



TU Clausthal

Technische Universität Clausthal

Institut für Polymerwerkstoff und Kunststofftechnik

Bachelorarbeit

Validierung der Funktionsfähigkeit ausgewählter, im FFF-Prozess gefertigter Adaptersysteme

Lucas B. Beggs
Matrikelnummer: 525853

Clausthal-Zellerfeld
05.05.2025

Erstgutachter:	Dr. sc. nat. Leif Steuernagel
Zweitgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel
Betreuung durch:	Fabian Hartkopf, M.Sc.

Danksagung

Ich möchte diese Gelegenheit nutzen, um all jenen zu danken, die mich während der Entstehung dieser Bachelorarbeit unterstützt und begleitet haben.

Zunächst möchte ich meinem Betreuer, Fabian Hartkopf, meinen tief empfundenen Dank aussprechen. Seine fachkundige Anleitung, wertvolle Anregungen und konstruktive Kritiken haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Durch seine stetige Unterstützung konnte ich viele wertvolle Einsichten gewinnen und Herausforderungen meistern.

Auch den Angestellten des Instituts für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PuK), speziell Herr Dr. Steuernagel, gilt mein besonderer Dank für Ihre Unterstützung und die bereitgestellten Ressourcen.

An dieser Stelle richte ich meinen Dank auch an die Sturm aktiv GmbH. Ohne Ihre Zusammenarbeit mit dem PuK wäre es nicht zu dieser Arbeit gekommen.

Außerdem möchte ich mich bei allen meinen Freunden und Kommilitonen bedanken, die mich während meines Bachelorstudiums und bei der Erstellung dieser Arbeit bei sämtlichen Schwierigkeiten unterstützt und motiviert haben.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Familie und meiner Freundin, die mich immer wieder unterstützt und mich während meines gesamten Studiums begleitet haben. Ihre Zustimmung und ihr Vertrauen haben mir die Motivation und Stärke verschafft, dieses Projekt erfolgreich zu beenden.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung eines Adapterkonzepts für eine Unterschenkelprothese unter dem Einsatz additiver Fertigungstechnologien.

Der Schwerpunkt liegt auf der Findung und Modellierung verschiedener Adapterkonzepte. Die Grundkonzepte werden nach verschiedenen Kriterien ausgewählt. Besonderer Bedeutung wird der Benutzerfreundlichkeit der Verschlüsse beigemessen. Darüber hinaus sollen die Verschlüsse als einteilige Drucke realisiert werden und im Endzustand eine definierte Belastbarkeit gewährleisten. Nach der Wahl von drei unterschiedlichen Verschlussmechanismen, Schraub-, Haken- und Bajonettverschluss, werden diese nach der Herstellung im Fused Filament Fabrication (FFF)-Verfahren angepasst und optimiert. Dies stellt den Hauptteil der Arbeit dar und wird in Kapitel 4 ausführlich erläutert.

In mechanischen Prüfungen werden die drei optimierten Verschlüsse schrittweise zunächst einer Zug- und anschließend einer Druckbelastung ausgesetzt.

Dabei ist das Ziel, einer Belastung von 2500 N standzuhalten. Der Hakenverschluss ist der Einzige der drei, der einer Druckkraft von 2500 N standhalten kann. Bei dem Schraubverschluss kommt es bei etwas oberhalb von 1400 N zum Versagen, während der Bajonettverschluss aufgrund seiner Modellierung nicht auf Druck getestet werden kann.

Im Zugversuch zeigen der Schraubverschluss und der Bajonettverschluss mit einem Versagen bei etwa 500 N die höchste Belastbarkeit. Bei dem Hakenverschluss liegt dieser Wert bei ca. 70 N. Der Unterschied zu den anderen beiden Verschlüssen liegt beim unbeschädigten Trennen der beiden Passteile.

Abschließend lässt sich feststellen, dass alle drei Verschlusskonzepte die Rahmenbedingungen des einteiligen Drucks, der Benutzerfreundlichkeit und der Größe einhalten. Die Belastbarkeit weist jedoch noch Verbesserungspotenzial auf. Hierfür können die jeweiligen anfälligen Stellen der Verschlussmechanismen optimiert oder zwei Mechanismen miteinander verbunden werden, um die Stärken zu betonen und die Schwäche zu minimieren. Es gibt erste Anzeichen dafür, wie Haken- und Schraubverschlüsse als Adapterkomponenten in Unterschenkelprothesen verwendet werden können. Für eine vollständige Nutzung dieses Potenzials sind weitere Forschungsarbeiten zur Verbesserung und Bestätigung dieser Verschlussysteme erforderlich.

Schlagwörter: Adapterkonzept, Unterschenkelprothese, Additive Fertigungstechnologie, Fused Filament Fabrication, Mechanische Prüfungen

Abstract

Using additive manufacturing technologies, this bachelor's thesis aims to create an adapter concept for a below-knee prosthesis. The goal is to identify and model different adapter concepts. Several criteria are used to choose the fundamental ideas. The ease of usage of the fasteners is given special consideration. A defined load capacity in the final state should also be guaranteed by the fasteners' realization as one-piece printing. Following the selection of three distinct locking mechanisms—the screw, hook, and bayonet—the Fused Filament Fabrication (FFF) method is employed to modify and refine these mechanisms after manufacture. Chapter 4 provides a detailed presentation of this, which makes up most of the material.

The three optimized fasteners are subjected to successive applications of compressive and tensile loads during mechanical testing. The goal is to withstand a 2500 N force. The hook fastener is the only one of the three that can withstand a compressive force of 2500 N. The bayonet fastener's modeling constraints make compression testing unfeasible, while the screw fastener fails slightly above a stress of 1400 N. According to the tensile test, the screw and bayonet fasteners have the maximum load capacity and fail at about 500 N. The hook fastener has a value of about 70 N. What sets the hook fastener apart from the other two, is the separation without damaging the two components.

In conclusion, all three locking designs meet the framework requirements of being user-friendly, suitably sized, and one-piece printed. Despite this, load capacity can still be increased. This can be achieved by optimizing the locking mechanisms' weak points or by combining two methods to emphasize their advantages and lessen their disadvantages. There are early signs of how hook and screw fasteners may serve as adapter components in below-knee prostheses. To fully utilize this potential, further investigation is needed to enhance and validate these locking systems.

Keywords: adapter concept, below-knee prosthesis, additive manufacturing technologies, Fused Filament Fabrication, mechanical tests

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung	2
3 Theoretische Grundlagen	3
3.1 Additive Fertigung	3
3.1.1 Fused Layer Manufacturing/Fused Filament Fabrication	5
3.2 Prothesen & Unterschenkelprothesenadapter.....	6
3.3 PETG	7
3.4 Rhinceros 3D	8
3.5 Simplify3D	8
4 Entwicklungsprozess der Adapterkonstruktionen	9
4.1 Anforderungsliste	9
4.2 Methodische Lösungsfindung	10
4.3 Wirkstrukturen und morphologischer Kasten	11
4.4 Bewertung und Auswahl	11
4.5 Erstellung der Adapter.....	13
4.5.1 Schraubverschluss	13
4.5.2 Hakenverschluss.....	19
4.5.3 Bajonettverschluss.....	23
5 Mechanische Prüfung	26
5.1 Methodik	26
5.1.1 Probenvorbereitung	26
5.1.2 Probeneinspannung	26
5.1.3 Festlegung der Parameter	27

5.1.4	Start des Tests	27
5.1.5	Messung und Datenerfassung.....	28
5.2	Ergebnisse	29
5.2.1	Belastung unter Zug	29
5.2.2	Belastung unter Druck.....	34
6	Fehlerbetrachtung.....	38
7	Fazit und Ausblick.....	40
8	Literaturverzeichnis.....	42
9	Anhang	44

Abkürzungsverzeichnis

Liste der verwendeten Abkürzungen:

Abkürzung	Erklärung
3D	Dreidimensional
CAD	Computer Aided Design
F	Fest
FFF	Fused Filament Fabrication
FLM	Fused Layer Modeling/Manufacturing
kN	Kilo Newton
Komp.	Komponente
mm	Millimeter
N	Newton
PET	Polyethylenterephthalat
PETG	Polyethylenterephthalat-Glykol
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
RM	Rapid Manufacturing
W	Wunsch

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsprinzip additiver Fertigungsverfahren [Wir17]	3
Abbildung 2: Einordnung und Abgrenzung der Kernbegriffe [Wir17]	4
Abbildung 3: Der Prozess zur Herstellung der Schmelzschicht [Bün23]	5
Abbildung 4: Brainstorming zu möglichen kraftschlüssigen Verbindungen	10
Abbildung 5: Erster Schraubverschluss (links: Negativform, rechts: Positivform)	13
Abbildung 6: Zweiter Schraubverschlussentwurf	14
Abbildung 7: Geometrie der neuen Form	14
Abbildung 8: Geometrie eines Zahns	15
Abbildung 9: Positivform	15
Abbildung 10: Verschlusskonzept	15
Abbildung 11: Dritter Schraubverschluss	16
Abbildung 12: Erfolgreiche Einführung der Zähne	17
Abbildung 13: Ausrichtung und Positionierung der Formen und Zähne	17
Abbildung 14: Finaler Hakenverschluss mit Prüfvorrichtung	18
Abbildung 15: Erster Hakenverschlussentwurf (links: Negativform, rechts: Positivform)	19
Abbildung 16: Herausgebrochenes Kreuz aus der Positivform	19
Abbildung 17: Neue Geometrie des Kreuzes	20
Abbildung 18: links: Zweiter Hakenverschluss, rechts: Frontansicht der Positivform	20
Abbildung 19: Dritter Hakenverschluss	21
Abbildung 20: Finaler Hakenverschluss	21
Abbildung 21: Bajonettmodell (links: Komp. 1, mittig: Komp. 2, rechts: Querschnitt)	23
Abbildung 22: Erster Bajonettverschluss (links: Komp. 2, rechts: Komp. 1)	24
Abbildung 23: Zweiter Bajonettverschluss	24
Abbildung 24: Finaler Bajonettverschluss	25
Abbildung 25: Ergebnisse der Belastung unter Zug	29

Abbildung 26: Verformung und Trennen des Hakenverschlusses.....	30
Abbildung 27: Verfahrenweg des Stifts bei Zugkraft	31
Abbildung 28: Bajonettverschluss mit abgebrochenem Stift	32
Abbildung 29: Sollbruchstellen des Schraubverschlusses unter Zugbelastung	33
Abbildung 30: Schraubverschluss mit abgebrochenen Zähnen	33
Abbildung 31: Bajonettverschluss unter Druckbelastung	34
Abbildung 32: Ergebnisse des Schraub- und Hakenverschlusses unter Druckbelastung	35
Abbildung 33: Zusammengesteckter Hakenverschluss.....	36
Abbildung 34: links: Schraubverschluss unter Druck, rechts: Ausschnitt der Positivform	37
Abbildung 35: Resultat des Schraubverschlusses nach Druckprüfung	37
Abbildung 36: Zugversuch des Bajonettverschlusses	45
Abbildung 37: Zugversuch des Schraubverschlusses	45
Abbildung 38: Druckversuch des Schraubverschlusses	46
Abbildung 39: Zugversuch des Hakenverschlusses	46
Abbildung 40: Druckversuch des Hakenverschlusses.....	47
Abbildung 41: Erste Skizze für Haken- & Bajonettverschluss	48
Abbildung 42: Erste Skizze für Schraub- & Steckverschluss	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialeigenschaften von PETG [Kön16]	7
Tabelle 2: Anforderungsliste für Adapterkonzept (Stand: 08.11.2024).....	9
Tabelle 3: Morphologischer Kasten zu kraftschlüssigen Verbindungsarten	11
Tabelle 4: Bewertung der Verbindungsarten	12
Tabelle 5: Prüfparameter in testXpert II.....	27
Tabelle 6: Vor- und Nachteile der Verschlüsse	41
Tabelle 7: Druckparameter	44

1 Einleitung

Die Entwicklung fortschrittlicher Prothesen ist in der modernen Medizintechnik von großer Bedeutung. Prothesen ermöglichen eine Steigerung der Lebensqualität von Menschen, die durch den Verlust einer oder mehrerer Gliedmaßen betroffen sind. Ihr Stellenwert erstreckt sich weit über die bloße physische Funktionalität hinaus und umfasst zahlreiche Aspekte des täglichen Lebens, der psychischen Gesundheit und der sozialen Integration. Vom Meistern alltäglicher Aufgaben zuhause bis hin zum Brechen von Weltrekorden bei den Paralympischen Spielen – der Anwendungsbereich von Prothesen ist enorm und ihre Existenz nicht mehr wegzudenken. Um den Nutzenden die versprochene Mobilität, den Komfort und die Sicherheit zu gewährleisten, muss dafür gesorgt werden, dass alle Einzelteile ihrer Aufgaben gerecht werden, um zusammen ein Glied zu ersetzen.

Ein wesentlicher Bestandteil einer Prothese ist ein Verbindungselement, ein sogenannter Adapter. Dieser stellt eine stabile sowie funktionale Verbindung zwischen dem Schaft der Prothese und dem restlichen Unterschenkel der Patientin oder des Patienten her. Außerdem spielt der Adapter eine wesentliche Rolle in der Funktionalität und Anpassungsfähigkeit einer Prothese. Die korrekte Auswahl und Gestaltung sind entscheidend in Bezug auf die Effektivität, den Komfort und die Sicherheit der Prothese. Genau der Aspekt der Personalisierung ist bei den traditionellen Fertigungsmethoden eingeschränkt. Hier bietet die additive Fertigung vielversprechende Möglichkeiten [Dip23] [Bor21].

Die Technologie der additiven Fertigung ermöglicht die Herstellung individueller und anwendungsbezogener Geometrien. Darüber hinaus bietet sie Vorteile in Bezug auf verkürzte Entwicklungszeiten und reduzierte Produktionskosten – Aspekte, die für Patienten im Bereich der Prothetik von großer Bedeutung sind. Allerdings gibt es bei additiv gefertigten Bauteilen je nach Materialauswahl und Fertigungsmethode Herausforderungen, wie z.B. die Belastbarkeit. Diese sollte zu traditionellen Materialien der Prothetik wie Edelstahl, Aluminium oder Titan vergleichbar sein [Wir17] [Fra24] [Ins24a] [Ins24b].

Diese Arbeit und ihre Ergebnisse sollen zur Weiterentwicklung von Prothesenkomponenten beitragen und verdeutlichen, wie additive Fertigungstechnologien wirksam genutzt werden können, um die Funktionalität und Benutzerfreundlichkeit von Unterschenkelprothesen zu optimieren.

2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit besteht in der Entwicklung eines Adapterkonzeptes, welches generell additiv umgesetzt werden kann. Der Hintergrund ist dieses später für ein Prothesenprojekt zu nutzen.

Der Fokus liegt auf der Identifizierung und Modellierung verschiedener Adapterkonzepte, die nach festgelegten Kriterien ausgewählt werden. Ein besonderer Schwerpunkt wird auf die Benutzerfreundlichkeit der Verschlüsse gelegt. Zusätzlich sollen diese als einteilige Drucke gefertigt werden und im Endzustand eine definierte Belastbarkeit aufweisen.

Nach der Auswahl von drei unterschiedlichen Verschlussmechanismen werden diese mittels eines FFF-Druckers hergestellt, angepasst und optimiert.

Die drei optimierten Verschlüsse werden anschließend mechanischer Prüfungen unterzogen, bei der sie einer Zug- und Druckbelastung ausgesetzt werden, mit dem Ziel einer Kraft von 2500 N standzuhalten.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Additive Fertigung

Die additive Fertigung, auch als 3D-Druck bekannt, bezeichnet ein Herstellungsverfahren, bei dem dreidimensionale Objekte sukzessiv aufgebaut werden. Dies geschieht, indem Materialien schrittweise hinzugefügt werden, um die endgültige Geometrie zu formen. Das beschriebene Prinzip ist in Abbildung 1 illustriert [Hoc23] [Fel17] [Wir17].

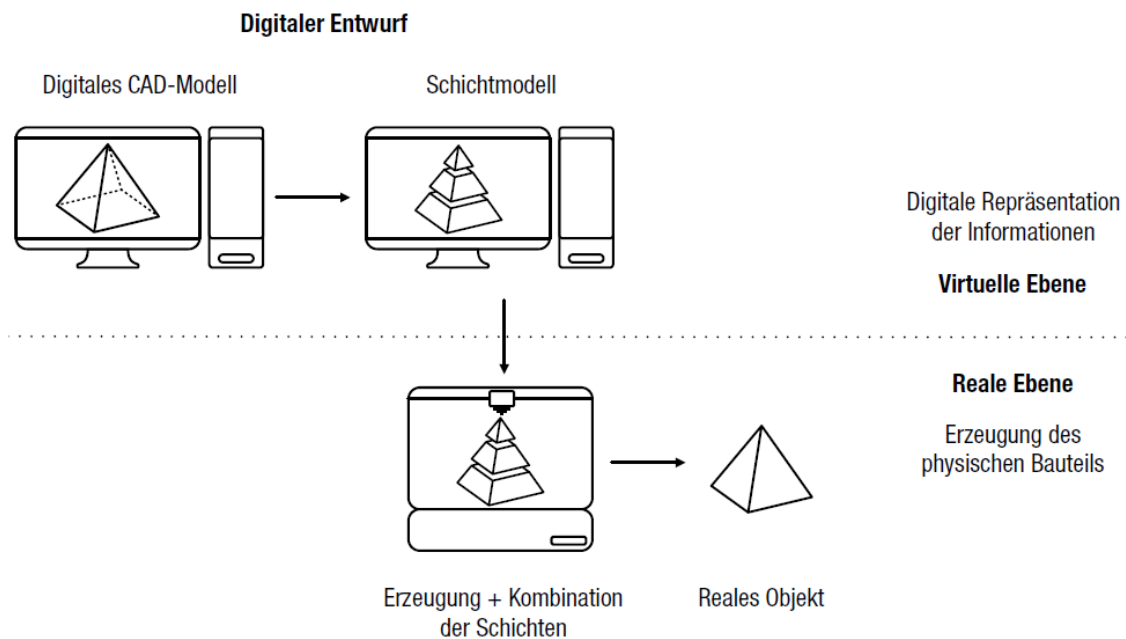


Abbildung 1: Funktionsprinzip additiver Fertigungsverfahren [Wir17]

Der Prozess der additiven Fertigung erfordert keine spezifischen Werkzeuge für einzelne Produkte. Die mechanisch-technischen Eigenschaften des hergestellten Objekts entwickeln sich simultan mit der Ausformung der geometrischen Struktur. Das virtuelle Modell, basierend auf den digitalen 3D-CAD-Daten, wird direkt oder relativ nahtlos in ein physisches Bauteil umgewandelt [Fel17] [Hoc23] [Fra24].

Die additive Fertigung bietet eine Vielzahl von Vorteilen, darunter die Fähigkeit zur Herstellung komplexer geometrischer Strukturen, die schnelle Entwicklung von Prototypen, die Möglichkeit zur individuellen Anpassung und Personalisierung von Produkten, sowie die Reduzierung von Materialverlust im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren. Jedoch ist diese Fertigungsverfahren auch mit Herausforderungen wie langwierigen Fertigungsprozessen, mögliche Nachbearbeitungsschritte und Materialbeschränkung verbunden. Trotz dieser Einschränkungen hat sich das Verfahren in verschiedenen Branchen etabliert, darunter Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Medizin, Architektur sowie bei

der Herstellung von Werkzeugen und Prototypen. Es handelt sich um eine innovative und vielseitige Technologie, die ständig weiterentwickelt wird, um neue Materialien, Prozesse und Anwendungen zu erschließen [Wir17] [Fra24] [Ins24a] [Ins24b].

Zur vertieften Analyse der Thematik wird in Abbildung 2 eine Definition und Einordnung der relevanten Kernbegriffe vorgenommen. Die additive Fertigung bezeichnet eine *Technologie* und beschreibt ein technisches Konzept, bei dem reale Objekte auf Basis digitaler Modelle in Schichtbauweise erzeugt werden. Die Anwendung dieser Technologie erfolgt in verschiedenen Kontexten für spezifische Zwecke [Wir17] [Bün23].

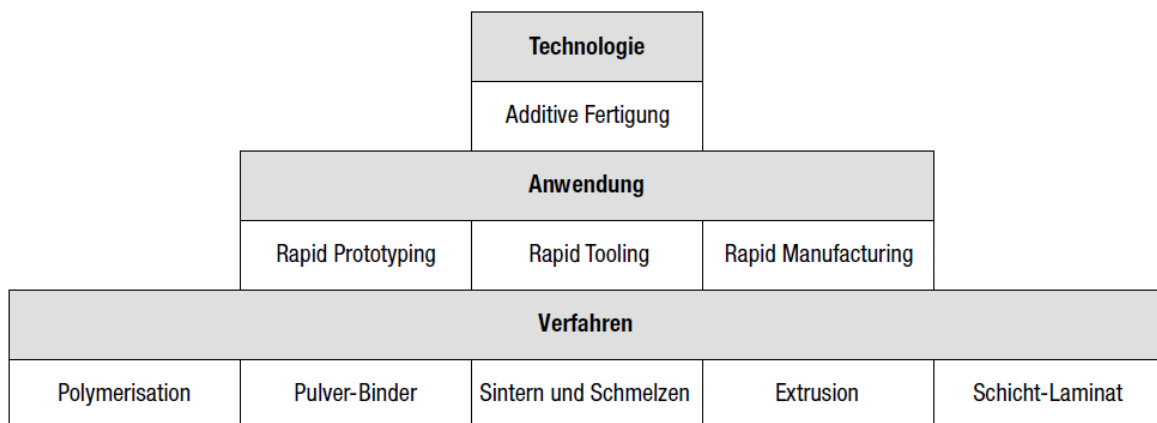


Abbildung 2: Einordnung und Abgrenzung der Kernbegriffe [Wir17]

Die Nutzung der additiven Fertigung für einen bestimmten Zweck wird als *Anwendung* bezeichnet. Häufig werden additive Fertigungsverfahren eingesetzt, um Prototypen und Muster herzustellen, was als Rapid Prototyping (RP) bekannt ist. Wenn hingegen Werkzeuge nach dem generativen Funktionsprinzip hergestellt werden, wird von Rapid Tooling (RT) gesprochen. Die Produktion von Endprodukten wird als Rapid Manufacturing (RM) bezeichnet [Wir17] [Bün23].

Insgesamt existieren fünf verschiedene *Verfahren*, die in der additiven Fertigung angewendet werden. Ein Verfahren repräsentiert die praktische Umsetzung der Technologie für eine bestimmte Anwendung. Das Grundprinzip der schichtweisen Objekterzeugung ist bei allen Verfahren konform (*VDI-Richtlinie 3405 2014-12*), wobei die Unterschiede letztlich in der Schichterzeugung liegen [Wir17] [Bün23].

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur mit einem Extrusionsverfahren, spezifischer dem Fused Layer Modeling/Manufacturing (FLM) bzw. der Fused Filament Fabrication (FFF), gearbeitet.

3.1.1 Fused Layer Manufacturing/Fused Filament Fabrication

Allgemein beinhalten Extrusionstechniken das Aufschmelzen von Granulat oder drahtförmigen Materialien, die dann in einer durch den Prozess vorgegebenen Form erstarren [Bün23].

Als Basismaterialien dienen thermoplastische Kunststoffe mit geringer Verformung, die üblicherweise in Form von Filament auf Spulen aufgewickelt sind. Diese Materialien werden durch einen beheizten Extruder verflüssigt und mit Hilfe einer Düse schichtweise direkt auf eine Druckplattform aufgetragen. In Abbildung 3 ist der Herstellungsprozess verdeutlicht [Bün23] [Wir17].

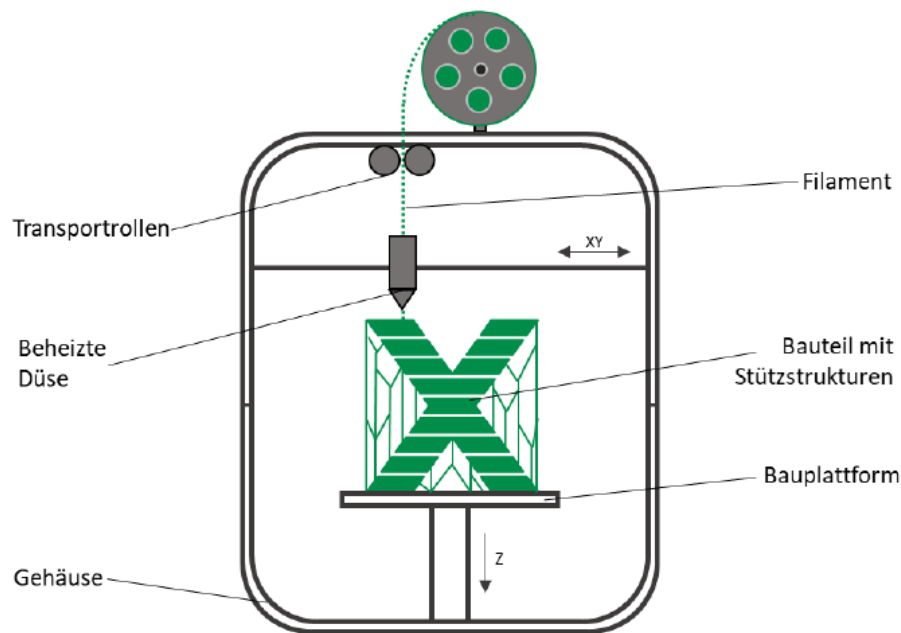


Abbildung 3: Der Prozess zur Herstellung der Schmelzschicht [Bün23]

Nach dem Auftrag des Kunststoffmaterials erfolgt unmittelbar dessen Erhärtung durch seine Abkühlung. Nach Abschluss einer Schicht wird die Bauplattform um die Dicke der Schicht abgesenkt und die folgende Ebene aufgetragen. Anhängig von der Geometrie des gedruckten Bauteils sind bei überhängenden Teilen, trotz der rapiden Verfestigung des Materials, Stützkonstruktionen erforderlich. Diese werden entweder von Slicer-Programm (vgl. Kapitel 3.5) automatisch ergänzt oder vom Nutzer spezifisch eingebaut und eingestellt. Aufgrund der Art und Weise, wie die Stützkonstruktion verdruckt wird, kann sie problemlos vom Bauobjekt entfernt werden [Bün23] [Wir17].

Die Vorteile des Fused Filament Fabrication resultieren aus der breiten Palette verfügbarer Materialien, der einfachen Handhabung, der kostengünstigen Anschaffung sowie der Möglichkeit zur Verarbeitung von faserverstärkten Materialien und Multimaterialien. Beim

Multimaterial-3D-Druck handelt es sich um den 3D-Druck mehrerer Materialien in einem kontinuierlichen Druckprozess. Aufgrund des durch die Düsen generierten, sukzessiven Aufbaus ist das Verfahren für die Herstellung kleiner komplexer Strukturen weniger geeignet. Dies führt insbesondere in der Z-Richtung zu Ungenauigkeiten und resultiert im Vergleich zu anderen generativen Verfahren in einer geringeren Oberflächenqualität. Daher ist oft eine aufwändige Nachbehandlung notwendig [Bün23] [Wir17] [Bre12] [Ast24].

Entsprechend der genannten Vorteile wird das Verfahren primär zur Erstellung von Prototypen und einfachen Modellen verwendet [Wir17].

3.2 Prothesen & Unterschenkelprothesenadapter

Eine Prothese ist ein Hilfsmittel, das zur teilweisen oder vollständigen Ersetzung fehlender Gliedmaßen verwendet wird. Prothesen werden oft von Menschen benutzt, die eine oder mehrere Extremitäten durch Verletzungen, Unfälle oder Krankheiten verloren haben. Dabei dienen sie der Wiederherstellung von Funktionalität und Mobilität verlorener Extremitäten. Allgemein wird zwischen Endo- und Exoprothesen unterschieden. Bei Endoprothesen werden, aufgrund von Gelenkserkrankungen, im Körperinneren des Patienten fixiert. Hingegen werden Exoprothesen nach Amputationen, mit Hilfe eines Schaftes an den Stumpf des Anwenders, äußerlich befestigt [Ott24b] [Öff24].

Während sich Endo- und Exoprothesen grundlegend in ihrer Positionierung und Funktion unterscheiden, ist bei beiden die präzise Verbindung der einzelnen Komponenten entscheidend – besonders bei der Gestaltung von Unterschenkelprothesen wird der Adapter als Schlüsselbauteil wichtig. Hier verbindet dieser den Prothesenschaft mit weiteren Bestandteilen der Prothese. Ebenfalls sorgt er für die Erhöhung der Bewegungsfreiheit und die Ermöglichung vielseitiger Bewegungsabläufe [Dip23] [Bor21].

Außerdem erleichtern die sichere Befestigung und Interkonnektivität der verschiedenen Komponenten die Herstellung der Prothese. Zusätzlich ermöglicht der Adapter eine individuelle Anpassung an spezifische Anforderungen des Benutzers und gewährleistet eine optimale Leistung. Diese Eigenschaft kann dazu beitragen, die Mobilität und Lebensqualität des Trägers der Prothese zu erhöhen [Bor21] [Öss24] [Ott24a].

3.3 PETG

Polyethylenterephthalat-Glykol (PETG) ist ein mit Glykol modifiziertes Polyethylenterephthalat (PET), welches eine besonders hohe Transparenz sowie eine geringe Viskosität aufweisen. Diese Modifizierung ermöglicht es, die gewünschten Druckeigenschaften, wie eine niedrigere Schmelztemperatur und eine Senkung der Kristallisation, zu erreichen. Beide Eigenschaften werden durch Glykol gewährleistet, was zu einem einfacheren Druck führt [Fil23] [SIM24].

PETG zeichnet sich durch eine gute Widerstandsfähigkeit, Stabilität und Langlebigkeit sowie einer Resistenz gegenüber Chemikalien und Lösungsmitteln aus.

Infolgedessen ist PETG neben *Acrylnitril-Butadien-Styrol* (ABS) und *Polyactid* (PLA) eins der am häufigsten verwendeten Materialien in der Additiven Fertigung mit Kunststoffen [Fil23] [Bün23] [Rap23]. Das hier verwendete Material stammt von der Firma *König GmbH Kunststoffprodukte*. In Tabelle 1 werden dessen mechanischen Kennwerte aufgeführt [Kön16].

Tabelle 1: Materialeigenschaften von PETG [Kön16]

Eigenschaften	Wert
Zugfestigkeit	50 MPa
Zugmodul	2,2 GPa
Bruchdehnung	120 %
Biegefestigkeit	70 MPa
Biegemodul	2147 GPa
Schlagzähigkeit nach Charpy (gekerbt)	10 kJ/m ²

3.4 Rhinoceros 3D

Rhinoceros 3D, auch bekannt als Rhino, zählt zu den am meist genutzten 3D-Modellierungssoftwares. Durch die Basierung der Software auf der sogenannten NURBS-Geometrie (Non-Uniform Rational Basis Splines) ist sie besonders für die Anwendung und in der Architektur-, Prototyping-, Engineeringbranche etc. geeignet. Mit der Software können Benutzer anspruchsvolle 3D-Modelle erstellen, bearbeiten und analysieren und bildlich darstellen lassen. Die Erweiterungsfähigkeit von Rhino durch beispielsweise *Grasshopper* ist ein weiterer bedeutender Vorteil, mit dessen Funktionen eine noch präzisere und detailliertere 3D-Modellierung möglich ist [San23b].

3.5 Simplify3D

Simplify 3D ist ein professionelles Slicer-Programm für die Vorbereitung von 3D-Druckaufträgen, spezialisiert auf FFF-Drucker. Die Benutzeroberfläche des Programms ermöglicht es den Drucker in einfachen Schritten zu konfigurieren und beispielsweise Stützstruktur zu platzieren oder ein zwei Materialien-Druck einzurichten. Außerdem erlaubt die Software, die Einstellungen des Druckmaterials für den 3D-Druck zu modifizieren und anzupassen [San23a] [Thu17] [San24].

4 Entwicklungsprozess der Adapterkonstruktionen

4.1 Anforderungsliste

In Tabelle 2 werden die grundlegenden Anforderungen an das zu entwickelnde Adapterkonzept strukturiert aufgelistet. Hierbei unterscheiden sich die Anforderungen in obligatorische (**Fest-**) und optionale (**Wunsch-**) Kriterien, um eine eindeutige Priorisierung und Flexibilität im Entwicklungsprozess sicherzustellen.

Tabelle 2: Anforderungsliste für Adapterkonzept (Stand: 08.11.2024)

Änderung	F W	Anforderungen	Verantwortlich Bemerkung
01.10.2023	F	1. Geometrie	PuK
15.11.2023	F	1.1 Ausreichende Größe, um an der Prüfmaschine testen zu können	Lucas Beggs
15.11.2023	F	1.2 Ähnliche Größe wie herkömmliche Adapter	Lucas Beggs
		2. Kinematik	
01.10.2023	F	3. Kräfte	Sturm aktiv GmbH
01.10.2023	F	3.1 Mindestbelastung von ≥ 1500 N	Sturm aktiv GmbH
		4. Energie	
01.10.2023	F	5. Material	PuK
01.10.2023	F	4.1 Verdruckbarer Kunststoff	PuK
01.10.2023	F	6. Sicherheit	Sturm aktiv GmbH
01.10.2023	F	6.1 Darf nicht die Sicherheit des Nutzers gefährden	Sturm aktiv GmbH
01.10.2023	F	7. Fertigung	PuK
01.10.2023	F	7.1 Fertigung durch additive Fertigungstechnologie mittels eines FFF-Druckers	PuK
01.10.2023	F	8. Gebrauch	Sturm aktiv GmbH
05.11.2023	F	8.1 Möglichst wenig Einschränkungen haben	Sturm aktiv GmbH
05.11.2023	F	8.2 Vorsicht bei Umgebungen, die Einfluss auf die Festigkeit des Materials haben können	Lucas Beggs
01.10.2023	F	9. Kontrolle	Lucas Beggs
14.12.2023	W	9.1 Alle zwei Monate auf mögliche Schäden untersuchen lassen	Lucas Beggs
01.10.2023	F	10. Montage	PuK
01.10.2023	F	10.1 Montage durch den Benutzer selbst	PuK
01.10.2023	F	11. Instandhaltung	Lucas Beggs
01.10.2023	W	11.1 Regelmäßige Reinigung	Lucas Beggs
		12. Termin	
		12.1 Abschluss des Projekts 01.08.2025	PuK

4.2 Methodische Lösungsfindung

Für die Entwicklung und Konstruktion eines neuen Produkts gibt es geeignete Methoden zur Lösungsfindung. Diese sind hilfreich, um bereits vorhandene Produkte in speziellen Teilbereichen zu optimieren. Die Methoden entstammen unter anderem aus dem Gebiet der Kreativitätstechnik, beruhen auf Analogiebetrachtungen oder basieren auf allgemeinen anwendbaren Methoden zur Problemlösung [Pah21]. Die genutzten Methoden dienen dazu, möglichst viele Lösungen zu sammeln und zu erarbeiten. Für eine detaillierte Lösungsfindung dienen Bewertungssysteme, die sich in einzelne Lösungen und Kriterien aufgliedern.

Bei dieser Arbeit wird sich hauptsächlich den intuitiv betonten Methoden bedient. Hierzu gehört das Brainstorming, bei dem mit Hilfe von Mindmaps auf übersichtliche Weise viele Ideen zu unterschiedlicher Problemstellung gesammelt werden können. Die gewonnenen Ideen liefern erste Impulse und sind während der Sammelphase weiter gereift. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 zu sehen [Rot96].

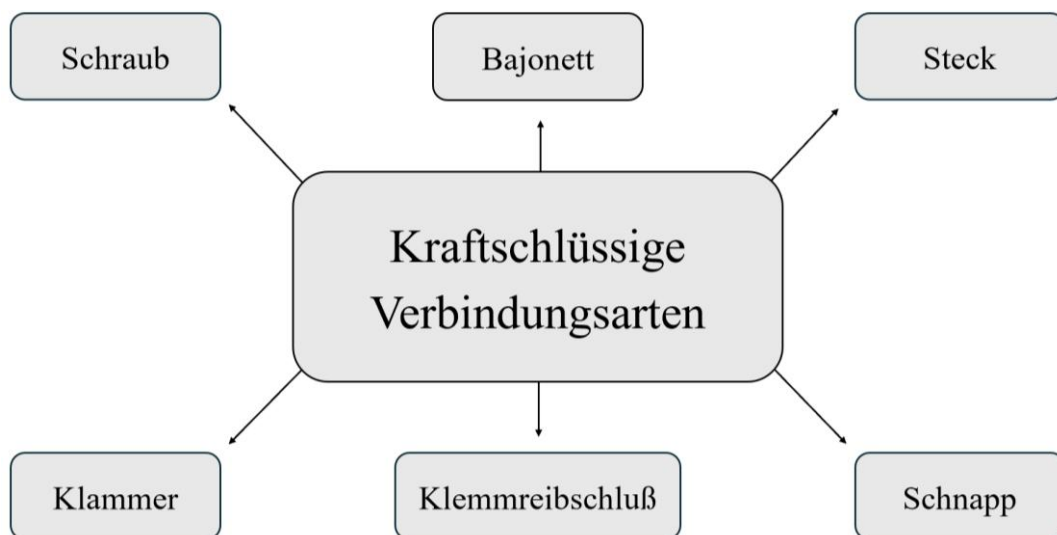


Abbildung 4: Brainstorming zu möglichen kraftschlüssigen Verbindungen

4.3 Wirkstrukturen und morphologischer Kasten

Die Technik des morphologischen Kastens beschreibt eine Kreativitätstechnik, die das Ziel hat, mögliche Lösungen und deren Variationen und Kombinationen zu einem konkreten Problem zu untersuchen [BWL23]. Der nächste Schritt ist also, die während des Brainstormings bestimmte Teilfunktion unseres Produkts, tabellarisch darzustellen. Dieser Vorgang vereinfacht nicht nur das weitere Arbeiten, sondern dient auch der überschaubaren und geordneten Visualisierung der Lösung. Zu der Teilfunktion werden spezifische Teillösungen gesucht und nebeneinander angeordnet. Auf diese Art und Weise kommt es zum Entstehen eines morphologischen Kastens, abgebildet in Tabelle 3.

Tabelle 3: Morphologischer Kasten zu kraftschlüssigen Verbindungsarten

Funktion	Teillösungen					
	1	2	3	4	5	6
Kraftschlüssige Verbindungsarten	Schraub	Bajonett	Steck	Klammer	Schnapp	Klemmreißschluß

4.4 Bewertung und Auswahl

Nachdem mögliche Teillösungen zusammengetragen werden, folgt zunächst die Bewertung, bevor anschließend diejenigen Lösungen ausgeschlossen werden, die sich als nicht sinnvoll oder nicht umsetzbar erweisen. Währenddessen werden sie auf unterschiedliche Bewertungskriterien untersucht und das Ergebnis mit farblicher Markierung gekennzeichnet (siehe Tabelle 4).

Dabei symbolisieren die drei auserwählten Farben

- Grün: erfüllt das Kriterium
- Rot: erfüllt das Kriterium nicht
- Gelb: erfüllt das Kriterium teils.

Bei der Untersuchung der Teillösungen werden die aufgelisteten Kriterien verwendet:

- Sicherheit (A): stellt sicher, dass der Mechanismus keine Gefährdung für den Anwender oder die fertige Prothese darstellt.
- Belastbarkeit (B): beschreibt das Verhalten des Mechanismus unter möglichen, realistischen Belastungen.
- Kompatibilität (C): überprüft, ob der Mechanismus mit den weiteren Teilen einer Unterschenkelprothese kompatibel ist.
- Anpassungsfähigkeit (D): bewertet, ob der Mechanismus gut an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden kann.
- Benutzerfreundlichkeit (E): bewertet, wie einfach und intuitiv der Mechanismus für den Benutzer zu bedienen ist. Dabei sollte der Mechanismus verständlich und schnell einsetzbar sein.
- Modellierung (F): dieses Kriterium beschreibt den Aufwand und die Schwierigkeit, den Mechanismus zu modellieren.

Tabelle 4: Bewertung der Verbindungsarten

Funktion	Teillösungen					
	1	2	3	4	5	6
Kraftschlüssige Verbindungsarten	Schraub	Bajonett	Steck	Klammer	Schnapp	Klemmreißschluß
(A)						
(B)						
(C)						
(D)						
(E)						
(F)						

Die Kriterien sind hinsichtlich ihrer relativen Gewichtung und Relevanz gegenüber dem herzustellenden Adapter von (A) bis (F) aufgelistet. Hierbei steht Kategorie (A) für das Kriterium mit der höchsten Priorität, während die Kategorie (F) das Kriterium mit der geringsten relativen Wichtigkeit.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Bewertung hinsichtlich der ausgewählten Kriterien werden für die nachfolgenden Entwicklungsphasen die Schraub-, Bajonett- und Schnappverbindung als aussichtsreiche Verbindungsarten evaluiert.

4.5 Erstellung der Adapter

In den folgenden Abschnitten wird der jeweilige Erstellungsprozess der drei konstruierten Adapter beschrieben und bildlich verdeutlicht.

Alle digitalen 3D-Modelle werden mit Hilfe des Programms *Rhinoceros 3D* erstellt und im Verlaufe des Entwicklungsprozesses optimiert. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um PETG der Firma *Alica*. Zur Herstellung der Strukturen werden der FFF-Drucker *x500* von *German RepRap* eingesetzt. Für eine mögliche Reproduzierbarkeit befinden sich die verwendeten Druckparameter zum Abgleich im Anhang (siehe Tabelle 7).

4.5.1 Schraubverschluss

Der erste Adapter wird als Schraubverschluss konstruiert und basiert auf dessen Gewindeprinzip. Die Positivform mit Gewinde und die Negativform mit dem entsprechenden Gewindegang auf der Innenseite bilden die zwei Teile des Verschlusses. Durch Drehen der Negativ- auf die Positivform wird ein Verschluss erzeugt.

Der erste Schraubverschluss besteht aus der Positivform mit einer Gewindeumdrehung und der dazu passenden Negativform. Die Positivform hat am Ende des Gewindes eine Erhöhung am Außenrand, die als Anschlagpunkt der Negativform dienen soll. Außerdem wird dem Innenrand der Negativform eine Abrundung zugefügt, um die Einführung des Gewindes zu verbessern. Das Produkt der ersten Modellierung ist in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Erster Schraubverschluss (links: Negativform, rechts: Positivform)

Die beiden Passteile können nach dem Druck jedoch nicht zusammengefügt werden. Dies liegt zum einen an den bei der Konstruktion nicht bedachten Toleranzen zwischen dem Gewinde der Positiv- und der Aussparung der Negativform. Zum anderen ist das Gewinde nicht optimal positioniert, um die anfängliche Einführung zu gewährleisten. Zur Verbesserung dessen wird die Negativform nachträglich händisch nachbearbeitet. Dabei wird mit Hilfe einer Feile der Beginn der Gewindeeinführung erweitert. Dennoch ist ein Fügen der beiden Form erfolglos.

Mit Beachtung der bestehenden Schwierigkeiten des ersten Verschlusses wird für den zweiten Prototyp das gesamte Verschlusskonzept neu konstruiert.

Das neue Design basiert weniger auf einem Gewinde, sondern vielmehr auf einem Einrastmechanismus nach einer Drehbewegung. Der erste fertiggestellte Prototyp ist in Abbildung 6 dargestellt.

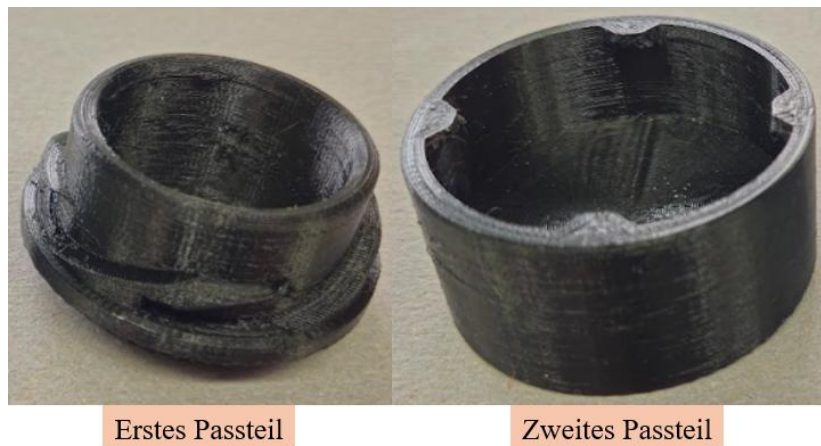


Abbildung 6: Zweiter Schraubverschlussentwurf

Das erste Passteil ähnelt in seiner Grundgeometrie stark der Positivform des ersten Prototyps. Anstelle eines Gewindes befinden sich jedoch vier symmetrisch platzierte Formen an der Außenseite. Diese Formen sollen durch ihr Design sowohl das Einführen erleichtern als auch das Einrasten des zweiten Passteils gewährleisten. Die Geometrie der modellierten Formen ist in Abbildung 7 zu sehen.

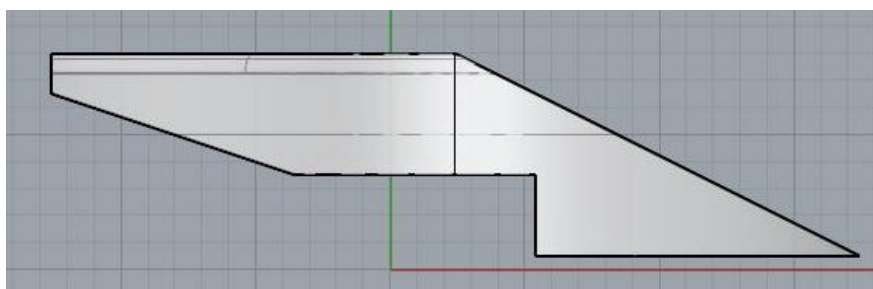


Abbildung 7: Geometrie der neuen Form

Das zweite Passteil ähnelt ebenfalls seinem Vorgänger der Negativform, allerdings werden der mittige Zylinder und die Neigung des Innenrandes entfernt sowie die Dicke der Außenwand verringert. Der neue Zusatz sind vier Zähne, die passend zu den vorher beschriebenen vier Formen der optimierten Positivform angeordnet sind. Ein Zahn, wie in Abbildung 8 zu sehen, bestehend aus einem kleinen Rechteck mit abgerundeten Kanten.

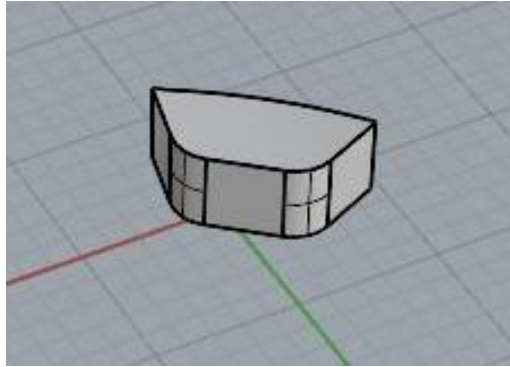


Abbildung 8: Geometrie eines Zahns

Die Idee hinter dieser Schraubverschlussvariante ist es, dass die Zähne durch das Drehen des Deckels entlang des schrägen Rückens der Form des ersten Passteils in eine Verengung an der Unterseite der benachbarten Form geleitet werden und dort Halt finden (siehe Abbildung 9).

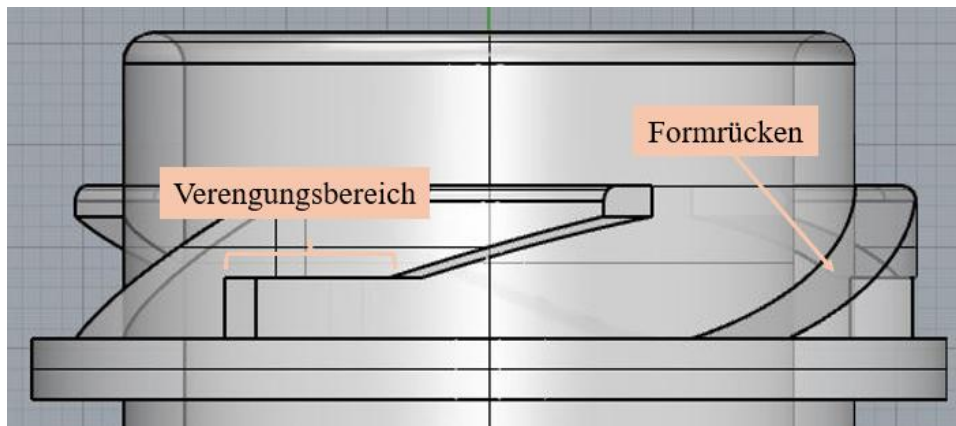


Abbildung 9: Positivform

Dieser Halt soll erstens durch die Verengung selbst und zweitens durch einen Anschlag innerhalb dieser gewährleistet sein.

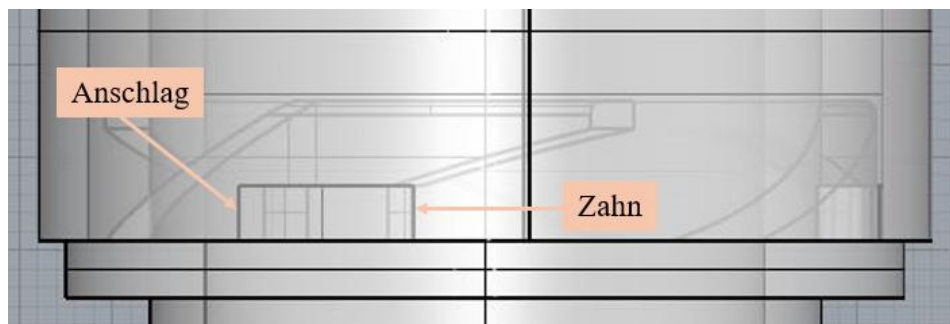


Abbildung 10: Verschlusskonzept

Der Anschlag markiert das Ende des Verschlusskonzepts und verhindert, dass der Mechanismus nicht überdreht wird. Um sich den zuvor beschriebenen Ablauf besser vorstellen zu können, wird eine realitätsnahe Darstellung in Abbildung 10 gegeben.

Die beiden Formen lassen sich problemlos zusammenfügen und der Mechanismus funktioniert wie vorgesehen. Ungeachtet dessen gibt es einen Aspekt, der ein Optimierungspotenzial aufweist. Die Verengung ist am Ende zu breit, sodass das Einführen reibungslos funktioniert, jedoch der Halt nicht gewährleistet wird. Die beiden Passteile können ohne Widerstand voneinander getrennt werden.



Abbildung 11: Dritter Schraubverschluss

Für eine weitere Optimierungsschleife wird die Höhe der Zähne um einen halben Millimeter vergrößert. Außerdem wird die Länge der Zähne verlängert, um mehr Kontaktfläche zu bieten. Nach Einführung der Verbesserungen wird der dritte Prototyp gedruckt. Der daraufhin gefertigte dritte Prototyp ist in Abbildung 11 abgebildet.

Nach Fertigstellung des Drucks zeigt sich ein neues Hindernis, welches durch die Anpassung der Zähne zustande kommt. Diese passen nicht mehr zwischen die Formen, woraufhin die Einführung und das Einrasten verhindert wird (vgl. Abbildung 12).

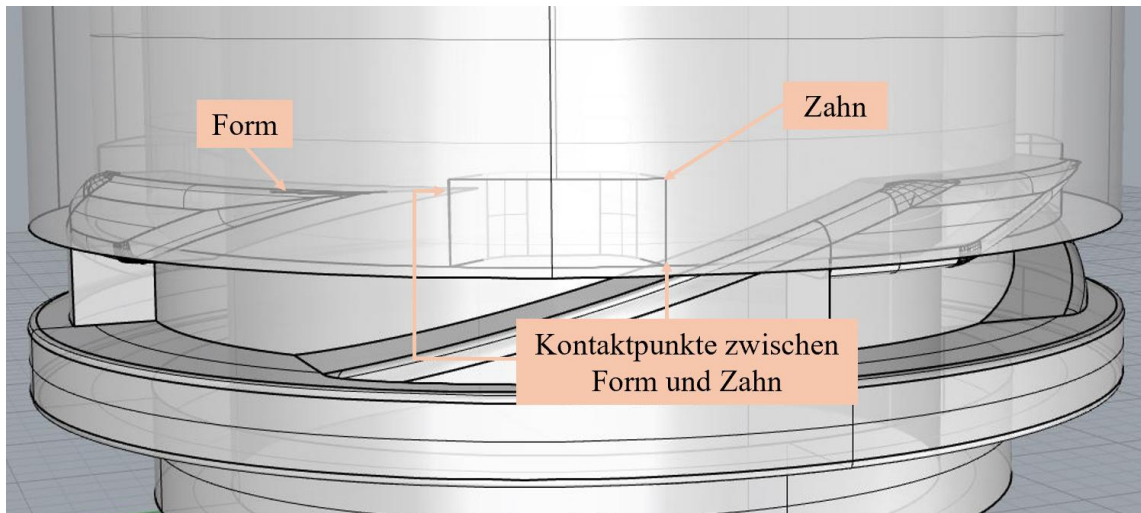


Abbildung 12: Erfolgreiche Einführung der Zähne

Der Mechanismus funktioniert mit den getroffenen Veränderungen zwischen der zweiten und der dritten Variante nicht mehr.

Eine Lösung ist erforderlich, die die bestehende Geometrie der Zähne nicht erneut verändert, da deren größere Fläche vorteilhaft ist. Diese gewährleistet bei Belastung eine bessere Kraftverteilung. Die Anzahl der Formen und Zähne wird deshalb von vier auf drei reduziert. So ist mehr Spielraum gegeben und sowohl die Formen als auch die Zähne können weiter optimiert werden. Die drei Formen werden nun rotationssymmetrisch am Außenrand positioniert, ebenso passend dazu die jeweiligen Zähne (vgl. Abbildung 13).

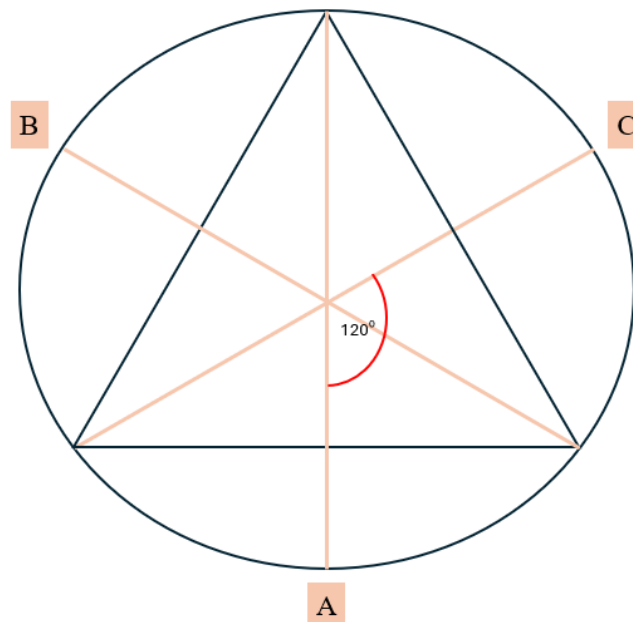


Abbildung 13: Ausrichtung und Positionierung der Formen und Zähne

Sowohl die Position der Formen als auch die der Zähne werden durch die Buchstaben A, B und C verdeutlicht. Dabei haben sie von dem Mittelpunkt ausgehend jeweils einen Winkel von 120° zueinander. Weiter werden die Kontaktflächen der Formen und der Bereich der Verengung vergrößert. Die Zähne werden in ihrer Höhe und Länge den korrespondierenden Maßen der Formen angepasst, um die maximale Reibung und den besten Halt zu ermöglichen. Bei der Änderung beider Geometrien wird explizit darauf geachtet, dass der Spalt zwischen den Formen ausreichend ist, um eine Einführung zu garantieren.

Für die mechanischen Untersuchungen, beschrieben in Kapitel 5, wird bei dem finalen Druck zudem eine Erweiterung an den Prototyp angebracht. Diese wird zusammen mit dem Adapter gedruckt und dient der Einspannung und Fixierung in der Prüfmaschine. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dies als Prüfvorrichtung bezeichnet (siehe Abbildung 14).

Der Mechanismus des Verschlusses funktioniert problemlos. Der vorhandene Prototyp erfüllt die Voraussetzungen für die geplanten mechanischen Prüfungen.



Abbildung 14: Finaler Hakenverschluss mit Prüfvorrichtung

4.5.2 Hakenverschluss

Das Prinzip dieses Verschlusssystems basiert darauf, dass sich die beiden Passteile durch sogenannte Schnapphaken miteinander verbinden. Dabei hat die Positivform die Schnapphaken zirkulär umrundend und die Negativform die passende Einkerbung. Ein zentral platziertes Kreuz (Positivform) mit seiner passenden Aushöhlung (Negativform) soll die Unbeweglichkeit des zusammengeführten Systems gewährleisten. Zudem ist das Kreuz nach dem *Poka Yoke* Prinzip konzipiert.

Das bedeutet, dass es aufgrund seiner Asymmetrie und einer verkürzten Seite nur eine Variante gibt, den Verschluss korrekt zusammenzustecken. Diese Funktion soll dem Nutzer auch bei der Ausrichtung des Verschlusses behilflich sein. Die Negativform hat zur besseren Einführung der Schnapphaken eine Abrundung der Innenkante. Die beiden gedruckten Adapterteile sind in Abbildung 15 zu sehen.



Abbildung 15: Erster Hakenverschlussentwurf (links: Negativform, rechts: Positivform)

Beim ersten Versuch des Verbindens und Trennens werden Komplikationen der Konstruktion sichtbar. Die Auslegung der Toleranz zwischen der Positiv- und der Negativform ist zu gering. Dadurch können die Teile maximal ein paar Millimeter ineinandergesteckt werden, bevor sie sich verkeilen. Zusätzlich ist beim Trennen das Kreuz von der Oberfläche der Positivform abgebrochen (vgl. Abbildung 16).



Abbildung 16: Herausgebrochenes Kreuz aus der Positivform

Für den zweiten Prototypen werden überall Toleranzen auf 0,5 mm erhöht. Zudem bekommt die Außenwand der Positivform eine Neigung von 2 Grad nach innen gerichtet. Dementsprechend wird auch die Negativform angepasst. Zusätzlich wird die Geometrie des Kreuzes verändert, um diesem mehr Oberfläche auf der Positivform zu bieten und dessen Volumen zu erhöhen. Die Volumenänderung sorgt gleichzeitig für eine insgesamt höhere Stabilität im Verschluss. Die Geometrie des neuen Kreuzes wird in Abbildung 17 verdeutlicht.

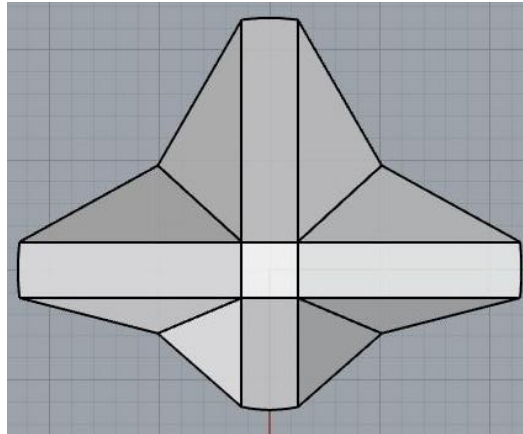


Abbildung 17: Neue Geometrie des Kreuzes

Mit Hilfe dieser Anpassungen sollen die beiden Komplikationen des ersten Prototyps ausgeglichen werden. In Abbildung 18 ist der zweite gedruckte Prototyp zu sehen.



Abbildung 18: links: Zweiter Hakenverschluss, rechts: Frontansicht der Positivform

Trotz der vorgenommenen Änderungen und Verbesserungen ist das Zusammenfügen der beiden Passteile erfolglos. Dies lässt sich auf folgende bestehende Hindernisse zurückführen: erstens auf die hohe Steifigkeit des Materials, zweitens auf die fehlende Möglichkeit der nach innen gerichteten elastischen Verformung der Positivform beim Zusammenfügen.

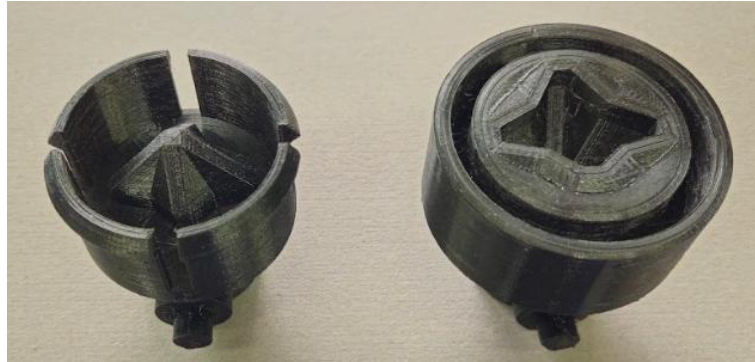


Abbildung 19: Dritter Hakenverschluss

Zur Behebung dieser Hindernisse werden vier Schlitz in die Außenwand der Positivform modelliert. Alle vier sind identisch, mit einer Breite von 4 mm, einer Höhe von 35 mm und einer nach dem Kreuz ausgerichteten Position. Außerdem werden zusätzlich die zirkulären Schnapphaken an die Oberkante der Positivform verlegt. Dies vereinfacht das Einführen und sorgt, im verbundenen Zustand, für minimalen Spielraum zwischen den beiden Passteilen und erhöht die Stabilität. Das Endresultat ist in Abbildung 19 dargestellt.

Die Veränderungen haben zu einem erfolgreichen Adapterkonzept geführt. Geometrisch ist der dritte Prototyp nun bereit für die mechanische Testphase. Jedoch passt die Größe noch nicht mit den der anderen Verschlüsse überein. Entsprechend wird der dritte Prototyp kleiner skaliert, um eine Vergleichbarkeit beim Prüfen zu gewährleisten. Als positiver Nebeneffekt kommt es zu einer Materialeinsparung und Verringerung der Druckzeit.



Abbildung 20: Finaler Hakenverschluss

Vor dem Druck des vierten Hakenverschlusses wird – analog zum Schraubverschluss – eine Prüfvorrichtung an der Unterseite beider Passteile konstruiert, um eine Einspannung in die Prüfmaschine zu ermöglichen (vgl. Kapitel 5). Wie zu erkennen ist, unterscheidet er sich ausschließlich farblich von den vorherigen Prototypen. Dies ist auf den Materialverbrauch des schwarzen PETG zurückzuführen. Abbildung 20 zeigt den finalen Prototyp des Hakenverschlusses.

4.5.3 Bajonettverschluss

Der Bajonettverschluss funktioniert mit Hilfe eines Verriegelungssystems, das eine sichere Verbindung durch Drehen und/oder Einrasten schafft. In der Regel sind bei einem Bajonettverschluss zwei Komponenten vorhanden. Die Erste hat einen Stift, der sich in die entsprechenden Aussparungen oder Rillen der Zweiten einfügt. Anschließend erfolgt das Drehen, bis der Stift in die Aussparung einrastet oder die Rillen miteinander verriegeln.

Basierend auf dem genannten Verriegelungssystem wird der erste Prototyp mit dem Bajonettverschluss modelliert und gefertigt.

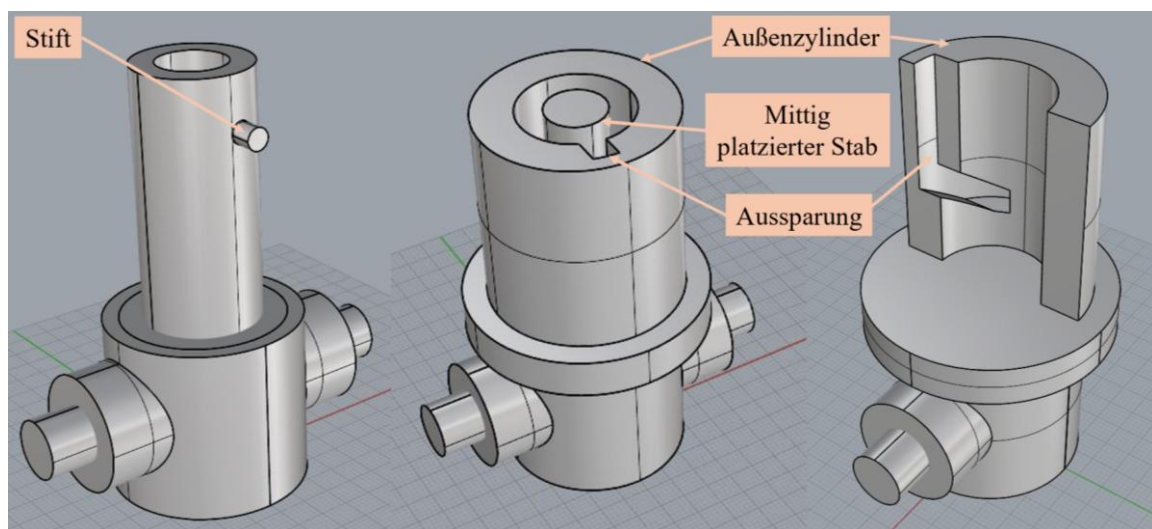


Abbildung 21: Bajonettmodell (links: Komp. 1, mittig: Komp. 2, rechts: Querschnitt)

Die erste Komponente ist ein Zylinder mit einem Stift an seiner Außenwand. Die zweite Komponente ist ein größerer Zylinder mit der entsprechenden Aussparung an seiner Innenwand. Zusätzlich ist die zweite Komponente mit einem mittig platzierten Stab ausgestattet, um die Einführung beider Komponenten zu erleichtern und für Stabilität unter Belastung zu sorgen (siehe Abbildung 21). Der Außendurchmesser dieses Stabs stimmt mit dem Innendurchmesser der ersten Komponente überein, um möglichst keinen Spielraum zu lassen. Dasselbe gilt ebenfalls für den Außendurchmesser der ersten und dem Innendurchmesser der zweiten Komponente. Das Resultat ist in Abbildung 22 verdeutlicht.



Abbildung 22: Erster Bajonettverschluss (links: Komp. 2, rechts: Komp. 1)

Der erste Entwurf ist zu klein skaliert und weist zu geringe Toleranzen auf, verursacht durch die parallele Herstellung mit dem ersten Hakenverschluss. Daher kann der Verschluss nicht wie geplant getestet werden. Sowohl der Stift als auch die Aussparung sind nicht ordentlich verdrückt. Beim Versuch des Zusammenfügens und des Trennens bricht der mittig platzierte Stab der zweiten Komponente aus seiner Bettung.

Zur Behebung der Schwachstellen werden beide Komponenten größer skaliert und die Toleranz ebenfalls auf 0,5 mm erhöht.

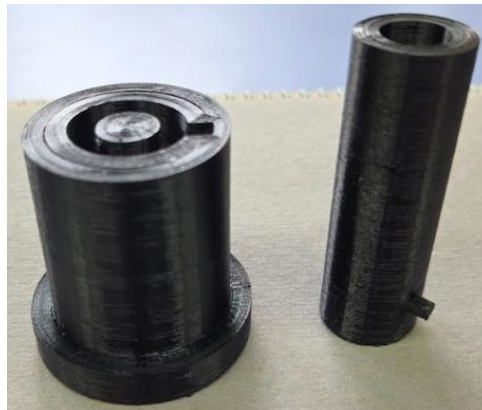


Abbildung 23: Zweiter Bajonettverschluss

Die größere Skalierung soll dazu führen, dass vor allem der Stift und seine Aussparung ordentlich verdrückt werden können, da diese die wichtigsten Aspekte der Verbindung sind. Abbildung 23 veranschaulicht dabei den zweiten Prototypen. Bei diesem Prototyp funktionierten neben dem Fügen und Trennen beider Komponenten auch das Verriegelungssystem einwandfrei.

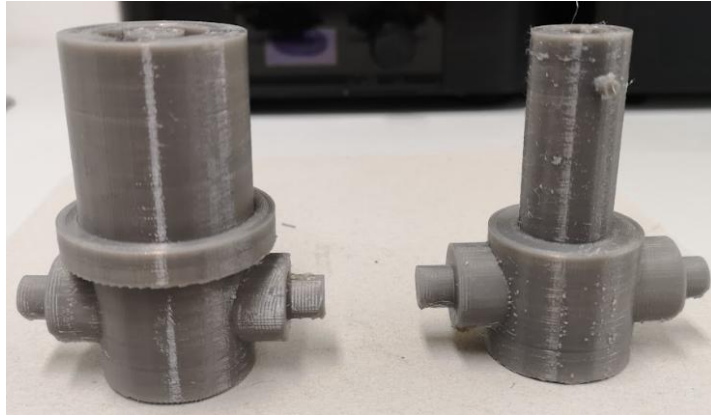


Abbildung 24: Finaler Bajonettverschluss

Die letzte Änderung, wie bei den anderen beiden Verschlüssen auch, ist das Hinzufügen der Prüfvorrichtungen (vgl. Abbildung 24). Wie bei dem Hakenverschluss wird der endgültige Prototyp mit einem farblich abweichenden PETG gedruckt. Somit ist der Bajonettverschluss bereit für die bevorstehende mechanische Prüfung.

5 Mechanische Prüfung

5.1 Methodik

Bei der mechanischen Prüfung werden alle drei finalen Verschlüsse auf Zug und Druck belastet. Verwendet wird die Universalprüfmaschine der Firma *ZWICKROELL GMBH & CO.KG* des Types BZ2-MM100TL.ZW01 mit einer Kraftmessdose von 100 kN. Zur Aufnahme und Auswertung der Ergebnisse wird das Programm *testXpert II* genutzt.

Im Testprogramm wird die Prüfvorschrift der *DIN EN ISO 178* geladen und entsprechend für diese Prüfungen modifiziert (siehe Tabelle 5).

5.1.1 Probenvorbereitung

Bevor es zum Prüfen der einzelnen Prototypen kommt, wird dafür gesorgt, dass alle drei Modelle die gleiche Ausgangslage aufweisen. Dabei wird beim Erstellen des jeweiligen finalen Verschlusses darauf geachtet, dass Größe und Geometrie untereinander vergleichbar sind. Zudem wird an der Unterseite jedes Verschlusses die gleiche Prüfvorrichtung angebracht, um eine einheitliche Einspannung in die Prüfmaschine zu gewährleisten. Diese getroffenen Vorkehrungen sollen ebenfalls dabei helfen, präzisere und vergleichbarere Ergebnisse zu erzielen.

5.1.2 Probeneinspannung

Im Anschluss an die vorbereitenden Maßnahmen findet das Einspannen der Modelle in die Prüfmaschine statt. Dabei ist es entscheidend, dass die Verschlüsse zentriert und fest fixiert werden. Beim Hakenverschluss müssen die beiden Passteile zudem korrekt übereinander liegen, um eine genaue Ausrichtung des inneren Kreuzes zu gewährleisten. Der Schraub- und der Bajonettverschluss werden manuell zusammengesetzt und anschließend eingespannt, da die Maschine diesen Mechanismus nicht selbstständig durchführen kann.

5.1.3 Festlegung der Parameter

Der letzte Schritt, bevor es zum Prüfen kommt, ist die Festlegung und Eingabe der Prüfparameter. Diese wurden mit Hilfe der Steuerungssoftware (siehe Kapitel 5.1) über einen Computer eingegeben. Die verwendeten Werte können aus Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5: Prüfparameter in testXpert II

Parameterreiter in testXpert II	Parameter	Wert
Startposition der Maschine	Geschwindigkeit der Startposition	50 mm/min
Prüfungsphase bis zur Vorkraft	Vorkraft	0,1 MPa
	Geschwindigkeit Vorkraft	5 mm/min
Bestimmung des Biegemoduls	Beginn Biegemodul	0,05 %
	Ende Biegemodul	0,25 %
Kriterien für das Prüfungsende	Kraftabschaltswelle	50 %Fmax
Prüfung	Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min

5.1.4 Start des Tests

Mit dem Beginn der Prüfung wird eine Beanspruchung auf die Verschlüsse durch die Anwendung von Zug- bzw. Druckkräften eingeleitet.

Im Falle des Hakenverschlusses wird bei der Druckprüfung die Positivform durch die Prüfmaschine in die Negativform eingeführt. Erst nachdem die Haken in die Einkerbung eingerastet sind, beginnt die tatsächliche Druckbelastung auf den Mechanismus und somit auch die Kraftaufzeichnung.

Im Zugversuch wird die Kraft gemessen, die benötigt wird, um die Positivform wieder von der Negativform zu trennen. Der Messvorgang wird abgebrochen, sobald die Haken aus ihrer Einkerbung rutschen.

Beim Schraub- und Bajonettverschluss ist der Mechanismus aufgrund des händischen Zusammenfügens direkt der Druck- bzw. Zugkraft ausgesetzt. Die Kraftaufzeichnung beginnt nahezu parallel zum Start des Tests.

5.1.5 Messung und Datenerfassung

Die Verschlüsse werden nacheinander zuerst auf Zug und danach auf Druck getestet. Das allgemeine Ziel bei beiden Versuchen ist das Standhalten einer Belastung von 2500 N.

Das Messen erfolgt für alle drei Verschlüsse schrittweise. Dies impliziert, dass für jeden Verschluss individuelle Kraftgrenzen festgelegt werden, auf die sie getestet werden. Der Grund dafür ist, ein besseres Gefühl und Verständnis über die Belastbarkeit der jeweiligen Mechanismen zu bekommen. Bei dem Zugversuch des Bajonettverschlusses sind die Schritte: 50 N, 150 N, 250 N und 500 N, während beim Schraubverschluss mit einer Zugkraft von 500°N begonnen wird. Beim Hakenverschluss dient der Zugversuch der Ermittlung der maximalen Zugkraft, bei der eine Trennung der beiden Bauteilkomponenten eintritt. Für die Druckversuche von Schraub- und Hakenverschluss werden die 500 N, 1500 N und 2500 N gewählt.

Alle Messungen werden mit der gleichen Probe des jeweiligen Verschlusses durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Verschlüsse vor dem Versuch vorbelastet sind.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Belastung unter Zug

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Zugbelastung für die drei verschiedenen Verschlussarten detailliert dargestellt. Dabei werden alle drei Konfigurationen auf ihre maximale Zugbelastung getestet. Ein Überblick dessen wird mit Hilfe von Abbildung 25 verdeutlicht. In dem abgebildeten Diagramm ist der Verfahrweg in Millimeter (mm) gegen die Kraft in Newton (N) gegeben.

Es handelt sich bei den Kurvenverläufen des Haken- und Bajonettverschlusses um den vierten Testdurchlauf. Wie in Kapitel 5.1.5 beschrieben, werden die Verschlüsse schrittweise, individuell auf 2500 N getestet. Die Kurvenverläufe der vorherigen Versuche des Haken- und Bajonettverschlusses sind dem dargestellten Verlauf bis hin zur getesteten Kraft ähnlich, sodass nur der letzte Testdurchlauf dargestellt ist. Beim Schraubverschluss zeigen sich hingegen Unterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Durchlauf, sodass im Folgenden beide Kurven dargestellt und diskutiert werden.

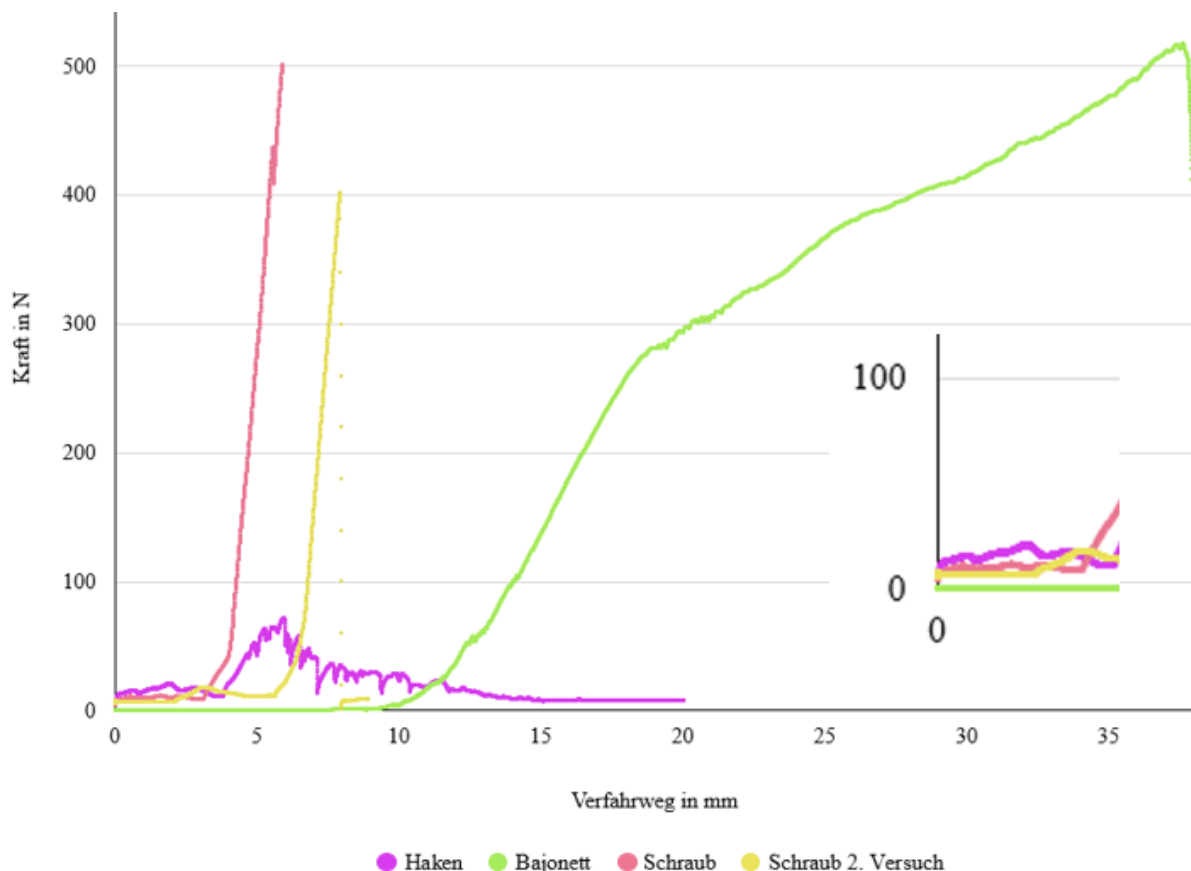


Abbildung 25: Ergebnisse der Belastung unter Zug

Zu Beginn kann direkt erkannt werden, dass der Kurvenverlauf für jede der drei Verschlüsse sehr unterschiedlich ist. Sie spiegeln die Funktionsweise des repräsentativen Mechanismus deutlich wider. Zum Anfang hin ist der Kraftverlauf bei allen drei Verschlüssen generell gleich. Die minimale Kraftaufzeichnung deutet auf mögliche Reibung zwischen den Passteilen hin. Der Schwellwert der Anfangskraft ist so niedrig eingestellt, dass diese Art an Kontakt bereits die Messung startet. Die Reibung wird mit steigendem Verfahrweg weiterhin aufgezeichnet, bis zu dem Punkt, an dem die Kraft auf den jeweiligen Mechanismus ausgeübt wird. Ab diesem Zeitpunkt sind individuelle Kurvenverläufe erkennbar.

Der Hakenverschluss wird insgesamt viermal getestet, um die zum Trennen des Mechanismus benötigte Kraft zu ermitteln. Der anfängliche Kraftverlauf spiegelt den Verfahrweg der Haken in der Einkerbung wider, bis diese auf die Kontaktfläche treffen. In dem Verfahrbereich zwischen etwa 4 mm und 6 mm steigt die Kraft stetig an. Dies deutet darauf hin, dass die Haken fest in ihrer Einkerbung sitzen und der ansteigenden Kraft standhalten. Dabei verteilt sich die Kraft gleichmäßig auf die Hakenkörper. Nach ca. 6 mm hat der Hakenverschluss seine maximale Belastung, etwa 70 N, erreicht und es kommt zu einer Abnahme der Kraft. Nach Erreichen der Maximalbelastung sind die Kraft und die daraus resultierende elastische Verformung zu hoch, um einen festen Halt der Haken zu garantieren (siehe Abbildung 26). Die elastische Verformung erfolgt aufgrund der vier Schlitze in der Außenwand der Positivform. Das Resultat ist das Herausrutschen der Haken aus der Einkerbung und dessen Reibung entlang der Innenseite der Negativform. Der dabei gemessene Kraftverlauf wird im Bereich zwischen 6 mm und 20 mm verdeutlicht.

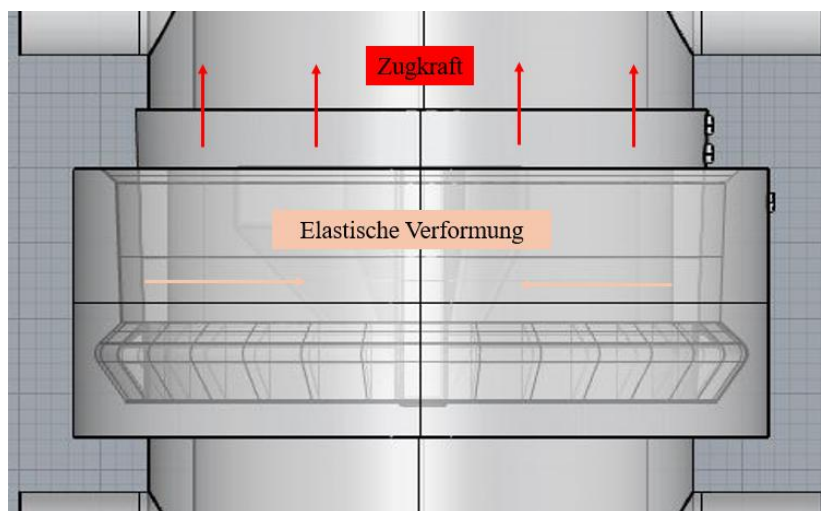


Abbildung 26: Verformung und Trennen des Hakenverschlusses

Die Verformung findet aufgrund des verwendeten Materials, dem PETG, und den modellierten Schlitten in der Außenwand der Positivform statt. Nachdem die Haken aus ihrer Einkerbung rutschen, kommt es zu einer elastischen Verformung der Außenränder der Positivform. Diese bleibt bestehen und kreiert eine Spannung, die dafür sorgt, dass die Haken an der Außenwand der Negativform abscheren und einen Halt erzeugen. Dies verdeutlicht auch der stark schwankende Kurvenverlauf. Das Ende der Kurve nach 20 mm zeigt die Trennung der beiden Passteile, ohne jegliche Beschädigungen. Dies ist ein charakterisierender Unterschied zu den anderen beiden Verschlüssen.

Bei dem Bajonettverschluss kommt es erst nach einem Verfahrweg von etwa 10 mm zu einem Zuwachs der Kraft. Ursächlich hierfür ist einerseits die Konstruktion der Aussparung. Andererseits die plastische Verformung infolge der dreifachen Vorbelastung. Der Stift liegt noch nicht korrekt in seiner Aussparung und muss erst einen gewissen Weg zurücklegen, bevor der Widerstand des Mechanismus zu Tragen kommt (vgl. Abbildung 27).

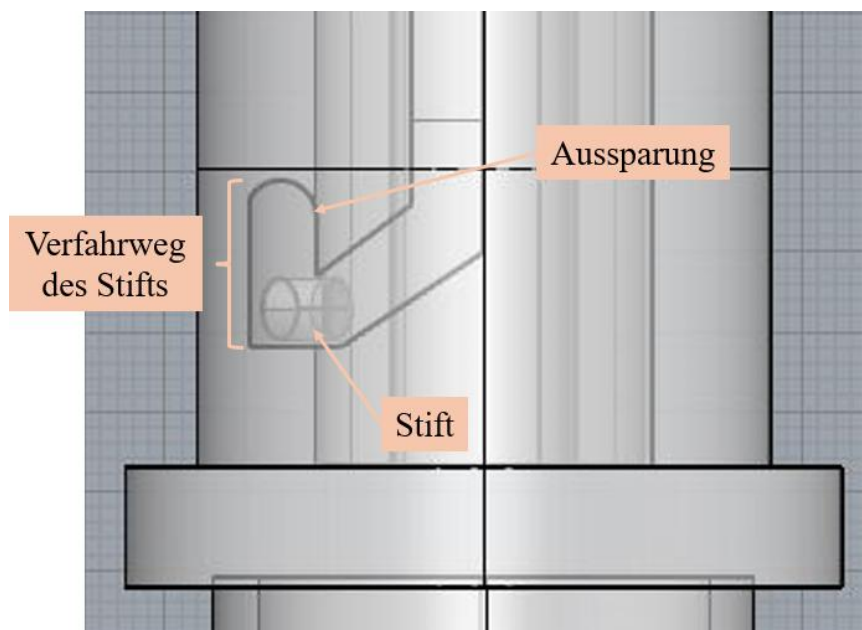


Abbildung 27: Verfahrweg des Stifts bei Zugkraft

Im Verfahrbereich zwischen 10 mm und 37 mm ist jedoch ein deutlicher Zuwachs der Kraft zu sehen. Während des Versuches wird die Zugbelastung entlang des Stifts und der Aussparung verteilt. Dabei verhindert die Aussparung das Verrutschen des Stifts und einen direkten axialen Zug. Nach ca. 18 mm ist eine Abnahme der Steigung zu beobachten. Diese deutet auf eine hohe plastische Verformung des Materials, insbesondere auf die des Stiftes hin. Die Verformung des Stiftes führt noch nicht zum Versagen und die Kraft nimmt weiter zu. Erst nach knapp 510 N ist die Belastungsgrenze des Stiftes überschritten. Kurz danach bricht dieser und es kommt zum

Versagen des Verschlusses, gekennzeichnet durch das Ende der Kurve bei 38 mm. Anders als bei Hakenverschluss kommt es zur Trennung der beiden Passteile aufgrund des Versagens des Stiftes. Der getestete Bajonettverschluss ist in Abbildung 28 abgebildet.



Abbildung 28: Bajonettverschluss mit abgebrochenem Stift

Beim Schraubverschluss ist der erste Belastungsschritt, die Aussetzung einer Zugbelastung von 500 N standzuhalten. Wie der nahezu lineare Kurvenverlauf im Verfahrbereich zwischen 3 mm und 5 mm verdeutlicht, gelingt dies problemlos.

Aufgrund ihrer Positionen und Ausrichtung kommt es zur einheitlichen Verteilung der Kraft zwischen den drei Zähnen und den jeweiligen Formen. Infolge deren Passgenauigkeit sorgt der Kontakt für eine feste Verbindung. Die durch das anfängliche Eindrehen beider Passteile entstehende Reibung sorgt ebenfalls für Sicherheit. Infolge der Belastung treten plastische Verformungen der Zähne auf, die jedoch aufgrund der Passgenauigkeit minimal sind. Nach ungefähr 440 N kommt es zu einem abrupten Knick in der Steigung, was auf das Einsetzen eines Risses und beginnendes Materialversagen hinweist. Dennoch kann der Schraubverschluss der ausgesetzten Belastung aushalten.

Der zweite Belastungsschritt mit derselben Probe dient der Verifizierung der Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Zugkraft von 1000 N. Anders als beim ersten Versuch beginnt die Kraftaufnahme des Verschlusses erst nach 6 mm. Ein möglicher Rückschluss ist der größere Spielraum zwischen der Prüfvorrichtung des Prototyps und der Einspannung der Prüfmaschine. Aufgrund dessen muss die Einspannung erst wieder auf Kontakt gezogen werden, bevor eine Kraftmessung stattfinden kann. Der Verfahrbereich liegt hier zwischen 6 mm und 7,5 mm und zeigt eine, von der Steigung her identische Kraftzunahme. Jedoch ist die Passgenauigkeit und die Reibung nicht mehr ausreichend gegeben, was zum Nachteil der Verbindung werden und anfällige Sollbruchstelle kreieren kann (siehe Abbildung 29).

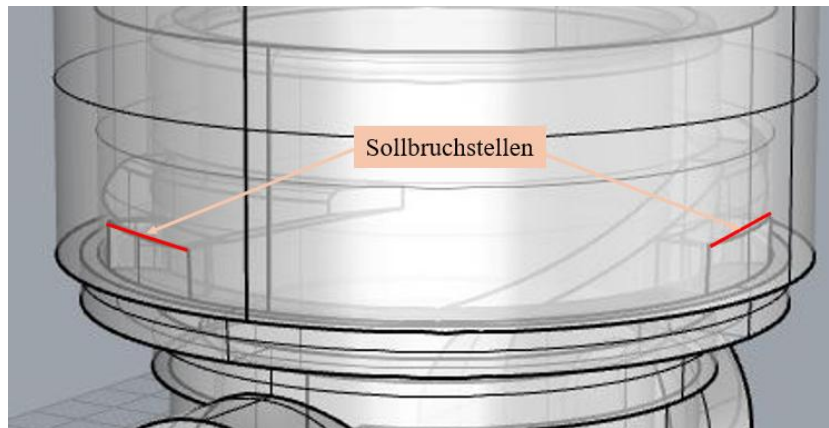


Abbildung 29: Sollbruchstellen des Schraubverschlusses unter Zugbelastung

Bei 400 N kommt es zum Materialversagen. Zwei der Zähne brechen aus dem Innenrand heraus. Die genannten Aspekte haben zum Scheitern des Verschlusses geführt. Der Bruch wird ebenfalls deutlich durch den schlagartigen Abfall der Kraft. Das Bruchbild ist in Abbildung 30 zu erkennen.

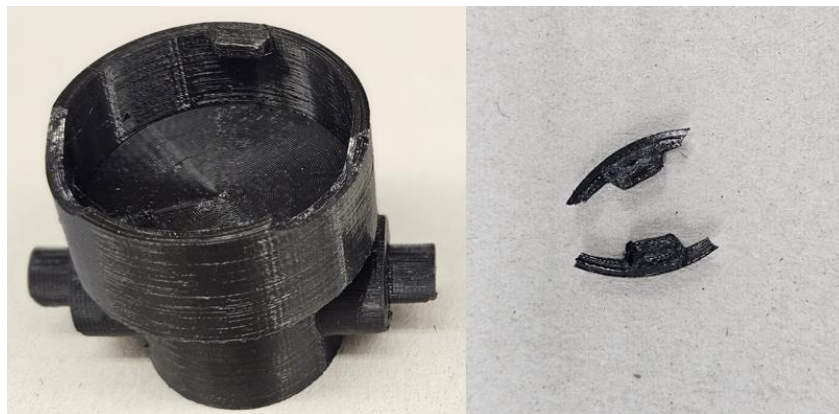


Abbildung 30: Schraubverschluss mit abgebrochenen Zähnen

5.2.2 Belastung unter Druck

Der Bajonettverschluss kann nicht unter Druck getestet werden, da der Aufbau und die Geometrie dies verhindern. Die Art, wie der Verschluss gedrückt wird, führt nicht zu der Belastung des Mechanismus, sondern der des Materials. Es kommt lediglich zu einem primären Kontakt zwischen der Oberfläche des Zylinders der ersten Komponente und der unteren Innenfläche der zweiten Komponente. Für den Verschluss ergibt sich daraus ein signifikanter Vorteil, da der Mechanismus währenddessen entlastet wird und sich die aufgebrachte Kraft über eine größere, symmetrischere Fläche verteilt. Dies wird anhand Abbildung 31 verdeutlicht.

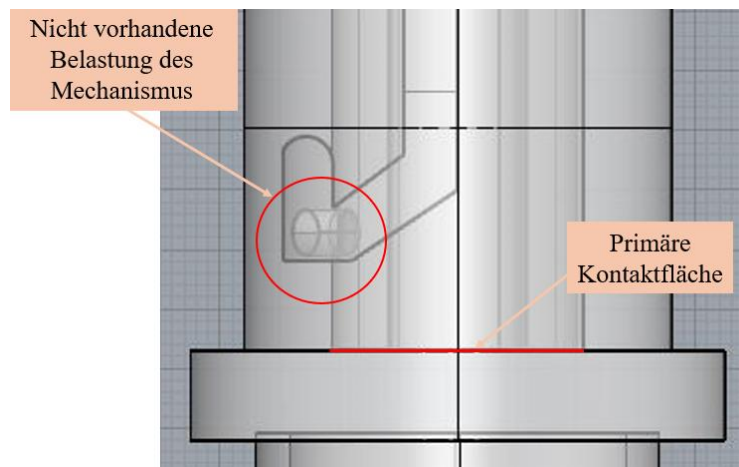


Abbildung 31: Bajonettverschluss unter Druckbelastung

Bei der zweiten durchgeführten mechanischen Prüfung wird der Schraub- und Hakenverschluss mit einer Druckkraft belastet, mit dem Ziel, 2500 N standzuhalten. Die gewonnenen Ergebnisse werden in Abbildung 32 dargestellt. Das vorliegende Diagramm illustriert den Zusammenhang zwischen der aufgebrachten Kraft in Newton und dem Verfahrensweg in Millimetern.

Entsprechend der Zugprüfung ist auch die Druckbelastung in individuellen Schritten durchgeführt worden. Alle aufgenommenen Ergebnisse können im Anhang eingesehen werden.

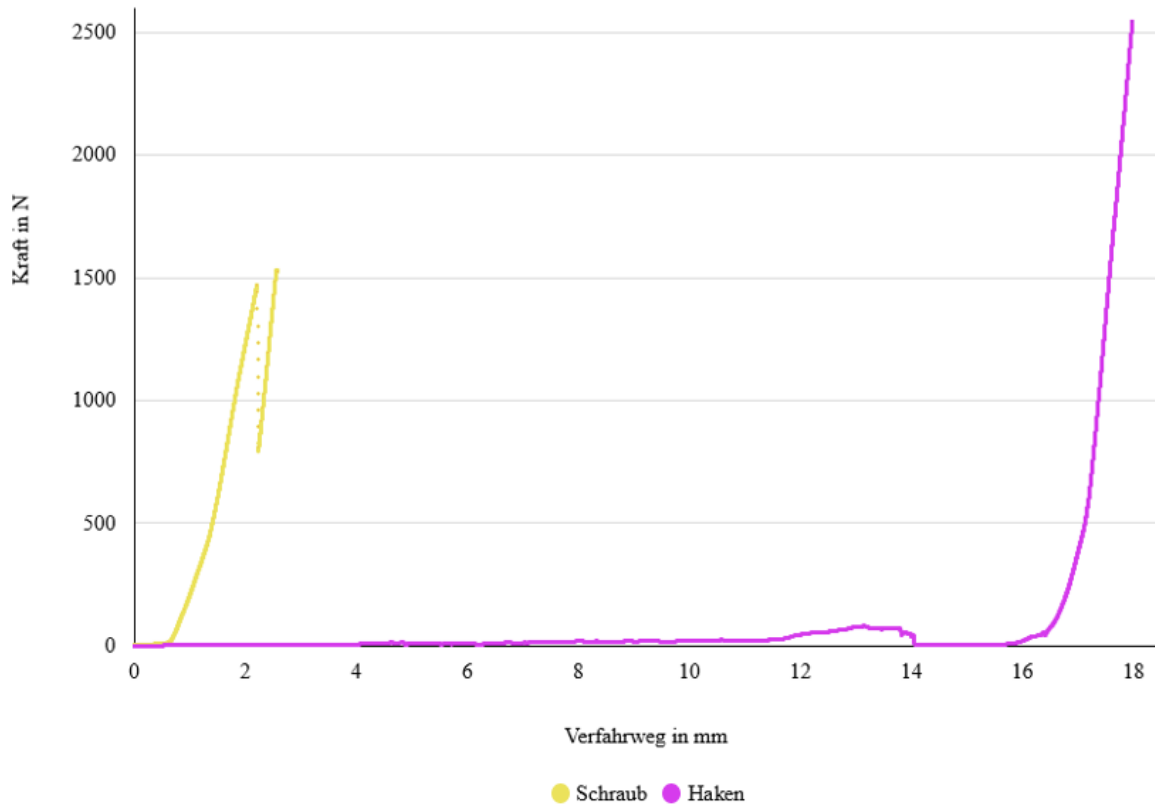


Abbildung 32: Ergebnisse des Schraub- und Hakenverschlusses unter Druckbelastung

Auf den ersten Blick ist direkt zu erkennen, dass sich die Kurven drastisch unterscheiden. Bei dem Hakenverschluss ist im Diagramm der dritte Versuch abgebildet.

Zu Beginn ist beim Haken keine sichtliche Kraftzunahme erkennbar. Zwischen 12 mm und 14 mm kommt es erst zu einer stetigen Kraftzunahme und dann zu einem plötzlichen Kraftabfall. Dieser Verlauf zeigt sich ebenfalls in jedem der drei vorherigen Messungen (vgl.°Abbildung 40). Dies liegt daran, dass die Haken zunächst in ihrer Einkerbung sitzen. Durch die Druckkraft werden diese jedoch immer mehr aus ihrer Einkerbung gedrückt, wodurch es zu einer nach innen gerichteter, elastischer Verformung der Außenwand der Positivform kommt (siehe Abbildung 33). Dies passiert auch aufgrund der eingebauten Schlitze.



Abbildung 33: Zusammengesteckter Hakenverschluss

Die Verformung nimmt zu, bis zu dem Punkt, wo die Haken komplett aus der Einkerbung gedrückt werden, und bleibt danach nahezu konstant. Die zirkulären Haken werden jetzt nur entlang der Innenseite der Negativform gedrückt. Das Zusammendrücken der beiden Passteile erfolgt so lange, bis der Außenrand der Positivform auf die Innenfläche der Negativform trifft. Erst nach einem zurückgelegtem Verfahrensweg von etwa 16 mm ist ein plötzlicher exponentieller Zuwachs der Kraft zu sehen, da die Belastung jetzt nicht mehr primär auf die Haken ausgeübt wird. Aufgrund des modifizierten Kreuzes kann sich der Mechanismus nicht verdrehen und die Kraft wird senkrecht aufgebracht. Nach einem Verfahrensweg von ca. 18 mm ist das Ziel von 2500 N erreicht. Die 2 mm Verfahrensweg zwischen Start und Ende der Kraftzunahme deutet auf eine Messung der Druckfestigkeit des PETG hin, wobei die beiden Passteile ineinander gedrückt werden.

Der vorliegende Kurvenverlauf des Schraubverschlusses spiegelt den zweiten Versuch wider. Anders als bei Hakenverschluss beginnt die Kraftzunahme beim Schraubverschluss direkt nach dem Aufbringen des Drucks. Der Grund dafür ist, wie bei der Zugbelastung, die Passgenauigkeit der Zähne und Formen (siehe Abbildung 34).

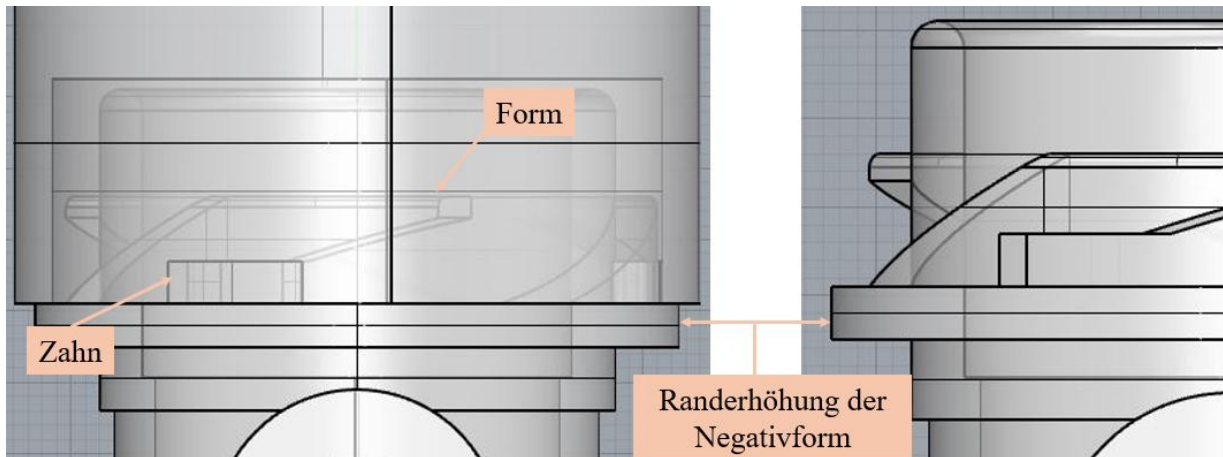


Abbildung 34: links: Schraubverschluss unter Druck, rechts: Ausschnitt der Positivform

Im Verfahrbereich von 0,7 mm bis 2 mm ist eine fast lineare Kraftzunahme erkennbar. Es gibt keinen Spielraum für den Mechanismus. Die Kraft steigt kontinuierlich an. Dabei konzentriert sich die meiste Belastung zwischen den drei Zähnen und der Randerhöhung der Negativform. Bei einer Kraft von knapp 1500 N kommt es zum ersten Versagen. Zwei der drei Zähne brechen am Innenrand raus, was zu einer plötzlichen Kraftabnahme und dem Abbruch der Messung führt. Im weiteren Verlauf ist jedoch ein erneuter Kraftanstieg zu beobachten, sobald der Außenrand und der verbliebene dritte Zahn erneut mit der Randerhöhung in Kontakt treten. Allerdings ist die Kraftverteilung nicht mehr einheitlich, wodurch der übrige Zahn zur strukturellen Schwachstelle wird. Nach Überschreiten von 1500 N kommt es zum zweiten Versagen des Verschlusses. Diesmal ist die Randerhöhung der Negativform abgebrochen. Veranschaulicht wird dies in Abbildung 35.

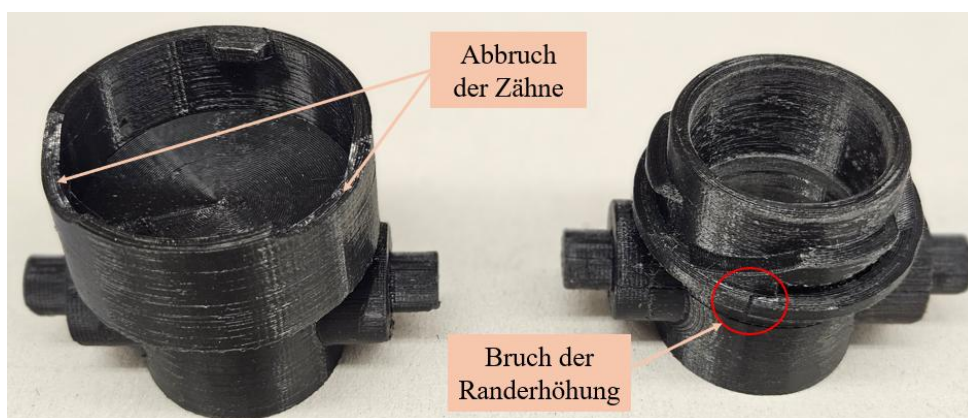


Abbildung 35: Resultat des Schraubverschlusses nach Druckprüfung

6 Fehlerbetrachtung

Im folgenden Kapitel werden möglich Fehler, die beim Erstellen der drei Adapter aufgetreten sind oder aufgetreten sein können, erörtert.

Aufgrund des sukzessiven Aufbaus können beim Drucken der Verschlüsse Fehlstellen oder Unregelmäßigkeiten auftreten, welche im Nachgang Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften haben können. Solche Unregelmäßigkeiten können durch eine Vielzahl von Faktoren verursacht werden, wie z.B. Schwankungen der Drucktemperatur, Ungleichmäßigkeiten des Druckbetts und Unterextrusion. Dabei können Defekte, wie z.B. Lücken oder Delaminationen entstehen, die strukturelle Integrität der gedruckten Verschlüsse erheblich beeinträchtigen und zu vorzeitigem Versagen unter mechanischer Belastung führen [Mic20] [3DP24].

Bei allen drei ersten Prototypen der jeweiligen Verschlüsse ist das erfolglose Verbinden zum Großteil auf die fehlenden Toleranzen zurückzuführen. Dies ist dem geschuldet, dass alle drei Verschlussmechanismen parallel modelliert und gedruckt werden. Erst nach Fertigstellung des jeweils ersten Druckvorgangs ist der Fehler aufgefallen und wird dann parallel bei allen Konzepten behoben.

Der Bajonettverschluss kann außerdem geometrisch optimiert werden, indem noch ein zweiter Stift, gegenüber dem ersten, platziert wird. So kommt es zu einer symmetrischen Kraftaufteilung. Zudem wird die auf den zuvor einzelnen Stift wirkende Kraft in diesem Fall um die Hälfte verringert. Somit kann die Schwachstelle des Mechanismus optimiert werden.

Die wiederholte Verwendung der Proben für alle Versuche, sowohl Zug- als auch Druckversuche, bringt das Risiko von Materialermüdung und strukturellen Veränderungen wie beispielsweise Rissen. Aufgrund dessen sind die gemessenen Werte in ihrer Validität hinterfragbar. Dies kann bei dem Schrauben- und Bajonettverschluss der Fall sein, anders als beim Hakenverschluss, welcher die durchgeführten Versuche ohne erkennbare Schäden überstanden hat.

Unterschiedliche Belastungen können zu makroskopischen Defekten oder Materialermüdungen führen, welche die Testergebnisse beeinflussen. Zur Erlangung verlässlicherer Daten sollten für Zug- und Drucktests getrennte Proben verwendet werden. Dadurch wird sichergestellt, dass jede Probe ausschließlich einer mechanischen Belastung unterliegt und somit die Unveränderlichkeit der Ergebnisse gewährleistet wird, was eine präzise Einschätzung der Belastbarkeit der Verschlüsse ermöglicht. Um deutlichere Resultate zu erzielen, müssen verschiedene Proben für einen Test getestet werden. Im Idealfall wären es zehn Proben je Test, um eine Statistik zu erzeugen. Dies konnte leider aufgrund der fehlenden Zeit nicht gemacht werden.

7 Fazit und Ausblick

Die Menschheit profitiert seit längerer Zeit von der Verwendung von Prothesen. Die Geschichte der Prothetik reicht weit zurück und ist ein beeindruckendes Zeugnis menschlicher Innovationskraft und Anpassungsfähigkeit. Ein bemerkenswertes Beispiel dafür ist der Fund einer Mumie, die eine Prothese als Gliedmaßenersatz am Bein trug. Diese Zehenprothese wurde zwischen 1000 und 600 v. Chr. angefertigt und besteht aus Leder und Holz. Obwohl es wahrscheinlich als Kultgegenstand gesehen wurde, deuten Spuren an der Prothese darauf hin, dass sie tatsächlich dauerhaft getragen wurde [Wel07].

Knapp 3000 Jahre später können traditionell verwendete Materialien größtenteils durch die Technologie der additiven Fertigung ersetzt werden. Prothesenpassteile, wie Schaft, Liner und Fuß, werden individuell an die Bedürfnisse der Nutzer angepasst. Doch bei der Anfertigung von Unterschenkeladaptern wird noch nicht auf diese Technologie zurückgegriffen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden erfolgreich drei verschiedene Adapterkonzepte mittels additiver Fertigung hergestellt. Alle drei Konzepte werden einer mechanischen Prüfung unterzogen, um ihre Belastbarkeit auf Zug und Druck zu evaluieren. Der Haken-, Schraub- und Bajonettverschluss verkörpert größtenteils die zuvor festgelegten Kriterien. Alle sechs Passteile können sowohl als Gesamtes gedruckt als auch benutzerfreundlich miteinander verbunden werden. In Bezug auf die Druckdauern zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede. Im Bereich der statischen Belastbarkeit und Sicherheit liefern die drei Verschlüsse jedoch noch nicht die angestrebten Anforderungen. Genau die Aspekte, die für die Funktion eines Unterschenkeladapters von großer Bedeutung sind.

Der Hakenverschluss erweist sich im Bereich der Druckbelastung als besonders leistungsstark. Der Mechanismus hält nicht nur den 2500 N stand, sondern bleibt dabei auch unbeschädigt. Im Gegenzug zeigt der Verschluss jedoch eine höhere Anfälligkeit für Versagen auf Zugbelastung. Sowohl der Schraub- als auch der Bajonettverschluss können weder unter Zug- noch unter Druckbelastung aufgrund von Versagen die 2500 N nicht erreichen. Die allgemeine Simplizität und Benutzerfreundlichkeit sorgen in diesen Fällen für eine mechanisch nicht ausreichende Verbindung. Jede Verbindung hat ihre Vor- und Nachteile, die in Tabelle 6 aufgelistet sind.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile der Verschlüsse

	Vorteile	Nachteile
Schraubverschluss	Gute Druckfestigkeit Sicherer Halt Einstellbarkeit	Anfällig auf Zugbelastung Abnutzung des Gewindes
Hakenverschluss	Hohe Druckbelastung Schnelle Verbindung Einfachheit	Geringe Zugbelastung Abnutzung der Haken
Bajonettverschluss	schnelle Handhabung sichere Verriegelung hohe Druckbelastung (unter Annahme der Geometrie)	Eingeschränkte Zugfestigkeit Komplexere Herstellung

Eine mögliche Optimierung besteht darin, gezielt die Schwächen einer einzelnen Verbindung zu verbessern, um deren Stärken noch weiter zu betonen. Des Weiteren können zwei Verschlussarten miteinander kombiniert werden, um die Nachteile aufzuheben und die Vorteile zu vereinigen.

Auch wenn die additive Fertigung noch nicht der Festigkeit und Belastbarkeit von traditionellen Fertigungstechnologien gleichkommt, haben sich im Rahmen dieser Arbeit die Stärken des Verfahrens unter Beweis gestellt. Es können individualisierte, komplexe Geometrien und Strukturen hergestellt werden, was insbesondere die schnelle Prototypenentwicklung begünstigt. Darüber hinaus herrschen eine Materialeffizienz und eine Flexibilität in Bezug auf Änderungen und Anpassungen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die additive Fertigung erhebliche Vorteile bei der Produktion von Prothesenadaptern mit sich bringt und die Prothetik wesentlich verändern kann. Die Fortschritte scheinen trotz der vorhandenen Schwierigkeiten vielversprechend zu sein, und es wird erwartet, dass die fortlaufende Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet zu weiteren Verbesserungen und innovativen Lösungen führen. Die Lebensqualität von Prothesenträgern kann weltweit deutlich verbessert werden, indem technologische Fortschritte mit einem tiefen Verständnis der patientenspezifischen Bedürfnisse kombiniert werden.

8 Literaturverzeichnis

- [3DP24] *3DPrima: 3D-Druck Guide: Häufige Probleme, Gründe & Lösungen | 3D Prima - Top 3D-Drucker, 3D-Scanner, Filament, Resin & Zubehör günstig kaufen, 2024*, https://www.3dprima.com/de/3dprima/3d-druck-guide-haeufige-probleme-gruende-loesungen?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-ai0BhDPArisAB6hmP7HayRb1TxS-hkDPPJRyaGV9xYIMDvkMpzeBjo--E-9qdDMcuGyN3caAqdGEALw_wcB#A15, Stand: 07.07.2024.
- [Ast24] *Astrid, Z.: Multi-Material 3D-Druck, was ist das und was müssen Sie darüber wissen? - 3Dnatives, 2024*, <https://www.3dnatives.com/de/multi-material-druck-leitfaden-100120241/#!>, Stand: 08.07.2024.
- [BWL23] *BWL-Lexikon: Morphologischer Kasten, 2023*, <https://www.bwl-lexikon.de/wiki/morphologischer-kasten/>, Stand: 24.01.2023.
- [Bor21] *Born, B. Beinprothese – Arten und Aufbau [online]. In: Born Prothesenhandwerk, 2021*, <https://www.prothesenhandwerk.de/prothesen/beinprothesen/>, Stand: 21.03.2024.
- [Bre12] *Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A. et al.: Generative Fertigung mit Kunststoffen – Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, ISBN 9783642243257.*
- [Bün23] *Bünger, K.: Evaluierung unterschiedlicher Kopplungsgeometrien in additiv gefertigten thermoplastischen Hybridstrukturen- Kathrin Bünger (533690), 2023.*
- [Dip23] *Dipl. Ges. Oec. (FH) Jennifer Ann Steinort. PG 24 – Beinprothesen: Definition, Anwendung und Kostenübernahme. In: Sanubi GmbH, 2023*, <https://sanubi.de/hilfsmittel-fuer-senioren/beinprothesen>, Stand: 21.03.2024.
- [Fel17] *Feldmann, C.; Gorj, A.: 3D-Druck und Lean Production – Schlanke Produktionssysteme mit additiver Fertigung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Springer Gabler, Wiesbaden, 2017, ISBN 9783658184087.*
- [Fil23] *Filamentworld: Was ist PETG? Alles über das 3D-Druckmaterial!, 2023*, <https://filamentworld.de/3d-druck-wissen/was-ist-petg/>, Stand: 19.03.2024.
- [Fra24] *Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV: Additive Fertigung | Additive Manufacturing (AM), 2024*, https://www.igcv.fraunhofer.de/de/forschung/kompetenzen/additive_fertigung_am.html, Stand: 21.03.2024.
- [Hoc24] *Hochwarth, D.: Was ist additive Fertigung? Definition, Anwendung, Potenzial. In: ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure, 2023*, <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/3d-druck/was-ist-additive-fertigung-definition-anwendung-potenzial/#definition>, Stand: 21.03.2024.
- [Ins24a] *Institut für Integrierte Produktion Hannover: Additive bzw. generative Fertigung: Grundlagen und Potenziale, 2024*, <https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/fertigungsverfahren/additive-fertigung/>, Stand: 21.03.2024.

- [Ins24b] *Institut für Integrierte Produktion Hannover: Additive bzw. generative Fertigung: Grundlagen und Potenziale, 2024, <https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/fertigungsverfahren/additive-fertigung/>, Stand: 24.06.2024.*
- [Kön16] *König GmbH Kunststoffprodukte: technisches-datenblatt-petg, 2016.*
- [Mic20] *Michelle, J.: Wie können 3D-Druck Fehler vermieden werden? - 3Dnatives, 2020, <https://www.3dnatives.com/de/wie-koennen-3d-druck-fehler-vermieden-werden-071020201/>, Stand: 07.07.2024.*
- [Öff24] *Öffentliches Gesundheitsportal Österreichs: Prothesen, 2024, <https://www.gesundheit.gv.at/gesundheitsleistungen/prothesen/was-ist-das.html>, Stand: 02.07.2024.*
- [Öss24] *Össur Deutschland: Standardadapter für Prothesen | Össur Deutschland, 2024, <https://www.ossur.com/de-de/prothetik/alle-produkte/standardadapter>, Stand: 21.03.2024.*
- [Ott24a] *Ottobock: Quickchange | Erweitere deine Möglichkeiten, 2024, <https://www.ottobock.com/de-de/product/4R11>, Stand: 21.03.2024.*
- [Ott24b] *Ottobock: Prothesen: Alles was Sie wissen müssen, 2024, <https://www.ottobock.com/de-de/prothesen>, Stand: 02.07.2024.*
- [Pah21] *Pahl, G.; Beitz, W.; Gericke, K.; Bender, B.; Feldhusen, J.; Grote, K.; Konstruktionslehre, Methode und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 9. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland 2021, Stand: 23.11.2024.*
- [Rot96] *Roth, Karlheinz.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band 3: Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung, 2. Auflage, wesentlich erweitert und neu gestaltet, 1996, ISBN 978-3-642-87220-4*
- [Rap23] *Rapid Print - Rewex GmbH | 3D Druck Service / Rapid Prototyping: 3D Druck Materialien - PETG, TPU, PA, ASA, PLA, Carbon, 2023, <https://rewex.de/materialien/>, Stand: 19.03.2024.*
- [San23a] *S., Sandra.: Simplify3D: Der Slicer für Experten? - 3Dnatives, 2023, <https://www.3dnatives.com/de/simplify3d%E2%80%A8-150520201/>, Stand: 19.03.2024.*
- [San23b] *S., Sandra.: Was sind die Besonderheiten der Software Rhinoceros 3D? - 3Dnatives, 2023, <https://www.3dnatives.com/de/was-sind-die-besonderheiten-der-software-rhinoceros-3d-15032020-1/#!>, Stand: 19.03.2024.*
- [San24] *S., Sandra.: Simplify3D Slicing Software für Ihren 3D-Drucker, 2024, <https://3dmaterial-shop.de/products/simplify3d-slicing-software-fur-ihren-3d-drucker>, Stand: 20.03.2024.*
- [SIM24] *SIMONA: technisches Handbuch, 2024.*
- [Thu17] *Thum, M. Simplify3D: 3D-grenzenlos Magazin, 2017, <https://www.3d-grenzenlos.de/glossar/simplify3d/>, Stand: 20.03.2024.*
- [Wel07] *Welt. Archäologie: Die älteste Prothese der Welt kommt aus Ägypten [online]. In: WELT, 2007, <https://www.welt.de/wissenschaft/article1068363/Die-aelteste-Prothese-der-Welt-kommt-aus-Aegypten.html>, Stand: 05.07.2024.*
- [Wir17] *Wirth, M.: Additive Fertigung: Technologie, Markt und Innovation, 2017.*

9 Anhang

Tabelle 7: Druckparameter

Parameterreiter in <i>Simplify3D</i>	Parameter	Wert
Extruder	Extrusionsdüsendurchmesser	0,4 mm
	Extrusionsmultiplikator	0,95
	Extrusionsbreite	0,37 mm
	Rückzugsdistanz	1,20 mm
	Rückzugsgeschwindigkeit	3600 mm/min
Layer	Schichthöhe	0,15 mm
	Obere Deckschichten	4
	Untere Deckschichten	4
	Wandschichten	5
	Geschwindigkeit der ersten Schicht	45 %
Infill	Probensatz	60 %
Temperatur	Extruder	230 °C
	Bauraum	40 °C
	Druckbett	50 °C

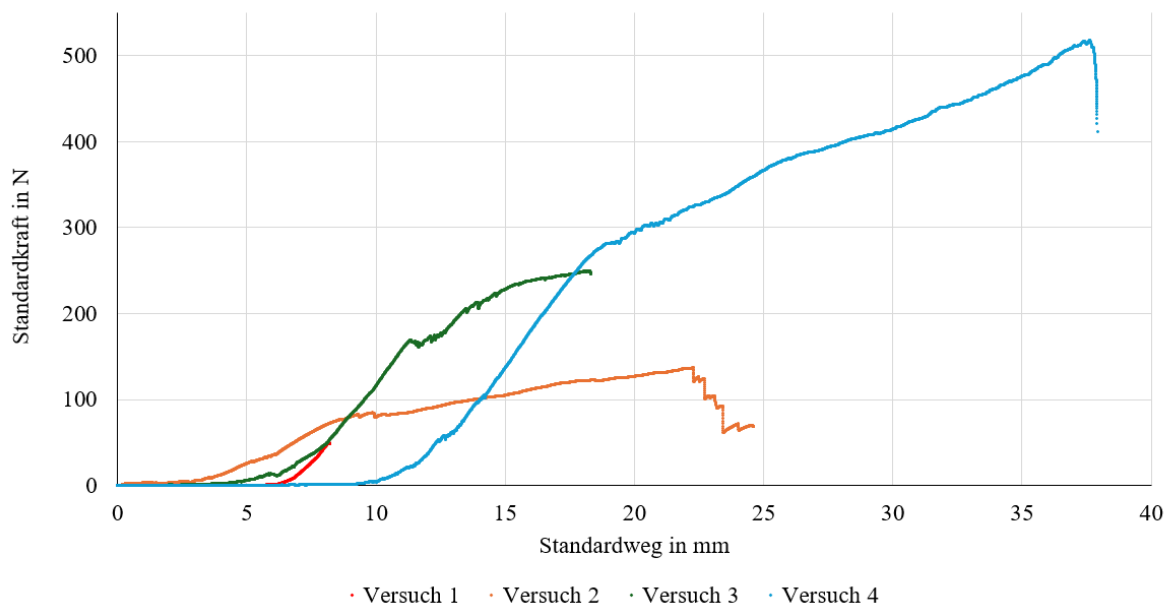


Abbildung 36: Zugversuch des Bajonettverschlusses

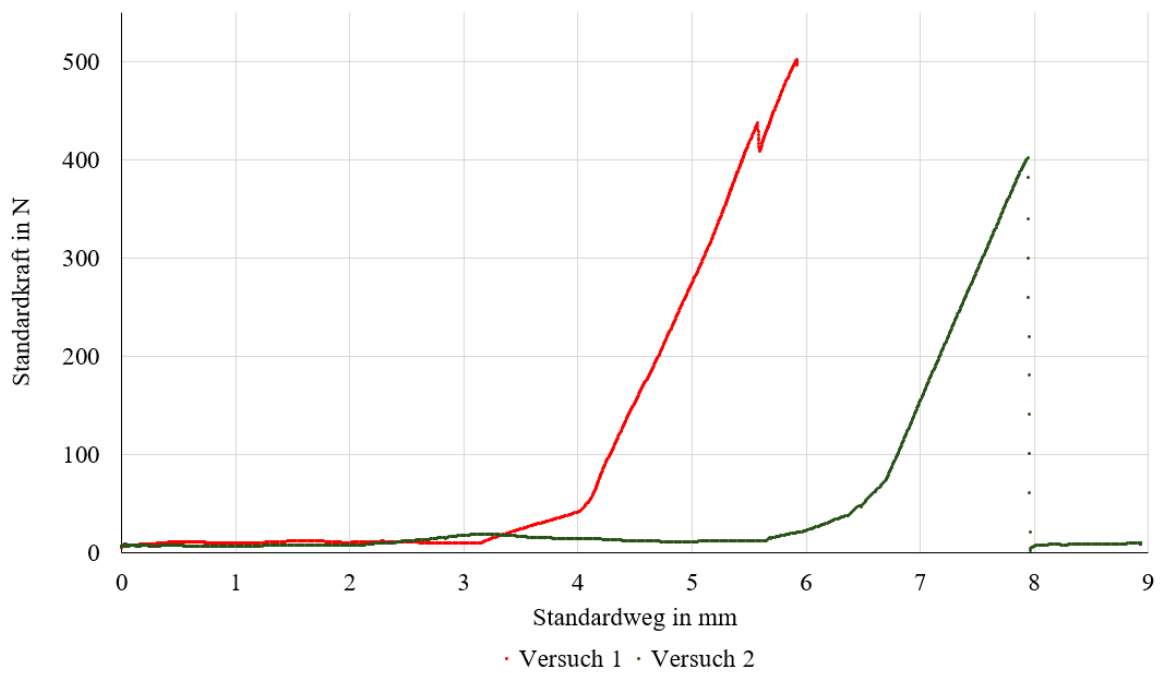


Abbildung 37: Zugversuch des Schraubverschlusses

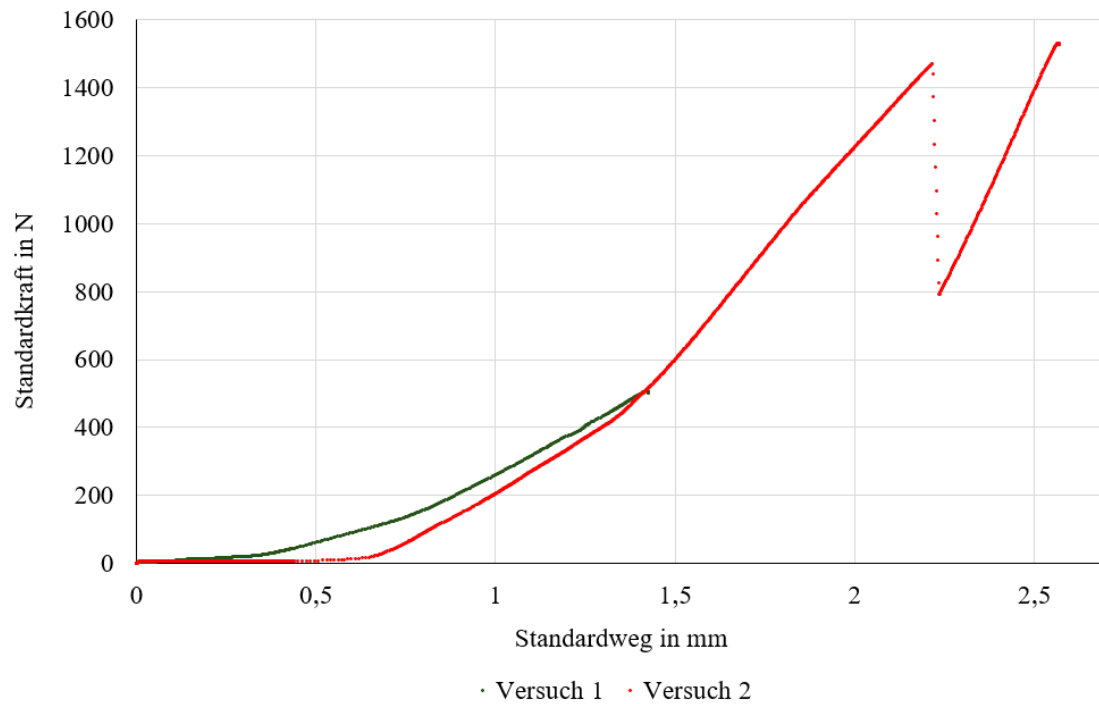


Abbildung 38: Druckversuch des Schraubverschlusses

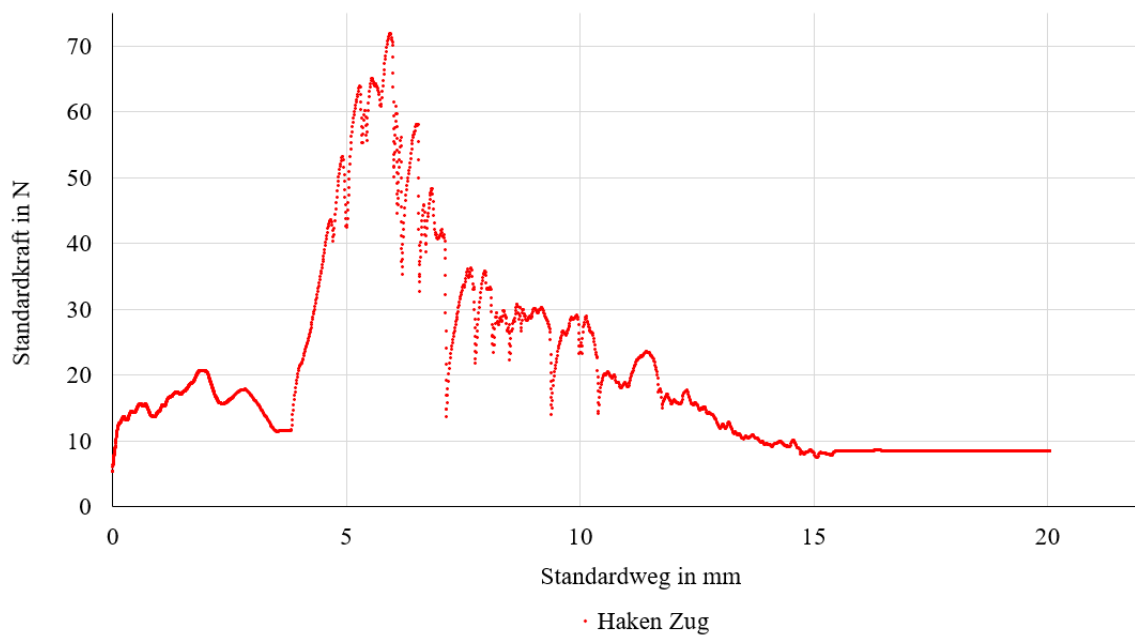


Abbildung 39: Zugversuch des Hakenverschlusses

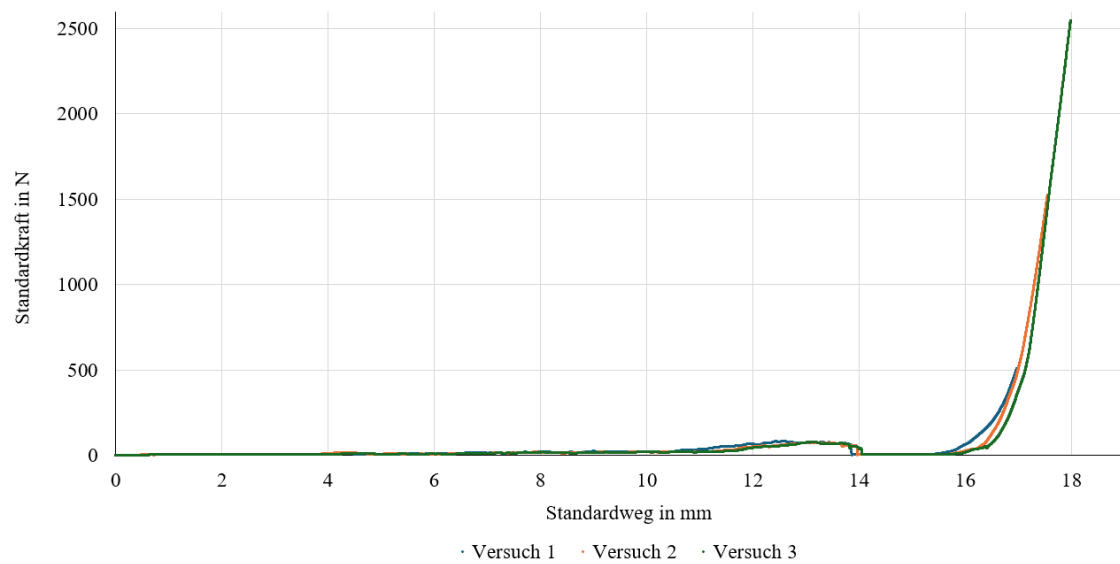


Abbildung 40: Druckversuch des Hakenverschlusses

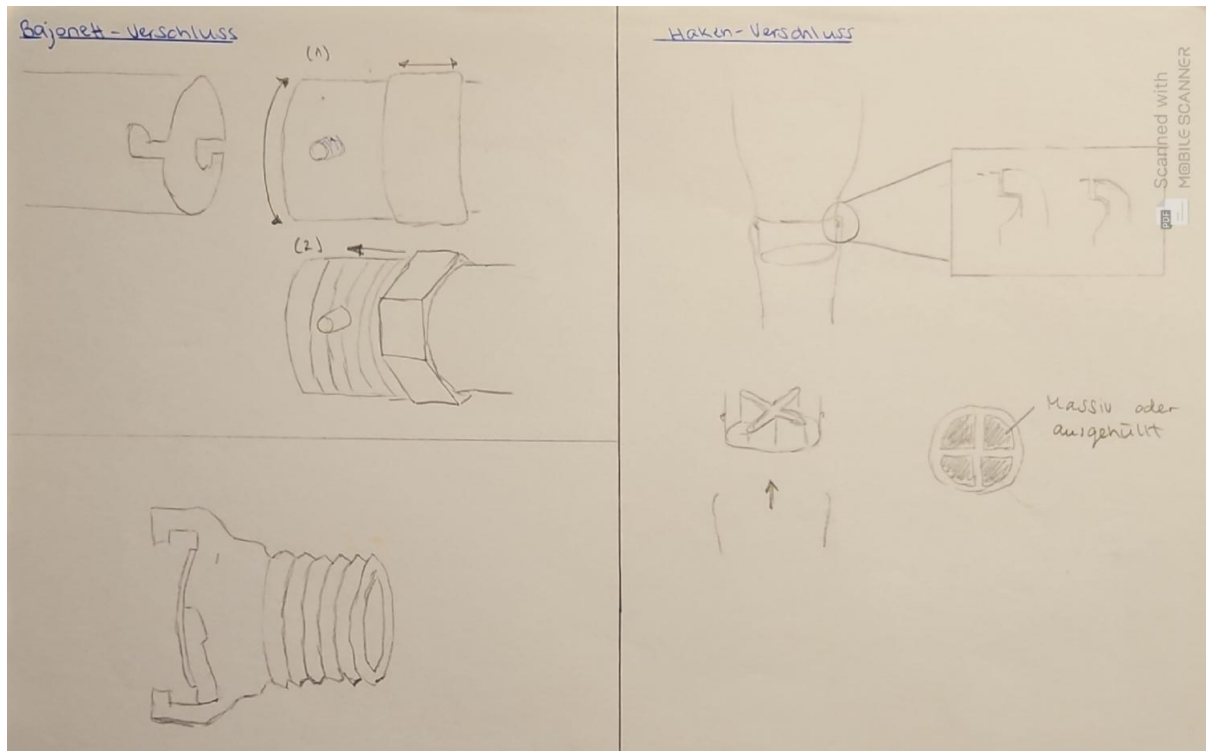


Abbildung 41: Erste Skizze für Haken- & Bajonettverschluss

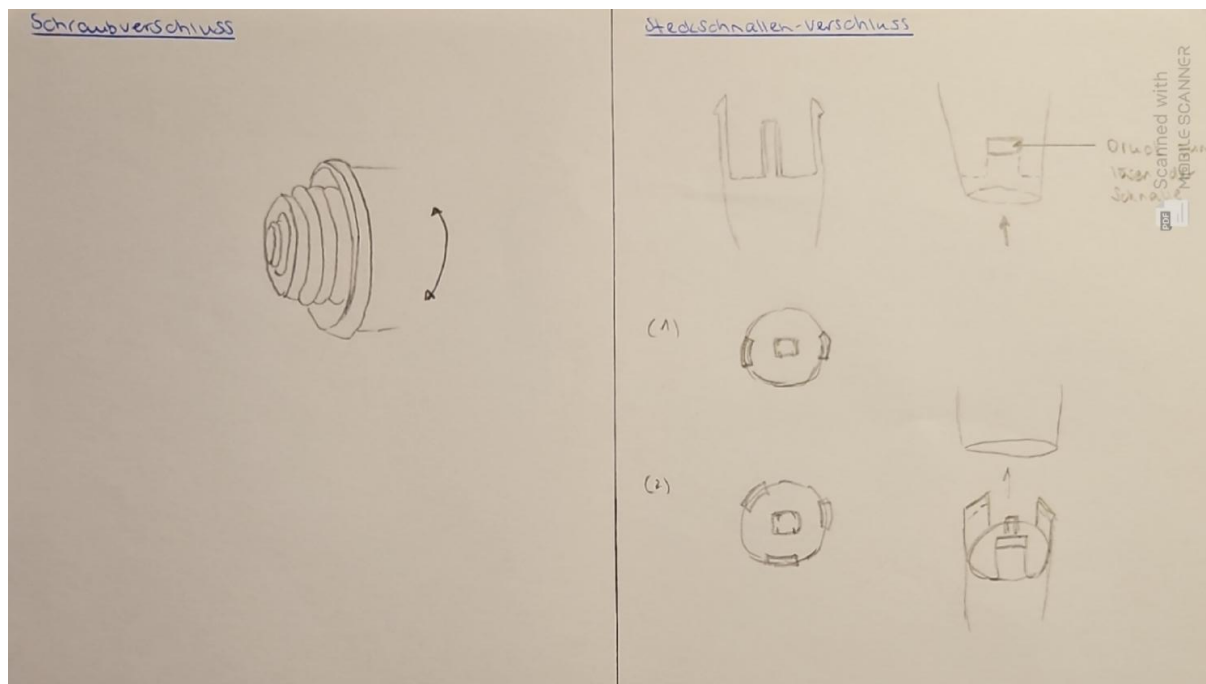


Abbildung 42: Erste Skizze für Schraub- & Steckverschluss

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und dass alle Stellen dieser Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht wurden und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsstelle vorgelegt wurde.

Des Weiteren erkläre ich, dass ich mit der öffentlichen Bereitstellung meiner Abschlussarbeit in der Instituts- und / oder der Universitätsbibliothek einverstanden bin.

Ort, Datum

Unterschrift