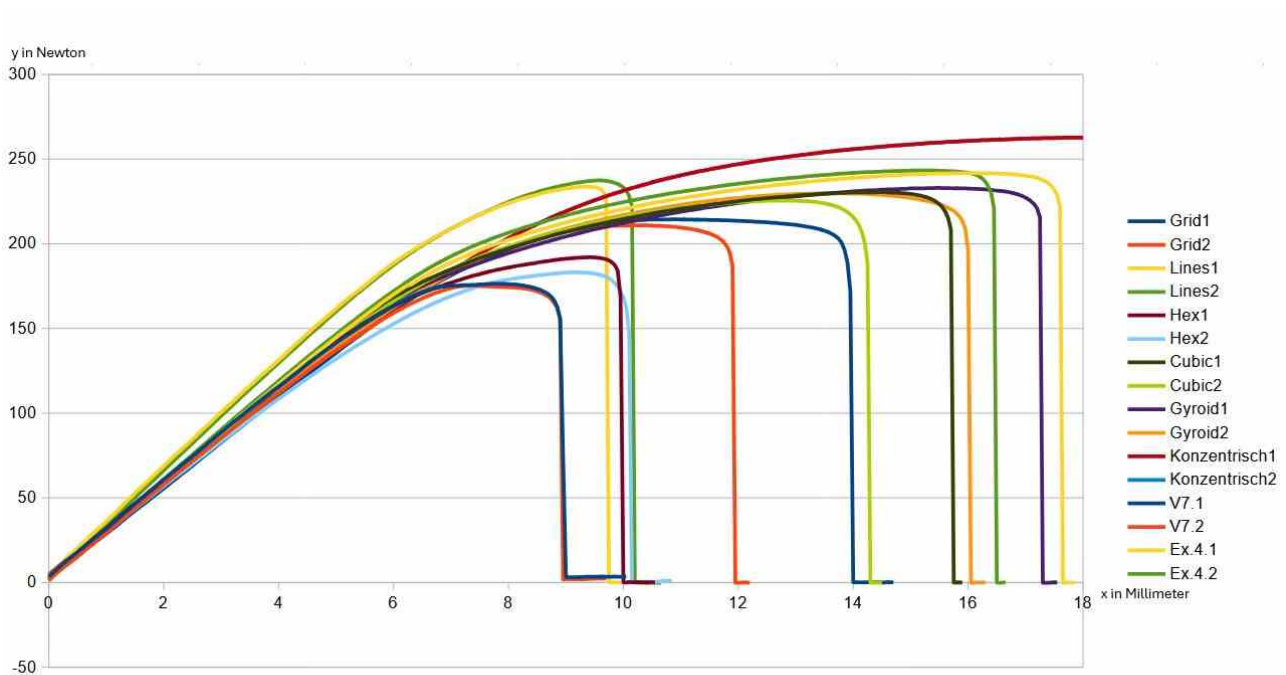


Abb. 14: konstante Extrusionsreihe im Vergleich

Zusammenfassend zeigt die dritte Messreihe, dass eine konstante Unterextrusion nicht zwangsläufig zu schlechteren mechanischen Eigenschaften führt, sofern sie mit einer signifikant erhöhten Pfaddichte kombiniert wird. Im Gegenteil: In bestimmten Konfigurationen konnte eine höhere Bruchfestigkeit und Steifigkeit erreicht werden als mit normaler Extrusion oder Standardmustern.

variable Extrusion bei spannungsgerechter Pfaddichte Die vierte Messreihe untersuchte die Wirkung einer adaptiven Extrusion, bei der der Materialfluss nicht konstant abgesenkt, sondern variabel an den lokalen Spannungsbetrag angepasst wurde. Ziel war es, in hochbelasteten Bereichen eine erhöhte Extrusion und in weniger beanspruchten Zonen eine reduzierte Extrusion einzusetzen. Dadurch sollte eine effizientere Materialverteilung entstehen, die sowohl die Festigkeit als auch die Ressourcennutzung optimiert.

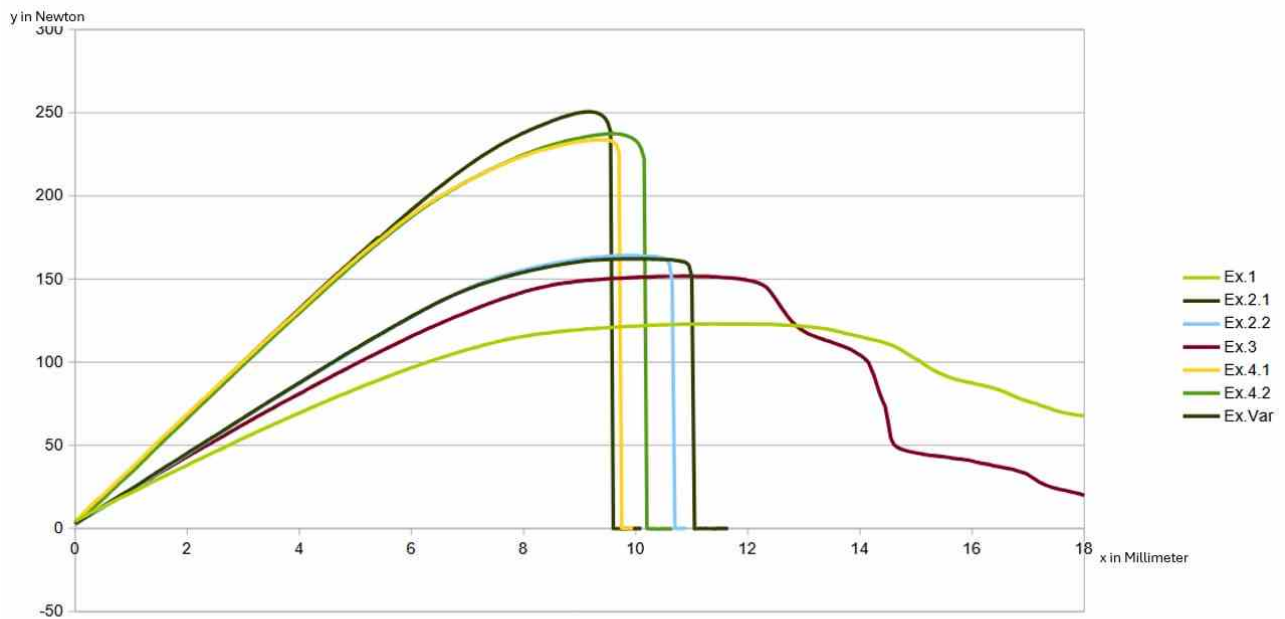


Abb. 15: Vergleich der variablen Extrusion mit der konstanten Extrusionsreihe

Das erste Diagramm (Abb. 15) verdeutlicht, dass die Proben mit variabler Extrusion ein klar verändertes Bruchverhalten aufweisen. Besonders auffällig ist die Kombination aus erhöhter Anfangssteifigkeit und gesteigerter Bruchlast. Im Vergleich zu den Proben mit konstanter Unterextrusion zeigen die adaptiv extrudierten Varianten nicht nur einen steileren elastischen Bereich, sondern auch eine verzögerte Abnahme der Tragfähigkeit nach Erreichen der maximalen Last. Dies deutet auf eine homogenere Materialverteilung und eine effektivere Nutzung der vorhandenen Masse hin.

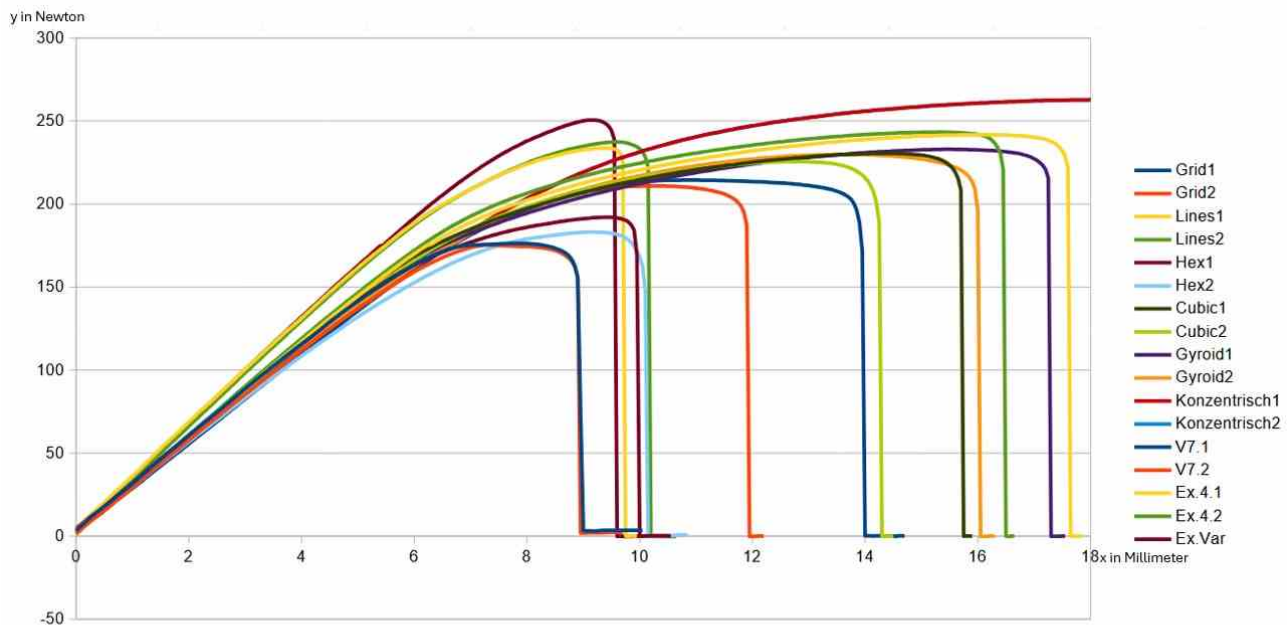


Abb. 16: Gesamtübersicht aller Reihen inklusive variabler Extrusion

In der Gesamtübersicht (Abb. 16) wird die Effizienz der variablen Extrusion besonders im direkten Vergleich mit klassischen Standardmustern sichtbar. Während Muster wie „Grid“ oder „Lines“ bei ähnlichem Gewicht deutlich früher versagen, erreichen die spannungsgerecht ausgerichteten und adaptiv extrudierten Proben eine signifikant höhere Bruchfestigkeit. Nur stark duktil verformbare Muster wie „Konzentrisch“ können in absoluten Zahlen mithalten, unterscheiden sich jedoch im Bruchmechanismus fundamental.

Zusammenfassend zeigt die vierte Messreihe, dass eine adaptive Extrusion die Vorteile der konstanten Unterextrusion (höhere Pfaddichte, verbesserte Steifigkeit) weiter verstärken kann. Durch die gezielte Erhöhung des Materialflusses in hochbelasteten Bereichen wird eine zusätzliche Sicherheitsreserve geschaffen, während in weniger beanspruchten Zonen Material eingespart wird. Diese Ergebnisse unterstreichen das Potenzial eines lastabhängig variablen Extrusionsansatzes, um die Balance zwischen Bauteilfestigkeit und Materialeffizienz noch weiter zu optimieren.

Steifigkeit und elastisches Verhalten Die Steilheit des ansteigenden Asts der Kraft-Weg-Kurven erlaubt Rückschlüsse auf die effektive Bauteilsteifigkeit. Hier zeigen die optimierten Varianten durchweg eine erhöhte Anfangssteigung. Die Kombination aus hoher Steifigkeit und hoher Bruchlast legt nahe, dass die Ausrichtung der Filamentbahnen entlang der Hauptspannungspfade tatsächlich zu einer signifikant verbesserten mechanischen Kopplung der Strukturen führt. Im Vergleich zu isotropen Mustern wie „Gyroid“ oder „Grid“ zeigt sich, dass die Anisotropie des Materials durch den Spannungspfad gezielt funktional genutzt werden kann.

Gewichtseffizienz Ein zentrales Ziel der Optimierung bestand darin, die Bauteilfestigkeit nicht absolut, sondern relativ zum Materialeinsatz zu verbessern. Während „Archimedische Akkorde CF“ mit 163 N eine gute Festigkeit zeigt, liegt das Gewicht bei 8,8 g – deutlich über V5.2, das mit 196,8 N bei 11,3 g über 20% höhere Festigkeit zeigt.

Festigkeit pro Gramm liefert.

5.3. Bewertung der Stabilitätsverbesserung

Die Spannungsorientierung der Druckpfade resultiert nicht nur in einer höheren absoluten Festigkeit, sondern verändert das strukturelle Verhalten des Bauteils auf fundamentale Weise. Im Folgenden wird die qualitative und quantitative Wirkung dieser Optimierung auf die Stabilität bewertet.

Nutzung der anisotropen Materialstruktur Das FDM-Verfahren produziert naturgemäß anisotrope Bauteile. Die optimierte Pfadführung kehrt diese Schwäche in eine Stärke um: Die Orientierung entlang der Hauptnormalspannungen nutzt die höhere Festigkeit in Druckrichtung optimal aus und reduziert schwache Querbindungen. Daraus resultiert nicht nur eine erhöhte Bruchfestigkeit, sondern auch eine homogenere Verteilung der Spannung über das gesamte Bauteilvolumen.

Homogenität der Spannungsauslastung Die Filterung und Glättung der Spannungslinien sorgt dafür, dass keine überflüssigen oder inkonsistenten Infill-Strukturen entstehen. Im Vergleich zu klassischen Mustern, bei denen wie in Gitterkreuzungen Spannungsspitzen lokal auftreten, ergibt sich eine gleichmäßige Auslastung. Dies zeigt sich in den Kraft-Weg-Kurven durch das Fehlen abrupten Lastabfälle und das allmähliche Versagen – ein Indikator für eine höhere strukturelle Reserve.

Stabilität unter geringer Dichte Die stabilitätswirksame Effizienz des Pfad-Infills zeigt sich besonders bei geringem Infill-Anteil. Während konventionelle Muster bei 13 %–19 % Füllgrad bereits deutlich an Festigkeit verlieren, erreicht das optimierte Muster vergleichbare oder höhere Festigkeiten bei niedrigerem Volumenanteil. Die Version V2 übertraf „Konzentrisch“ und „Hexagon“ trotz eines ähnlichen Materialeinsatzes.

Elastizitätsverhalten und Rückverformung Ein weiterer Stabilitätsaspekt ist die Elastizität des Bauteils, aber die Fähigkeit zur Rückverformung ohne bleibende Deformation. Die optimierten Infill-Muster zeigen im Vergleich eine steilere, linearere Kraft-Weg-Kurve im elastischen Bereich. Dies spricht für eine verbesserte Federsteifigkeit – wichtig für zyklisch beanspruchte Bauteile wie Brakebooster.

Grenzen der Optimierung bei hoher Infill-Dichte Ein interessanter Befund ergibt sich aus der Vergleichsmessreihe: obwohl das spannungsgerechte Infill (Versionen V7.1 und V7.2) im elastischen Bereich ein mit anderen Infill-Geometrien vergleichbares Steifigkeitsverhalten zeigt – also eine ähnlich steile Anfangssteigung der Kraft-Weg-Kurve –, fällt die maximale Bruchfestigkeit gegenüber den besten Standardmustern wie „Konzentrisch“ oder „Gyroid“ merklich ab. Mögliche Ursachen hierfür sind die im Vergleich feinere Extrusionsstruktur der Spannungslinien (geringere Linienbreite oder -höhe) sowie eine geringere tatsächliche Infill-Dichte bei gleicher äußerer Bauteilform. Dies legt nahe, dass sich der positive Effekt der spannungsgerechten Orientierung bei zunehmender Materialdichte abschwächt: Wenn das Bauteil fast vollmassiv gedruckt wird, dominieren flächige Materialakkumulation und Gesamtvolumen über die gezielte Strukturierung. Die Stärke der optimierten Pfadstrategie liegt demnach nicht im Erreichen absoluter Maximalwerte bei nahezu 100% Infill, sondern in ihrer Fähigkeit, bei reduziertem Materialeinsatz – also in echten Leichtbauanwendungen – dennoch eine überproportional hohe strukturelle Stabilität bereitzustellen. Die Wirksamkeit der Methode entfaltet sich gerade dann, wenn

Materialressourcen begrenzt sind und jede Faser gezielt im Kraftfluss platziert werden muss. Das Verfahren lässt sich somit als eine Abwandlung der SKO-Methode verstehen, da durch die Definition der Spannungslinien gezielt Infill an den Stellen vermieden wird, an denen es nur einen marginalen Beitrag zur strukturellen Stabilität leisten würde.

Ausreißer und methodische Reflexion Die Version „Archimedische Akkorde V2“ zeigte ein anomales Verhalten mit extrem hoher Auslenkung (37,7 mm) bei vergleichsweise hoher Bruchlast. Dies ist vermutlich auf eine übermäßige Duktilität durch ungerichtete Struktur zurückzuführen. Trotz des höheren E-Moduls zeigte das Filament PLA-CF keine besseren Ergebnisse, wodurch die These gestützt wird, dass die strukturelle Pfadoptimierung eine größere Rolle spielt als die reine Materialwahl.

Handlungsempfehlung für die Praxis Die Ergebnisse belegen das erhebliche Potenzial strukturadaptiver Pfadoptimierung für den Leichtbau. Künftige Druckaufträge sollten gezielt dort mit spannungsgerechtem Infill arbeiten, wo strukturelle Belastung dominiert – etwa in Lasttragenden Zonen oder Befestigungspunkten. Weniger beanspruchte Bereiche können hingegen mit konventionellem Füllmuster oder gar ohne Infill realisiert werden.

Zusammenfassung Die Pfadoptimierung entlang der Hauptnormalspannungen verbessert die Stabilität nicht nur durch höhere maximale Bruchlasten, sondern vor allem durch gesteigerte Steifigkeit, Materialeffizienz und Homogenität der Spannungsverteilung. Sie bietet somit eine effektive Methode zur funktionellen Verstärkung von FDM-Bauteilen bei gleichzeitiger Ressourcenschonung – ein Paradigmawechsel weg von isotropen Massenstrukturen hin zu intelligenten, spannungsgerechten Leichtbaukonzepten.

6. Fazit

6.1. Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die durchgeführten Testreihen zeigen, dass der entwickelte Optimierungsansatz besonders bei niedriger Infill-Dichte sein volles Potenzial entfaltet. Während bei nahezu vollmassiven Drucken (hoher Infill-Anteil) keine signifikanten Unterschiede zwischen optimiertem und konventionellem Infill festgestellt wurden, konnten bei geringerer Dichte deutliche Vorteile der spannungsgerechten Strukturierung nachgewiesen werden – insbesondere in Bezug auf Steifigkeit und relative Bruchfestigkeit.

Diese Ergebnisse bestätigen, dass das Verfahren nicht auf eine Maximierung der absoluten Belastbarkeit abzielt, sondern auf eine Verbesserung der strukturellen Effizienz. Durch gezielte Ausrichtung der Filamentpfade entlang der Hauptspannungen wird nur dort Material eingesetzt, wo es mechanisch wirksam ist. Dadurch lässt sich das Bauteilgewicht bei vergleichbarer Festigkeit gezielt reduzieren – eine wesentliche Voraussetzung für den Leichtbau.

Gleichzeitig zeigen die Resultate, dass die Aussagekraft einzelner Versuchsreihen aufgrund unkontrollierter Variablen wie Filamentcharge oder Druckerparameter eingeschränkt ist. Die Validierung der gezeigten Trends erfordert eine weitere Testreihe unter streng standardisierten Bedingungen – idealerweise mit identischem Material, einheitlicher Lagerung und gleichen äußeren Abmessungen.

6.2. Ausblick und Potenziale für weitere Optimierungen

Dichte der Spannungspfade: Eine Möglichkeit, die maximale Belastung des optimierten Bauteiles zu steigern, wäre, die Dichte der Spannungspfade zu vergrößern. Dadurch ist allgemein mehr Material da, auf welches die Kraft verteilt werden kann. Eine höhere räumliche Dichte würde allerdings auch mit einem erhöhten Bauteilgewicht einhergehen. Im Extremfall maximaler Dichte entstünde ein vollmassives Bauteil, wodurch das eigentliche Ziel der Optimierung – die Reduktion des Gewichts bei gleichbleibender Belastbarkeit – verfehlt würde.

Variabilität der Extrusionsmenge: Zur Steigerung der Effizienz des Bauteils in diesem Anwendungszweck könnten die gedruckten Pfade je nach tatsächlicher Belastung verstärkt oder geschwächt werden. So würde an Stellen, an denen kaum Spannung anliegt, Material gespart werden.

Es wird also nur so viel Material genutzt, wie auch benötigt wird. Dadurch kann mit insgesamt weniger Masse mehr Leistung erbracht werden.

Eingeschobene Zwischenschichten: Die Hauptnormalspannung ist zwar die Spannung, an die die optimierten Druckpfade angelegt werden, sie ist aber nicht die einzige Kraft, die in dem Bauteil auftritt. Um den, teilweise in andere Richtungen verlaufenden, wesentlich kleineren, anderen auftretenden Kräften entgegenzuwirken, könnten anders optimierte Zwischenschichten eingefügt werden. Diese Schichten würden aber eventuell dazu führen, dass die Belastungskapazität entlang der Hauptnormalspannung abnimmt.

Untersuchung zyklischer Belastungsmuster: Ein Fahrrad Brake-Booster wird beim Fahrradfahren sehr häufig verwendet. Schließlich muss dabei häufig angefahren und abgebremst werden. Interessant wäre deshalb, wie sich die häufige Belastung im Alltag auf die Druckpfadoptimierung anhand der Hauptnormalspannung auswirkt.

Mögliche Tests unter realen Bedingungen: Interessant wäre es auch, die Effektivität der Brake-Booster anhand eines Tests in der echten Welt zu untersuchen. Eine mögliche Art von Test könnte ein Anhalteweg-Test sein, bei dem der Anhalteweg nach einer festgelegten Geschwindigkeit einmal mit und einmal ohne optimierten Brake-Booster ermittelt wird.

7. Danksagungen

Unser besonderer Dank gilt der Hans-Werner-Hector-Stiftung sowie insbesondere Hans-Werner und Josephine Hector, deren großzügiges Engagement die Gründung des Hector-Seminars erst ermöglicht hat. Durch ihre Förderung erhielten wir die außergewöhnliche Gelegenheit, im Rahmen dieses Programms ein anspruchsvolles Forschungsprojekt eigenständig zu entwickeln und durchzuführen.

Wir danken außerdem der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die Bereitstellung der Zugprüfmaschine, die einen zentralen Beitrag zur experimentellen Umsetzung unseres Projekts geleistet hat. Ohne diese Unterstützung wären die mechanischen Prüfungen in dieser Qualität und Tiefe nicht realisierbar gewesen.

Ein besonderer Dank gilt dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie dem Institut für Angewandte Materialien – Werkstoff- und Grenzflächenmechanik (IAM-MMI), die uns ihre Einrichtungen für die Durchführung unserer Arbeiten zur Verfügung gestellt haben. Dadurch konnten wir unsere Konzepte praktisch umsetzen und experimentell validieren.

Darüber hinaus möchten wir uns herzlich bei Dr. Iwiza Tesari, Dr. Roland Kappel und Dr. Karlheinz Weber bedanken, die uns während des Projekts mit ihrer fachlichen Expertise und kontinuierlichen Unterstützung begleitet haben. Ihre wertvollen Hinweise und Anregungen haben maßgeblich zum Fortschritt und Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso danken wir Frau Richert und Herrn Gruber, unseren Kursleitern des Hector-Seminars während der Kooperationsphase. Sie standen uns stets mit Rat und Tat zur Seite, gaben uns konstruktives Feedback und haben uns in jeder Phase des Projekts unterstützt.

Allen Beteiligten gilt unser aufrichtiger Dank für ihre Unterstützung, durch die dieses Projekt in seiner heutigen Form erst möglich geworden ist.

A. Anhang

A.1. Herkömmliche Infill-Muster

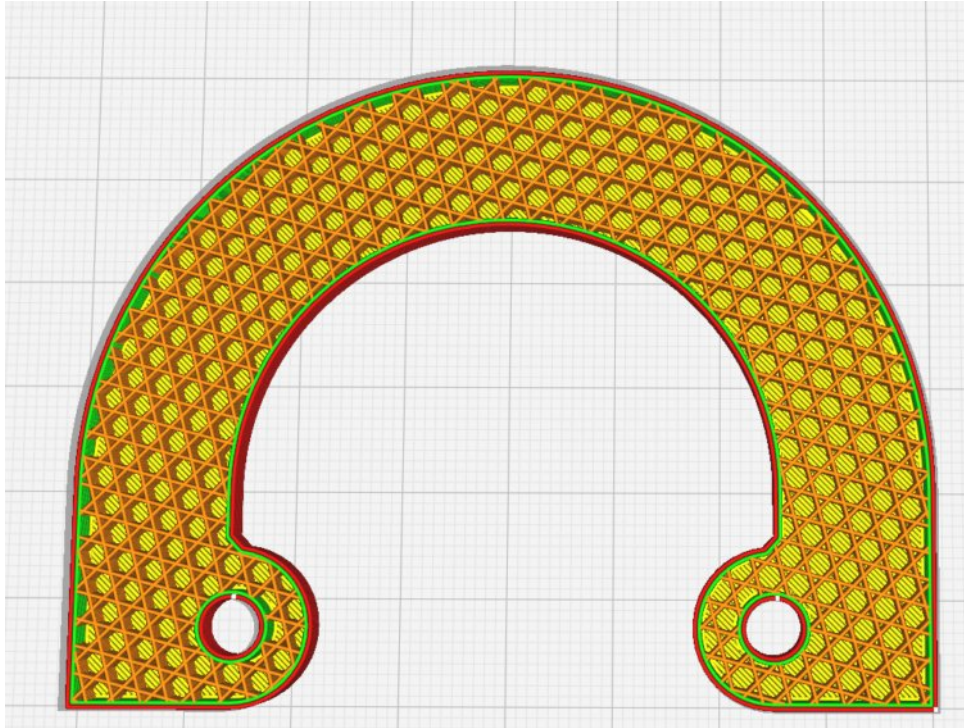


Abb. 17: Tri-Hexagon

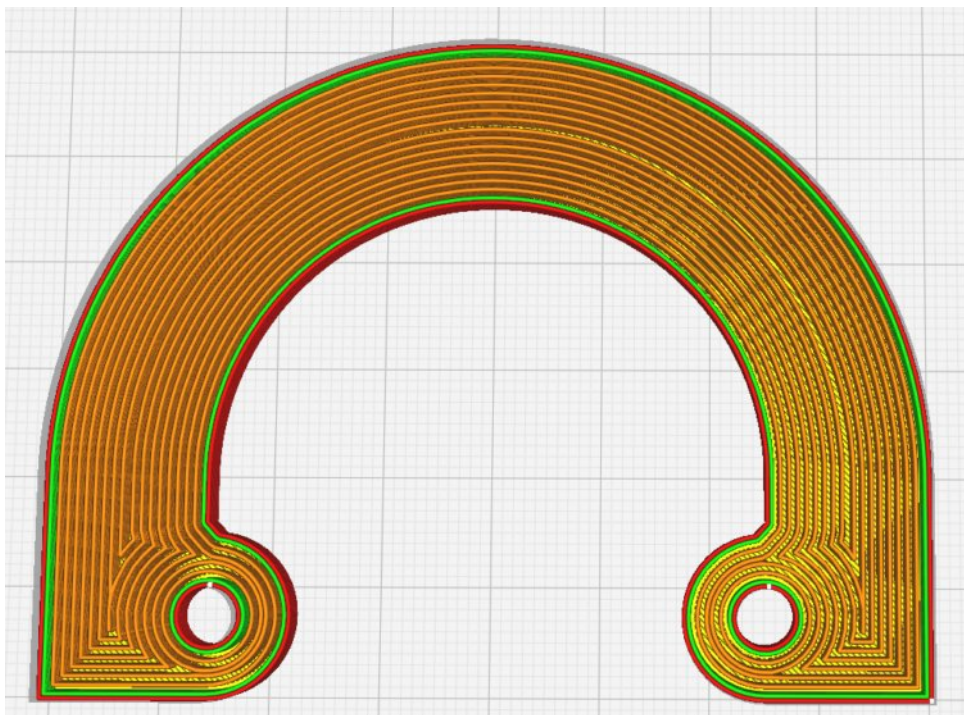


Abb. 18: Concentric

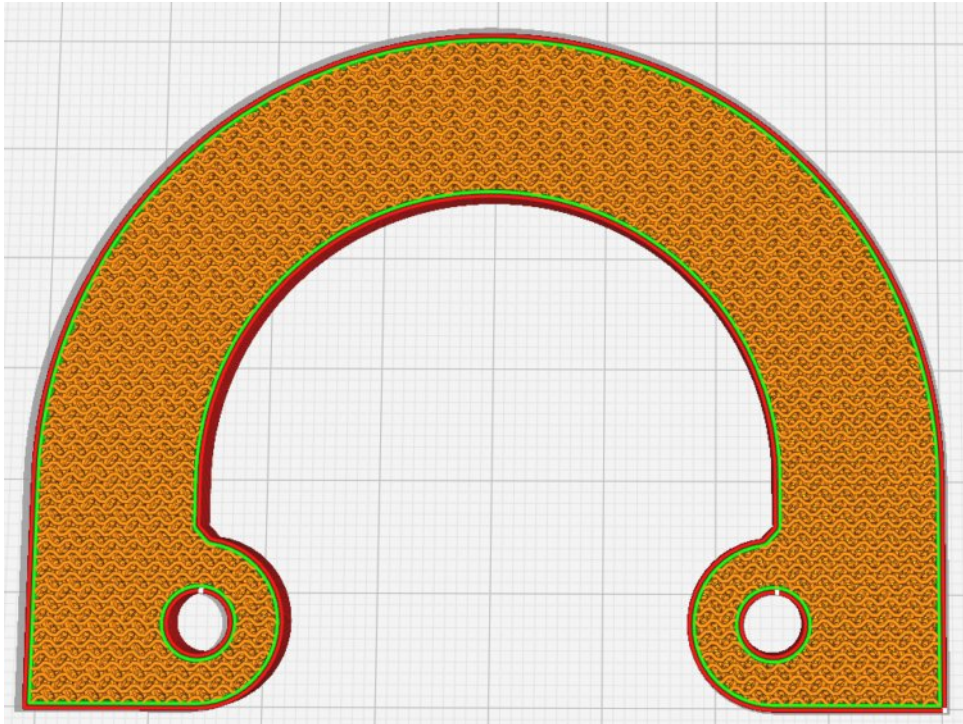


Abb. 19: Gyroid

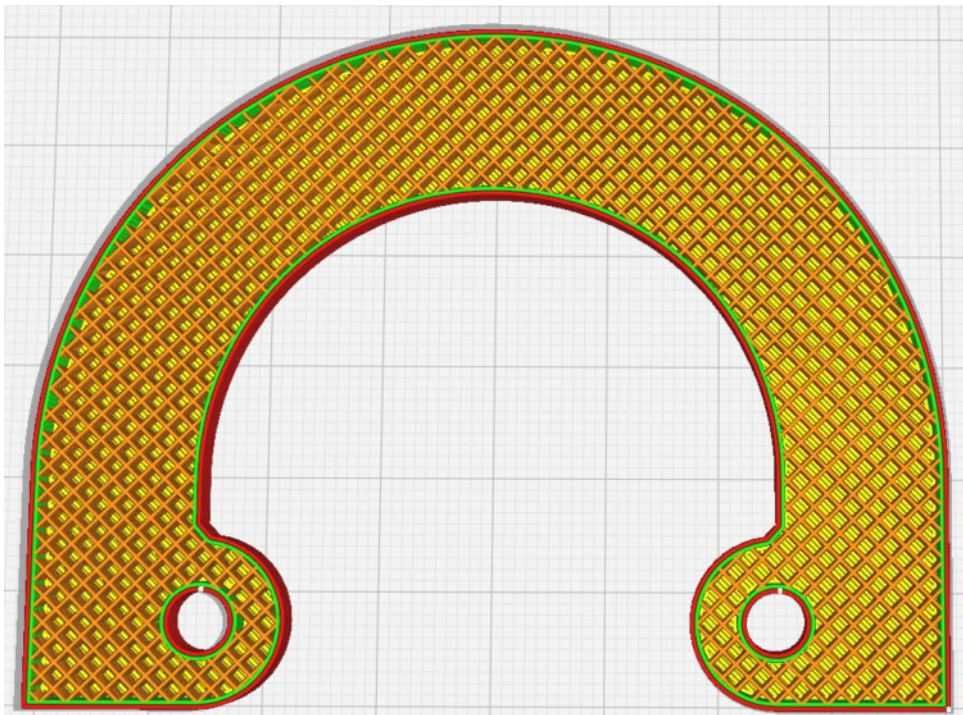


Abb. 20: Grid

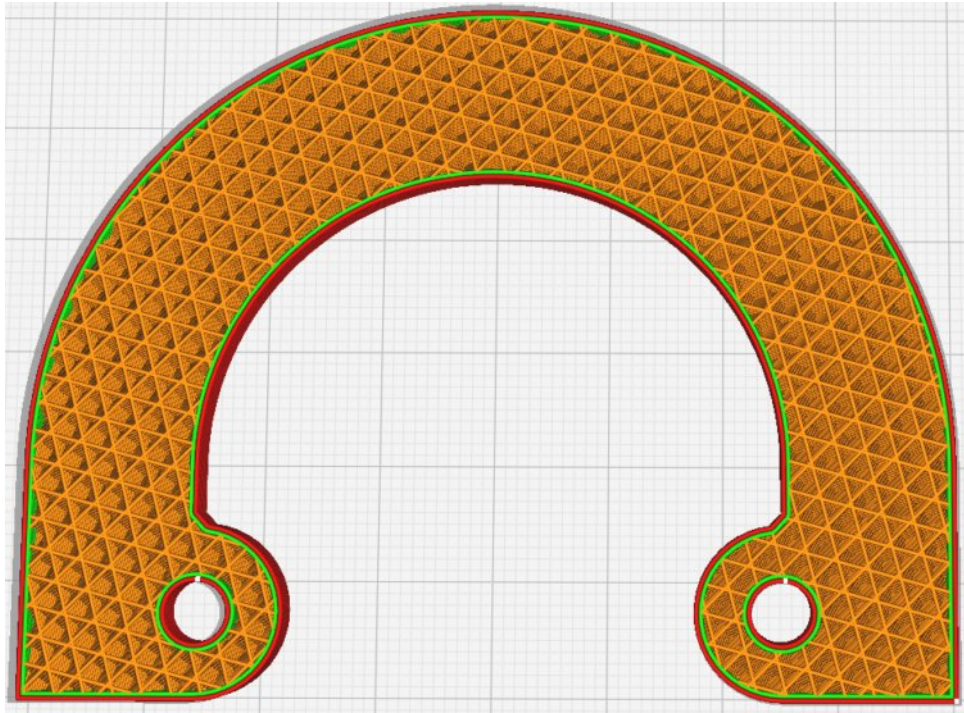


Abb. 21: Cubic

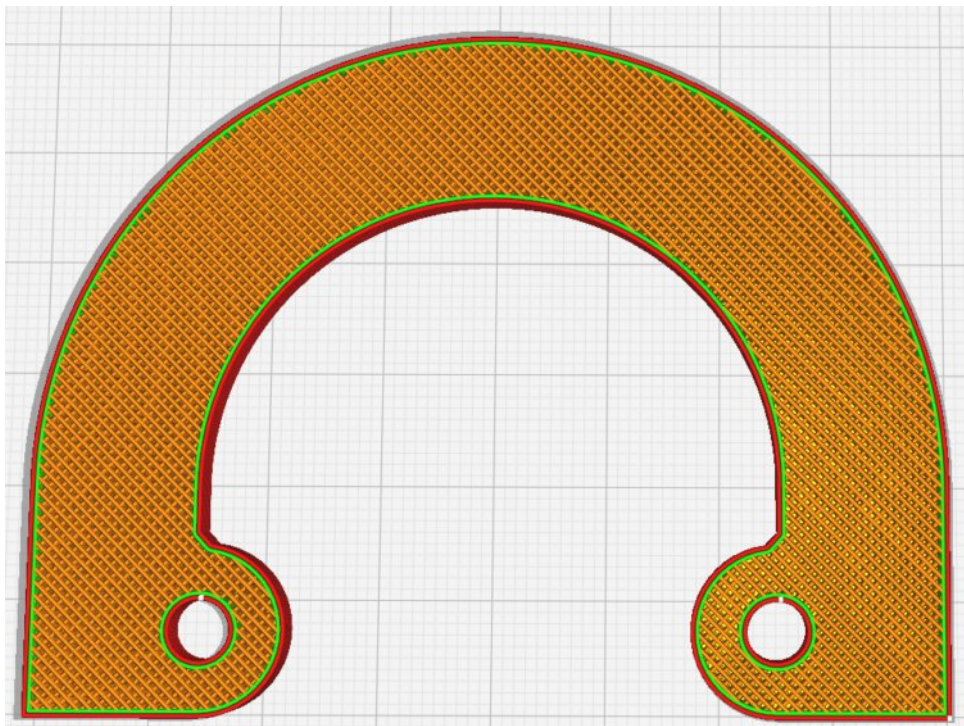


Abb. 22: Lines

A.2. APDL-Skript zur Auslese der Spannungslinien



Abb. 23: QR-Code zum Skript: *SKRIPT_Spannungslinien.txt*

A.3. ADPL-Skript zur Bauteil Erstellung



Abb. 24: QR-Code zum Skript: *Bremsbuegel-HALB-V2.txt*

A.4. Startpunktverteilungs-Skript



Abb. 25: QR-Code zum Skript: *Input-list-Generator-V5.py*

A.5. Datenaufbereitungs-Skript



Abb. 26: QR-Code zum Skript: *Koordinaten-System-Filter-V49.py*

A.6. gCode-Converter-Skript



Abb. 27: QR-Code zum Skript: *Gcode-Converter.py*

A.7. Ergebnisse der Belastungstests

Tabelle 2: Maximale Bruchfestigkeit und zugehörige Kenngrößen der Entwicklungsreihe

Werkstück	$F_{\max}$ [N]	Auslenkung [mm]	Infill [%]	Gewicht [g]
Konzentrisch	106,05	10,55	13	7,1511
Hexagon	110,43	15,95	19	7,1303
Archimedische Akkorde	118,78	16,20	16	7,0917
Archimedische Akkorde CF	163,21	14,45	45	8,7986
Cubic	139,35	12,70	-	7,0775
Optimiert V1	125,63	14,55	-	7,6816
Optimiert V2	131,46	11,00	-	7,5039
Optimiert V3	181,47	12,10	-	9,3929
Optimiert V4	187,46	11,90	-	9,5313
Optimiert V5.1	195,41	10,30	-	11,31
Optimiert V5.2	196,76	10,40	-	11,31
Optimiert V6	216,30	10,60	-	12,00
Optimiert V7 BambuLab	163,24	10,40	-	-
Optimiert V7 Creality	213,43	10,65	-	12,0066
Archimedische Akkorde V2	202,47	37,70	-	-
Cubic V2	160,15	10,50	-	-
Grid V2	143,56	10,25	-	-
Gyroid V2	169,20	15,15	-	-

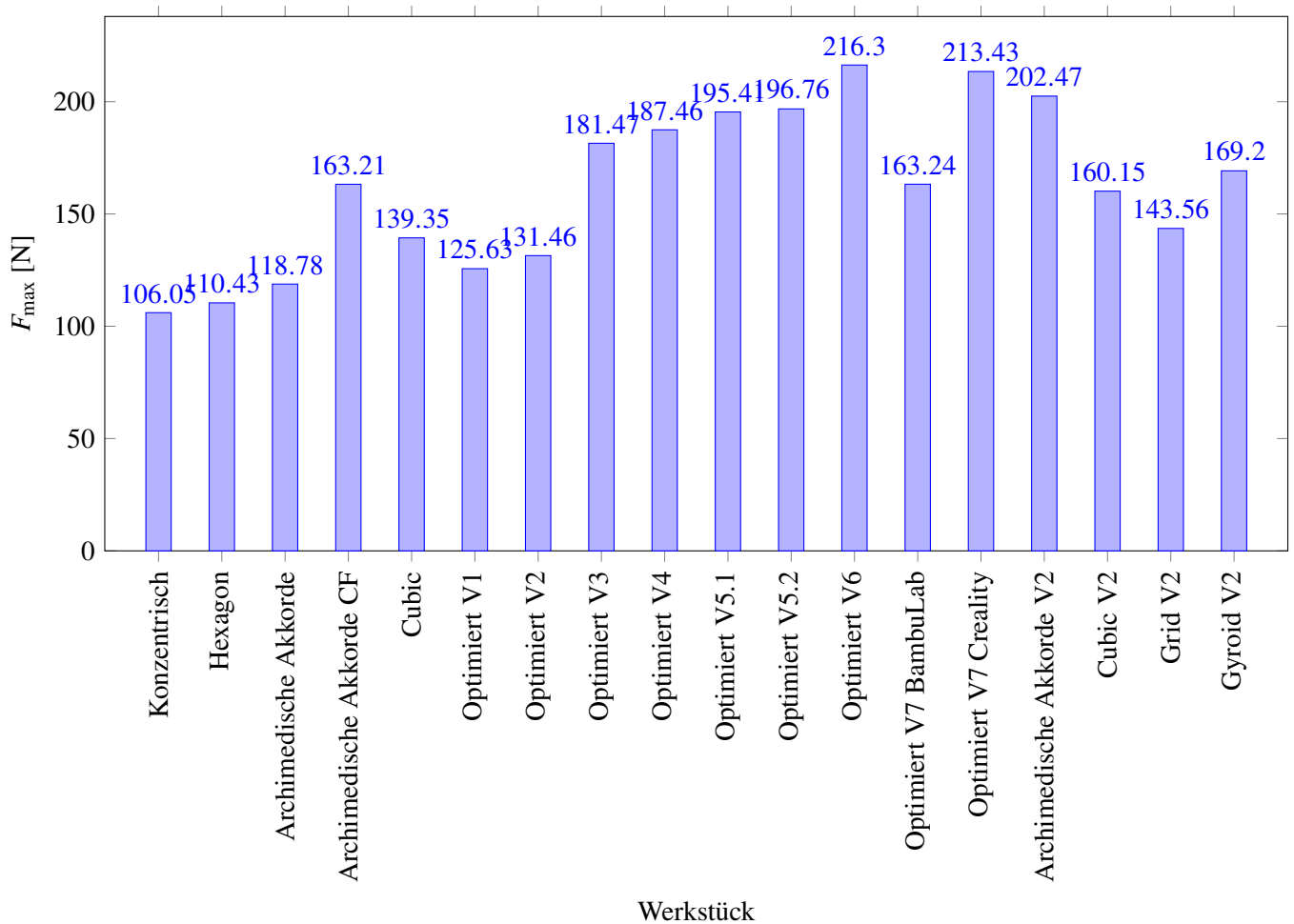


Abb. 28: Maximale Bruchfestigkeit der Werkstücke aus Tabelle 2

Tabelle 3: Maximale Bruchfestigkeit und Kenngrößen der Vergleichsreihe

Werkstück	$F_{\max}$ [N]	Auslenkung [mm]	Infill [%]	Gewicht [g]
Lines 1	241,74	16,05	-	12,85
Lines 2	243,30	15,35	-	12,89
Hexagon 1	192,05	9,40	-	12,82
Hexagon 2	183,17	9,20	-	12,77
Cubic 1	230,47	14,45	-	12,79
Cubic 2	225,54	12,85	-	12,83
Gyroid 1	232,97	15,50	-	12,97
Gyroid 2	229,83	13,65	-	12,95
Grid 1	176,29	7,80	-	12,87
Grid 2	175,28	7,35	-	12,82
Konzentrisch 1	294,94	29,80	-	12,78
Konzentrisch 2	262,99	18,80	-	12,68
Optimiert V7.1	214,43	10,90	-	12,33
Optimiert V7.2	210,94	10,20	-	12,32

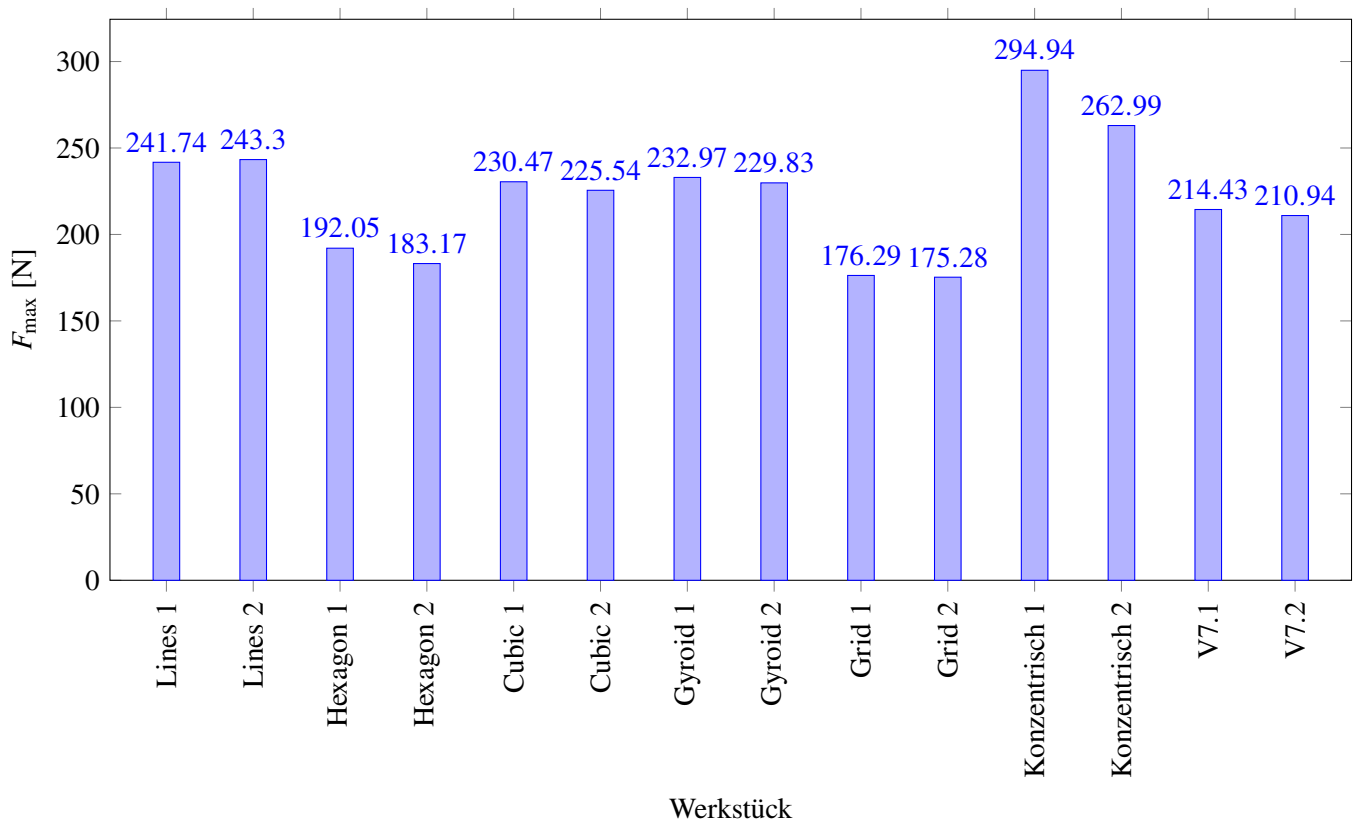


Abb. 29: Maximale Bruchfestigkeit der Werkstücke aus Tabelle 4

Tabelle 4: Maximale Bruchfestigkeit und Kenngrößen der konstanten Extrusionsreihe

Werkstück	$F_{\max}$ [N]	Auslenkung [mm]	Infill [%]	Gewicht [g]
Ex. 1	123,03	11,35	-	8,5465
Ex. 2.1	162,19	9,90	-	9,0133
Ex. 2.2	164,13	9,90	-	9,0601
Ex. 3	151,75	10,95	-	9,0936
Ex. 4.1	233,69	9,40	-	12,5175
Ex. 4.2	237,47	9,60	-	12,5293
Ex.Var	250,54	9,20	-	12,5374

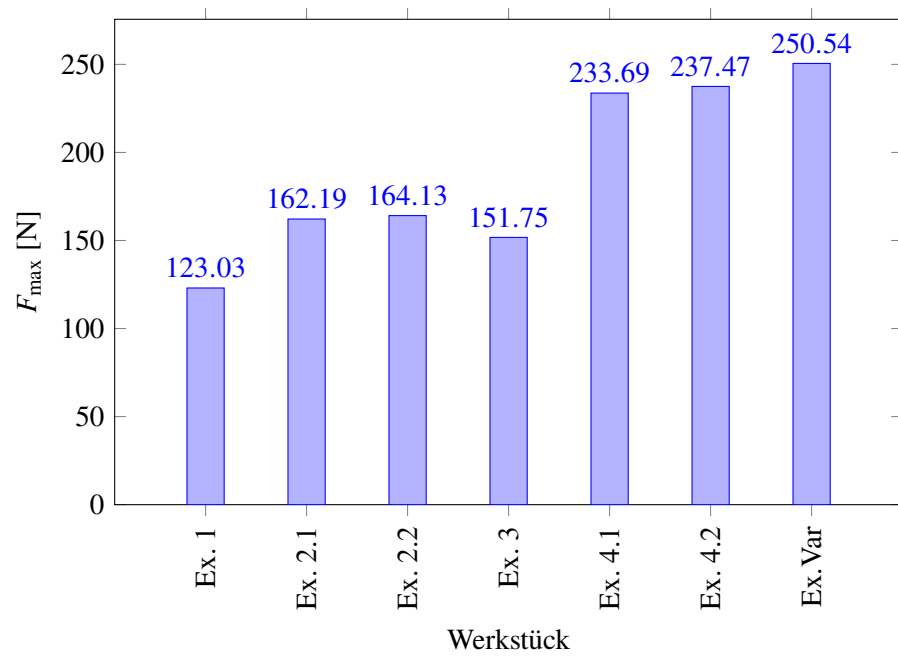


Abb. 30: Maximale Bruchfestigkeit der Werkstücke aus Tabelle 4

Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] Birosz, M. T. et al.: Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing* 113 (2022), 107654. DOI:10.1016/j.polymertesting.2022.107654.
- [2] KIT IAM: Programmierung bionisch optimierter Druckpfade mit Python. ProBio Abschlussdokumentation, KIT Institut für Angewandte Materialien, 2024.
- [3] Shapeways Support: How does part orientation affect the strength of a 3D-printed part? (2025). <https://support.shapeways.com/hc/en-us/articles/202082360-How-does-part-orientation-affect-the-strength-of-a-3D-printed-part->.
- [4] Raise3D: Infill 3D Printing: Patterns, Density and Issues. 2023. <https://www.raise3d.com/infill-3d-printing-patterns-issues/>.
- [5] Zhang, Y. et al.: A 3D printing tool-path generation strategy based on the partition of principal stress field for FFF. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 122 (2022), 1719–1735.
- [6] „Mohrscher Spannungskreis“, Wikipedia, zuletzt abgerufen Mai 2025, https://de.wikipedia.org/wiki/Mohrscher_Spannungskreis.
- [7] M. Munzinger: „CAIO V1.0 für ANSYS“, Dokumentation CAIO V1.0, Seite 1–20, 2005.
- [8] Tymrak, B. M.; Kreiger, M.; Pearce, J. M.: Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design* 58 (2014), S. 242–246. DOI:10.1016/j.matdes.2014.02.038.
- [9] Ahn, S. H. et al.: Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal* 8(4), 2002, S. 248–257. DOI:10.1108/13552540210441166.

Bildquellen

- Abbildung 2: *Mohrscher Spannungskreis*, Wikipedia, abgerufen Mai 2025, https://de.wikipedia.org/wiki/Mohrscher_Spannungskreis.
- Abbildung 3: *Brakebooster*, Amazon, abgerufen Juni 2025, <https://www.amazon.de/BuyWeek-Fahrrad-Bremskraftverst%C3%A4rker-Aluminiumlegierung-Schrauben-Mountainbikes/dp/B0BGBYCGYW?th=1>.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichern wir, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe angefertigt haben. Alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Inhalte aus anderen Quellen wurden als solche gekennzeichnet und vollständig nach den geltenden Regeln zitiert. Sämtliche verwendeten Hilfsmittel (einschließlich Software, Skripte, KI-basierte Tools sowie externe Beratung) sind angegeben. Ergebnisse, die in Zusammenarbeit entstanden sind, sind als solche gekennzeichnet. Uns ist bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche und prüfungsrechtliche Konsequenzen nach sich ziehen kann.

Ort, Datum:

Ort, Datum:

Unterschrift:

Cornelius Baumgartner

Unterschrift:

Richard Schütz