



TU Clausthal

Masterarbeit

Evaluierung unterschiedlicher Kopplungsgeometrien in additiv gefertigten thermoplastischen Hybridstrukturen

Kathrin Bünger

Matrikelnummer: 533690

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik (M.Sc.)

Angefertigt am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik
der Technischen Universität Clausthal

Abgabedatum: 15.09.2023

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach

Zweitgutachter: Dr. Leif Steuernagel

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. Wierach sowie Herrn Dr. Steuernagel, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet haben. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Weiterhin gilt mein Dank folgenden Mitarbeitenden des Instituts: Fabian, der mir die Grundlagen der Additiven Fertigung beigebracht und somit den Grundstein dieser Arbeit gelegt hat. Sowie Katrin, die mich immer auf dem Laufenden bezüglich meiner Druckversuche gehalten hat und sich nie zu schade für einen fachlichen Austausch war.

Auch meinen Kommilitonen Cedric und Carrie möchte ich für die Hilfe, Ratschläge und Diskussionsrunden danken. Ihr habt nicht nur einen großen Anteil an dieser Arbeit, sondern an der schönen Zeit während meines gesamten Studiums hier in Clausthal.

Letztlich richte ich auch ein Dankeschön an Nele, Lisa und Maren, welche mich nicht nur in allem unterstützt und motiviert, sondern auch bei der Anfertigung meiner Arbeit stets kritisch zur Seite gestanden haben.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern und meinem Freund Stefan, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten. Danke für die motivierenden Worte, die hilfreichen Umarmungen und die Geduld mit mir.

Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Abkürzungen	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	2
2 Kenntnisstand und theoretische Grundlagen	3
2.1 Grundlagen der Additiven Fertigung	3
2.1.1 Definitionen und Begriffe	3
2.1.2 Anwendungsgebiete	4
2.1.3 Prozesskette	5
2.1.4 Potentiale und Restriktionen	7
2.2 Einteilung der Additiven Fertigung	9
2.2.1 Stereolithografie	10
2.2.2 Fused Layer Manufacturing	12
2.3 Multimaterialdruck	13
2.4 Biomechanik des Fußes	14
2.5 Orthesen	15
3 Material & Methoden	17
3.1 Geometrieerstellung	17
3.2 Fertigung mittels Fused Layer Manufacturing	19
3.2.1 Materialauswahl	20
3.2.2 Druckparameter	21
3.3 Prüfung der Strukturen	23
3.3.1 Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS)	23
3.3.2 Schälprüfung nach VDI 2019	24
3.4 Konstruktion der Orthese	26
3.5 Fertigung der Orthese mittels Fused Layer Manufacturing	29
4 Ergebnisse	31
4.1 Druckparameter und visuelle Probenbetrachtung	31

4.2	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS)	33
4.3	Schälversuch nach VDI 2019	34
4.3.1	Untersuchung verschiedener Gittervariationen	37
4.3.2	Untersuchung des Schichthöheneinflusses	41
4.4	Visuelle Strukturbetrachtung der Orthese	43
5	Diskussion	48
5.1	Druckparameter und visuelle Probenbetrachtung.....	48
5.2	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS)	49
5.3	Schälversuch nach VDI 2019	50
5.3.1	Untersuchung verschiedener Gittervariationen	52
5.3.2	Untersuchung des Schichthöheneinflusses	54
5.4	Visuelle Strukturbetrachtung der Orthese	54
6	Schlussfolgerung und weiteres Vorgehen	56
7	Zusammenfassung	57
	Literaturverzeichnis	VIII
	Anhang I: Datenblatt Cheetah™- Filament von NinjaTek®	XI
	Anhang II: Schälkurven Konfigurationen	XII
	Anhang III: Probenfotos Schälprüfung	XIII
	Anhang IV: Schälkurven Gittervariationen	XIV
	Erklärungen	XVII

Liste der verwendeten Abkürzungen

3DP	3D-Printing
AF	Additive Fertigung
AFO	(Ankle-)Sprunggelenks-Fuß-Orthese
AM	Additive Manufacturing
AMF-Format	Additive Manufacturing File Format
AMT	Additive Manufacturing Technologies
CAD	Computer Aided Design
CS	Cold Spray (Kaltgasspritzen)
DED	Directed Energy Deposition
DLP	Digital Light Processing
EBDM	Electron Beam Direct Manufacturing
EBF	Electron Beam Freeform Fabrication
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFF	Fused Filament Fabrication
FLM	Fused Layer Modeling/Manufacturing
ILSS	Scheinbare interlaminaire Scherfestigkeit
KAFO	Knie-(Ankle-)Sprunggelenk-Fuß-Orthese
LA	Laserauftragsschweißen
LBM	Laser Beam Melting
LCVD	Laser Chemical Vapor Deposition
LLM	Layer Laminat Manufacturing
LS	Laser-Sintern
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJM	Multi Jet Modeling
PETG	Glykolmodifiziertes Polyethylenterephthalat
PJM	Poly Jet Modeling
RP	Rapid Prototyping
SL/SLA	Stereolithografie
SLS	Selektives Lasersintern
SMS	Selective Mask Sintering
STL-Format	Standard Triangle Language Format
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
UDMA	Urethan Dimethacrylat
WHO	(Wrist-)Handgelenks-Hand-Orthese

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Technologie der additiven Fertigungsverfahren/Additive Manufacturing/3D-Druck und ihre Gliederung in die Anwendungen Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing und Rapid Tooling	4
Abb. 2.2	Mittels Metall-Lasersintern hergestellte Strukturen aus Titan für die Luftfahrtindustrie. Links vorne: Halterung aus einem Airbus A380. Hinten: konventionelle Struktur. Rechts: Türscharnier	5
Abb. 2.3	Prozessschritte und Wertschöpfungsprozess der Additiven Fertigung	6
Abb. 2.4	Einfluss der Stückzahl auf die Stückkosten in Abhängigkeit von der Additiven Fertigung oder der werkzeuggestützten Fertigung	8
Abb. 2.5	Klassifikation additiver Fertigungsverfahren nach Aggregatzustand/Form des Ausgangsmaterials und physikalischem Wirkprinzip. Vereinfachte Version mit Schwerpunkt auf die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Verfahren	9
Abb. 2.6	Schemazeichnung der Stereolithografie	11
Abb. 2.7	Schemazeichnung des Fused Layer Manufacturing	12
Abb. 2.8	Adhäsionstheorien	13
Abb. 2.9	Aufbau des Fußes	14
Abb. 2.10	Darstellung der Beinstellung während der Stand- und Schwungphase	15
Abb. 3.1	Konstruierte Muster zur Untersuchung des Kopplungsverhaltens von PETG und TPU (Positivformen)	17
Abb. 3.2	Schnittbild des Kurzbalkens der Gitterkonfiguration	18
Abb. 3.3	Konstruierte Struktur für die Schälprüfung	18
Abb. 3.4	Verschiedene Versionen der Gitterstruktur	19
Abb. 3.5	FLM-Drucker x500 der Firma German RepRap	20
Abb. 3.6	Tool Change Script in Simplify3D	21
Abb. 3.7	Mögliche Versagensarten bei der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeitsprüfung	23
Abb. 3.8	Prüfaufbau der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeitsprüfung	24
Abb. 3.9	Prüfaufbau der Schälprüfung nach VDI 2019	25
Abb. 3.10	Schematische Darstellung der Bruchbilder A bis D	26
Abb. 3.11	Scanprozess und die daraus resultierten 3D-Modelle	27
Abb. 3.12	Konstruierte Orthese. Rot: TPU, Schwarz: PETG	28
Abb. 3.13	Konstruierte Orthese. Ansicht der einzelnen Bauteile	29
Abb. 3.14	Orthese im Fertigungsprozess auf dem x500 FLM-Drucker	30
Abb. 4.1	Versuchsproben zur Ermittlung der Druckparameter	31
Abb. 4.2	Schälversuchsproben im Fertigungsprozess. Darstellung des Stringings	32
Abb. 4.3	Ergebnisse der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeitsprüfung	33
Abb. 4.4	Schälkurven Glatt P1-P5	34
Abb. 4.5	Bruchstellen der untersuchten Konfigurationen	36
Abb. 4.6	Vergleich der Schälwiderstände verschiedener Konfigurationen (Auswertebereich: 15-75 mm)	36
Abb. 4.7	Vergleich der Schälwiderstände verschiedener Gittervariationen (Auswertebereich: 5-16 mm)	38
Abb. 4.8	Bruchbild Gitter: Version 2-0,1 mm Schichthöhe	39
Abb. 4.9	Bruchbild Gitter: Version 3-0,1 mm Schichthöhe	39
Abb. 4.10	Bruchbild Gitter: Version 4-0,1 mm Schichthöhe	40
Abb. 4.11	Vergleich der Schälwiderstände verschiedener Gittervariationen in Abhängigkeit von der verdrukten Schichthöhe (Auswertebereich: 5-16 mm)	41
Abb. 4.12	Bruchbild Gitter: Version 2-0,3 mm Schichthöhe	42

Abb. 4.13	Bruchbild Gitter: Version 4-0,3 mm Schichthöhe	43
Abb. 4.14	Mittels FLM gefertigte Orthese A. Schichthöhe: 0,3 mm. Rot: TPU; Schwarz: PETG.....	43
Abb. 4.15	Detailansichten der mittels FLM gefertigten Orthese A	44
Abb. 4.16	Mittels FLM gefertigte Orthese B. Schichthöhe: 0,3 mm. Rot: TPU; Schwarz: PETG.....	45
Abb. 4.17	Detailansichten der mittels FLM gefertigten Orthese B	45
Abb. 4.18	Orthese Version C im Fertigungsprozess sowie Detailansicht der Unterseite	46
Abb. 4.19	Orthese Version D im Fertigungsprozess und fertige Struktur	47
Abb. 4.20	Orthese D unbearbeitet und nachbearbeitet durch Schleifen mit Sandpapier	47

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	FLM-Drucker x500 von der Firma German RepRap- Technische Daten	19
Tab. 3.2	Materialeigenschaftsdaten des CheetahTM- Filaments von NinjaTek®	20
Tab. 3.3	Materialeigenschaftsdaten von PETG.....	21
Tab. 3.4	Verwendete Druckparameter für den Druck mit TPU und PETG. Eingestellt in Simplify3D.....	22
Tab. 3.5	Final verwendete Druckparameter für den Druck der Orthese mit TPU und PETG. Eingestellt in Simplify3D	30
Tab. 4.1	Berechnete scheinbare interlaminare Scherfestigkeit - Übersichtswerte. Volumenanteil PETG	34
Tab. 4.2	Bruchbilder der geprüften Proben nach VDI 2019	35
Tab. 4.3	Größe der Grenzflächen, Volumenanteil PETG und Fläche der Schwachstellen für die verschiedenen Konfigurationen	37
Tab. 4.4	Größe der Grenzflächen und Volumenanteil PETG für die verschiedenen Gittervariationen	41

1 Einleitung

Das lateinische „*Citius, altius, fortius*“ (deutsch: schneller, höher, stärker) ist vielen als Motto der Olympischen Spiele bekannt. Aber auch außerhalb dieses Sportevents erlangt der Leitsatz immer mehr Popularität. Insbesondere im Industriezweig führen die fortschreitende Globalisierung, der demografische Wandel sowie Konzepte wie beispielsweise Industrie 4.0 zu einem erhöhten Konkurrenzdenken [Fel-17]. Industrielle Produkte müssen heutzutage nicht mehr nur kostengünstig, von hoher Qualität und schnell herstellbar („Time to Market“) sein, sondern auch zukunftsweisend. Hinzu kommt das vermehrte Interesse an kundenspezifischen Gütern und der damit einhergehende Einsatz von komplexeren Fertigungsprozessen [Fel-17]. Der Wandel von der reinen Massenproduktion zur sogenannten „Mass Customization“ [Bre-13] erfordert ein Umdenken in der Industrie [Fel-17, God-22]. Eine Lösung dieser Veränderungen könnte die disruptive Technologie der Additiven Fertigung (AF) darstellen.

Das umgangssprachlich als „3D-Druck“ bezeichnete Verfahren ist seit mehr als drei Jahrzehnten auf dem Markt und erfährt in den letzten Jahren, nicht zuletzt durch populärwissenschaftliche Medien, einen Anstieg der Aufmerksamkeit [Wir-17, Kum-18].

Gerade im medizintechnischen Sektor ist eine Individualisierung aufgrund der Einzigartigkeit des Menschen von hoher Relevanz. In diesem Zusammenhang fällt immer häufiger der Begriff der Additiven Fertigung als Herstellungsverfahren für medizinische Hilfsmittel. Die Additive Fertigung ist ein Oberbegriff für eine Reihe verschiedenster Verfahren, welche als Grundprinzip einen schichtweisen (additiven) und werkzeuglosen Aufbau eines Bauteils gemeinsam haben. Die Technologie wurde in den 1980er Jahren kommerzialisiert und zunächst für den Prototypenbau verwendet, wodurch auch heute noch der Begriff „Rapid Prototyping“ mit der Additiven Fertigung in Verbindung gebracht wird. Wie bereits erwähnt, sind Vorteile dieses Verfahrens vor allem die individuelle Anpassung von Produkten an Kundenwünsche sowie neue Gestaltungsfreiheiten in Bezug auf die Konstruktion [Kum-18].

Eine Erhöhung der Komplexität ist durch die Verarbeitung verschiedener Materialien innerhalb eines Bauteils möglich. Durch den sogenannten Multimaterialdruck lassen sich mehrere Materialien in einem Fertigungsprozess kombinieren. Komplexe Schnittstellen aus steifen und nachgiebigen Materialien sind nicht nur in der Natur weit verbreitet, sie bieten auch überlegene Materialeigenschaften innerhalb der Baugruppe [Fre-22]. Die steife Phase kann die Lastaufnahme gewährleisten, während die Weiche Risse begrenzen kann. Außerdem können anwendungsspezifische Eigenschaften, welche häufig im medizinischen Sektor der Knöchel-Fuß-Orthesenherstellung erwünscht sind, integriert werden. Ein Beispiel dafür ist die Dämpfung mit einer gleichzeitigen Stabilisierung des Fußes.

Knöchel-Fuß-Orthesen (kurz: AFOs, aus dem Englischen: Ankle-foot orthoses) werden zum Generieren eines effizienten und physiologisch korrekten Gangbildes von Patienten mit

eingeschränkter Funktion der unteren Extremitäten genutzt [Bar-20b, Dit-19]. Der Einsatz dieses medizinischen Hilfsmittels reicht dabei zur Behandlung von mittleren bis starken Fußfehlstellungen bis hin zur Immobilisierung des Sprunggelenks bei Sportverletzungen. Die Unterscheidung der AFOs erfolgt in Standardorthesen zur Rehabilitation und individuelle Orthesen, welche dem Krankheitsbild des Patienten entsprechend angefertigt werden. Insbesondere die Herstellung von individuellen Knöchel-Fuß-Orthesen nimmt eine lange Fertigungszeit in Anspruch und benötigt darüber hinaus ein hohes Maß an Erfahrung. Zu diesen Punkten kommt hinzu, dass die Einsatzdauer dieser Orthesenart auf etwa zwei Millionen Belastungszyklen begrenzt ist. Dies entspricht laut Erfahrungsberichten einer Tragedauer von ca. 24 Monaten bei erwachsenen Personen. Bei Kindern kann sich dieser Zeitraum auf sechs Monate reduzieren, da hier das Körperwachstum mit einbezogen werden muss.

1.1 Problemstellung

Trotz der zuvor beschriebenen vermehrten Einsatzgebiete der Additiven Fertigung existieren wenige wissenschaftliche Arbeiten, welche die Eigenschaften von additiv gefertigten Produkten evaluieren. Hersteller geben zwar die grundlegenden mechanischen Eigenschaften der Materialien an, jedoch sind diese nur als Richtwerte zu sehen, da Parameter wie Druckgeschwindigkeit, Schichthöhe, Füllgrad, Temperatur und Bauteilpositionierung die Kennwerte der Bauteile beeinflussen können. Gerade im Bereich des Multimaterialdrucks und der Medizintechnik befindet sich die Forschung in den Anfängen. Hier bedarf es einer vermehrten Untersuchung von Bauteilen, welche unter Umständen als medizinisches Hilfsmittel zum Einsatz kommen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel in dieser Masterthesis, welche am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik angefertigt wird, ist die Konstruktion und Anfertigung einer Knöchel-Fuß-Orthese mittels Additiver Fertigung. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Konzipierung der Fußsohle mittels Dualdruck von thermoplastischem Polyurethan (TPU) mit glykolmodifiziertem Polyethylenterephthalat (PETG). Hierfür wird das Haftungsverhalten der beiden Materialien in Abhängigkeit der Druckparameter beurteilt und durch verschiedene Kopplungsgeometrien optimiert. Zur Beurteilung wird die Prüfung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit (DIN EN ISO 14130) verwendet sowie der Schälwiderstand aus der Schälprüfung nach VDI 2019 bestimmt. Weiterhin werden die Multimaterialproben sowie die gefertigte Orthese visuell begutachtet. Anhand dieser Ergebnisse werden die Druckparameter für den Multimaterialdruck optimiert.

2 Kenntnisstand und theoretische Grundlagen

2.1 Grundlagen der Additiven Fertigung

Bereits 1860 wurde die Basis der heutigen additiven Fertigungstechnologien durch Francoise Willerne gesetzt, welcher ein Abbild von sich selbst durch 24, im Raum verteilte, Kameras reproduzierte. Etwa 100 Jahre später wurde der Laser durch Theodore Maimann erfunden und somit auch die ersten Schritte für die Entwicklung der Stereolithografie gesetzt [Bre-13]. Die als Ursprung der AF geltende Stereolithografie (SL oder SLA) wurde schließlich 1984 von Charles Hull patentiert und 1987 von seiner Firma 3D Systems vorgestellt [Bre-13, Fel-17]. Daraufhin stieg die Zahl der angemeldeten Patente im Bereich der Additiven Fertigung beachtlich an, sodass bereits 1988 weitere Verfahren, wie das Fused Deposition Modeling (FDM), erfunden wurden [Fel-17, Wir-17]. Heutzutage ist der Begriff der Additiven Fertigung nicht mehr aus den Unternehmen wegzudenken. Es existieren eine Vielzahl an Prozessen zur additiven Verarbeitung verschiedenster Materialsysteme [Wir-17].

Wie bereits beschrieben ist die Additive Fertigung ein Prinzip, bei welchem Material Schicht für Schicht aufeinander aufgetragen wird. Die Formgebung jeder Schicht erfolgt dabei in xy-Richtung und damit in 2D. Die dritte Dimension entsteht durch das Aufeinanderfügen der einzelnen Schichten und nicht durch eine permanente z-Koordinate. Der in der Umgangssprache verwendete Begriff des „3D-Drucks“ ist demnach fachlich nicht korrekt und müsste „2 ½ D-Druck“ heißen [Geb-16].

Die Generierung eines Modells erfolgt bei der AF in zwei Teilschritten und kann aus der flüssigen (Polymerisation), der festen (Extrusion, Aufschmelzen) oder der gasförmigen Phase (chemisches Abscheiden) erfolgen. Zuerst wird eine Schicht in xy-Ebene erzeugt und anschließend in z-Richtung mit der vorhergehenden Schicht (bzw. nachfolgenden) verbunden. Je kleiner die Stufung in der z-Richtung ist, desto detailreicher und präziser werden die Bauteile. Typische Schichtstärken liegen, abhängig vom Verfahren, bei 0,05 - 0,1 mm und im Minimum bei 0,016 mm [Geb-16].

2.1.1 Definitionen und Begriffe

Der Begriff der Additiven Fertigung ist bei weitem nicht die einzige Bezeichnung für diese Art von Verfahren. Problematisch hierbei ist jedoch, dass die wenigsten davon bereits definiert sind. Im englischen Sprachgebrauch sind die Ausdrücke Additive Manufacturing (AM) bzw. Additive Manufacturing Technologies (AMT) durch den ASTM-Standard F2792 genormt. In Deutschland ist die Begriffswahl nicht eindeutig. In der früheren VDI-Richtlinie 3404 wurden die Verfahren zunächst als Generative Fertigung benannt, anschließend wurde dieser Ausdruck jedoch in VDI 3405 durch Additive Fertigung ersetzt [Kum-18]. Im Rahmen dieses Themenfeldes sind jedoch auch häufig die Bezeichnungen Rapid-Technologien, Additive Layer Manufacturing, Automated Fabrication, Schichtbauverfahren, Direct Manufacturing,

Rapid Tooling sowie Layer Based Manufacturing zu finden. Hinzu kommt, dass die Additive Fertigung in der Öffentlichkeit als „Rapid Prototyping“ (RP) oder „3D-Druck“ bekannt ist. Letztgenannter Begriff löst in der Praxis ungeachtet eines gleichbetitelten Verfahrenspatentes des MIT oder aller wissenschaftlichen Definitionen die meisten anderen Ausdrücke aufgrund der Anschaulichkeit ab [Kum-18, VDI-16a].

Die Additive Fertigung fand zunächst im Prototypenbau Anwendung und ist demnach auch als Rapid Prototyping geläufig. Durch das neue Verfahren konnten die damals üblichen langen Zeiten zur Herstellung von Prototypenbauteilen enorm verkürzt und die Modelle direkt aus CAD-Dateien generiert werden. Das Wort „rapid“ (deutsch: schnell) ist allerdings nur im Zusammenhang mit dem klassischen Prototypenbau zu sehen [Bre-13, Kum-18]. Aus dem Rapid Prototyping wurde der Anwendungsfall des Direct bzw. Rapid Manufacturing weiterentwickelt, bei dem nicht nur Prototypen, sondern komplette Endprodukte gefertigt wurden. Als dritter, in manchen Quellen als Sonderform bezeichneter, Nutzungsfall ist das Rapid Tooling beschrieben. Hierbei wird die Additive Fertigung zur Generierung von Werkzeugen, Werkzeugeinsätzen und Formen genutzt [Kum-18]. In Abb. 2.1 ist die Unterteilung der Anwendungen der additiven Fertigungstechnologien zu sehen.

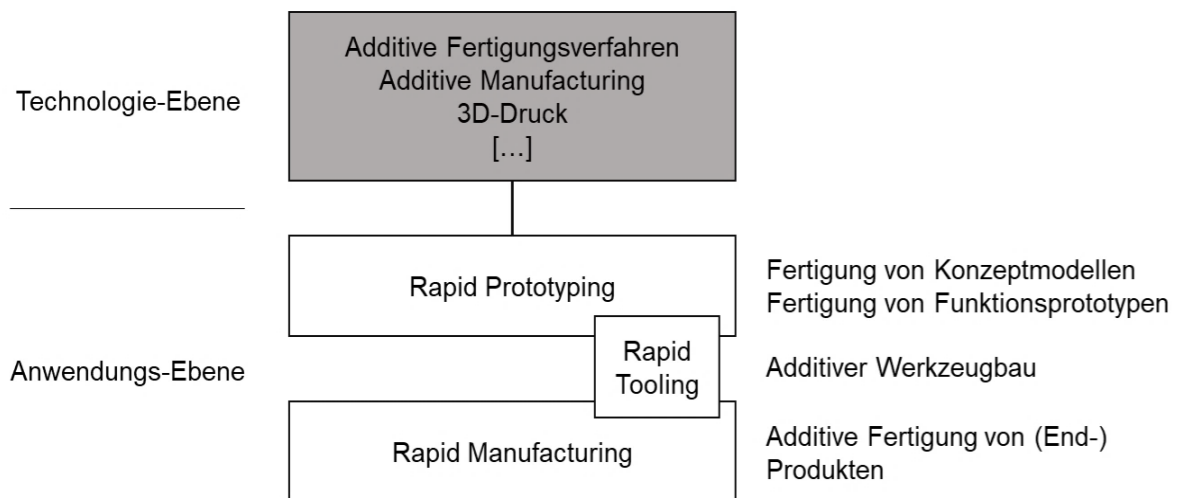


Abb. 2.1 *Technologie der additiven Fertigungsverfahren/Additive Manufacturing/3D-Druck und ihre Gliederung in die Anwendungen Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing und Rapid Tooling. Aus: [Geb-16].*

2.1.2 Anwendungsgebiete

Es existieren drei grundlegende Anwendungs-Ebenen für die AF: die Fertigung von Prototypen im Rahmen des Rapid Prototyping, die Herstellung von Werkzeugen beim Rapid Tooling und die Endprodukterstellung in der Ebene des Rapid Manufacturing [Geb-16]. Die Anwendung der Additiven Fertigung unterscheidet sich je nach Branche. Gerade in der Luft- und Raumfahrtindustrie sowie der Medizintechnik wird das Verfahren vielseitig verwendet. Bei

erstgenannter Branche liegt der Fokus auf der Gewichtseinsparung, welche wiederum zur Senkung des Treibstoffverbrauchs und zu Einsparungen von Betriebskosten führt. Aus diesem Grund gibt es mittlerweile Flugzeugbestandteile wie beispielsweise Elektrogehäuse, Halterungen, individuelle Einrichtungskomponenten oder auch Türscharniere aus additiv gefertigten Bauteilen [VDI-16a]. In Abb. 2.2 sind mittels Metall-Lasersintern hergestellte Strukturen dargestellt.



Abb. 2.2 Mittels Metall-Lasersintern hergestellte Strukturen aus Titan für die Luftfahrtindustrie. Links vorne: Halterung aus einem Airbus A380. Hinten: konventionelle Struktur. Rechts: Türscharnier. Aus: [Hag-14].

Die individuellen Gestaltungsmöglichkeiten sind gerade im medizintechnischen Einsatz von großem Vorteil. Prothesen, welche auf patientenspezifischen 3D-Computertomografie-Daten basieren oder maßgeschneiderte medizinische Hilfsmittel sind schon längst Standard. Aber auch zur Ausbildung oder Operationsvorbereitung wird die Additive Fertigung herangezogen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet findet sich im Werkzeug- und Formenbau. Die Eigenschaft der schnellen Einzelprodukt- bzw. Kleinserienfertigung ist in diesem Bereich von hohem Nutzen. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind beispielsweise der Bau von Kraftfahrzeugen, Schiffen sowie Gebäuden oder auch die Gießerei- und Montagetechnik.

Die Additive Fertigung ist somit in einem Großteil von Branchen vertreten, welche von Tag zu Tag mehr werden. Das Verfahren lässt sich somit vielseitig verwenden und es ergeben sich stetig neue Einsatzgebiete [Hag-14, VDI-16a].

2.1.3 Prozesskette

Die Additive Fertigung umfasst eine Vielzahl an Verfahren. Trotz teilweise großer Unterschiede bezüglich Technologie oder Materialien existiert eine grundlegende universale Prozesskette (siehe Abb. 2.3).

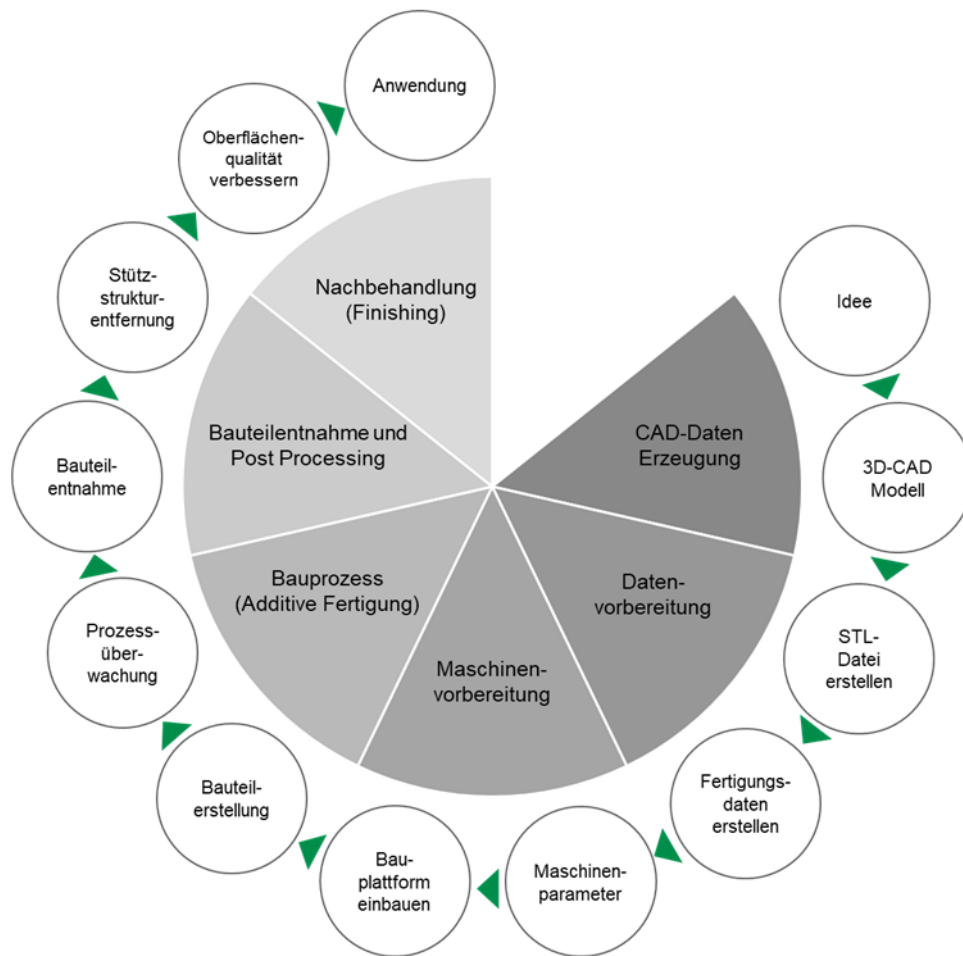


Abb. 2.3 Prozessschritte und Wertschöpfungsprozess der Additiven Fertigung. Modifiziert nach: [Bre-13, Kum-18, VDI-16a].

Zu Beginn des Vorgangs steht meistens eine Kundenidee, welche umgesetzt oder ein Problem, welches gelöst werden soll. Dabei wird häufig auch auf Konstruktionen aus dritten Quellen wie beispielsweise dem Internet zurückgegriffen [VDI-16a]. Ist dies nicht der Fall, dann werden 3D-CAD (Computer Aided Design)-Daten mittels etablierter CAD-Software, über 3D-Scan oder durch bionische Optimierungsverfahren generiert. Nachfolgend werden die erstellten Daten für die Additive Fertigung vorbereitet. Hierzu gehört die Datenkonvertierung und -reparatur sowie die Erstellung von Fertigungsdaten. Bei erstgenanntem Punkt werden die Datensätze in ein geeignetes Dateiformat umgewandelt. Als Standard gelten das STL (Standard Triangle Language) und das an Popularität gewinnende AMF-Format (Additive Manufacturing File). Die Modellflächen sind im STL-Format durch Dreiecksfacetten dargestellt. Gekrümmte Geometrien sind daher nur angenähert beschrieben. Entstehen bei der Konvertierung Fehler, wie beispielsweise offene Flächen, ist eine Reparatur durch geeignete Software notwendig [Kum-18]. Der zweite Punkt, das Erstellen von Fertigungsdaten, umfasst die Positionierung im Bauraum (Nesting), das Einfügen von Supportstrukturen, eine eventuelle Anpassung der Bauteilgröße sowie das sogenannte Slicen, bei dem die Bauteile in Schichten geschnitten und für jede dieser Schichten Informationen zur Erzeugung ebendieser definiert

werden. Nachdem die Daten vorbereitet sind, gilt es gleiches mit der Maschine zu tun. Meist werden Standardparametersätze für das Einstellen der Maschinenkenngrößen verwendet. Je nach Verfahren und Anlage ist ein eventueller Einbau der Bauplattform sowie dessen Ausrichtung notwendig. Anschließend beginnt die eigentliche Additive Fertigung. Das Bauteil wird vollautomatisch generiert und es bedarf höchstens einer Prozessüberwachung. Nach dem Druckprozess wird das Bauteil aus dem Bauraum entnommen, gereinigt und gegebenenfalls nachbearbeitet (Post Processing). Zu diesem Schritt gehören das Entfernen von eventuellen Stützstrukturen und überschüssigen Materialresten, beispielsweise Pulvern oder flüssigen Harzresten. Das Post Processing kann sowohl kosten- als auch zeitintensiv sein. Abschließend erfolgt die Nachbehandlung bzw. das *Finishing* zur weiteren Verbesserung des Bauteils. Zur Erhöhung der Oberflächenqualität werden die Produkte meist geglättet oder beschichtet. Bei Metallen erfolgt häufig eine Wärmebehandlung und auch das Nachfräsen von Funktionsflächen ist üblich [God-22, Kum-18, VDI-16a].

2.1.4 Potentiale und Restriktionen

Additive Fertigungsverfahren werden mittlerweile als Alternative zu traditionellen Technologien gesehen. Gerade im Bereich des Prototypenbaus ist die AF nicht mehr wegzudenken. Wie jede Art von technischer Methodik weist auch die Additive Fertigung Potentiale und Restriktionen auf.

Zu den am häufigsten genannten Vorteilen des Verfahrens zählt die konstruktive Freiheit der Bauteile. Auch komplexe Strukturen sind durch das Schichtbauverfahren möglich und eine Funktionsintegration ist ohne größere Probleme umsetzbar. Wie bereits denkbar, ist auch der Bedarf an Rohmaterial im Vergleich zu subtraktiven oder formativen Verfahren geringer, da vor allem der Abfallanteil sinkt. Hinzu kommt, dass überschüssiges Material mehrheitlich weiterverwendet werden kann [Fel-17, Kum-18]. Additive Fertigung führt zu einer geringeren Lagerhaltung und Optimierung des Ersatzteilemanagements [VDI-16a]. Durch das Verfahren ist nicht nur eine sogenannte On-Demand-Produktion (Produktion auf Abruf) durchführbar, sondern auch eine On-Location-Produktion (lokale Produktion). Die Vorstellung von großen Maschinenparks ist durch die Additive Fertigung in den Hintergrund gerückt. Im Zusammenhang mit diesem Punkt ist auch das Potential der Prozessintegration zu nennen. Produktionsprozessketten können verkürzt und mehrere Verfahrensschritte auf einer AF-Anlage zusammengefasst werden. Dies führt nicht zuletzt dazu, dass Kosten für das Unternehmen gesenkt werden können. Eine Kostenreduktion ist auch durch geringere Transport- und Montagegelder sowie die nicht erforderlichen Werkzeugausgaben gegeben [Fel-17, Kum-18]. Bei der Thematik der Kostensenkung muss allerdings die geplante Stückzahl der Produkte berücksichtigt werden. Wie in Abb. 2.4 zu sehen, ist der wirtschaftliche Einsatz der Additiven Fertigung nur bei einer niedrigen Stückzahl sinnvoll. Demnach wird empfohlen, dieses Verfahren nur bei Einzelstücken, Klein- oder Pilotserien zu verwenden [Bre-13, Kum-18, VDI-16a].

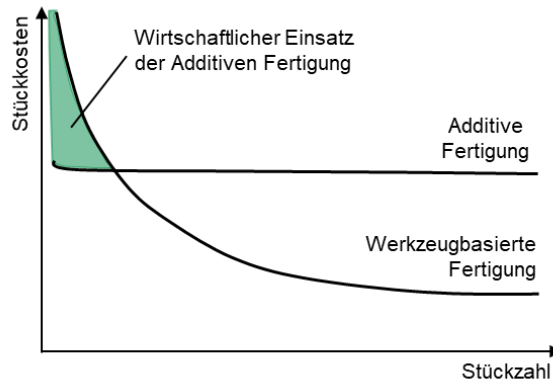


Abb. 2.4 Einfluss der Stückzahl auf die Stückkosten in Abhängigkeit von der Additiven Fertigung oder der werkzeugbasierten Fertigung. In Anlehnung an: [Kum-18].

Laut Godec et al. (2022) führt die Additive Fertigung dazu, dass zugrundeliegende Fehler im Produkt schnellstmöglich gefunden werden können. Montage- und Verbindungsstellen, Festigkeit sowie Haltbarkeit können bereits vor der Produktion geprüft werden. Außerdem wird die Produktentwicklungszeit (Time-to-Product) verkürzt, da die Planung dieser erleichtert werden kann [God-22]. In einer Vielzahl von Werken aus der Fachliteratur wird im Rahmen der Additiven Fertigung von einem verbesserten Produktnutzen berichtet. Stichworte, welche in diesem Kontext fallen, sind vor allem Leichtbau, Individualisierung, Effizienz sowie Designfreiheit [Fel-17, VDI-16a]. Zum Schluss dieser Potentialaufzählung der AF ist noch die vereinfachte Dokumentation zu nennen, da alle Konstruktionen als CAD-Datensätze vorliegen und unbegrenzt wiederverwendet werden können [Bre-13].

Neben den Vorteilen gehören meist auch Nachteile zu einem Verfahren. In der Literatur wird vor allem die fehlende Standardisierung der Additiven Fertigung bemängelt. Die Qualitätssicherung, Werkstoff- und Prozesszertifizierungen sowie fehlendes Konstruktionswissen stellen nach wie vor ein Hindernis dar. Hinzu kommen urheberrechtliche Konflikte, da gerade AF-optimierte CAD-Daten keiner ausreichenden Normierung unterliegen. Auf die Wirtschaftlichkeit von AF-Produkten wurde bereits im vorherigen Absatz eingegangen. Hier soll ergänzend erwähnt werden, dass nicht nur Stückzahlen die Profitabilität beeinflussen, sondern auch Punkte wie Ausgangsmaterialpreise, Herstellungszeiten sowie Anlagen- und Personalkosten [God-22]. Kumke (2018) beschreibt als Restriktion des Schichtbauverfahrens die ungenügende Automatisierbarkeit. Eine Einbringung in bestehende Fertigungsabläufe ist somit nur in geringem Maße möglich. Abseits der ökonomischen Faktoren sind zudem die werkstoff- und fertigungstechnologischen Aspekte zu betrachten. Aufgrund des Schichtaufbaus entsteht ein sogenannter Treppenstufeneffekt, welcher nicht nur die Oberflächenqualität, sondern auch die Baugenaugigkeiten und mechanischen Eigenschaften des Bauteils verringern kann. Analysen, wie beispielsweise die Finite-Elemente-Methode (FEM), können an AF-gefertigten Produkten nur erschwert durchgeführt werden, da die Materialien entsprechend der Achsrichtungen zu anisotropen Eigenschaften, Schwindungen und Eigenspannungen neigen.

Ein weiterer Nachteil der Additiven Fertigung stellt die eingeschränkte Bauteilgröße durch die Bauraumbegrenzung dar. Auch die Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit ist bislang unzureichend gegeben [God-22, Kum-18].

2.2 Einteilung der Additiven Fertigung

Additive Fertigungsverfahren lassen sich, je nach Quelle, in verschiedene Hauptgruppen klassifizieren. Meistgenannt sind die Unterteilungen nach Art des Materials (Aggregatzustand), physikalisches oder technologisches Prinzip, Anwendungsgebiet, Energiequelle und Form des Endprodukts. Wie zuvor bei der Begriffsdefinition gibt es auch hier keine eindeutige Einordnung, jedoch hat sich in der Literatur mittlerweile die Einteilung nach Aggregatzustand und Wirkprinzip durchgesetzt [God-22, Kum-18]. Eine vereinfachte Klassifizierung, welche dem Rahmen dieser Arbeit entspricht, ist in Abb. 2.5 beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass die Wirkprinzipien der Deformation und des Fügens aufgrund der Übersichtlichkeit sowie der bestehenden Irrelevanz für diese Forschungsarbeit im Schaubild exkludiert wurden.

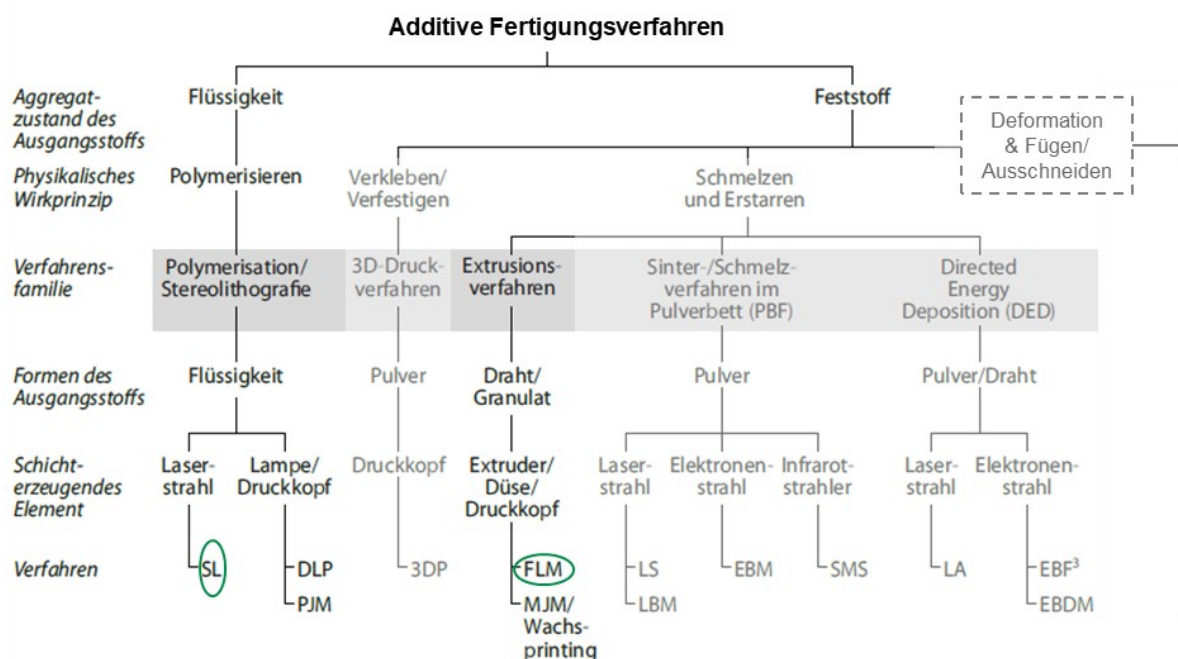


Abb. 2.5 Klassifikation additiver Fertigungsverfahren nach Aggregatzustand/Form des Ausgangsmaterials und physikalischem Wirkprinzip. Vereinfachte Version mit Schwerpunkt auf die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Verfahren. In Anlehnung an: [Kum-18].

Die additiven Fertigungsverfahren lassen sich anhand ihres physikalischen Wirkprinzips in fünf Gruppen unterteilen: das Polymerisieren, Verkleben/Verfestigen, Schmelzen und Erstarren, Fügen sowie die Deformation. Aus diesen Prinzipien wurden verschiedene Verfahrensfamilien abgeleitet. Die Prozessklasse der Stereolithografie wirkt aufgrund der Polymerisation. Bauteile,

welche mittels Stereolithografie (SL/SLA), Digital Light Processing (DLP) oder Poly-Jet-Modeling (PJM) gefertigt werden, sind polymerisiert. Das vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) patentierte 3D-Printing (3DP) ist der Familie der 3D-Druck-Verfahren zugeordnet. Hier werden die Komponenten aus pulverförmigen Ausgangsstoffen mittels Druckkopf hergestellt. Bei Extrusionsverfahren werden Granulat oder drahtförmige Materialien aufgeschmolzen, welche anschließend in entsprechender Geometrie erstarren. In diese Prozessklasse werden das Multi Jet Modeling (MJM) und das Fused Layer Modeling/Manufacturing (FLM) bzw. die Fused Filament Fabrication (FFF) eingeordnet [Fas-12, God-22, Kum-18]. Letztgenanntes ist vielen besser bekannt als Fused Deposition Modeling (FDM), allerdings ist dieses eine eingetragene Marke der Firma Stratasys, wodurch FFF und FLM als markenrechtsfreie Alternativen eingeführt wurden [God-22]. Die Sinter-/Schmelzverfahren im Pulverbett verfügen je nach Verfahren über Laser- oder Elektronenstrahlen sowie Infrarotstrahler als schichterzeugende Elemente. Mittels Laserstrahl werden Bauteile aus Pulver im Lasersintern (LS) und Laser Beam Melting (LBM) hergestellt. Beim Electron Beam Melting (EBM) erfolgt die Generierung über Elektronenstrahlen. Das Maskensintern (Selective Mask Sintering; SMS) nutzt Infrarotstrahler. Auch bei den Direct Energy Deposition (DED)-Verfahren wird zwischen Laser- und Elektronenstrahl unterschieden. Laserauftragsschweißen (LA) erfolgt mittels Laserstrahl, Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM) und Electron Beam Freeform Fabrication (EBF) mittels Elektronenstrahl. Die in Abb. 2.5 ausgegliederten Prinzipiengruppen beinhalten das Kaltgasspritzen (Deformationsprinzip), das Schicht-Laminat-Verfahren (Fügen über Laserstrahl) und den Paper-3D-Print (Paper-3DP mittels Ausschneiden durch Messer) [Fas-12, Kum-18]. Je nach Quelle werden auch Verfahren beschrieben, welche Bauteile aus der Gasphase generieren. Zu diesen Prozessen werden das Aerosoldruckverfahren und die Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD) gezählt [Geb-16].

Nachfolgend werden die Verfahren der Stereolithografie und des Fused Layer Manufacturing genauer beschrieben.

2.2.1 Stereolithografie

Die als erstes additives Fertigungsverfahren bekannte Stereolithografie nutzt das Prinzip der Photopolymerisation zum Aufbau der Strukturen. Flüssige Oligomere werden in dünnen Schichten durch einen Laser polymerisiert und dadurch ausgehärtet. Die Oligomere können dabei sowohl zähflüssig als auch niedrig vernetzt vorliegen und sind mit Photo-Inhibitoren durchsetzt [Geb-16]. Durch den Einfluss von UV-Strahlung beginnt eine dünne Schicht des Ausgangsstoffs sich zu verfestigen. Nachdem diese Schicht polymerisiert wurde, wird die Bauplattform, je nach Bauart der Anlage, abgesenkt oder angehoben und die nächste Schicht wird mit ultravioletter Strahlung beaufschlagt. In Abb. 2.6 ist eine Schemazeichnung der Stereolithografie nach dem Laser-Scanner-Verfahren dargestellt. Diese Methode der Stereolithografie gilt als älteste, exakteste und am häufigsten genutzte von insgesamt drei

Verfahrensweisen und arbeitet wie zuvor beschrieben mittels Laser. Des Weiteren gibt es das Maskenverfahren, welches weiter unterteilt wird in Lampen-Masken-Verfahren sowie Projektionsverfahren und Druckkopf-Lampe-Verfahren. Bei Letztgenanntem wird das Baumaterial durch einen Druckkopf an die entsprechenden Stellen der Kontur aufgebracht und anschließend durch UV-Strahlung polymerisiert. Das Erstellen des Bauteils beim Lampen-Masken-Verfahren erfolgt durch das Abbilden des gesamten Querschnitts auf einer transparenten Maske mit nachfolgender Projektion durch UV-Lampen auf das Harzbad. Das zweite Maskenverfahren, die Projektionsmethode, nutzt einen Beamer zum Projizieren der Schichtinformationen und zum Aushärten mittels UV [Geb-16]. Nachdem das Bauteil Schicht für Schicht gefertigt wurde, wird das Produkt aus dem Bauraum entfernt und von überschüssigem Polymer mit Lösemittel gereinigt. Bauteile, welche mittels Stereolithografie hergestellt werden, müssen unter UV-Licht nachgehärtet werden. Dieser Schritt gilt neben den hohen Materialkosten, der Notwendigkeit von Stützstrukturen und dem eventuellen Ausdampfen schädlicher Gase als einer der großen Nachteile des Verfahrens.

Wie bei fast allen additiven Fertigungsverfahren kommt es auch bei der Stereolithografie zu Verzug und Schwindung am Bauteil. Trotzdem ist die Methode mit Schichtdicken von 0,05-0,15 mm und guten Oberflächenqualitäten eine der Genauesten [God-22]. Jedoch sollte das Einsatzgebiet der Produkte, die durch SLA hergestellt wurden, vorher überlegt werden, da die Bauteile mit zunehmender Zeit aufgrund der UV-Lichtempfindlichkeit zu geringer werdenden thermischen und mechanischen Belastbarkeiten neigen.

Auch hinsichtlich der Nachhaltigkeit steht die Stereolithografie anderen Verfahren nach. Die verwendeten Photopolymere sind im Gegensatz zu den z.B. beim Fused Layer Manufacturing genutzten Thermoplasten nicht recyclebar [Ilg-19].

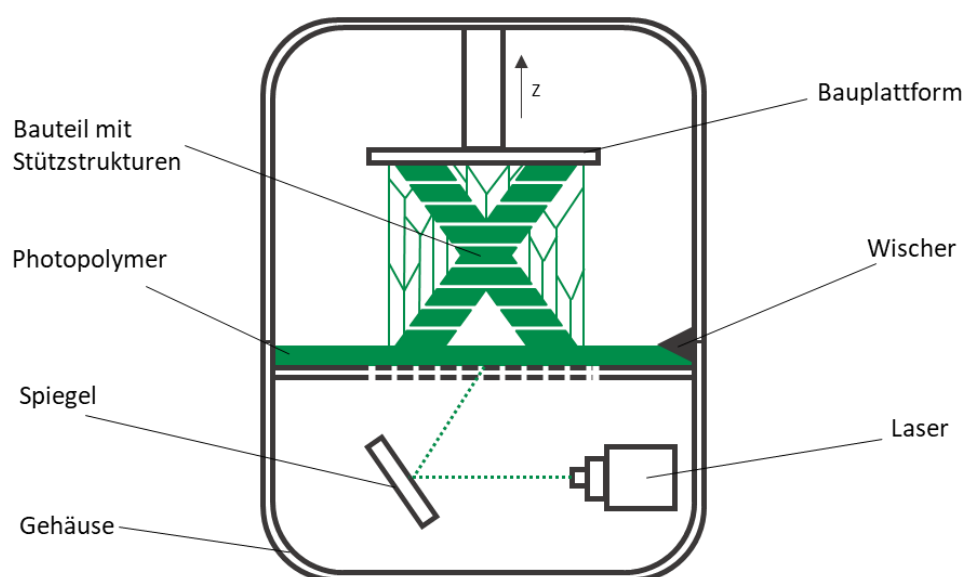


Abb. 2.6 Schemazeichnung der Stereolithografie. In Anlehnung an: [Bre-13, Hag-14].

2.2.2 Fused Layer Manufacturing

Beim Fused Layer Manufacturing (FLM) wird, wie der Name des Verfahrens bereits beschreibt, Material durch eine beheizte Düse aufgeschmolzen und geometrisch definiert in Schichten abgelegt. FLM ist eines der verbreitetsten Verfahren im Bereich der Additiven Fertigung und findet auch aufgrund des geringen Anschaffungspreises im Privatgebrauch vermehrt Anwendung [VDI-16a]. Das Verfahren wird in den meisten Fällen im Zusammenhang mit thermoplastischen Kunststoffen und thermoplastischen Verbundwerkstoffen genutzt, aber auch niedrig schmelzende Metalle, Keramiken, Silikone sowie Beton sind verarbeitbar [God-22].

Das Grundprinzip des Fused Layer Manufacturing umfasst das Bereitstellen des Materials, das Aufschmelzen dieses, das Herausdrücken durch die Düse durch Kraft bzw. Druck und das Auftragen des verflüssigten Materials entlang eines vordefinierten Pfades für jede Schicht. Dabei existieren vier verschiedene Methoden: die pneumatische und kolbenbasierte, die schneckenbasierte, die filamentbasierte und die Freeformer Vorgehensweise, bei der Tröpfchen mikroinjiziert werden [God-22]. Je nach Verfahrenart liegt das Ausgangsmaterial dabei als Granulat, Pellet oder Filament vor. In Abb. 2.7 ist die Methode der filamentbasierten Fertigung schematisch dargestellt.

Die Vorteile des Fused Layer Manufacturing setzen sich aus der Vielzahl von Materialien, der leichten Bedienbarkeit, dem geringen Anschaffungspreis und der Verarbeitbarkeit von Endlosfasern und Multimaterialien zusammen. Nachteile sind die geringen Bauteilgenauigkeiten und Oberflächenqualitäten, die Nachbehandlung der Produkte und die Anisotropie der Eigenschaften durch die geringe Kohäsion der Schichten in z-Richtung [Bre-13, Kum-18, God-22].

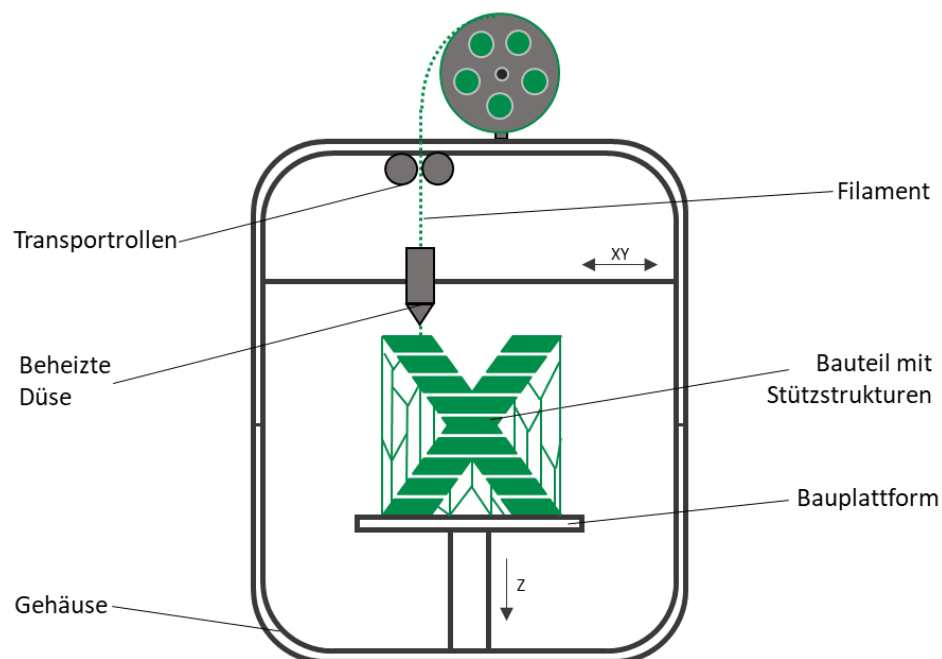


Abb. 2.7 Schemazeichnung des Fused Layer Manufacturing. In Anlehnung an: [Bre-13, Hag-14].

2.3 Multimaterialdruck

Nicht nur in der Natur lassen sich häufig Schnittstellen aus flexiblen und steifen Materialien (Beispiel: Sehne und Knochen) finden, auch in unserem Alltag existieren viele Multimaterialprodukte, wie z.B. Zahnbürsten oder Küchenutensilien. Die kombinierte Eigenschaft aus Festigkeit und Zähigkeit lässt Multimaterialbaugruppen zu einer überlegenen Gruppe werden [Fre-22, Ros-20]. Hinzu kommt, dass durch einen Multimaterialeinsatz eine verbesserte Komplexität und Funktionalität erreicht werden kann. So finden sich Multimaterialstrukturen in einer Vielzahl von Bereichen wieder, z.B. in der Soft-Robotik, der flexiblen Elektronik oder der Biomedizin [Ros-20]. Bei der Herstellung der Bauteile wird immer öfter die AF, genauer das Fused Layer Manufacturing, genutzt. Bei diesem Verfahren ist das Drucken mit zwei Düsen möglich, wodurch zwei Materialien gleichzeitig verarbeitet werden können [Bra-21]. Das Fertigen aus zwei Materialien erfordert allerdings besondere Beachtung verschiedener Parameter. Der Erfolg eines Multimaterialdrucks ergibt sich aus der Interaktion der beiden Materialien. Diese kann durch ein kalibriertes Gerät, das Vorhandensein eines Direkt-Extruders, und die optimale Anpassung von Füllgrad, Prozesstemperatur sowie anderen Slicingparametern verbessert werden [Bra-21, Lop-18]. Trotz idealer Einstellungen ist der größte beeinflussende Faktor die chemische Beschaffenheit der Materialien. Durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen und Schrumpfungswerte sowie eine geringe chemische Affinität kann die mechanische Integrität an den Grenzflächen zwischen den geometrischen Grenzen sinken [Bra-21, Lop-18]. Diese Problematik lässt sich laut Rossing et al. (2020) durch eine mechanische Verzahnung statt einer rein physikalisch-chemischen Haftung lösen [Ros-20]. Auch bioinspirierte Designs sind eine häufig verwendete Möglichkeit zur Verbesserung der Haftung [Fre-22]. Im Allgemeinen existieren mehrere Theorien bezüglich der Haftungsmechanismen zwischen Hart-Weich-Verbindungen (siehe Abb. 2.8). Eine eindeutige Erklärung zur Adhäsion ist trotz vieler Untersuchungen bisher nicht gegeben.

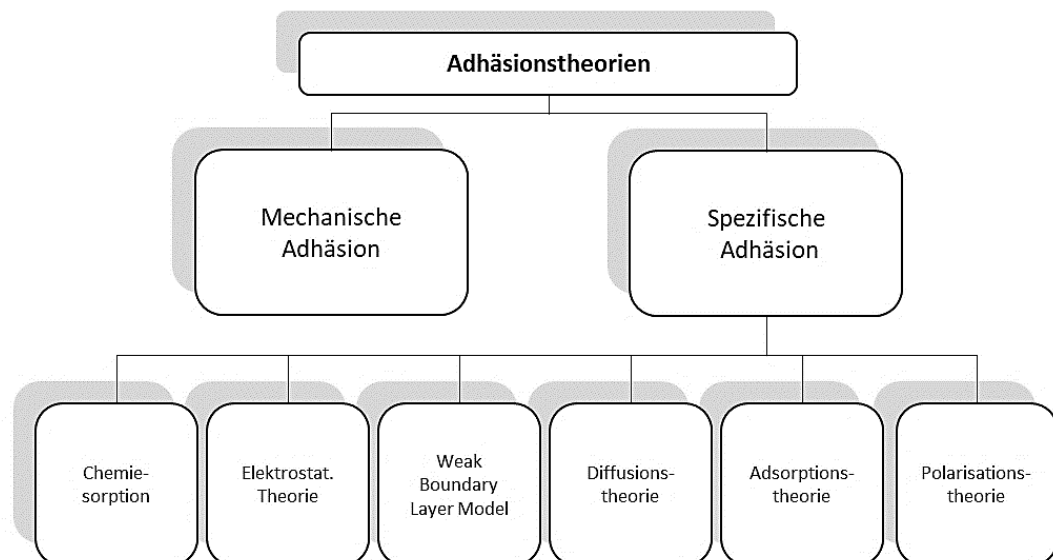


Abb. 2.8 Adhäsionstheorien [Sch-09].

2.4 Biomechanik des Fußes

Bei der Herstellung eines medizinischen Hilfsmittels ist es unabdingbar, die Anatomie des betreffenden Körperteils zu kennen. Im Falle der Konstruktion und Fertigung einer Sprunggelenksorthese betrifft dieses den Fuß. In Abb. 2.9 ist der vereinfachte Aufbau des Fußes dargestellt. Dieser wird in drei Bereiche aufgeteilt, zu denen die Fußwurzel mit sieben Fußwurzelknochen (Sprungbein, Kahnbein, Fersenbein, Würfelbein sowie drei Keilbeine), der Mittelfuß, bestehend aus fünf Mittelfußknochen und die Zehen gehören. Die Zehen sind aus drei Einzelknochen zusammengesetzt (Ausnahme Großzehe: diese besteht aus zwei Knochen), welche das Grund-, Mittel- sowie Endgelenk verbinden [Kre-21]. Hinzu kommen zur Ermöglichung von Bewegungen wie das Spreizen der Zehen oder dem Aufspannen des Fußgewölbes eine Großzahl an Muskeln innerhalb des Fußes. Dieses Gewölbe wirkt als Stoßdämpfer und federt Gewicht, welches auf den Fuß wirkt, ab. Dadurch werden Sehnen, Nerven, Muskeln und Knochen vor den großen Belastungen geschützt. Die Fußgewölbe sind außerdem der Grund für die typische Grundform eines gesunden Fußes, bei dem die Fußsohle nicht flach auf dem Boden aufliegt [Kre-21].

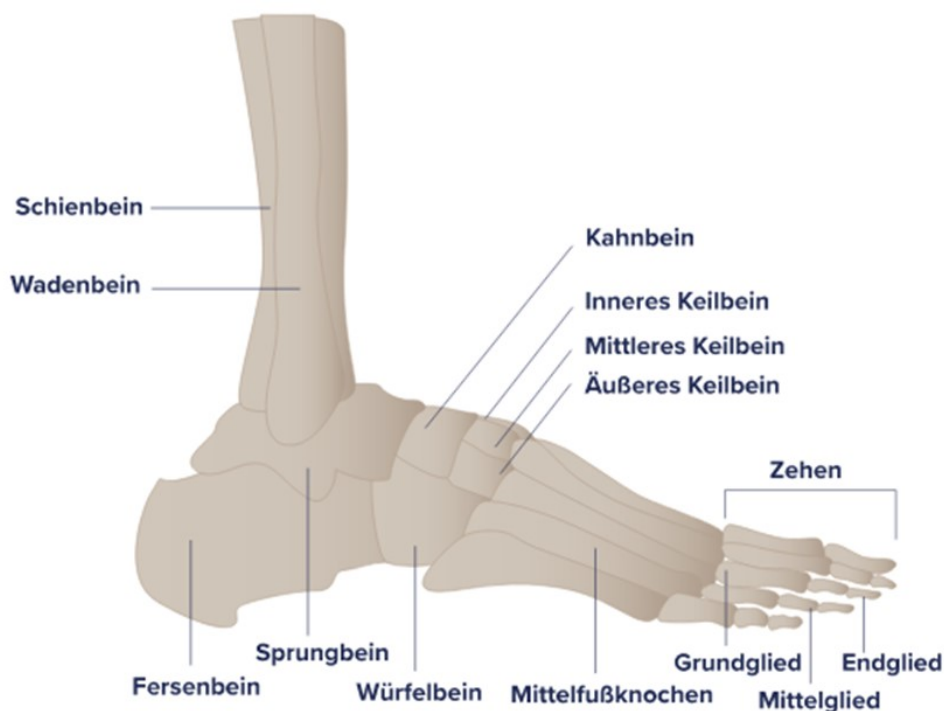


Abb. 2.9 Aufbau des Fußes [Kre-21].

Neben der Anatomie des betreffenden Körperteils ist ebenfalls der Anwendungsfall des medizinischen Hilfsmittels zu betrachten. Bei einer Knöchel-Fuß-Orthese ist neben der Belastung durch die unterstützende Funktion auch die Gangbelastung von großer Bedeutung. Der Gang des Menschen wurde zuerst von Wilhelm Braune und Otto Fischer beschrieben. Die von ihnen eingeführte Ganganalysenbetrachtung gilt noch heute als Grundstein vieler Arbeiten auf diesem Gebiet. Im Allgemeinen besteht der menschliche Gang aus 34 Einzelstellungen,

welche im Abstand von etwa 0,03 Sekunden auftreten. Der aus einem Doppelschritt bestehende Gangzyklus läuft periodisch ab und wird durch eine Aufeinanderfolge von Schwung- sowie Standphasen der Beine charakterisiert (Abb. 2.10). Die Standphase beginnt mit dem Fersenauftritt und endet mit dem Ablösen der Zehen vom Boden, wohingegen die Schwungphase durch das erneute Aufsetzen der gleichen Ferse beendet wird. Die Zykluszeit des Doppelschrittes setzt sich aus 60 % Standphase und 40 % Schwungphase zusammen. Während der Standbeinphasen tritt die höchste Belastung auf den Fuß bzw. das Sprunggelenk auf. Weitere wirkende Kräfte sind die Gewicht- und Bodenreaktionskraft, welche durch das Schien- und Wadenbein auf den Unterschenkel übertragen werden. Außerdem wirken große Dreh- und Torsionsmomente auf das obere und untere Sprunggelenk [Dit-19, Wan-21].

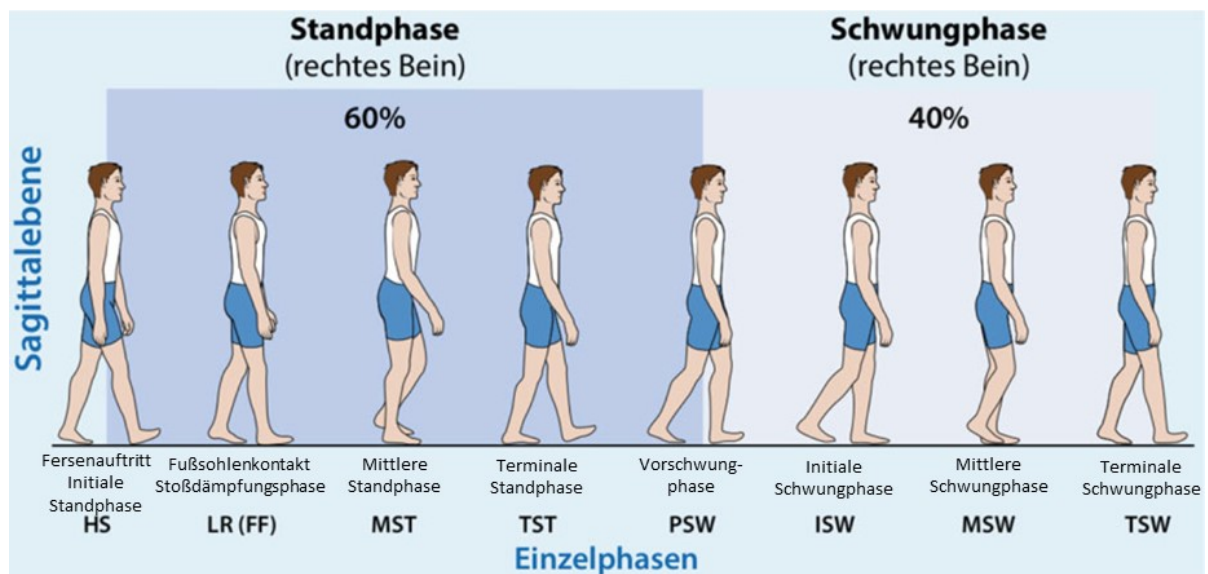


Abb. 2.10 Darstellung der Beinstellung während der Stand- und Schwungphase. Modifiziert nach [Sup-11].

2.5 Orthesen

Orthesen sind orthopädische Hilfsmittel, welche für eine Reihe von körperlichen Beschwerden eingesetzt werden. Sie überbrücken Gelenk- und Extremitätenabschnitte nach verschiedenen Therapiewirkprinzipien. Zu diesen gehören das Stützen, Stabilisieren, Führen sowie Korrigieren [Gre-17]. Orthesen sind ein unentbehrliches Hilfsmittel für körperlich beeinträchtigte Menschen und ermöglichen die Teilnahme am Alltag durch eine Erhöhung der Mobilität. Durch das Hilfsmittel werden strukturelle und funktionelle Eigenschaften des menschlichen neuromuskulären und muskuloskelettalen Systems unterstützt und verändert [Jin-15].

Die Entwicklung von Prothesen und auch Orthesen ist rasant. Spätestens seit dem Zweiten Weltkrieg erfolgt die Herstellung nicht mehr nur in Handarbeit, sondern auch in Serienproduktion. Gerade der Einsatz von Carbonfaserverbundprodukten ist seitdem stetig gestiegen. Dieser geht allerdings aufgrund der Verarbeitung per Hand mit hohen Preisen einher

[Fra-19]. Orthesen werden international nach den durch sie überbrückten Gelenken eingeteilt. Dazu werden meist Kurzbezeichnungen für die verschiedenen Orthesentypen verwendet. So finden sich im orthopädiotechnischen Bereich beispielsweise Bezeichnungen wie KAFO für Knie-(Ankle-)Sprunggelenk-Fuß-Orthesen, WHO ((Wrist-)Handgelenk-Hand-Orthesen) oder AFO für (Ankle-)Sprunggelenk-Fuß-Orthesen [Gre-17]. Letztgenannte dienen zur Verbesserung der Gangleistung von Patienten mit Fehlstellungen oder eingeschränkter Funktion der unteren Extremitäten, welche beispielsweise durch einen Schlaganfall, Multiple Sklerose oder angeboren vorliegen [Liu-19].

Normalerweise werden Orthesen über zwei verschiedene Herstellverfahren gefertigt. Konventionell über Gipsabdruck oder durch Additive Fertigung im Zusammenhang mit 3D-Scan und CAD-Konstruktion [Abd-21]. Das erstgenannte Verfahren ist das vom Orthopädietechniker oder der Orthopädietechnikerin handwerklich ausgeführte. Hierbei wird eine Negativform durch Aufbringen von Gipsmaterial auf dem entsprechenden Körperteil hergestellt. Anthropometrische Daten wie Umfang des Knöchels oder Längen werden während dieses Schrittes berücksichtigt und notiert. Aus diesem Negativmodell wird anschließend ein Positivabdruck gegossen, welcher zur weiteren Bearbeitung genutzt wird. Auf diesen wird der Orthesenrohling entweder durch Vakuumformen mit Polypropylen- oder Polyethylen-Folien oder durch Carbonfaser und Harz hergestellt [Abd-21, Che-16]. Der Rohling wird schlussendlich zugesägt, geschliffen und an den Patienten angepasst. Dieses konventionelle Verfahren wird heutzutage hauptsächlich genutzt. Jedoch gilt es als mühsam sowie zeit- und materialkonsumierend. Außerdem ist die Qualität von der bearbeitenden Person abhängig [Bar-20a, Liu-19]. Die Additive Fertigung bietet eine neue Art der Orthesenherstellung. Durch die hohe geometrische Komplexität, die Funktionsintegration und Freiheit der Additiven Fertigung geht dieses Verfahren mit der Entwicklung neuartiger Orthesen einher [Ric-17]. Bei dieser Methode wird direkt ein Positivmodell des Körperteils mittels 3D-Scanner erstellt. Die Patientendaten liegen demnach digital vor. Anschließend wird über *Offset* die entsprechende Orthese im CAD-Programm konstruiert und angepasst. In vielen Fällen wird nach diesem Schritt eine Finite-Elemente-Analyse durchgeführt. Meist wird die Stereolithografie oder das selektive Lasersintern (SLS) im Anschluss zur Herstellung genutzt. Die Additive Fertigung bietet im Vergleich zur konventionellen Erstellung eine schnellere Produktion, ein für den Patienten angenehmeres Verfahren ohne Gipsabdruck, kürzere Lieferzeiten, eine höhere Genauigkeit und Gestaltungsfreiheit sowie eine eventuelle Recyclebarkeit. Außerdem können die Daten archiviert und bei Bedarf reproduziert werden [Abd-21, Bar-20a, Pal-10]. Trotz der Vorteile wird die Additive Fertigung bisher wenig genutzt. Dies liegt vor allem an der Skepsis, der geringen Automatisierung sowie der fehlenden Erfahrung von CAD-Experten [Ric-17].

3 Material & Methoden

Für den Multimaterialdruck wird das FLM-Verfahren genutzt. Im Vorfeld müssen jedoch die Materialien hinsichtlich der optimalen Druckparameter überprüft werden. Dafür wurden zunächst unterschiedliche Versuche durchgeführt.

3.1 Geometrieerstellung

Für die durchgeführten Versuche wurden verschiedene Geometriestrukturen mittels 3D-CAD-Programm (SolidWorks 2022 von der Dassault Systèmes SolidWorks Corp.) konstruiert. Dabei wurden Inspirationen und Ideen für drei Kopplungsgeometrien zur Untersuchung der Haftung zwischen PETG und TPU gesammelt und anschließend im Folgenden beschriebenen Modellen umgesetzt. Als Referenz dient eine glatte Probe. In Abb. 3.1 sind die unterschiedlichen Muster zu sehen. Von diesen existiert jeweils ein Positivmuster (PETG) und ein Negativmuster (TPU). Es wurden eine gitterförmige, eine pilzförmige sowie eine türmchenförmige Verbindung gewählt, wobei letztgenannte an die Schwalbenschwanzverbindung aus der Zimmerei angelehnt ist. Um die optimalen Druckparameter für die beiden Druckmaterialien separat zu bestimmen, wurden zunächst glatte Proben mit den Maßen 30x30x3 mm genutzt. Anschließend wurden die beiden Materialien kombiniert verdruckt. Anhand von Testkörpern wurden die einzeln optimierten Parameter der Materialien auf den Dualdruck angepasst. Die Testkörper sind die beschriebenen Positiv- und Negativmuster der verschiedenen Konfigurationen mit den Maßen 30x30x3 mm.

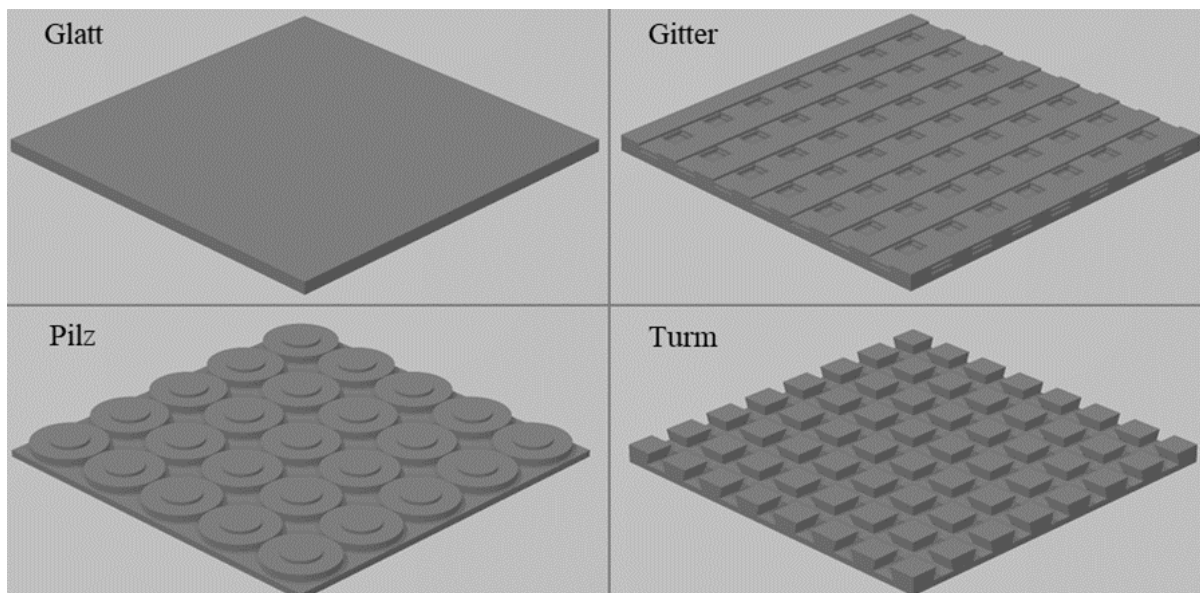


Abb. 3.1 Konstruierte Muster zur Untersuchung des Kopplungsverhaltens von PETG und TPU (Positivformen). Links oben: Glatt, rechts oben: Gitter, links unten: Pilz, rechts unten: Turm.

Mit Berücksichtigung dieser Konfigurationen wurden verschiedene Probekörper für die Prüfungen konstruiert und anschließend gefertigt. Für die Versuche der scheinbaren

interlaminaren Scherfestigkeit (ILSS) wurden Kurzbalkenproben nach DIN EN ISO 14130 mit den Maßen 30x15x3 mm erstellt. In Abb. 3.2 ist beispielhaft ein Schnittbild des Kurzbalkens der Gitterkonfiguration dargestellt. Hier ist das Positiv- und Negativmuster mit der jeweiligen Übergangszone der Kopplungsgeometrie einsehbar.

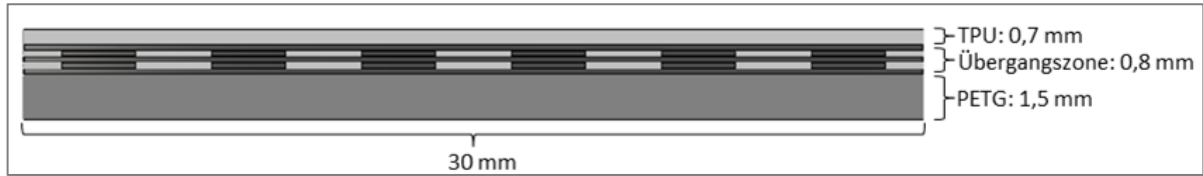


Abb. 3.2 Schnittbild des Kurzbalkens der Gitterkonfiguration.

Die Struktur für die Schälprüfung wurde nach VDI 2019 - Prüfung der Haftung von thermoplastischen Elastomeren (TPE) an Substraten [VDI-16b] - und den Ergebnissen des Forschungsprojektes zu Hart-Weich-Verbindungen in der additiven Fertigung von Heuzeroth (2020) modifiziert und konstruiert. Um statistisch verwertbare Ergebnisse zu erzielen, wurden sechs Probekörper gleichzeitig gedruckt. Dafür wurde die Probengröße für die Additive Fertigung verkleinert. In Abb. 3.3 ist die technische Zeichnung dargestellt.

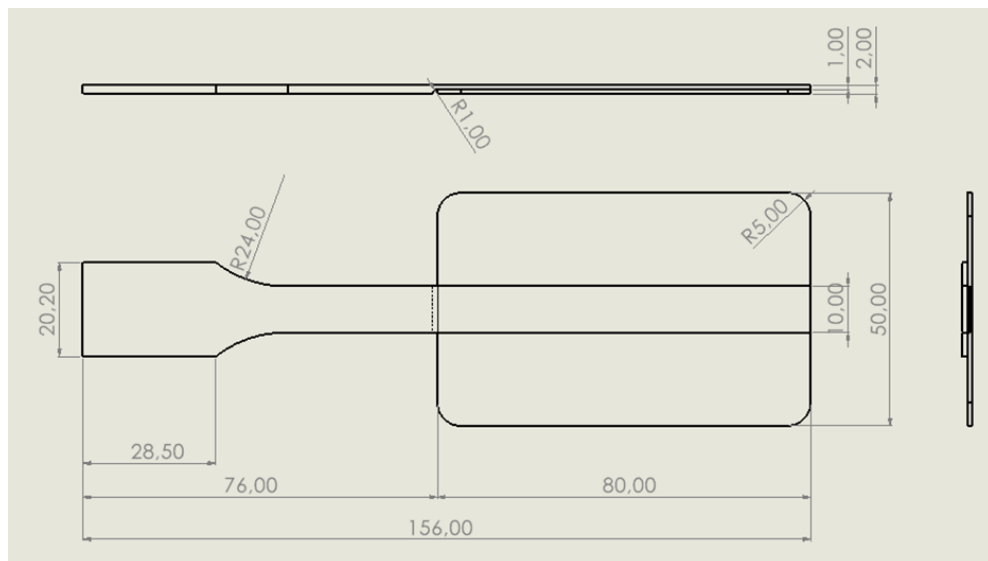


Abb. 3.3 Konstruierte Struktur für die Schälprüfung. Modifiziert nach [Heu-20, VDI-16b].

Nach den ersten Prüfungen wurden die bisherigen Ergebnisse ausgewertet und anhand dieser neue Probekörper für eine genauere Betrachtung konstruiert. Demnach wurden schlussendlich vier verschiedene Versionen der Gitterstruktur entworfen und mittels Schälprüfung auf ihre Haftungseigenschaften untersucht. Hierbei wurde sowohl konstruktiv auf die Gitterhöhe (5x0,2 mm oder 3x0,33 mm) und die Feinheit des Gitters (2,5 mm oder 5 mm) als auch bei Version zwei und vier über Druckeigenschaften auf die Schichthöhe (0,1 mm oder 0,3 mm) eingegangen. In der nachfolgenden Abb. 3.4 sind die unterschiedlichen Versionen als Positivformen, welche später aus PETG gefertigt werden, aufgezeigt.

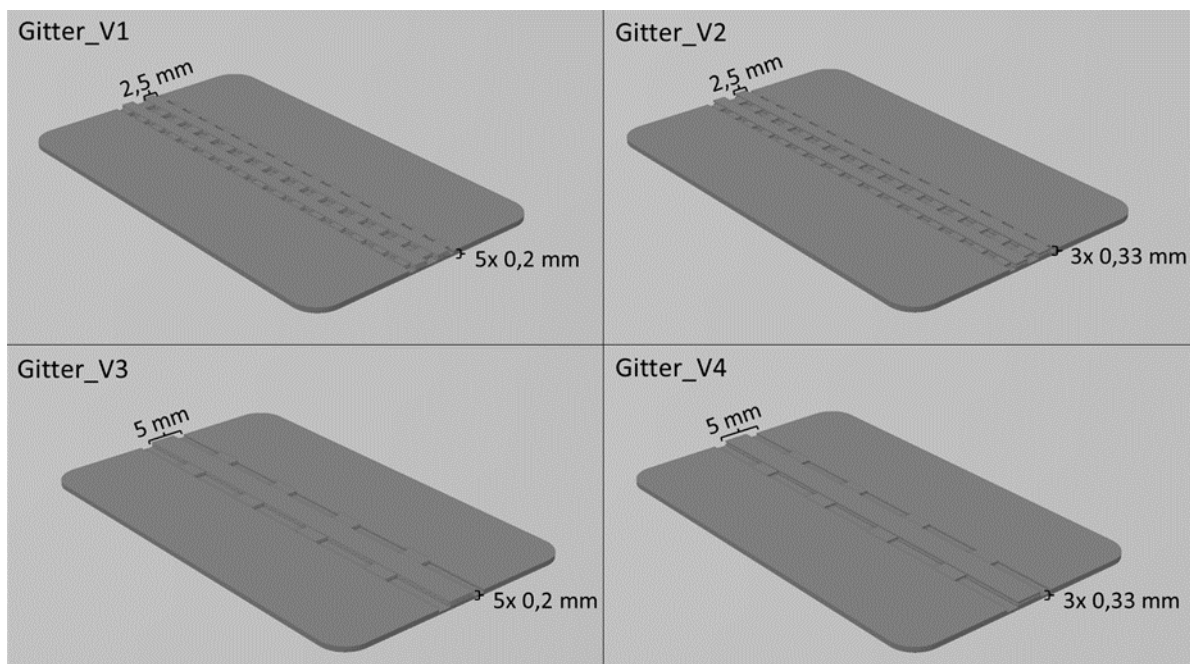


Abb. 3.4 *Verschiedene Versionen der Gitterstruktur.*

3.2 Fertigung mittels Fused Layer Manufacturing

Die Geometrien wurden für die Additive Fertigung vorbereitet. Hierzu gehörte die Datenkonvertierung sowie die Erstellung von Fertigungsdaten. Die Konstruktionen wurden zunächst in ein STL-Format umgewandelt und somit durch Dreiecksfacetten in einem sogenannten Mesh dargestellt. Nachfolgend wurden die Bauteile im *Slicer*-Programm Simplify3D für den Bauraum positioniert, Supportstrukturen definiert und gesliced. Diese Schritte sind nachfolgend für das Verfahren genauer beschrieben.

Für die Fertigung der Strukturen mittels Fused Layer Manufacturing wurde der FLM-Drucker x500 der Firma German RepRap verwendet. In der nachfolgenden Abbildung (Abb. 3.5) ist der Drucker dargestellt. Außerdem sind in Tab. 3.1 die Eigenschaften des x500 aufgezeigt.

Tab. 3.1 *FLM-Drucker x500 von der Firma German RepRap- Technische Daten [Ger-23].*

Eigenschaften	Wert
Druckraum	500x400x450 mm
Verwendete Materialien	PETG, TPU
Schichtauflösung	Min. 0,02 mm
Druckgeschwindigkeit	10-150 mm/s
Extrudertyp	DD4 Dual Extruder



Abb. 3.5 FLM-Drucker x500 der Firma German RepRap [3Dn-22].

3.2.1 Materialauswahl

Für die Versuche und die schlussendliche Herstellung der AFO wurden die Materialien PETG und TPU verwendet. Diese sind in der Additiven Fertigung weit verbreitet und aufgrund ihrer Eigenschaften vielseitig einsetzbar.

Thermoplastische Polyurethane (TPU) werden aus Diolen zusammen mit Polyisocyanaten durch eine Polyadditionsreaktion hergestellt und besitzen als Haupteigenschaften eine hohe Dehnung und Zugfestigkeit. In den meisten Fällen findet TPU Anwendung als Verschleißschutz, Dämpfungselement oder auch in Schläuchen und Rohren [Els-08]. Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurde das CheetahTM- Filament der Firma NinjaTek[®] verwendet. Das Material besitzt eine Shore-Härte von 95A, welche ungefähr der Gummihärte eines Einkaufswagenrades entspricht. In Tab. 3.2 ist ein Auszug der Materialeigenschaftsdaten des TPUs einzusehen. Das vollständige Datenblatt findet sich in Anhang I.

Tab. 3.2 Materialeigenschaftsdaten des CheetahTM- Filaments von NinjaTek[®].

Eigenschaften	Wert
Zugfestigkeit	39 MPa
Zugmodul	26 MPa
Bruchdehnung	580 %
Härte	95 Shore A
Schlagzähigkeit nach IZOD	19,1 kJ/m ²

PETG ist ein mit Glykol modifiziertes Polyethylenterephthalat, welches zur Klasse der Thermoplaste gehört. PETG zählt zusammen mit ABS und PLA zu den am häufigsten verwendeten Materialien in der Additiven Fertigung mit Kunststoffen. Das hier verwendete Material stammt von der Firma Alcia 3DP und wird für Anwendungen mit mittlerer bis hoher mechanischer Festigkeit empfohlen. PETG gilt als leicht druckbar, widerstandsfähig, schwer entflammbar sowie resistent gegen eine Vielzahl von Chemikalien. Von Seiten des Herstellers existieren keine Informationen über die mechanischen Eigenschaften des Materials. Aus Gründen der Vollständigkeit sind in der nachfolgenden Tabelle (Tab. 3.3) allgemeine Kennwerte von PETG aufgezeigt.

Tab. 3.3 *Materialeigenschaftsdaten von PETG.*

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

3.2.2 Druckparameter

Die optimalen Druckparameter wurden aus Vorversuchen für jedes der Materialien bestimmt und anschließend auf den Dualdruck angepasst. Hier ist zu erwähnen, dass mit einem sogenannten *Tool Change Script* gearbeitet wurde, bei dem die in der Schicht nicht verwendete Düsenseite auf 140°C abgekühlt wurde. Durch diesen Schritt kann das Herauslaufen der Schmelze verhindert werden. Das Script ist in Abb. 3.6 dargestellt.

```
G1 X 175 Y175 F2000 {IF NEWTOOL=0}
M104 S140 T1 {IF NEWTOOL=0}
M109 S[extruder0_temperature] T0 {IF NEWTOOL=1}
M109 S[extruder1_temperature] T1 {IF NEWTOOL=1}
M104 S140 T0
```

Abb. 3.6 *Tool Change Script in Simplify3D.*

Nachfolgend sind die Parameter zur Fertigung der Strukturen mit dem Material TPU im Tronxy X5SA Pro beschrieben. Das jeweilige Bauteil wurde mit dem *Slicer*-Programm Simplify3D gesliced. Für den Druck wurde eine Extruderdüse von 0,40 mm verwendet, eine Extrusionsbreite von 0,48 mm sowie ein Extrusionsmultiplikator von 1,04 eingestellt. Die

Schichthöhe betrug 0,1 mm, es wurde sowohl mit vier oberen, als auch unteren Deckschichten und zwei Wandschichten gedruckt. Als *Infill* wurde das rechteckige Füllmuster gewählt, welches zu einem Prozentsatz von 60 % verwendet wurde. Die Druckgeschwindigkeit lag bei 800 mm/min, die Extrudertemperatur bei 225°C, der beheizte Bauraum bei 40°C und die Druckbetttemperatur betrug 50°C. Mögliche Supportstrukturen wurden mit 45 % Supportinfill automatisch generiert.

Für den Druck mit PETG wurde ebenfalls eine Extruderdüse von 0,40 mm verwendet, eine Extrusionsbreite von 0,48 mm sowie ein Extrusionsmultiplikator von 0,98 eingestellt. Die Schichthöhe betrug 0,1 mm, es wurde sowohl mit vier oberen, als auch unteren Deckschichten und zwei Wandschichten gedruckt. Als *Infill* wurde das rechteckige Füllmuster gewählt, welches zu einem Prozentsatz von 60 % verwendet wurde. Die Druckgeschwindigkeit lag bei 2000 mm/min, die Extrudertemperatur bei 240°C, der Bauraum bei 40°C und die Druckbetttemperatur war 50°C. Mögliche Supportstrukturen wurden automatisch generiert mit 45 % Supportinfill.

Auf Zusätze wie *Raft*, *Brim* oder *Ooze Shield* wurde für beide Materialien verzichtet. Die Haftung auf dem Druckbett war für TPU und PETG ohne Hilfsmittel gegeben.

Weitere Parameter, welche in Simplify3D festgelegt werden können, sind in Tab. 3.4 dargestellt. Dort sind auch die zuvor genannten Einstellungen für beide Materialien aufgelistet.

Tab. 3.4 *Verwendete Druckparameter für den Druck mit TPU und PETG. Eingestellt in Simplify3D.*

Parameterreiter in Simplify3D	Parameter	Wert	
		TPU	PETG
Extruder	Extrusionsdüsendurchmesser	0,40 mm	0,40 mm
	Extrusionsmultiplikator	1,04	0,98
	Extrusionsbreite	0,48 mm	0,48 mm
	Rückzugsdistanz	0,80 mm	0,80 mm
	Rückzugsgeschwindigkeit	3600 mm/min	3600 mm/min
Layer	Schichthöhe	0,1/0,3 mm	0,1/0,3 mm
	Obere Deckschichten	3	4
	Untere Deckschichten	3	4
	Wandschichten	2	2
	Geschwindigkeit erste Schicht	80 %	65 %
Support	Supportinfill	45 %	45 %
Temperatur	Extruder	225°C	240°C
	Bauraum	40°C	40°C
	Druckbett	50°C	50°C
Geschwindigkeiten	Druckgeschwindigkeit	800 mm/min	2000 mm/min
	Bewegungsgeschwindigkeit	3000 mm/min	3000 mm/min

3.3 Prüfung der Strukturen

Nach der Herstellung der Prüfkörper wurden diese auf ihre mechanischen Eigenschaften untersucht. Dafür wurde die Prüfung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit sowie eine Schälprüfung genutzt. Nachfolgend sind die Verfahren beschrieben.

3.3.1 Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS)

Die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS) nach DIN EN ISO 14130 wurde anhand des Dreipunktverfahrens am kurzen Balken durchgeführt. Das Verfahren wird im Normalfall für faserverstärkte Kunststoffe mit duroplastischer oder thermoplastischer Matrix eingesetzt und zielt auf ein Versagen durch interlaminare Scherung ab [DIN-98]. Nach der Norm ist ein Schubversagen in einer oder mehrerer Ebenen als akzeptables Ergebnis angesehen. Andere Versagensarten, welche beispielsweise durch Zug, Druck oder Scherung entstehen, sind nicht anerkannt. Die möglichen Versagensarten sind in Abb. 3.7 dargestellt. Durch diese Analyse kann aufgezeigt werden, wie gut die Haftung zwischen Faser und Matrix ist und ob angrenzende Schichten zu Scherversagen neigen. Aufgrund des auch in der Additiven Fertigung vorliegenden Schichtenaufbaus wurde das Verfahren für diese Arbeit genutzt und adaptiert.

Für die Prüfung wurde eine Stützweite von 15 mm, Druckfinnen mit 5 mm Radius sowie Auflager mit 2 mm Radius verwendet. Die Prüfgeschwindigkeit ist mit 1 mm/min in der Norm festgelegt. Für jede untersuchte Konfiguration wurden jeweils fünf Proben geprüft. Der Prüfaufbau ist in Abb. 3.8 abgebildet.

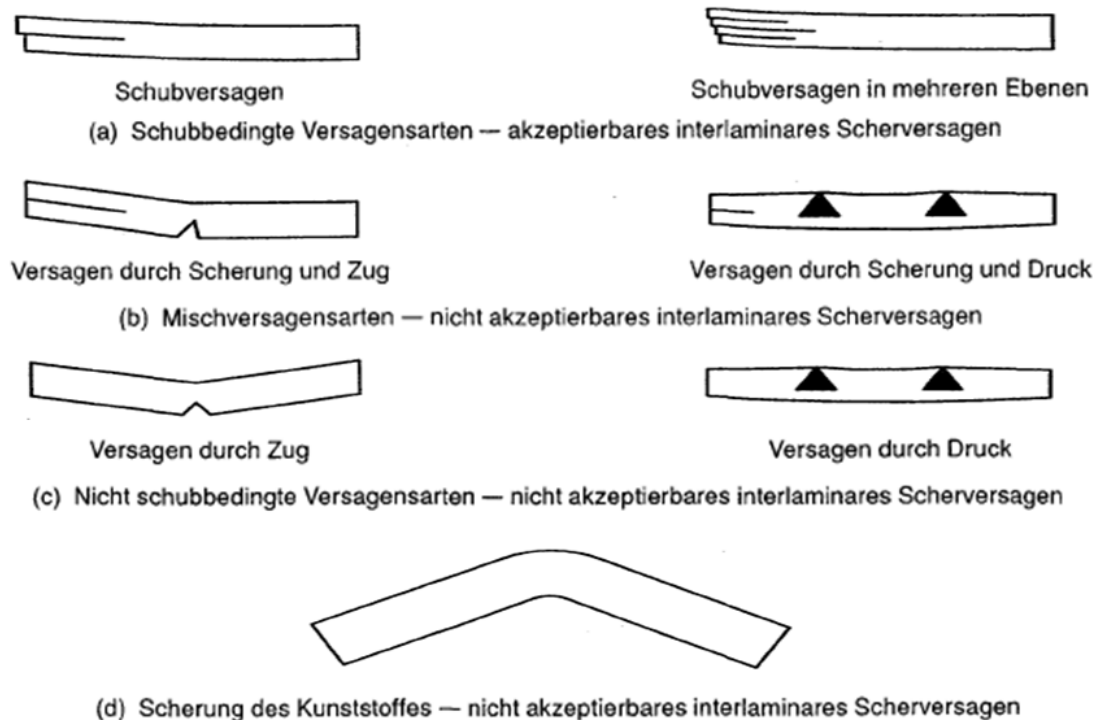


Abb. 3.7 Mögliche Versagensarten bei der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeitsprüfung [DIN-98].

Im Verlauf der Prüfung wird die Kraft über der Verformung gemessen. Bei Schubversagen kann die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit nach Formel (1) berechnet werden:

$$\tau = \frac{3}{4} * \frac{F_{max}}{b_{Probe} * h_{Probe}} \quad (1)$$

Dabei ist:

F_{max}	die Bruchkraft oder die maximale Kraft in Newton;
b_{Probe}	die Breite des Probekörpers in Millimeter;
h_{Probe}	die Dicke des Probekörpers in Millimeter.

Bei den beschriebenen nicht akzeptablen Versagensarten ist eine Berechnung nach (1) nicht möglich. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind nach DIN EN ISO 14130 nur innerhalb der gleichen Prüfreihe und bei gleichem Werkstoff vergleichbar.

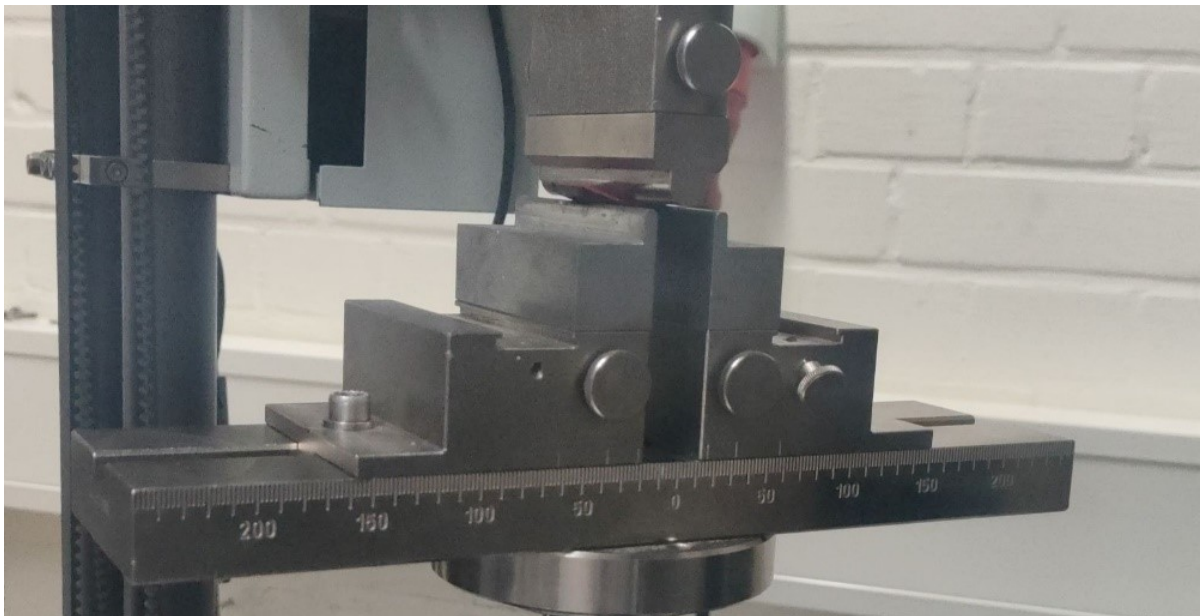


Abb. 3.8 Prüfaufbau der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeitsprüfung.

3.3.2 Schälprüfung nach VDI 2019

Zur Prüfung der Haftung der beiden Materialien wurde die Schälprüfung nach VDI 2019 (Prüfung der Haftung von thermoplastischen Elastomeren an Substraten) verwendet. Diese Richtlinie dient der Ermittlung des Schälversagens bzw. der Haftkraft oder des Schälwiderstands. Bei dieser Prüfung wird die Weichkomponente (im Fall dieser Arbeit das TPU) im Winkel von 90° zur Grenzfläche mit konstanter Geschwindigkeit durch Zug belastet, sodass die weiche Komponente von der harten abgeschält wird. Dabei wird die benötigte Kraft über den Weg aufgezeichnet. Für die Einspannung des in Kapitel 3.1 beschriebenen Probekörpers wurde ein eigener Prüfschlitten nach Vorbild der VDI 2019 sowie den Forschungsergebnissen von Heuzeroth (2020) angefertigt. Der Prüfaufbau sowie der

Prüfslitten sind in Abb. 3.9 dargestellt. Um statistisch verwertbare Ergebnisse zu erzielen, wurden sechs Probekörper gleichzeitig gedruckt. Dafür wurde die Probengröße für die Additive Fertigung verkleinert.

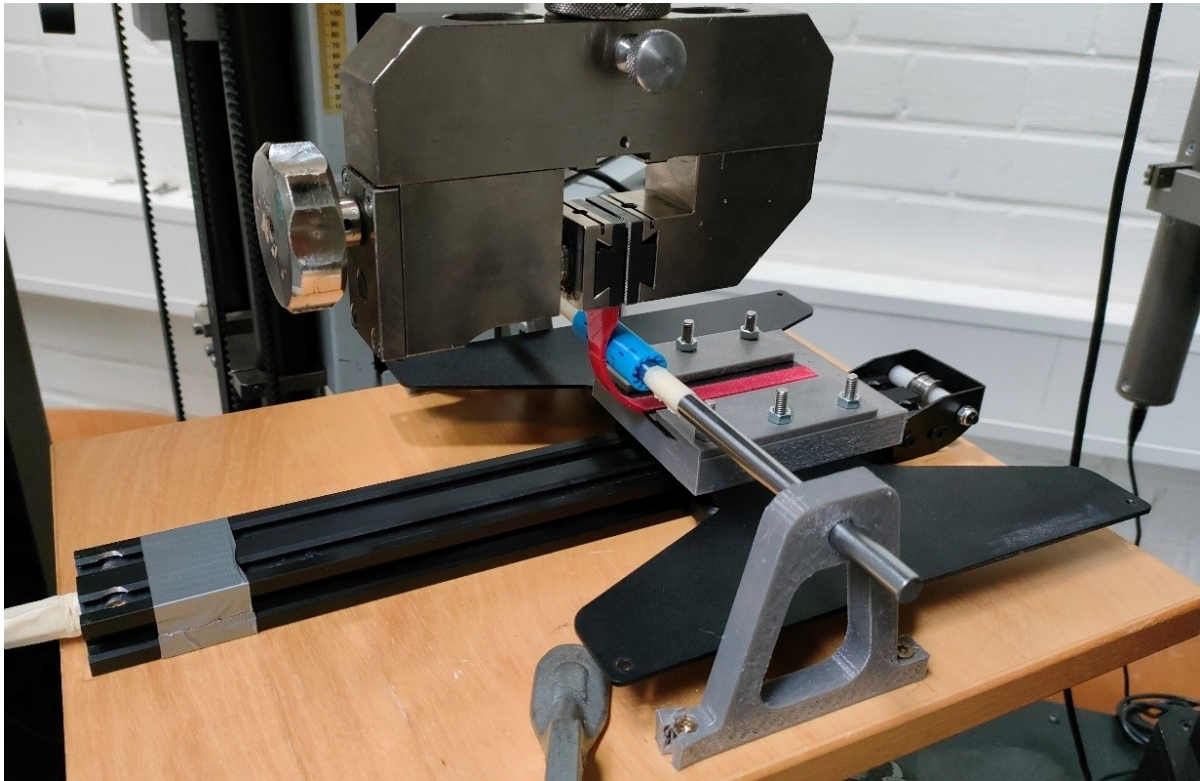


Abb. 3.9 Prüfaufbau der Schälprüfung nach VDI 2019.

Die Auswertung des Versuchs erfolgt anhand der Berechnung des Schälwiderstands W_s nach Formel (2) bzw. der Angabe der Haftkraft F in N:

$$W_s = \frac{F}{b} \quad (2)$$

Dabei ist:

- F die nach ISO 6133 ermittelte Haftkraft in N;
- b die Breite der Weichkomponente an der Grenzfläche in mm.

Außerdem ist eine optische Bewertung des Bruchbildes für die Auswertung vorgesehen. Die verschiedenen Bruchbilder sind in Abb. 3.10 zu sehen. Hinzukommt hier die Zuordnung E, welche die Zerstörung der Probe beschreibt. Diese ist bildlich nicht dargestellt.

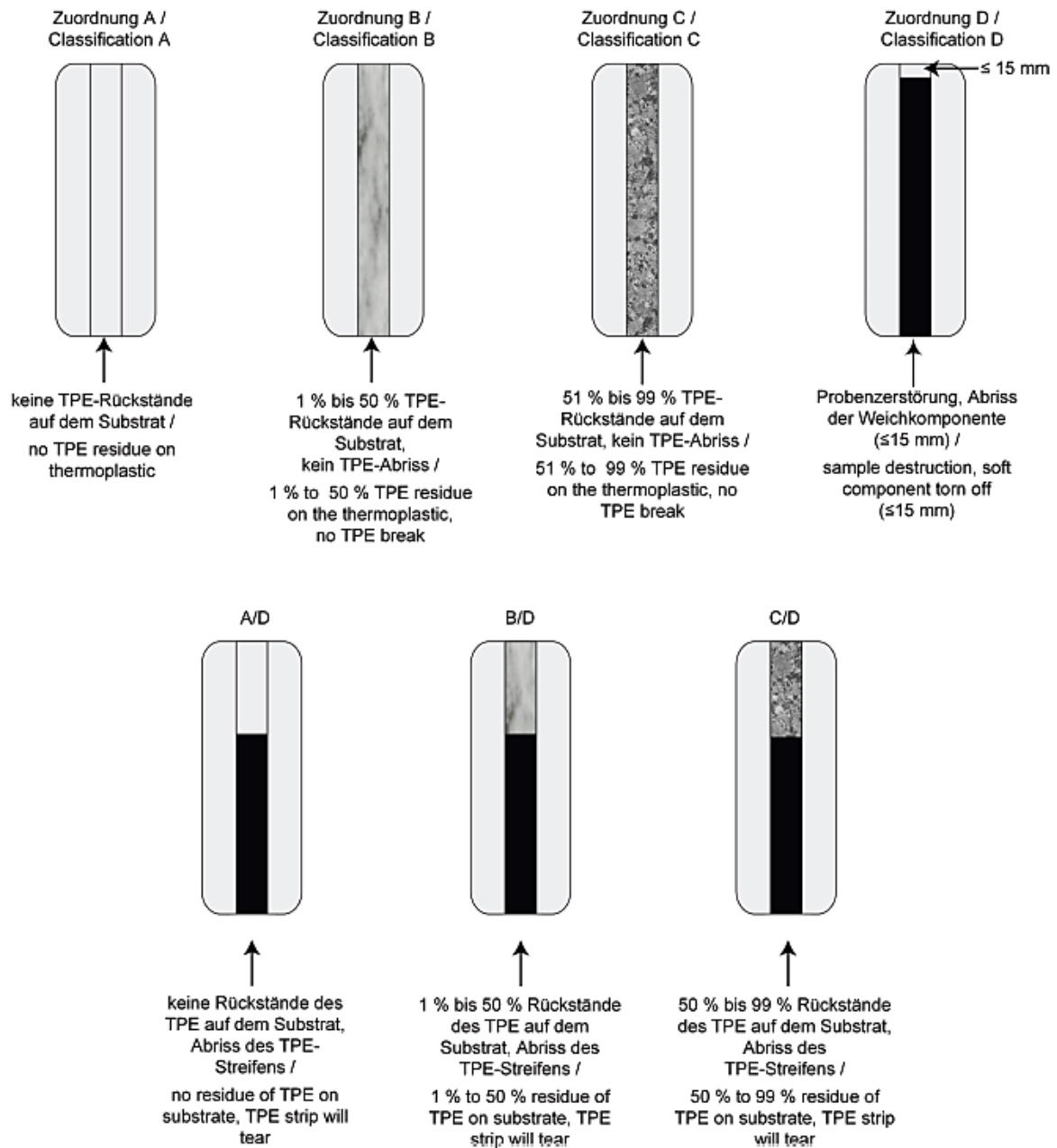


Abb. 3.10 Schematische Darstellung der Bruchbilder A bis D [VDI-166].

3.4 Konstruktion der Orthese

Nach den beschriebenen Prüfungen wurde die Orthese unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse konstruiert und gefertigt. Dazu wurde zunächst ein 3D-Scan eines Probandenfußes erstellt. Dieser wurde mit dem 3D Scanner HandySCAN 3D 307 der CREAFORM GmbH und der zugehörigen Software VXelements erstellt. Anschließend wurde die Rohdatei mit der Autodesk Meshmixer Software bearbeitet und für die weiteren Schritte vorbereitet. Der Scanprozess und die daraus resultierten 3D-Modelle sind in Abb. 3.11 zu sehen.



Abb. 3.11 Scanprozess und die daraus resultierten 3D-Modelle.

Die schlussendliche Konstruktion der Orthese wurde mittels 3D-CAD-Programm SolidWorks 2022 (Dassault Systèmes SolidWorks Corp.) durchgeführt. Zuerst wurde aus der 3D-Scan-Datei im STL-Format ein Volumenmodell erstellt. Hierfür wurde die SolidWorks Zusatzanwendung ScanTo3D verwendet. Anschließend wurde die später aus PETG bestehende Trägerform (Wandstärke 2,5 mm) und die aus TPU bestehende Sohle (Wandstärke 2 mm) als einzelne Bauteile konstruiert. Hinzu kam das Einfügen der Gitterstruktur zur Erhöhung der Kopplung zwischen den beiden Materialien. Außerdem wurden wabenförmige Luftlöcher eingebaut. Dies erfolgte zum einen, um ein angenehmeres Hautklima zu erzielen und zum anderen, um Material und Gewicht einzusparen. Schlussendlich wurden Verrundungen für ein angenehmeres Tragegefühl implementiert. In Abb. 3.12 und Abb. 3.13 ist die konstruierte Orthese zu sehen. In schwarz ist das Trägermaterial PETG dargestellt und in rot die weiche Komponente aus TPU. Außerdem sind Schnittbilder in Front- und Seitenansicht sowie eine Detailansicht abgebildet. Ein besonderes Merkmal der Orthese stellt der Abrollmechanismus im Zehenbereich dar. Hier wurde konstruktiv mit einem Funktionsmechanismus gearbeitet, um der Steifigkeit des PETGs entgegenzuwirken. An der Unterseite ist ebenfalls eine TPU-Schicht mit Gitterkonstruktion aufgebracht, um ein Rutschen auf dem Boden zu verhindern.

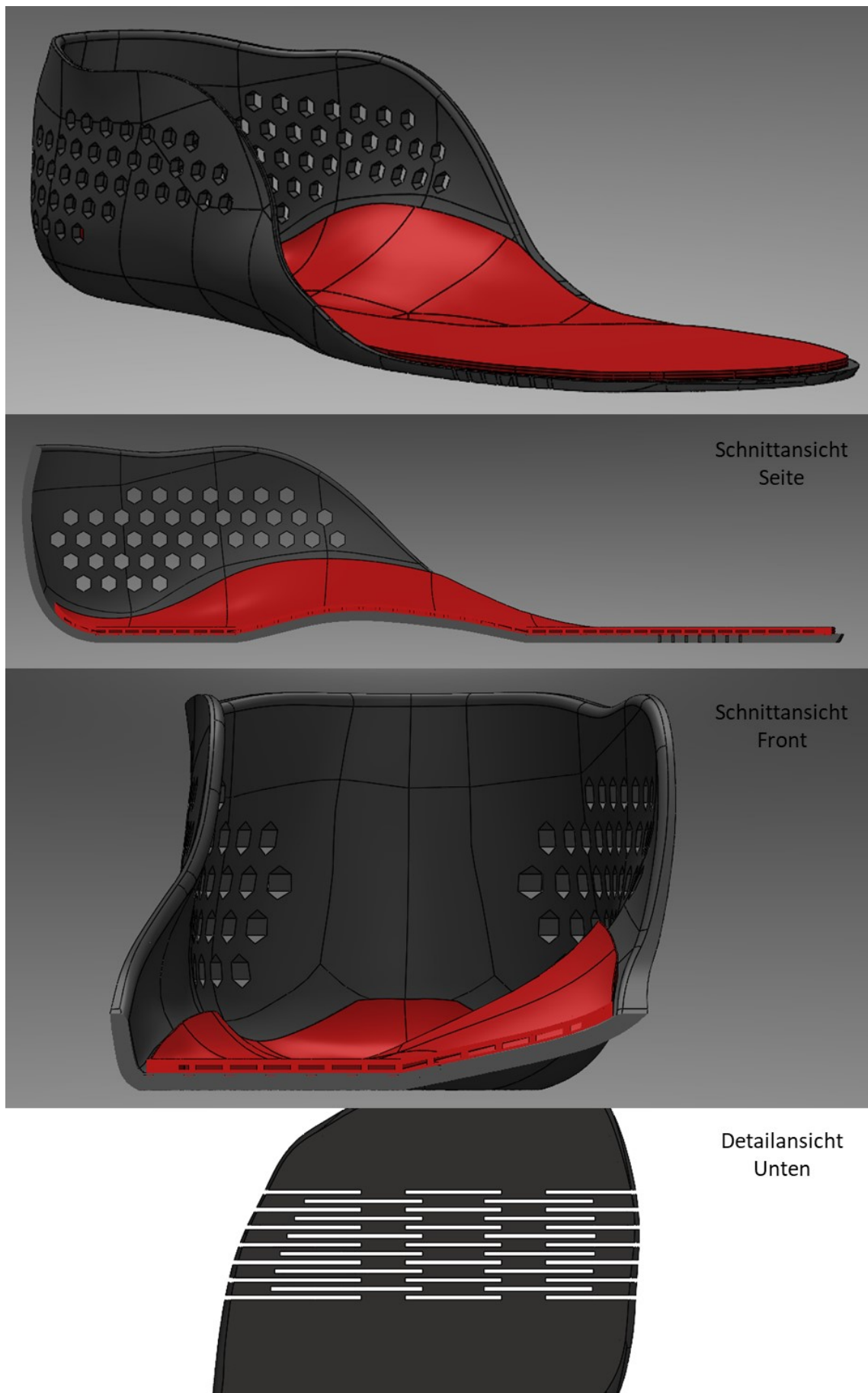


Abb. 3.12 Konstruierte Orthese. Rot: TPU, Schwarz: PETG.

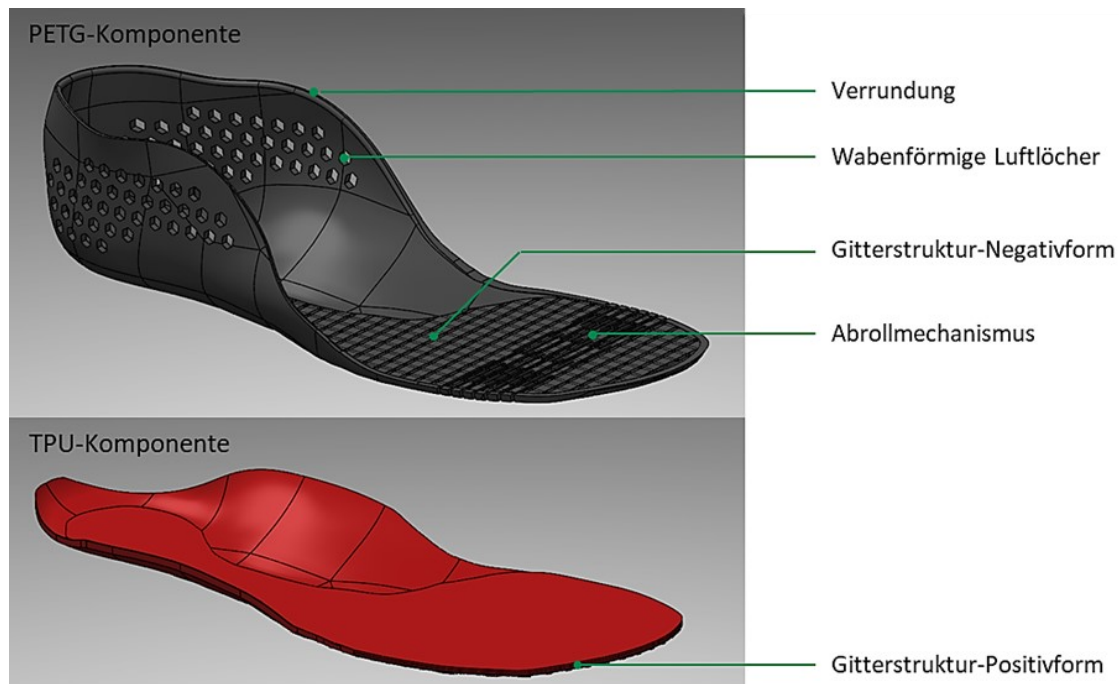


Abb. 3.13 Konstruierte Orthese. Ansicht der einzelnen Bauteile.

Neben dieser Konstruktion wurden weitere Versionen getestet. Die schlussendliche Orthese beruht allerdings auf der hier beschriebenen, sodass auf die anderen Varianten nicht weiter eingegangen wird.

3.5 Fertigung der Orthese mittels Fused Layer Manufacturing

Nach der Konstruktion der Orthese wurde diese in ein STL-Format überführt und anschließend im Slicerprogramm Simplify3D auf den Druckprozess vorbereitet. Für die Fertigung der Orthese wurden ebenfalls das thermoplastische Polyurethanfilament Cheetah™ der Firma NinjaTek® sowie das Glykol modifizierte Polyethylenterephthalat von Alcia 3DP verwendet. Die Eigenschaften der Filamente sind in Kapitel 3.2.1 genauer beschrieben.

Zu Beginn der Vorbereitung wurden die einzelnen Bauteile der Struktur im Slicer platziert. Die in der vorherigen Abb. 3.12 rot und schwarz eingefärbten Bereiche sind unabhängige Bauteile, welche in einer Baugruppe zusammengefügt sind. Anschließend wurden die Druckprozesse mit den verschiedenen Druckparametern vom TPU und PETG für die beiden Komponenten ausgewählt. Die benutzten Parameter sind in Tab. 3.5 zu sehen und unterscheiden sich nur gering von den Parametern der Prüfstrukturherstellung. Die Orthese wurde sowohl mit einer Schichthöhe von 0,1 mm gefertigt als auch mit einer von 0,3 mm, um den Einfluss der Höhe auf die Funktionalität und Optik zu untersuchen. Außerdem konnte die Abhängigkeit der Druckqualität von der Druckzeit beurteilt werden. Bei der Fertigung der Orthese wurden Supportstrukturen im Bereich des Fußgewölbes verwendet. Diese sind bspw. in Abb. 3.14 zu sehen, wo die ersten Schichten der PETG-Komponente im Fertigungsprozess dargestellt sind. Bei Betrachtung der Abbildung ist zu erkennen, dass auch hier auf Zusätze wie *Raft* oder *Skirt*

verzichtet wurde. Wie bei der bisherigen Herstellung der Probekörper wurde ebenfalls das *Tool Change Script* aus Abb. 3.6 benutzt. Außerdem wurde in einigen Fällen ein *Prime Pillar* und ein *Ooze Shield* verwendet, um den Effekt dieser zu untersuchen.

Tab. 3.5 Final verwendete Druckparameter für den Druck der Orthese mit TPU und PETG. Eingestellt in Simplify3D.

Parameterreiter in Simplify3D	Parameter	Wert	
		TPU	PETG
Extruder	Extrusionsdüsendurchmesser	0,40 mm	0,40 mm
	Extrusionsmultiplikator	1,04	0,98
	Extrusionsbreite	0,48 mm	0,48 mm
	Rückzugsdistanz	1,00 mm	1,0 mm
	Rückzugsgeschwindigkeit	3800 mm/min	3800 mm/min
Layer	Schichthöhe	0,1/0,3 mm	0,1/0,3 mm
	Obere Deckschichten	3	4
	Untere Deckschichten	3	4
	Wandschichten	2	2
	Geschwindigkeit erste Schicht	80 %	65 %
Support	Supportinfill	45 %	45 %
Temperatur	Extruder	225°C	240°C
	Bauraum	40°C	40°C
	Druckbett	50°C	50°C
Geschwindigkeiten	Druckgeschwindigkeit	1000 mm/min	2000 mm/min
	Bewegungsgeschwindigkeit	3000 mm/min	3000 mm/min
Zusätze	Brim Ooze Shield Prime Pillar	15 Skirt Outlines, 1 Skirt Layers 20 mm Offset, 3 Outlines 20 mm Pillar Width	

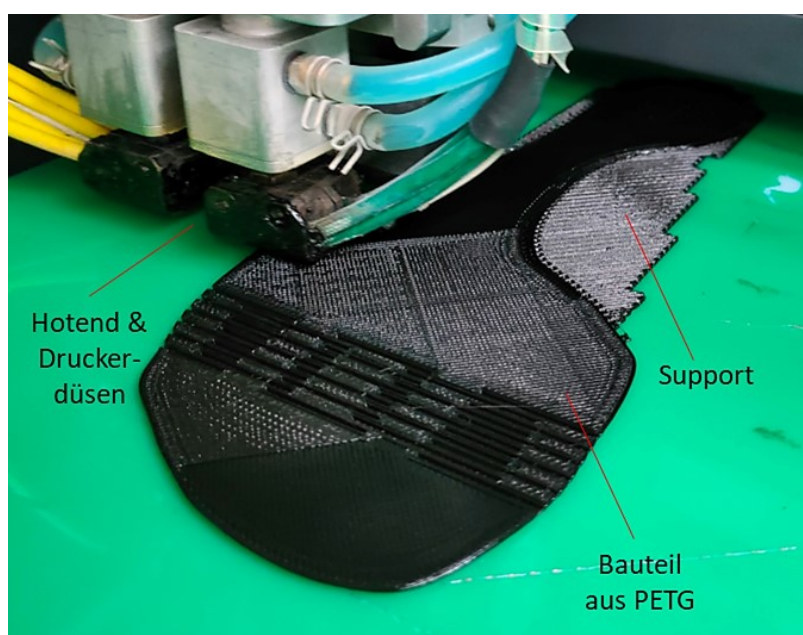


Abb. 3.14 Orthese im Fertigungsprozess auf dem x500 FLM-Drucker.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt. Dabei werden die Druckparameter, die visuelle Probenbetrachtung, die Prüfung der scheinbaren interlaminaeren Scherfestigkeit sowie die Schälprüfungen beschrieben.

4.1 Druckparameter und visuelle Probenbetrachtung

Zu Beginn der gesamten Versuchsreihe wurden die optimalen Druckparameter für den Multimaterialdruck mit PETG und TPU ermittelt.

In Abb. 4.1 sind Proben abgebildet, welche versuchsweise mit *Raft*, *Ooze Shield* oder komplett ohne Zusätze gedruckt wurden. Es ist zu erkennen, dass die Haftung auf dem *Raft* nicht ausreichend für das TPU ist. Für die gedruckten Bauteile wurde daher auf ein *Raft* verzichtet, vor allem, da Phänomene wie *Warping* nicht aufgetreten sind. Die direkte Haftung auf dem Druckbett des x500 war ausreichend gegeben. Bei der Betrachtung der mit *Ooze Shield* gedruckten Probe sind Lücken in der äußeren Zone der Oberfläche zu sehen. Optimale Ergebnisse konnten somit ohne Zusätze erzielt werden.

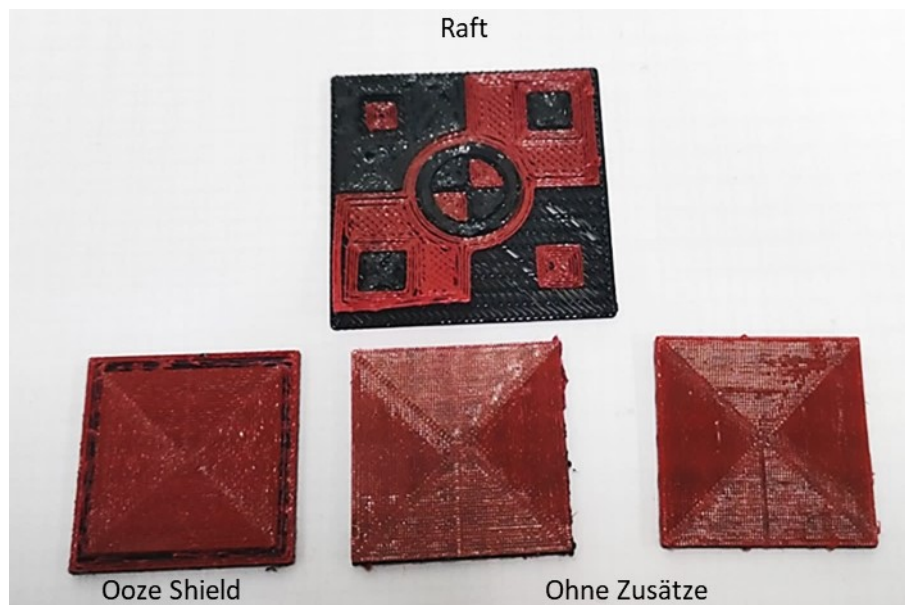


Abb. 4.1 Versuchsproben zur Ermittlung der Druckparameter.

Während der Untersuchung wurden verschiedene Druckgeschwindigkeiten ausprobiert. Das PETG-Filament wurde mit Geschwindigkeiten von 2000 mm/min bis 3000 mm/min und das TPU mit 800-2600 mm/min verarbeitet. Hier konnte festgestellt werden, dass eine langsamere Druckgeschwindigkeit für die Fertigung der teilweise sehr feinen Strukturen von Vorteil ist. Daher wurden als Geschwindigkeiten 800 mm/min für das TPU und 2000 mm/min für das PETG ausgewählt.

Während der Herstellung der Proben konnten trotz der überprüften Parameter Unterschiede in der Qualität festgestellt werden. Diese beziehen sich hauptsächlich auf die Breite der Schichtlinien, welche in einigen Fällen dünner als festgelegt vorlagen. Gegen dieses Fehlerbild konnte jedoch durch neues Kalibrieren der Düsenhöhe erfolgreich vorgegangen werden. Dies war zudem häufiger notwendig, da die Düsen nach dem Druck stark verschmutzt waren. Durch den Reinigungsvorgang haben sich die Abstände zur Druckplattform verändert.

Hinzu kommt, dass sich die beiden Düsen durch den gemeinsamen Druckkopf immer gleichzeitig bewegen. Dies ist auch der Fall, wenn eine der Düsen nicht in Benutzung ist. Demnach fährt die Düse des anderen Materials über das gedruckte Objekt und verschmiert dieses mit überschüssiger Schmelze. Diese Beeinträchtigung konnte durch das *Tool Change Script* bereits verbessert werden, allerdings ist das Problem nicht vollständig behoben. Außerdem führt dieses Script zu einer wesentlichen Verlängerung der Druckzeit, da der Druckkopf bei jedem Materialwechsel zur Seite fährt und die eine Düse aufheizt, während die andere abkühlt.

Des Weiteren ist bei der Betrachtung der Druckergebnisse aufgefallen, dass das TPU zum sogenannten *Stringing* neigt, welches sich durch feine Materialfäden zwischen Bauteilen oder Leerräumen bemerkbar macht (siehe Abb. 4.2). Abhängig von der Probengeometrie war dieses mehr oder weniger ausgeprägt sichtbar.

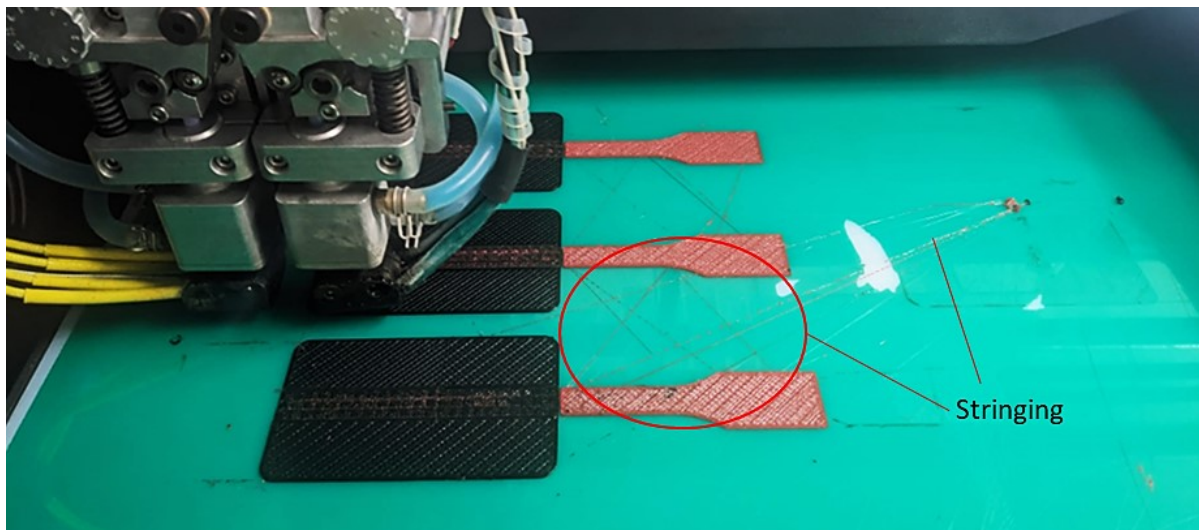


Abb. 4.2 Schälversuchproben im Fertigungsprozess. Darstellung des Stringings.

Einige Schälproben wurden sowohl mit einer Schichthöhe von 0,1 mm als auch einer in 0,3 mm gefertigt. Bis auf die klar erkennbaren Schichten bei der 0,3 mm Schichthöhe konnten keine qualitativen Unterschiede beobachtet werden. Unter Berücksichtigung der Druckzeit für eine Probe (0,1 mm: 03:06 h; 0,3 mm: 01:24 h) ohne Beachtung der mechanischen Eigenschaften zeigten beide Druckversionen gute Druckbilder.

4.2 Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeitsprüfung am Kurzbalken beschrieben. Dabei wurden alle vorgestellten Konfigurationen mit jeweils fünf Proben untersucht. In Abb. 4.3 sind die Ergebnisse der Analyse dargestellt. In dem Diagramm ist die Verformung der Struktur in Millimeter gegen die Standardkraft in Newton aufgetragen. Des Weiteren sind die verschiedenen Konfigurationen farblich angegeben.

Es ist für jede der vier Probenarten ein ähnlicher Verlauf der Kurve erkennbar. Auffällig ist, dass mit ansteigender Verformung und Kraft die Standardabweichungen höher werden. Zu Beginn der Prüfung steigt die Kraft bis zu einer Verformung von etwa 0,2 mm kaum an. Anschließend ist ein linearer Anstieg der Kurven erkennbar. Für die Konfigurationen der Proben Gitter und Glatt sind im Vergleich zu der Pilz- und Turmkonfiguration höhere Kräfte bei gleicher Verformung ersichtlich. Nachfolgend ist ein Abflachen der Kurven zu beobachten, wobei bis zur Beendigung der Prüfung ein geringer Kraftanstieg zu verzeichnen ist. Der Verlauf der Ergebniskurven ähnelt einem zähhaften bis elastischen Kunststoff.

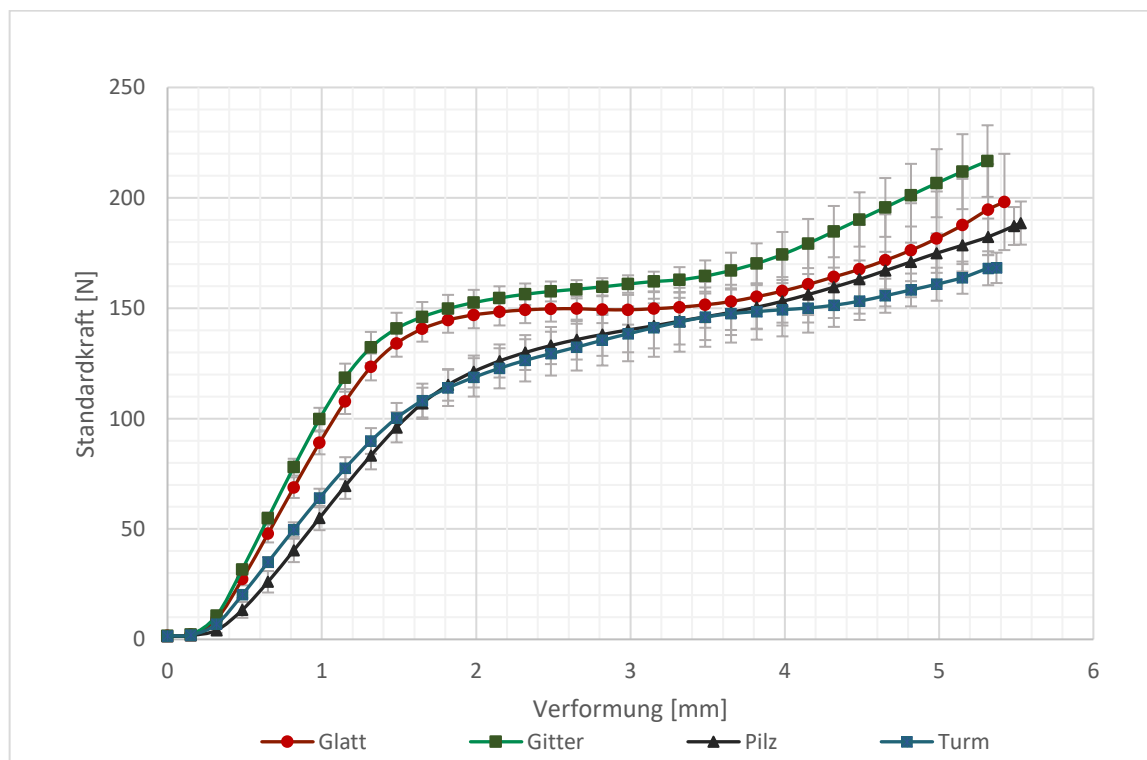


Abb. 4.3 Ergebnisse der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeitsprüfung.

Da alle Proben durch Zug bzw. Scherung versagt haben, ist ein Vergleich der Ergebnisse nur innerhalb einer Versuchsreihe mit den gleichen Werkstoffen zulässig. Die Berechnung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit ist aufgrund der nicht akzeptierten Versagensarten nur als Übersichtswert anzusehen. Die nach Formel (1) berechneten Resultate sind in Tab. 4.1 zu sehen. Hierbei kann festgestellt werden, dass die Gitterstruktur den höchsten Wert bei einer,

in Relation zu den anderen Proben, geringen Standardabweichung aufweist. Allgemein liegt die Scherfestigkeit aller Konfigurationen nah beieinander. Außerdem ist der Volumenanteil des PETGs angeben. Dieser korreliert mit den Kraftwerten des Diagramms.

Tab. 4.1 Berechnete scheinbare interlaminare Scherfestigkeit - Übersichtswerte. Volumenanteil PETG.

Konfiguration	Scherfestigkeit τ	Standardabweichung	Volumenanteil PETG
Glatt	3,54 N/mm ²	0,520	900 mm ³
Gitter	3,90 N/mm ²	0,366	900 mm ³
Pilz	3,07 N/mm ²	0,617	817 mm ³
Turm	3,13 N/mm ²	0,244	859 mm ³

4.3 Schälversuch nach VDI 2019

Für den Schälversuch nach VDI 2019 wurden jeweils fünf Proben der jeweiligen Konfiguration untersucht. Aufgezeichnet wurden Kraft-Weg-Diagramme. Wie bei [Heu-20] liegt der Auswertebereich der Messkurven zwischen 15 und 75 mm. Die anfänglichen 15 mm sowie die letzten werden nicht berücksichtigt. In Abb. 4.4 ist ein Beispieldiagramm der glatten Referenzproben mit dem genutzten Messbereich dargestellt. Die weiteren Schälkurven finden sich in Anhang II.

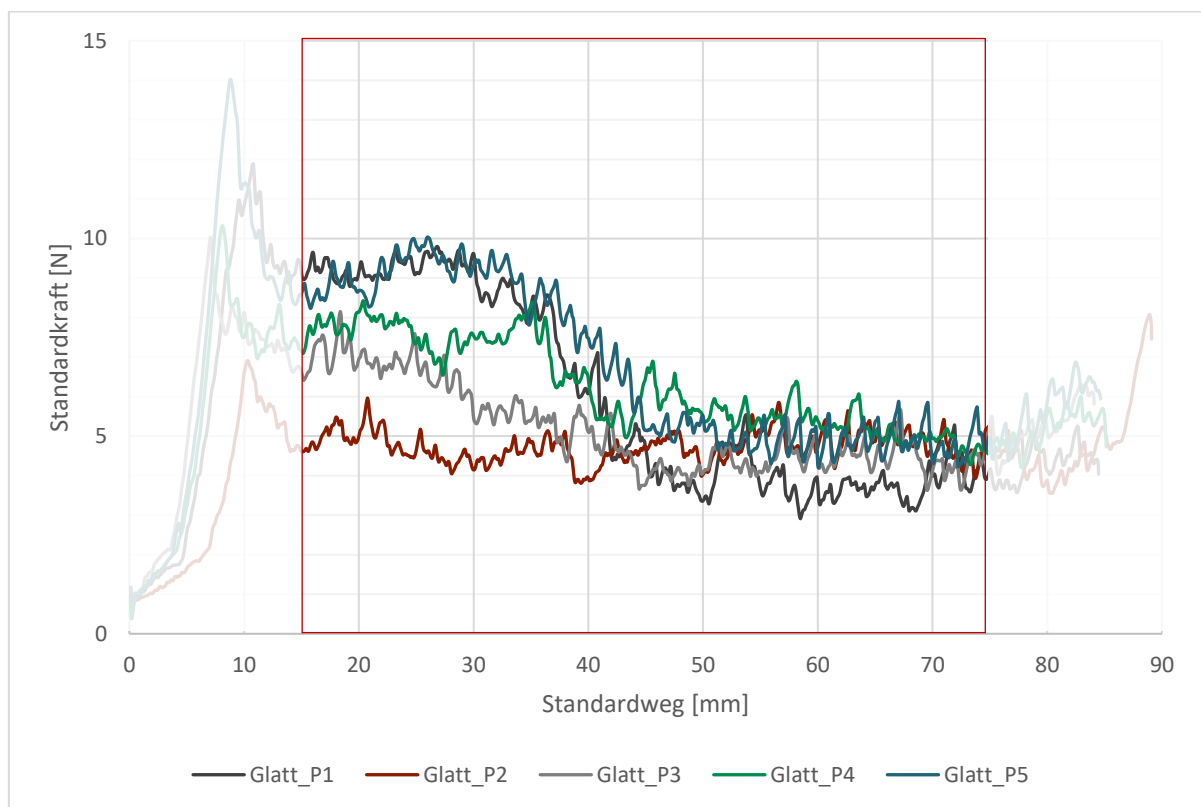


Abb. 4.4 Schälkurven Glatt P1-P5.

Es ist zu erkennen, dass die Kraft zu Beginn der Prüfung bei allen Strukturen stark ansteigt. Bei den Turm- und Gitterproben bleibt diese in etwa auf dem Kraftplateau. Im Gegensatz dazu sinkt die Kraft nach den ersten 10 mm Weglänge bei der glatten und pilzförmigen Konfiguration. Allgemein ist bei allen Proben ein Zickzack-Verlauf der Kurven mit steigenden und sinkenden Kraftwerten zu beobachten, welcher gerade bei der Turm- und Gitterkonfiguration ausgeprägt dargestellt ist.

Die Auswertung der Prüfung erfolgt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie und beinhaltet sowohl die Berechnung des Schälwiderstandes nach Formel (2) als auch die Betrachtung des Bruchbildes (siehe Abb. 3.10). Letztgenannter Punkt ist in Tab. 4.2 aufgezeigt. Die Probenfotos der Analyse sind in Anhang III einzusehen.

Tab. 4.2 *Bruchbilder der geprüften Proben nach VDI 2019.*

Konfiguration	Bruchbild nach VDI 2019				
	P1	P2	P3	P4	P5
Glatt	A	A	A	A	A
Gitter	B/E	B/E	B/E	E	E
Pilz	A	A	A	A	A
Turm	B	C	B	C	E

Es ist bei der Begutachtung der Proben zu erkennen, dass es zwischen den Konfigurationen zu unterschiedlichen Bruchbildern gekommen ist. Bei den glatten Referenzproben sind 0 % Rückstände des TPUs auf dem Substrat zu sehen. Es erfolgte bei diesen Proben ein vollständiges Abschälen. Bei der Gitterstruktur konnten 1-50 % Rückstände beobachtet werden. Die Kopplung zwischen den Materialien war in diesem Fall so hoch, dass das Substrat aus PETG versagt hat (Zuordnung E). Die Proben sind neben dem Bruch des Substrats an den PETG-Querstreben gebrochen. Die beobachtete Schwachstelle ist in Abb. 4.5 eingezeichnet. Die Fläche der Bruchstelle beträgt $2 \times 6,25 \text{ mm}^2$ pro Reihe. Auf den Proben der pilzförmigen Konfiguration konnten keine Rückstände des TPUs festgestellt werden. Hier ist in der Übergangszone das PETG gebrochen (Abb. 4.5). Die Fläche beträgt $2 \times 3,08 \text{ mm}^2$ pro Reihe. Das Substrat blieb allerdings unbeschädigt. Die Turmstruktur zeigte im Vergleich die unterschiedlichsten Bruchbilder. Von 1-50 % Rückstand bis zu 51-99 % Rückstand sowie einem Bruch der Probe konnten erkannt werden. Bei dieser Probenart konnten deutliche Abweichungen in der Druckqualität beobachtet werden. Auch in dieser Prüfreihe ist das PETG-Substrat in der Übergangszone gebrochen (siehe Abb. 4.5). Die Bruchfläche pro Reihe liegt bei $3 \times 4 \text{ mm}^2$. Die berechneten Flächen der Schwachstellen sind in Tab. 4.3 zu sehen.

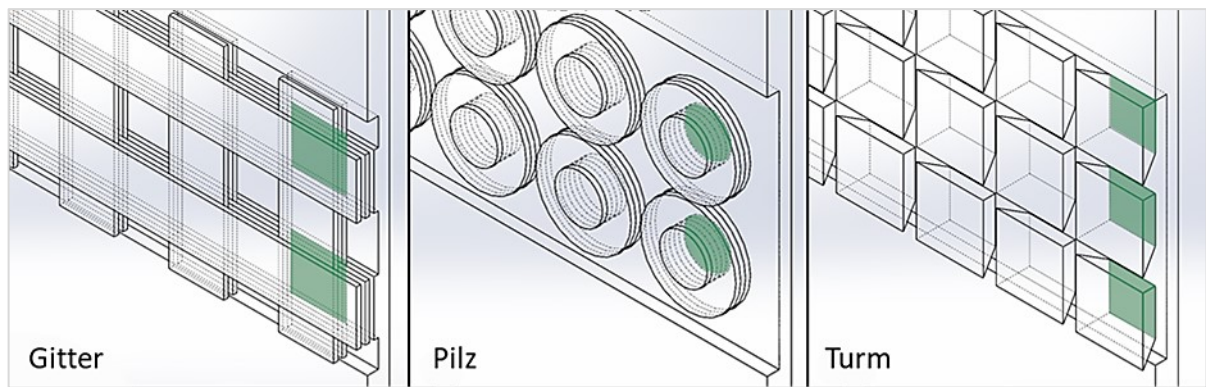


Abb. 4.5 Bruchstellen der untersuchten Konfigurationen.

Die Auswertungen der additiv gefertigten Schälproben haben zu verschiedenen Resultaten geführt. Der in diesem Schritt berechnete mittlere Schälwiderstand der vier Strukturen ist in Abb. 4.6 aufgezeigt.

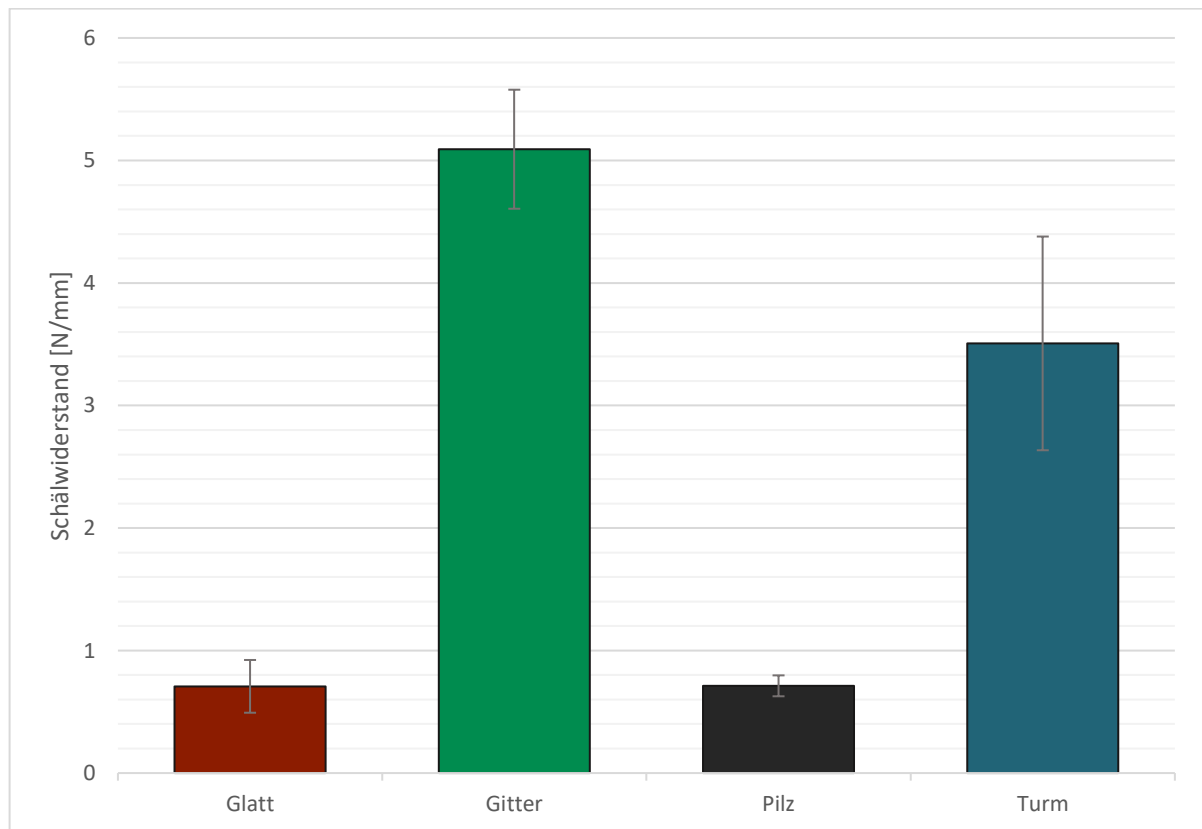


Abb. 4.6 Vergleich der Schälwiderstände verschiedener Konfigurationen (Auswertebereich: 15-75 mm).

Es ist zu erkennen, dass die Gitterprobe den höchsten Schälwiderstand mit einem Wert von 5,09 N/mm zeigt. Danach folgt die Turmkonfiguration mit einem Widerstand von 3,51 N/mm. Die geringsten Werte zeigen die glatten und pilzförmigen Proben. Erstgenannte kommt auf 0,70 N/mm und letztgenannte auf 0,71 N/mm. Interessant ist bei dieser Betrachtung die Standardabweichung. Diese liegt bei der Turmstruktur mit 0,87 N/mm am höchsten.

Anschließend folgen die Gitterproben mit einer Abweichung von 0,49 N/mm. Auch hier zeigen die glatte und pilzförmige Konfiguration die geringsten Werte. Die Pilzstruktur weist eine Standardabweichung von 0,09 N/mm und die glatten Proben eine von 0,22 N/mm auf. Die Ergebnisse der Schälwiderstandsberechnung decken sich mit denen der Betrachtung der Bruchbilder. Gerade im Hinblick auf die Turmstruktur ist die hohe Standardabweichung übereinstimmend mit den beobachteten Versagenszuordnungen. Zum Vergleich und zur Einordnung der Ergebnisse wurden für die Konfigurationen die Größe der Grenzfläche zwischen PETG und TPU, der Volumenanteil des PETGs und die Fläche der Schwachstelle berechnet. Diese sind in Tab. 4.3 zu sehen. Die glatte Struktur weist die geringste und die Gitterstruktur die höchste Fläche auf. Nach Letztgenannter folgen nach Größe sortiert die Pilz- und danach die Turmkonfiguration. Die Sortierung nach dem Volumenanteil des PETGs in der Übergangszone unterscheidet sich von den Größen der Grenzflächen. Die Turmkonfiguration besitzt den höchsten Anteil, dicht gefolgt von der Gitterstruktur. Die Pilzproben haben mit 244 mm³ etwa die Hälfte des Anteils der beiden anderen Konfigurationen. Die glatte Referenz besitzt keine zusätzliche PETG-Komponente und erreicht somit einen Volumenanteil von 0 mm³ in der Übergangszone.

Tab. 4.3 *Größe der Grenzflächen, Volumenanteil PETG und Fläche der Schwachstellen für die verschiedenen Konfigurationen.*

Konfiguration	Größe der Grenzfläche	Volumenanteil PETG in Übergangszone	Fläche der Schwachstelle
Glatt	800 mm ²	0 mm ³	0 mm ²
Gitter	2784 mm ²	400 mm ³	12,5 mm ²
Pilz	2524 mm ²	244 mm ³	6,15 mm ²
Turm	2013 mm ²	424 mm ³	12 mm ²

4.3.1 Untersuchung verschiedener Gittervariationen

Ausgehend von den vorherigen Resultaten wurde die Gitterstruktur für weitere Versuchsreihen ausgewählt. Nachfolgend wurde die Schälprüfung mit verschiedenen Versionen der Gitterkonfiguration (siehe Abb. 3.4) erneut durchgeführt.

Bei den Ergebnissen der zweiten Schälprüfung ist auffällig, dass alle Proben das Bruchbild E aufweisen. Demnach sind alle Probesubstrate während der Analyse zerstört worden. Der erste Bruch des Substrates erfolgte während der ersten 16 mm der Prüfung. Demnach liegt in dieser Versuchsgruppe der Auswertungsbereich für den Schälwiderstand zwischen 5 und 16 mm. Die ersten 5 mm werden durch etwaige Unregelmäßigkeiten zu Beginn der Prüfung vernachlässigt. Die Schälkurven dieses Versuches sind in Anhang IV und die errechneten Schälwiderstände in Abb. 4.7 zu sehen. Für den Vergleich innerhalb des genannten Messbereichs sind die Konfigurationen Glatt, Pilz und Turm ebenfalls aufgezeigt.

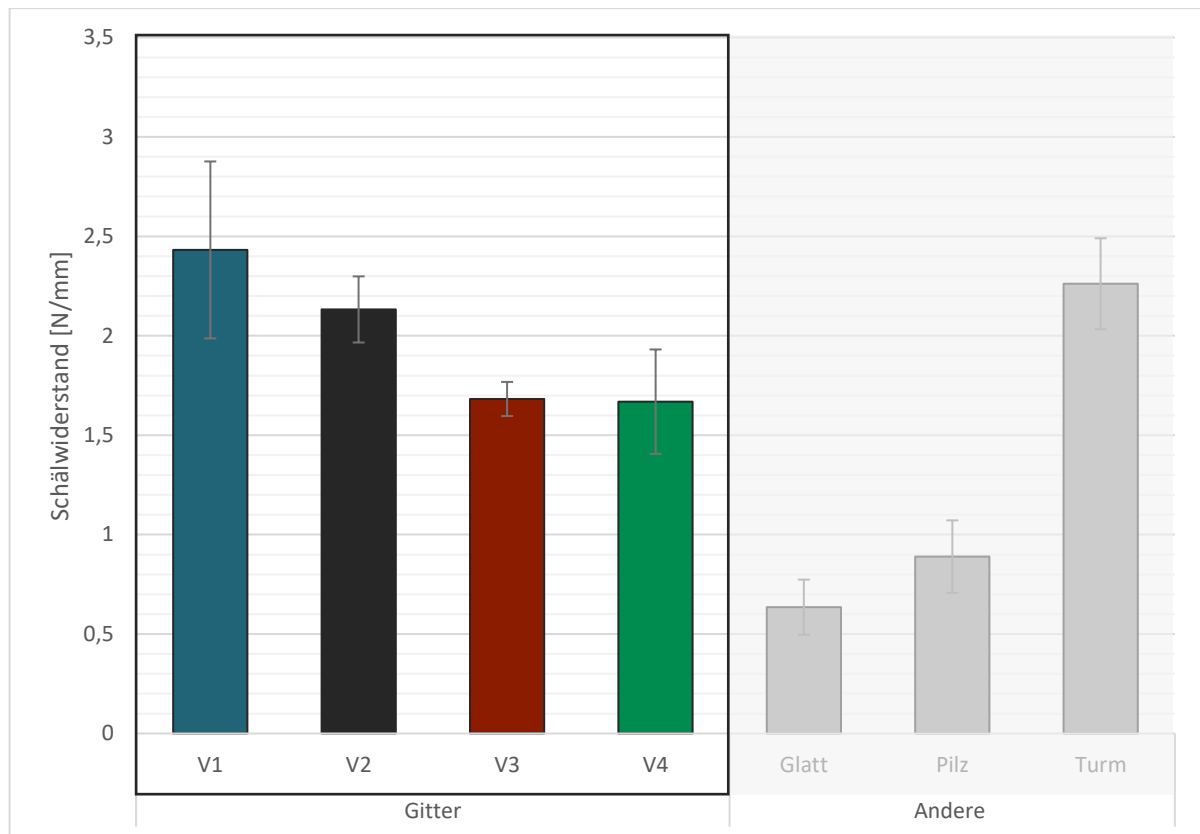


Abb. 4.7 Vergleich der Schälwiderstände verschiedener Gittervariationen (Auswertebereich: 5-16 mm).

Die Ergebnisse der ersten Version mit einer gedruckten Schichthöhe von 0,1 mm wurden bereits beschrieben. Hier erfolgte an fünf von fünf Proben ein Bruch. Neben des Substratbruches sind 1-50 % TPU-Rückstand an drei Proben sichtbar. Bei den anderen Testkörpern konnte keine Ablösung festgestellt werden.

Die Schälkurve spiegelt das beschriebene Ergebnis wider. Die ersten Brüche konnten ab 10 mm Standardweg mit einem Abfall der Standardkraft beobachtet werden. Anschließend stieg die Kraft kurzzeitig bis zum nächsten Bruch an. In den ersten 20 mm wurde eine maximale Standardkraft von 60 N erreicht. Beim Vergleich der mittleren Schälwiderstände im Auswertebereich von 5-16 mm zeigen die Proben der Version 1 einen höheren Wert. Dieser liegt bei etwa 2,4 N/mm.

Version 2 der Gittervarianten wurde ebenfalls mit einer Schichthöhe von 0,1 mm gedruckt. Bei der Versuchsreihe sind alle Proben gebrochen und zeigen ein ähnliches Bruchbild zu der Zuordnung E (siehe beispielhaft Abb. 4.8.). Einige der untersuchten Proben weisen nahezu kein Ablöseverhalten vom Substrat auf, wodurch dieses gebrochen ist (Abb. 4.8, links). Die gleichartigen Ergebnisse der visuellen Betrachtung decken sich bei dieser Variante mit den berechneten Schälwiderständen. Bei einer verdrukten Schichthöhe von 0,1 mm erreichen die Proben einen Widerstand von etwa 2,1 N/mm.

Der Unterschied zwischen V1 und V2 wird in diesem Fall bei der Begutachtung der Standardabweichung deutlich. Diese ist für die erste Version etwa 2,5-fach größer.



Abb. 4.8 Bruchbild Gitter: Version 2-0,1 mm Schichthöhe.

Version 3 wurde mit grober Gitterstruktur konstruiert und hergestellt. Auch bei dieser Prüfung sind die Probensubstrate gebrochen und weisen das Bruchbild E auf. An den Kontaktflächen sind nur geringe Rückstände des TPUs sichtbar (siehe Abb. 4.9.).

Der mittlere Schälwiderstand liegt bei dieser Probenart bei 1,7 N/mm und ist damit geringer als bei den zuvor beschriebenen Versionen. Bei Betrachtung der Schälkurve fällt auf, dass alle Probenkurven zu Beginn der Untersuchung einen ähnlichen Verlauf zeigen. Diese Beobachtung deckt sich mit der berechneten und gering ausfallenden Standardabweichung. Der erste Bruch ist in der Kurve nach etwa 14 mm wahrzunehmen. An dieser Stelle ist die erste Querverbindung aus PETG vom Substrat abgerissen. Wie in Abb. 4.9 zu sehen, ist die obere Längsstrebe aus PETG in der TPU-Komponente eingebettet. An den glatten Auflageflächen aus thermoplastischem Polyurethan und PETG sind keine Oberflächenfehler erkennbar.



Abb. 4.9 Bruchbild Gitter: Version 3-0,1 mm Schichthöhe.

Die vierte Version der Gitterstruktur ähnelt Version 3 mit dem Unterschied, dass die Gitterelemente eine Höhe von 0,33 mm besitzen. Bei der Analyse der Bruchbilder sind analoge Resultate zu beobachten. Auch bei der letzten Versionsart zeigen alle Proben ein Bruchbild mit der Zuordnung E. Im Vergleich zu Variante 3 sind mehr Rückstände des elastischen Materials zu sehen. Außerdem hat sich unter der oberen PETG-Längsverbinding eine Lasche gebildet, in der das TPU haftet. An diesen Stellen sind einzelne Fäden des thermoplastischen Polyurethans ausgerissen. Nachfolgend ist noch zu erwähnen, dass das Druckbild der V4-Proben minderwertiger aussieht als bei den anderen drei Versionen.

Der mittlere Schälwiderstand entspricht dem Wert der dritten Variante und liegt damit auch bei etwa 1,7 N/mm. Auch die Schälkurven zeigen zu Beginn ähnliche Verläufe. Allerdings ist die Standardabweichung für V4 deutlich größer und es sind neben dem Zickzack-Verlauf wellige Bereiche erkennbar, welche gleichartig zur glatten Konfiguration sind.

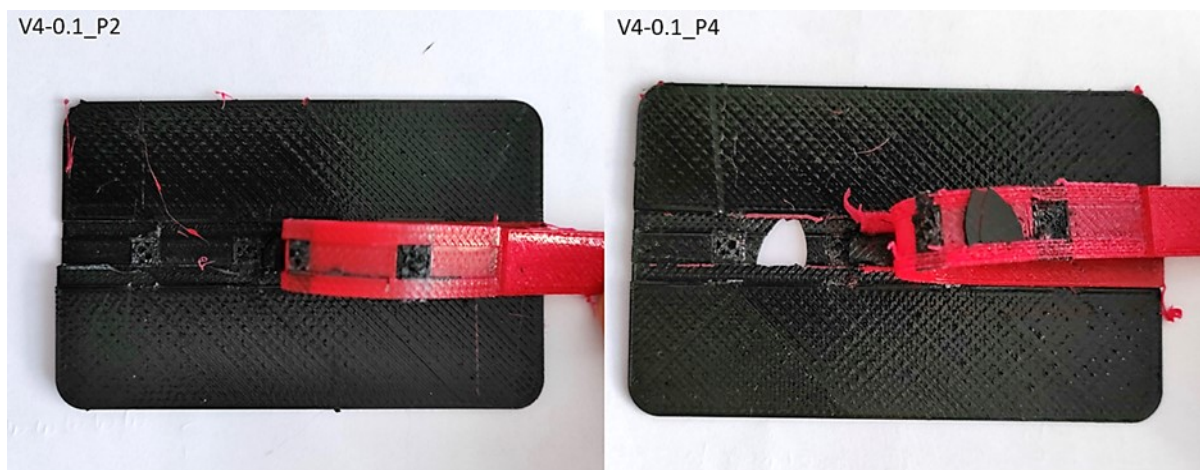


Abb. 4.10 Bruchbild Gitter: Version 4-0,1 mm Schichthöhe.

Im Vergleich zu den Konfigurationen Glatt sowie Pilz sind die Werte des Schälwiderstands von allen Gitterversionen höher. Die Ergebnisse aus dem Auswertebereich von 5-16 mm spiegeln die aus dem Bereich 15-75 mm wider. Hinzu kommt, dass die Proben mit glatter und pilzförmiger Konfiguration keinen Substratbruch aufzeigen sowie keine TPU-Rückstände vorhanden sind. Die Widerstandswerte der Testkörper mit Turmstruktur liegen bei 2,3 N/mm und sind damit etwa gleichwertig zur Version 1 der Gitterstruktur. Die Schälwiderstände der anderen Gitterversionen sind niedriger.

In Tab. 4.4 sind die Größen der Grenzflächen für die verschiedenen Versionen sowie der Volumenanteil des PETGs dargestellt. V1 besitzt die größte Oberfläche an der Grenzschicht mit einem Wert von 2784 mm². Danach folgt die dritte Version mit 2600 mm². Version 2 und Version 4 weisen die geringsten Flächengrößen auf mit 1989 mm² (V2) und 1807 mm² (V4). Die Sortierung des Volumenanteils des PETGs in der Übergangszone korreliert mit der Größe der Grenzfläche. Die genauen Werte sind in Tab. 4.4 einzusehen.

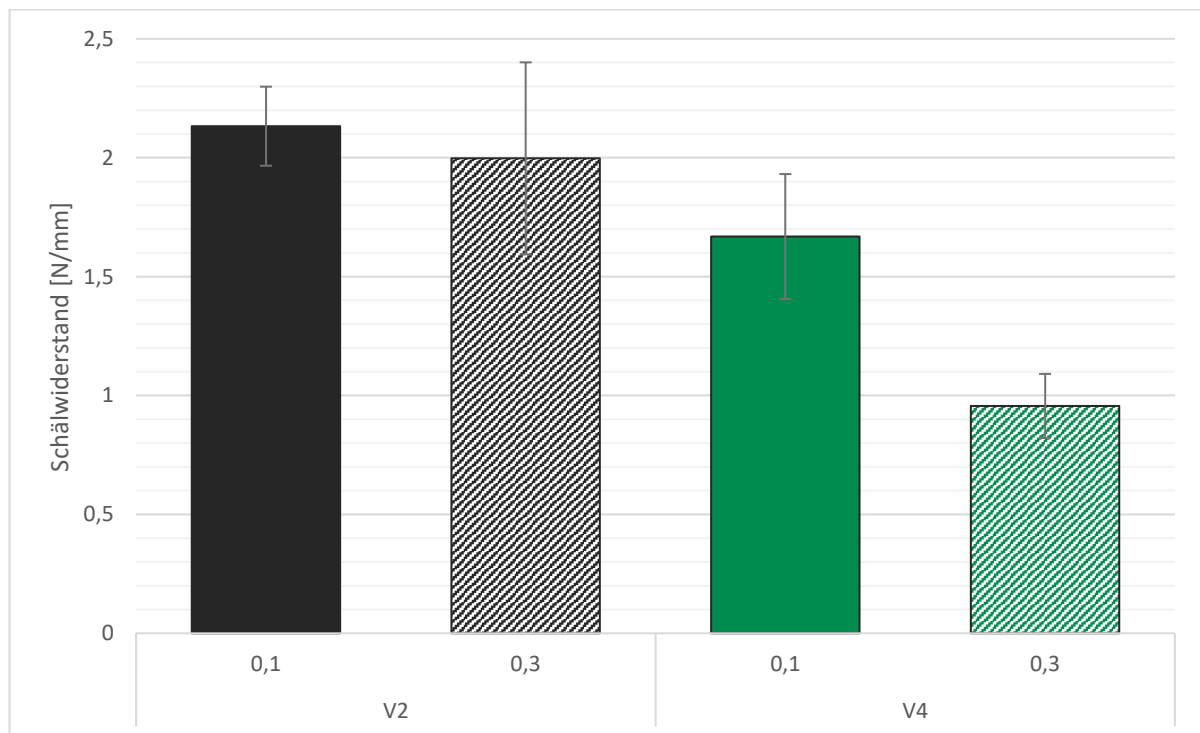
Tab. 4.4 Größe der Grenzflächen und Volumenanteil PETG für die verschiedenen Gittervariationen.

Gitterversion	Größe der Grenzfläche	Volumenanteil PETG in Übergangszone
V1	2784 mm ²	400 mm ³
V2	1989 mm ²	360 mm ³
V3	2600 mm ²	320 mm ³
V4	1807 mm ²	300 mm ³

4.3.2 Untersuchung des Schichthöheneinflusses

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden die Gitterversionen 2 und 4 mit einer Schichthöhe von 0,3 mm gefertigt, um den Einfluss dieses Druckparameters auf die Haftung zu untersuchen. Für die anderen Varianten ist eine Analyse konstruktiv nicht möglich, da 0,2 mm hohe Gitterschichten nicht mit 0,3 mm Schichthöhe gedruckt werden können. Die Schälkurven dieser Probenreihe sind ebenfalls in Anhang IV abgebildet.

Die mittleren Schälwiderstände der verschiedenen Proben sind in Abb. 4.11 zu sehen.

**Abb. 4.11** Vergleich der Schälwiderstände verschiedener Gittervariationen in Abhängigkeit von der verdruckten Schichthöhe (Auswertebereich: 5-16 mm).

Es ist erkennbar, dass die mit 0,3 mm Schichthöhe gedruckten Testkörper einen geringeren Wert aufweisen als die mit jeweils 0,1 mm gefertigten Strukturen. Der Widerstand von Variante 2 mit 0,3 mm Schichthöhe ist mit 2,0 N/mm trotzdem höher als von beiden V4-

Versionen. Die geringste Haftkraft pro Millimeter erreicht Version 4 in 0,3 mm Höhe mit einem Wert von ca. 1 N/mm. Im Vergleich der beiden vierten Varianten ist der Unterschied der Ergebnisse am deutlichsten sichtbar.

Die Bruchbilder der 0,3 mm Versionen sind ähnlich zu den zuvor beschriebenen 0,1 mm Varianten. In Abb. 4.12 sind beispielhaft zwei Proben aus der Versuchsreihe mit Version 2 dargestellt. Alle Testkörper sind am Substrat gebrochen und weisen das nach VDI 2019 festgelegte Bruchbild E auf. Wie zu sehen ist, ist der TPU-Teil der Proben intakt. Das Versagen der Probe begrenzt sich auf den PETG-Bereich. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die beiden Komponenten trotz Bruch aneinanderhaften. Die Auflagefläche ist frei von TPU-Rückständen.



Abb. 4.12 Bruchbild Gitter: Version 2-0,3 mm Schichthöhe.

Der Unterschied zwischen den beiden Schichthöhenversionen von V3 wird in diesem Fall bei der Begutachtung der Standardabweichung deutlich. Diese ist bei der 0,3 mm-Struktur mehr als doppelt so groß im Vergleich zu der anderen Probe. Hinzu kommt, dass die Verläufe der Schälkurven voneinander abweichen, sodass sichtbar wird, dass die 0,1 mm-Proben zu einem späteren Zeitpunkt als die 0,3 mm Testobjekte gebrochen sind (siehe Anhang). Durch den Kraftabfall während des Bruchs sinkt der Wert des mittleren Schälwiderstands für die mit höherer Schichthöhe gefertigten Proben.

Die Proben der Version 4 sind ebenfalls alle am Substrat gebrochen. In Abb. 4.13 sind die Bruchbilder zweier Testobjekte zu sehen. Wie zu erkennen ist, ähneln diese der 0,1 mm-Probenreihe nur bedingt. Im rechten Teil der Abbildung ist zu beobachten, dass die an den Längsstreben befindlichen PETG-Gitterstrukturen am Übergang zu den Querstreben abgerissen sind. Die Reste dieser sind in den TPU-Teil eingebettet. Bei der linken Probenabbildung haften Stücke des Substrats an der weichen Komponente. An dieser Probe ist ein Ausfransen der einzelnen Lagen sichtbar.

Neben der pilzförmigen und glatten Konfiguration wurden mit der vierten Version in 0,3 mm Schichthöhe die geringsten Schälwiderstände erreicht.

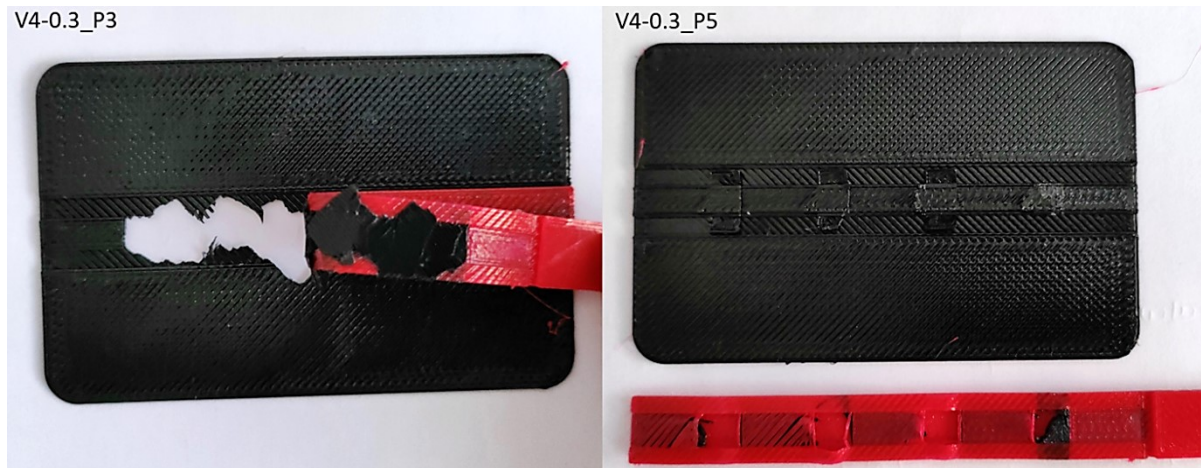


Abb. 4.13 Bruchbild Gitter: Version 4-0,3 mm Schichthöhe.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist zu bedenken, dass sich die Druckqualität einzelner Proben von anderen unterscheidet. Außerdem sind etwaige Einflüsse durch das Materialverhalten des TPUs und PETGs nicht mit einbezogen.

4.4 Visuelle Strukturbetrachtung der Orthese

Nach der Optimierung der Druckparameter, der Prüfung der verschiedenen Konfigurationen sowie der Konstruktion der Orthese wurde diese mittels des FLM-Druckers x500 gefertigt. In Abb. 4.14 ist die erste hergestellte Orthese mit der Bezeichnung A zu sehen. Diese wurde in weiteren Versuchen optimiert.



Abb. 4.14 Mittels FLM gefertigte Orthese A. Schichthöhe: 0,3 mm. Rot: TPU; Schwarz: PETG.

Diese Orthese wurde mit einer Schichthöhe von 0,3 mm gedruckt, um für die ersten Versuche Zeit und Material einzusparen. Wie in der Konstruktionsabbildung (Abb. 3.13) sind die wabenförmigen Luftlöcher, die Verrundungen sowie die PETG- und TPU-Komponente bei der gedruckten Orthese zu sehen. Die Orthese wurde vollständig gedruckt. Allerdings ist zu erkennen, dass im Bereich des Fußgewölbes keine deckende TPU-Schicht vorliegt (siehe Abb. 4.15 A2). Die abgelegten Extrusionslinien haben teilweise keinen Kontakt zueinander, sodass Lücken im Druckbild vorhanden sind. Die Detailansicht A3 zeigt die Deckschicht der TPU-Komponente im Vorderfußbereich. Hier ist der Bereich zwar deckend, jedoch sind in das weiche Material PETG-Reste eingebettet. Diese sind sowohl sichtbar als auch fühlbar. Teilabbildung A4 aus Abb. 4.15 beinhaltet eine Detailaufnahme des Abrollmechanismus. Die feinen Strukturen wurden problemlos gedruckt. In A5 der gleichen Abbildung ist der Fußgewölbeteil an der Außenseite zu sehen. Hier befanden sich Stützstrukturen, welche mechanisch entfernt wurden. Demnach ist die Druckoberfläche an dieser Stelle von geringerer Qualität als an anderen. Der sogenannte Treppeneffekt ist klar erkennbar. Außerdem sind einzelne TPU-Reste zu beobachten.

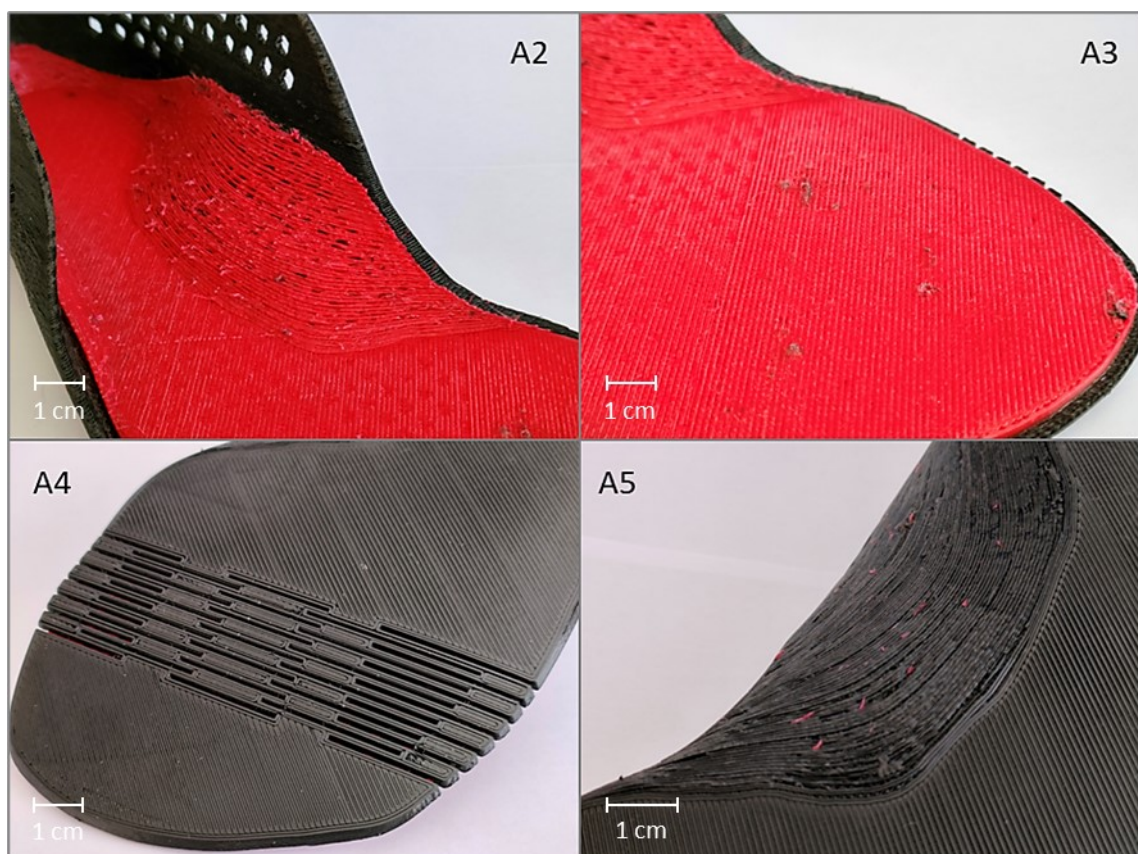


Abb. 4.15 Detailansichten der mittels FLM gefertigten Orthese A.

Während der visuellen Betrachtung und der ersten Anprobe der Orthese ist aufgefallen, dass die Unterseite aus PETG sehr rutschig ist. Daher wurde in den nachfolgend gefertigten Strukturen auf die Sohlenseite eine dünne TPU-Schicht gedruckt.

Eine mit TPU-Unterseite gedruckte Orthese ist in Abb. 4.16 zu sehen. Diese ist im Vergleich zu Orthese A im Knöchelbereich höher und hat kleinere wabenförmige Luftlöcher.



Abb. 4.16 Mittels FLM gefertigte Orthese B. Schichthöhe: 0,3 mm. Rot: TPU; Schwarz: PETG.

Die zweite Orthese wurde ebenfalls mit einer Schichthöhe von 0,3 mm vollständig gedruckt. In den Detailansichten in Abb. 4.17 sind jedoch einige Modellfehler zu erkennen.

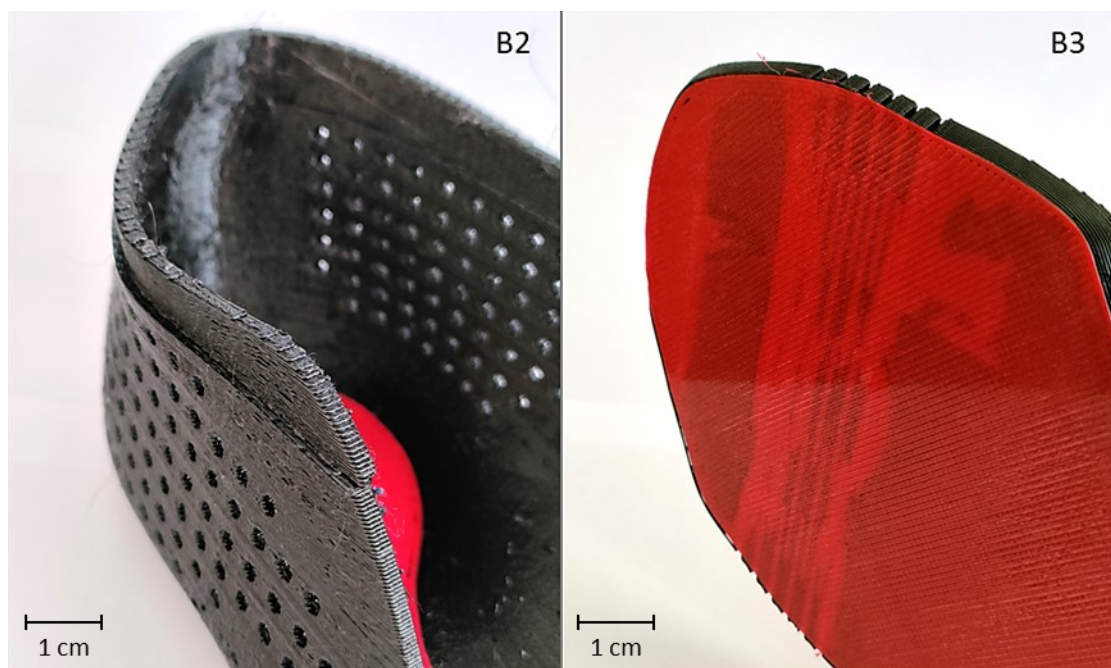


Abb. 4.17 Detailansichten der mittels FLM gefertigten Orthese B.

Zum einen sind die obersten Schichten verschoben und zum anderen ist die Haftung zwischen der glatt aufeinander gedruckten TPU-Unterseite und der PETG-Trägerschicht ungenügend. Bei der Biegung des Abrollmechanismus löst sich die elastische Sohle von der Orthese ab. Darüber hinaus besteht die Problematik der eingebetteten PETG-Reste in der TPU-Schicht. Die fehlende Schichthaftung am Fußgewölbe liegt hier nicht vor, da dieser Teil konstruktiv entfernt wurde.

Orthese B ist durch die Höhe und das minimalistische Sohlendesign im Tragekomfort geringer als Version A, sodass die Version A für weitere Versuche ausgewählt wurde. Bei Version A wurde die Kopplung der TPU-Unterseite ebenfalls mittels Gitterkonfiguration verbessert.

Nachfolgend ist eine nicht vollständig gedruckte Orthese (Version C) dargestellt, welche konstruktiv Version A nachempfunden ist.

Im linken Bild der Abb. 4.18 ist die Orthese während des Druckprozesses zu sehen. Dort können die Gitterstruktur sowie die Stützstrukturen betrachtet werden. Außerdem ist am unteren Rand der *Prime Pillar* zu erkennen. Neben einigen Fäden, welche auf *Stringing* hinweisen, ist die optische Qualität der Orthese zufriedenstellend. Der Druck wurde jedoch vorzeitig vom Drucker beendet, sodass diese Orthese nicht vollständig gefertigt wurde. In der rechten Detailansicht ist dennoch zu sehen, dass die TPU-Unterseite durch die Gitterverbindung besser am PETG-Substrat haftet.

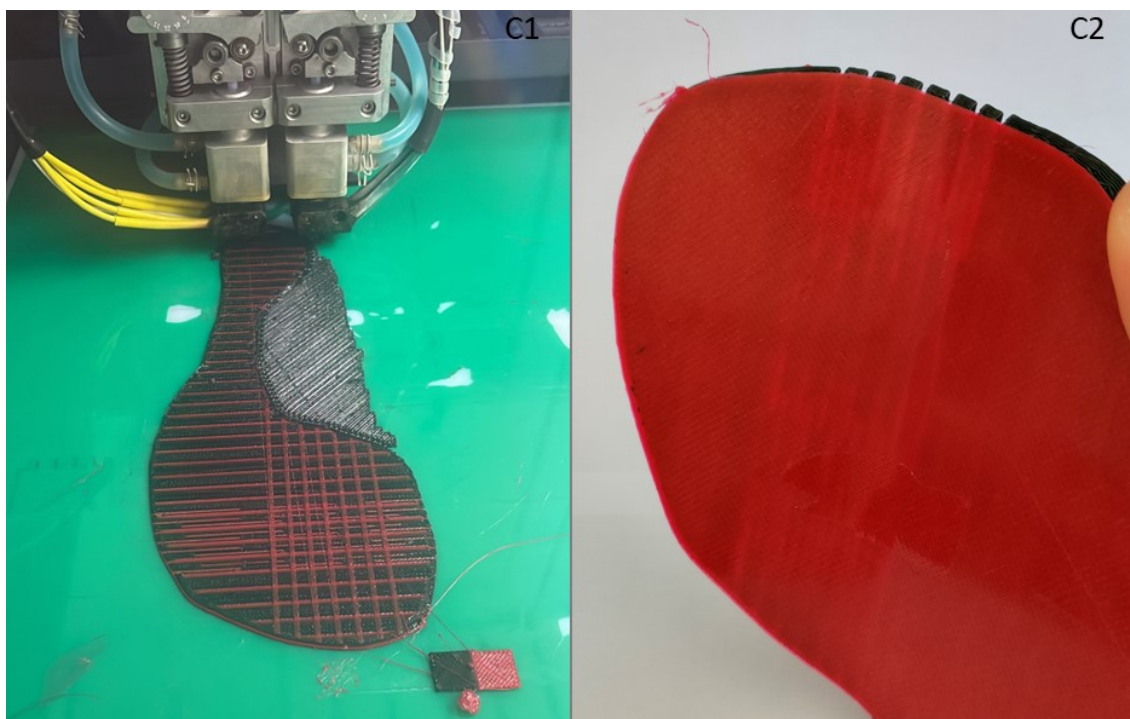


Abb. 4.18 Orthese Version C im Fertigungsprozess sowie Detailansicht der Unterseite.

Schlussendlich wurde eine finale Orthese (D) mit den Zusätzen des *Prime Pillars* und einem *Ooze Shield* gedruckt. Dadurch sollten die bisherigen Probleme verhindert werden. Die Haftung

der Zusätze auf dem Druckbett wurde mit einem *Brim* verbessert. Die Orthese während des Fertigungsprozesses und die finale Struktur sind in Abb. 4.19 zu sehen.

Es ist im Bildteil D1 zu erkennen, dass sich das *Ooze Shield* und der *Prime Pillar* trotz *Brim* vom Druckbett abgelöst haben. Die Orthese wurde dennoch vollständig gedruckt. Die in Ausschnitt D2 dargestellte Orthese weist weniger Materialeinschlüsse des PETGs im TPU-Fußbett auf. Durch das *Ooze Shield* konnte dieses Problem demnach nicht vollständig behoben werden. Die fehlende Schichthaftung am Fußgewölbe liegt hier ebenso in geringerem Ausmaß vor. Die Schichten wurden vollständig gedruckt. *Stringing* lag trotz angepasster Rückzugseinstellungen und das Fadenziehen weniger ausgeprägt vor.



Abb. 4.19 Orthese Version D im Fertigungsprozess und fertige Struktur.

In Abb. 4.20 ist die zuvor beschriebene Orthese D sowohl im unbearbeiteten Zustand nach dem Druck als auch nach der Bearbeitung durch Schleifpapier zu sehen. Unbearbeitet sind die einzelnen Schichten eindeutig zu erkennen. Nach der Bearbeitung sind die Schichten nur vereinzelt zu sehen. Die optische Qualität hat sich merklich verbessert. Hinzu kommt, dass der Tragekomfort erhöht wurde.



Abb. 4.20 Orthese D unbearbeitet und nachbearbeitet durch Schleifen mit Sandpapier.

5 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche diskutiert. Dabei werden die Druckparameter, die visuelle Probenbetrachtung, die Prüfung der scheinbaren interlaminaeren Scherfestigkeit sowie die Schälprüfungen ausgewertet.

5.1 Druckparameter und visuelle Probenbetrachtung

Zu Beginn der gesamten Versuchsreihe wurden die optimalen Druckparameter für den Multimaterialdruck mit PETG und TPU ermittelt. Insgesamt zeigten sich nach der ersten Einstellung der Parameter zufriedenstellende Druckbilder. Verschiedene Parameter wie unterschiedliche Druckgeschwindigkeiten oder der Einsatz von *Raft*, *Brim* und *Ooze Shield* wurden überprüft.

Es konnte festgestellt werden, dass langsame Druckgeschwindigkeiten zu besseren optischen Ergebnissen führen. Insbesondere beim TPU ist dies von Vorteil, da das Fördern durch Förderschlauch, Hotend und Düse schwieriger ist als beim PETG, weil das weiche Material auf dem Förderweg gestaucht wird. Durch das Vorhandensein eines *Direct*-Extruders am x500 wird dieses Problem jedoch auf eine kurze Förderstrecke beschränkt.

Der Einfluss der Druckgeschwindigkeiten auf die mechanischen Eigenschaften wurde nicht untersucht. Eine diesbezügliche Versuchsreihe ist für nachfolgende Projekte sinnvoll, da die Zeitersparnis und damit verbundene geringere Druckkosten signifikant sein können. Hier sollte jedoch der Einsatzzweck des gefertigten Objektes berücksichtigt werden.

Die Versuche haben zudem gezeigt, dass Zusätze wie *Raft* oder *Brim* nicht notwendig sind. Die Haftung auf dem Druckbett ist sowohl beim PETG als auch beim TPU ausreichend. Eigenspannungen und dadurch entstehendes *Warping* wurden bei dieser Probengeometrie nicht beobachtet.

Der Einsatz eines *Ooze Shields* sollte einer weiteren Untersuchung unterzogen werden. Durch den häufigen Materialwechsel sind Schmelzereste der nicht verwendeten Düsenseite auf die Druckobjekte abgestreift worden. Gegen diese Problematik könnte ein *Ooze Shield* helfen, da die Materialreste an diesem hängen bleiben würden. Des Weiteren wäre es möglich, das *Tool Change Script* anzupassen und einen Code zum automatischen Reinigen der Düsen an den Reinigungsbürsten einzubringen. Bei diesen beiden Lösungen ist allerdings zu beachten, dass die Druckzeiten stark ansteigen würden. Außerdem wäre der Materialverbrauch bei dem Einsatz eines *Ooze Shields* höher.

Eine langfristige Lösung könnte die Verwendung eines Druckers mit zwei separaten Druckköpfen darstellen.

In den Ergebnissen wurde beschrieben, dass das TPU zum sogenannten *Stringing* neigt, welches sich durch feine Materialfäden zwischen Bauteilen oder Leerräumen bemerkbar macht. Abhängig von der Probengeometrie war dieses mehr oder weniger ausgeprägt sichtbar. Möglichkeiten zur Verhinderung des *Stringings* könnten eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit des Extruders bei Leerfahrten oder auch eine geringere Drucktemperatur sein. Außerdem können auch die *Retraction*-Einstellungen verändert werden. Allerdings sind diese für das weiche Material nahezu ausgereizt, sodass bei einer weiteren Erhöhung der Werte eine Verstopfung der Düse möglich sein könnte.

Neben den genannten Punkten ist das längere Vortrocknen des stark hygroskopischen TPUs ein weiterer zu beachtender Aspekt zur Vermeidung des *Stringings*.

Bei einigen Proben konnte eine ungenügende Materialförderung nach dem Wechsel der Düsen beobachtet werden. Durch die Verwendung des *Tool Change Script* wurde die nicht verwendete Düsenseite auf 140°C heruntergekühlt. Vor der Nutzung der Seite wurde sie anschließend auf Endtemperatur aufgeheizt. Jedoch fuhr der Drucker direkt nach Erreichen der Temperatur mit dem Druckprozess fort, sodass das Filament in der kurzen Zeit nicht aufschmelzen konnte.

Die Anpassung des *Scripts* oder der Einsatz eines sogenannten *Prime Pillars* sind mögliche Lösungen zum Verbessern des Materialübergangs.

Schlussendlich waren zwischen den Proben häufig Qualitätsunterschiede ersichtlich. Die zunächst kalibrierten Düsen verstellten sich während der Fertigungsprozesse, sodass mit der Zeit minderwertige Druckbilder erzeugt wurden. Durch häufiges Kalibrieren konnte dem entgegengesteuert werden. Allerdings ist der Kalibrierungsvorgang fehleranfällig und das Resultat nie vollkommen identisch, sodass die produzierten Proben die beschriebenen Qualitätsdifferenzen aufwiesen.

5.2 Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeitsprüfung am Kurzbalken diskutiert. Bei der Prüfung wurden alle vorgestellten Konfigurationen mit jeweils fünf Proben untersucht.

Zu Beginn der Prüfung ist die Kraft gegenüber dem Standardweg nur gering angestiegen. Hier liegt die Vermutung nahe, dass die oben aufliegende TPU-Komponente zunächst auf Druck beansprucht wurde. Durch das elastische Material musste für eine Verformung wenig Kraft aufgewendet werden. Für diese Hypothese spricht der Bereich des Standardwegs.

Nach dem geringen Anstieg folgte ein linearer Anstieg der Kraft mit einhergehender Biegung der gesamten Probe. Die Gitter- und die glatte Referenzstruktur zeigten bei gleicher Verformung höhere Kraftwerte als die anderen beiden Konfigurationen. Dies ist auf den höheren Volumenanteil des PETGs zurückzuführen, da das Material ausschlaggebend für die

entstehenden Kräfte bei der Prüfung ist. Außerdem sind, gerade bei der Gitterstruktur, die PETG-Teile über die gesamte Fläche miteinander verbunden. Bei der Pilz- und Turmkonfiguration existieren „Inseln“ aus PETG, welche die Biegekräfte nicht übertragen können. Zwischen diesen liegt das elastische TPU, welches bei Biegung gestaucht wird.

Weiterhin ähnelt der Verlauf der Kurven einem zäherten bis elastischen Kunststoff. Nicht nur das thermoplastische Polyurethan weist elastische Eigenschaften auf, sondern auch das PETG. Dieses Phänomen wurde bereits in anderen Arbeiten beschrieben. Außerdem bestätigen die vom Hersteller angegebenen Materialeigenschaftsdaten diese Beobachtung. Allerdings ist das elastische Verhalten des PETGs viel geringer ausgeprägt als das beim TPU. Dadurch ist es während der Prüfung in den meisten Fällen zum Zug- und Scherversagen oder bis zum Bruch der PETG-Komponente gekommen. Hinzu kommt, dass alle Proben irreversibel plastisch verformt wurden. Die beiden Materialien haben sich bei diesem Versuch jedoch nicht voneinander abgelöst. Ein Schubversagen konnte nicht beobachtet werden, wodurch eine Auswertung mit Vergleich der Proben nur bedingt möglich ist.

Eine Änderung des Lagerabstands könnte die Ergebnisse unter Umständen verändern. Dieses Vorgehen wird auch in der DIN-Norm empfohlen.

5.3 Schälversuch nach VDI 2019

Für den Schälversuch nach VDI 2019 wurden jeweils fünf Proben der jeweiligen Konfiguration untersucht. Aus diesen Versuchen wurde eine Strukturform ausgewählt, um weitere Untersuchungen durchzuführen. Die Resultate des Schälversuchs werden nachfolgend diskutiert. Die Auswertung erfolgte anhand der VDI-Richtlinie und in Anlehnung an ein Forschungsvorhaben des Kunststoff-Zentrums (SKZ) im Bereich zwischen 15-75 mm, um Schwankungen zu Beginn der Prüfung auszuschließen sowie einen gemeinsamen Endpunkt zu definieren.

Die Ergebnisse der Schälversuche zwischen den vier Konfigurationen unterscheiden sich teilweise stark. Außerdem konnten verschieden ausgeprägte Bruchbilder und Schwachstellen identifiziert werden.

Die glatte Referenzprobe zeigte den geringsten Schälwiderstand von allen Proben. Hinzu kommt, dass die Größe der Grenzfläche sowie der Anteil des PETGs in diesem Bereich am geringsten sind. Die Schälkurven folgen einem leicht welligen Verlauf und sinken mit zunehmendem Schälweg ab. Dieser Verlauf ist durch mehrere Faktoren erklärbar.

Ein additiv gefertigter Körper ist nicht homogen und besteht aus verschiedenen Schichten, sodass Hohlräume vorliegen. Die einzeln gedruckten Linien mit den nachfolgenden Hohlräumen führen zu einem Anstieg und Absinken der Kraft.

Durch den Schichtaufbau entsteht im Allgemeinen eine unebene Oberfläche. Die Haftreibung der Strukturen ist somit erhöht und es kann zum sogenannten Stick-Slip-Effekt mit Ruckgleiten kommen.

Eine weitere Ursache könnte der eigens hergestellte Transportschlitten darstellen, wenn die Bewegung des Schlittens nicht konstant ist. Das Absinken der Kraft während des gesamten Prüfungsvorgangs ist zum einen durch die geringer werdende Auflagefläche und zum anderen durch den abnehmenden Materialeinfluss des TPUs entstanden. Gerade zu Beginn der Prüfung wird die TPU-Komponente auf Zug belastet, sodass etwaige Kräftewerte des Schälversuchs beeinflusst werden. Abhilfe könnte hier der Einsatz eines induktiven Wegaufnehmers schaffen.

Die Verbundhaftung zwischen TPU und PETG an der glatten Referenzprobe ist generell ungenügend. Eine physikalisch-chemische Haftung der beiden beprobten Materialien ist je nach Anwendungsfall nicht ausreichend, sodass eine mechanische Adhäsion zu verwenden ist.

Die gitterförmige Konfiguration weist im Gegensatz zur Referenzprobe den höchsten Schälwiderstand auf. Die Schälkurven zeigen einen Zickzack-Verlauf mit großen Schwankungen der Kraft. Im Schnitt ist die Standardkraft über den gesamten Auswertebereich auf einem Plateau. Die zuvor beschriebenen Möglichkeiten des Kurvenverlaufs gelten auch in diesem Fall, jedoch erklären sie nicht die starke Ausprägung. Diese ist auf verschiedene Brüche innerhalb der Probekörper zurückzuführen, da die Abschnitte des Kraftabsinkens im Diagramm mit den beschriebenen Orten der Bruchbilder übereinstimmen. Die Brüche sind jeweils in den Bereichen der Querverbindungen des PETGs entstanden. Dort sind die PETG-Komponenten voneinander abgerissen. Die Fläche der Schwachstelle ist größer als bei allen anderen untersuchten Proben. Außerdem ist der Anteil des PETGs und die Grenzfläche in der gesamten Probenvariante sehr hoch. Durch diese drei Punkte ist der Wert des Schälwiderstands entstanden. Es liegt im Vergleich zu den anderen Strukturen mehr PETG-Material vor, sodass bei der Trägerstruktur mehr Kraft zum Erreichen des Bruchs aufgebracht werden muss. Weitere Aspekte sind, wie bei der glatten Referenz beschrieben, die Materialeigenschaften. Die hohe Dehnungsfähigkeit des TPUs ist durch die eingebetteten PETG-Gitter reduziert. Dadurch steigt auch hier der Wert der Kraft in Zugbeanspruchung an. Für eine eindeutige Aussage ist der Einsatz eines Wegaufnehmers unabdingbar. Durch die mechanische Verzahnung in allen Orientierungsrichtungen könnte außerdem eine Kraftübertragung stattfinden. Allgemein sind am Substrat minimale Rückstände des elastischen Materials erkennbar. Eine direkte Haftung zwischen den Materialien ist allerdings nicht zu sehen, sodass die hohen Werte des Schälwiderstands auf die Formverbundstruktur zurückzuführen sind.

Bei der pilzförmigen Konfiguration konnte ein ähnlich niedriger Schälwiderstand wie bei der glatten Referenzprobe berechnet werden. Trotz einer großen Grenzfläche zwischen dem thermoplastischen Polyurethan und dem glykolmodifizierten Polyethylenterephthalat konnte keine ausreichende Verbundhaftung erzielt werden.

Allerdings ist dieses Ergebnis auf ein Versagen der PETG-Struktur am unteren Ende der Pilze zurückzuführen. Die Fläche der Schwachstellen sowie der Anteil des PETGs sind etwa halb so groß wie bei der Gitterkonfiguration, wodurch weniger Kraft bis zum Bruch der Struktur notwendig ist. Durch die Brüche ist auch in diesem Fall der Zickzack-Verlauf zu erklären. Die abgerissenen PETG-Reste sind in der TPU-Komponente eingebettet. Bei einer konstruktiven Änderung mit Erhöhung des PETG-Anteils sowie einer Optimierung des Schwachstellenbereichs sind gegebenenfalls bessere Ergebnisse erreichbar.

Schlussendlich folgt die Diskussion der Ergebnisse von der Turmkonfiguration, welche an die Schwalbenschwanzverbindung aus der Holzverarbeitung angelehnt ist. Diese Struktur besitzt nach den Gitterproben den höchsten Schälwiderstandwert. Wie bei allen anderen beschriebenen Varianten wurden die Proben ebenfalls am PETG-Bereich zerstört. Die Fläche der Schwachstelle ist minimal kleiner als bei den Gitterproben. Außerdem ist die Grenzfläche um etwa 700 mm² geringer, wodurch der Unterschied der Schälwiderstände zwischen Gitter und Turm zu erklären ist. Bei dieser Betrachtung ist der Volumenanteil des PETGs mit aufzuführen, welcher bei der hier beschriebenen Struktur höher als bei der gitterförmigen Konfiguration ist. Allerdings variieren die Anteile nur gering und der Einfluss der Materialeigenschaften unter Zugbelastung ist nicht mitberücksichtigt. Wie bei der Diskussion der Gitterstrukturergebnisse beschrieben, beeinflusst die gitterförmige PETG-Komponente das Dehnungsverhalten des TPUs. Bei der Turmstruktur tritt dieser Effekt in einem geringeren Maß auf, da die Türme nicht miteinander verbunden sind. Das in den Zwischenräumen befindliche TPU lässt sich ungehindert dehnen. Auch bei der Betrachtung der Schälkurven dieser Konfiguration tritt der wellenförmige Verlauf der Schälkurven auf und ist durch die jeweiligen Brüche zu erklären. Bei einigen Probekörpern waren Reste des TPUs auf dem Substrat zu erkennen, bei anderen nicht. Allgemein haben sich die Proben in ihrer Druckqualität stark unterschieden, wodurch die hohe Standardabweichung zu erklären ist. Ob diese Beobachtung zufällig ist oder an der konstruierten Geometrie liegt, muss durch weitere Versuche validiert werden.

5.3.1 Untersuchung verschiedener Gittervariationen

Ausgehend von den vorherigen Resultaten wurde die Gitterstruktur für weitere Versuchsreihen ausgewählt. Nachfolgend wurde die Schälprüfung mit verschiedenen Versionen der Gitterkonfiguration erneut durchgeführt.

Allgemein sind alle untersuchten Proben am Substrat aus PETG gebrochen. Daher wurde der Auswertebereich, welcher vorher zwischen 15-75 mm lag, auf 5-16 mm und somit vor den Ort des Bruchs reduziert. Somit ist der Einfluss des Substratbruchs auf die Kraft nicht mit einbezogen. Insgesamt sind alle Probekörper an der ersten Querstrebe des PETGs gebrochen. Die Schwachstelle ist identisch zu der zuvor diskutierten Gitterkonfiguration.

Für die erste Version wurden die Ergebnisse der Gitterkonfiguration verwendet. Diese wurden im vorherigen Kapitel bereits diskutiert.

Die zweite Version ist ebenso mit feiner Gitterstruktur hergestellt. Allerdings beträgt die Gitterhöhe nicht $5 \times 0,2$ mm, sondern $3 \times 0,33$ mm. Das Substrat ist in allen Fällen gebrochen und es hat an der weichen TPU-Komponente sowie dem PETG-Gitter gehaftet. Der berechnete Widerstand ist im Vergleich zu V1 minimal geringer. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Grenzfläche und der Volumenanteil des PETGs geringer sind. Außerdem sind weniger Schichten des Gitters vorhanden, sodass davon ausgegangen werden kann, dass weniger Berührungspunkte in allen Orientierungsrichtungen vorliegen. Wie bei allen untersuchten Proben sind die Schälkurven durch einen Zickzack-Verlauf gekennzeichnet. Hier gelten die bereits beschriebenen Erklärungen aus Kapitel 5.3, in dem der Abriss der Gitterbereiche beschrieben wurde.

Version 3 der analysierten Gittervariationen zeichnet sich durch eine grobe Gitterstruktur aus. Die Gitterhöhe beträgt $5 \times 0,2$ mm. Trotz einer höheren Fläche beim Materialübergang ist der Wert des Schälwiderstands geringer als bei den feinen Gittervarianten. Allerdings unterscheidet sich der Volumenanteil des PETGs um etwa 40 mm^3 im Vergleich zu Version 2. Die Kraft, die bis zum Bruch des steifen Materials benötigt wird, ist demnach geringer. Des Weiteren ist bei der Betrachtung der Bruchbilder aufgefallen, dass die groben Gitterstrukturen mit *Infill* gedruckt wurden, sodass der reale Anteil des PETGs deutlich geringer als der berechnete ausfällt. Wie bei Version 2 existieren weniger Berührungspunkte in allen Orientierungsrichtungen und auch die durch den Treppenstufeneffekt vergrößerte Oberfläche ist geringer. Das thermoplastische Polyurethan ist nach der Prüfung intakt. Die vielen glatten Berührungsflächen führten zu einem Abschälen des TPUs wie bei der glatten Referenzprobe. Auch hier zeigten sich Zickzack-Verläufe der Schälkurven, welche ebenso auf die Brüche an den Querstreben zurückzuführen sind. Die Haftung zwischen den einzelnen Linien des PETGs am Substrat ist bei allen Proben ausreichend. Bei den beobachteten Bruchbildern ist kein Ausfransen der PETG-Schichten festzustellen.

Version 4 der Varianten ist ebenso wie V3 mit grobem Gitter gedruckt. Allerdings beträgt die Gitterhöhe $3 \times 0,33$ mm. Der Zickzack-Verlauf der Schälkurven ist weniger ausgeprägt vorhanden. Außerdem ist der berechnete Schälwiderstand am geringsten. Die vierte Version weist aber auch die kleinste Oberfläche sowie den geringsten Anteil an PETG auf. Jedoch unterscheidet sich gerade Letztgenanntes nur wenig von der dritten Version. Des Weiteren scheint bei der groben Gitterstruktur die Gitterhöhe kaum Einfluss auf die Ergebnisse zu haben.

Da der Auswertebereich bei dieser Prüfung verändert wurde, ist eine Neuauswertung der Anfangskonfigurationen innerhalb des Bereiches vorgenommen worden. Die glatte Referenz sowie die Pilzform haben noch immer die geringsten Widerstände. Version 1 von Turm und Gitter liegen sehr nah beieinander. Die anderen Gitterversionen weisen etwas geringere Schälwiderstände als die Turmkonfiguration auf. Bezüglich dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass der Volumenanteil des PETGs in der Übergangszone den größten

Faktor ausmacht. Außerdem ist die Fläche der Bruchstellen ein nicht zu vernachlässigender Aspekt.

5.3.2 Untersuchung des Schichthöheneinflusses

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden die Gitterversionen 2 und 4 mit einer Schichthöhe von 0,3 mm gefertigt, um den Einfluss dieses Druckparameters auf die Kopplung zu untersuchen. Für die anderen Varianten war eine Analyse konstruktiv nicht möglich, da 0,2 mm hohe Gitterschichten nicht mit 0,3 mm Schichthöhe gedruckt werden können.

Zwischen den verschiedenen gedruckten Versionen der Variante 2 sind nur geringe Unterschiede bezüglich des Schälwiderstands wahrnehmbar. Die Schälkurven unterscheiden sich anhand der Lage der ersten Brüche. Bei der 0,1 mm Struktur haben sich die PETG-Querstreben innerhalb einer Gitterschicht zwischen zwei Layern abgelöst. Im Gegensatz dazu sind die Brüche der 0,3 mm-Version zwischen den Gitterschichten entstanden. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen. Zwischen einzelnen Schichten liegt bei der Additiven Fertigung der Schwachpunkt bei Belastung in z-Richtung. Durch eine geringere Schichthöhe sind zwar mehr potentielle Schwachstellen vorhanden, jedoch bricht die einzelne Schicht auch schneller, sodass das Ablösen gar nicht zustande kommt. Außerdem ist die Oberfläche durch den Treppenstufeneffekt erhöht. Es existiert eine höhere mechanische Verzahnung.

Version 4 mit den beiden gefertigten Schichthöhen zeigt ein ähnliches Ergebnis. Allerdings unterscheiden sich hier die Werte des Schälwiderstands stärker. Bei der 0,3 mm-Version haben sich die PETG-Querstreben von der Längsstrebe gelöst. Jedoch sind hier, im Gegensatz zur 0,1 mm-Variante, die Querstreben vom TPU abgelöst. Sonst waren diese immer abgebrochen und im TPU eingebettet. Die höhere Schichthöhe hat somit die Querstrebe verstärkt.

Allgemein sind die Schwachstellen bei diesen Proben an verschiedenen Stellen. Zudem weisen alle eine geringere Bruchfläche als bei der 0,1 mm-Version auf. Der Unterschied der Werte ist demzufolge mithilfe der kleineren Oberfläche aufgrund des Treppenstufeneffekts sowie der geringeren Bruchfläche zu erklären.

5.4 Visuelle Strukturbetrachtung der Orthese

Nach der Optimierung der Druckparameter, der Prüfung der verschiedenen Konfigurationen sowie der Konstruktion der Orthese wurde diese in verschiedenen Varianten mittels des FLM-Druckers x500 gefertigt und optimiert.

Allgemein ist es möglich, eine Orthese mit Multimaterialdruck herzustellen. Zunächst wurde für die ersten Druckversuche eine Schichthöhe von 0,3 mm gewählt. Dies widerspricht den Ergebnissen der Schälprüfung, ist allerdings zeit- und materialsparend, sodass die Parameter für die Fertigung der Orthese im Sinne der Effizienz angepasst werden können.

Bei den ersten Drucken konnte eine ungenügende Materialförderung nach dem Wechsel der Düsen im Bereich des Fußgewölbes beobachtet werden. Durch das *Tool Change Script* wurde die nicht verwendete Düsenseite auf 140°C heruntergekühlt. Bevor diese Seite benutzt wurde, wurde sie auf die Endtemperatur aufgeheizt. Jedoch hat der Drucker direkt nach Erreichen der Temperatur mit dem Druckprozess weitergemacht, sodass das Filament in der kurzen Zeit nicht aufschmelzen konnte. Die Anpassung des *Scripts* oder der Einsatz eines sogenannten *Prime Pillars* sind eine mögliche Lösung zum Verbessern des Materialübergangs.

In weiteren Versuchen wurde ein *Prime Pillar* verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass die Schichten deckender auf dem PETG aufgetragen wurden. Die einzelnen Linien waren miteinander verbunden. Komplett konnte das Problem jedoch nicht beseitigt werden. Des Weiteren muss bei der Verwendung von Zusätzen beachtet werden, dass sich die Druckzeit und auch die Materialmenge erhöhen. Gerade beim *Prime Pillar* ist dies stark ausgeprägt, da dieser als Vollkörper gedruckt wird. Hinzu kommt, dass die Haftung der Zusätze auf dem Druckbett mangelhaft ist, sodass ein großer *Brim* oder sogar ein *Raft* notwendig sind.

Durch den häufigen Materialwechsel sind Schmelzereste der nicht verwendeten Düsenseite auf die Orthese abgestreift worden. Gegen diese Problematik könnte ein *Ooze Shield* helfen, da die Materialreste an diesem hängen bleiben würden. Des Weiteren wäre es möglich, das *Tool Change Script* anzupassen und einen Code zum automatischen Reinigen der Düsen an den Reinigungsbürsten einzubringen. Bei diesen beiden Lösungen ist erneut zu beachten, dass die Druckzeiten stark ansteigen würden. Außerdem wäre der Materialverbrauch bei dem Einsatz eines *Ooze Shields* höher. In nachfolgenden Versuchen wurde das *Ooze Shield* eingesetzt. Die PETG-Einschlüsse waren geringer sichtbar, jedoch nicht vollständig entfernt. Auch die Haftung auf dem Druckbett war, wie beim *Prime Pillar*, mangelhaft. Durch die Haftungsprobleme sind die Schichten des *Shields* verschoben. Je nach Ausprägung kann dies die optische Qualität der Orthese beeinflussen. Der Einsatz eines solchen Zusatzes sollte je nach Anwendungsgebiet des Druckobjektes gewählt werden. Eine langfristige Lösung würde die Verwendung eines Druckers mit zwei separaten Druckköpfen darstellen.

Die Unterseite der Orthese wurde mit einer dünnen Schicht aus TPU gedruckt. Diese sollte ebenfalls durch eine mechanische Verzahnung am PETG aufgebracht werden. Anderweitig ist die Haftung im Bereich des Abrollpunktes zu gering. Dies spiegeln die Ergebnisse der Schälprüfungen mit der glatten Referenzprobe ebenso wider.

In den Ergebnissen wurde beschrieben, dass das TPU zum sogenannten *Stringing* neigt, welches sich durch feine Materialfäden zwischen Bauteilen oder Leerräumen bemerkbar macht. Bei den Orthesen war dies ausgeprägt sichtbar.

Möglichkeiten zur Vermeidung des *Stringings* könnten eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit des Extruders bei Leerfahrten oder auch eine geringere Drucktemperatur sein. Außerdem können die *Retraction*-Einstellungen verändert werden.

Neben den genannten Punkten ist das längere Vortrocknen des stark hygroskopischen TPUs ein weiterer zu beachtender Aspekt zur Vermeidung des *Stringings*. In diesem Fall bestand die effizienteste Lösung darin, die abstehenden Fäden in der Nachbearbeitung zu entfernen.

Schlussendlich wurde die finale Version der gedruckten Orthesen mit Schleifpapier nachbearbeitet. Die Ergebnisse weisen auf eine glattere Oberfläche ohne erkennbare Schichten hin. Die optische Qualität und der Tragekomfort konnten mit geringem Aufwand gesteigert werden. Dies ist auch bei einer geringer verwendeten Schichthöhe möglich, jedoch ist die Druckzeit etwa um das Dreifache höher, sodass der Nutzen für jeden Einzelfall abzuwägen bleibt.

6 Schlussfolgerung und weiteres Vorgehen

Insgesamt zeigt sich, dass es im Allgemeinen möglich ist, Objekte im Multimaterialdruck aus thermoplastischem Polyurethan und glykolmodifiziertem Polyethylenterephthalat herzustellen.

Die Versuchsergebnisse führten zu der Erkenntnis, dass die rein chemisch-physikalische Haftung zwischen den beiden Materialien ungenügend ist, weshalb eine mechanische Verzahnung verwendet werden sollte. Es hat sich herauskristallisiert, dass die Effizienz dieser von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird. Zum einen ist der Aufbau der Formverbundstruktur ausschlaggebend, da die reine Haftung des TPUs am PETG nicht verbessert, sondern das TPU in die PETG-Struktur eingebettet wird. Zum anderen ist der Volumenanteil der steifen Struktur und die Größe der Grenzfläche zwischen den beiden Materialien für einen besseren Verbund relevant. Durch die Auswertung der Schälprüfungsergebnisse hat sich herausgestellt, dass die PETG-Komponenten abgerissen sind. Die Größe der Schwachstelle ist demnach ein weiterer Aspekt, welcher zu berücksichtigen ist. Eine höher verdruckte Schichthöhe führte zu niedrigeren Schälwiderstandswerten. Allerdings ist der Unterschied minimal, sodass für jeden Einzelfall die Zeitersparnis gegenüber den mechanischen Eigenschaften abzuwägen ist. Schließlich kann festgestellt werden, dass alle genannten Punkte miteinander kohärieren und einen Einfluss auf die Verbundhaftung haben. Für eine mechanische Verzahnung können verschiedene Modelle gewählt werden. Anhand der Ergebnisse dieser Arbeit ist eine feine Gitterstruktur zur Kopplung zu empfehlen. In nachfolgenden Versuchen sollten die Resultate durch eine größere Anzahl von Proben validiert werden, da sich die Druckqualitäten und somit auch die Ergebnisse stark voneinander unterscheiden haben. Unter Einbezug der Standardabweichungen liegen die Werte für alle Strukturen nah beieinander. Außerdem sollte bei der Schälprüfung ein Wegaufnehmer eingesetzt werden, damit etwaige Materialeinflüsse in Zugbelastung berücksichtigt werden können. Da viele der Proben am Substrat gebrochen sind, sollte eine konstruktive Erhöhung der Wandstärke für weitere Versuche dieser Art in Betracht gezogen werden. Des Weiteren ist eine Untersuchung verschiedener Materialkombinationen in Zukunft empfehlenswert.

Abschließend ist festzustellen, dass der Multimaterialdruck im Anwendungsfall einer Knöchel-Fuß-Orthese umsetzbar ist. Es ist somit möglich, eine Orthese im FLM-Verfahren aus TPU und PETG zu fertigen. Die Ergebnisse zeigen, dass einige Schwierigkeiten bei der Herstellung existieren. Sowohl das Verschmieren von Materialresten als auch die Entstehung von Lücken in der Oberfläche stellen Probleme in der Fertigung dar. Hier hat sich herausgestellt, dass der Einsatz von Zusätzen (*Prime Pillar* oder *Ooze Shield*) zu besseren Druckbildern führt. Dennoch sollten der Material- und Zeitaufwand berücksichtigt werden. Eine mechanische Nachbearbeitung ist ebenfalls zu empfehlen. Zukünftig sollte die Orthese mit verschiedenen Schichthöhen sowie Wandstärken gefertigt werden. Außerdem sollten die Druckparameter weiter optimiert werden. Schlussendlich ist die mechanische Prüfung der Orthese ein weiterer Schritt. Hier ist ein Vergleich mit verschiedenen Materialkombinationen möglich.

7 Zusammenfassung

Die Additive Fertigung erfährt immer größer werdende Popularität. Jedes Jahr steigt die Zahl der Einsatzgebiete und Anwendungsmöglichkeiten dieses Herstellungsverfahrens an. Gerade im Sektor der Medizintechnik, wo individuelle Anpassungen und Gestaltungsfreiheiten notwendig sind, ist die Additive Fertigung von Vorteil. Zur Steigerung dieser Eigenschaften wird der Multimaterialdruck verwendet. Die Komplexität kann durch die Kombination verschiedener Materialien intensiviert werden. Trotz der steigenden Tendenz des Einsatzes existieren wenige wissenschaftliche Arbeiten in diesem Bereich. Insbesondere bezüglich der allgemeinen Materialeigenschaften und dem Haftungsverhalten im Multimaterialdruck gibt es nur eine geringe Anzahl an Forschungsberichten.

Das Ziel in dieser Masterthesis war die Konstruktion und Anfertigung einer Knöchel-Fuß-Orthese mittels Additiver Fertigung. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Konzipierung der Fußsohle mittels Dualdruck von thermoplastischem Polyurethan (TPU) mit glykolmodifiziertem Polyethylenterephthalat (PETG). Hierfür wurde das Haftungsverhalten der beiden Materialien in Abhängigkeit der Druckparameter beurteilt und optimiert. Zur Beurteilung wurde die Prüfung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit (DIN EN ISO 14130) verwendet sowie der Schälwiderstand aus der Schälprüfung nach VDI 2019 bestimmt. Weiterhin wurden die Multimaterialproben sowie die gefertigte Orthese visuell begutachtet. Anhand dieser Ergebnisse konnten die Druckparameter für den Multimaterialdruck optimiert werden.

Es konnte gezeigt werden, dass es im Allgemeinen möglich ist Strukturen im Multimaterialdruck aus PETG und TPU herzustellen. In der Arbeit wurde unter anderem die Haftung zwischen den beiden Materialien untersucht. Die Untersuchung der Haftungseigenschaften zwischen den Materialien führte zu der Erkenntnis, dass die rein chemisch-physikalische Haftung zwischen TPU und PETG ungenügend ist. Aufgrund dessen sollte eine mechanische Verzahnung gewählt werden. Jedoch wird die Effizienz der Verzahnung vom Volumenanteil der steifen Komponente, der Grenzflächengröße und der Größe der Bruchstellen beeinflusst. Aus den untersuchten Konfigurationen wurde die feine Gitterstruktur als geeignete Verbundstruktur ausgewählt.

Die Orthese wurde aus den beiden genannten Materialien hergestellt. Die Druckqualität ließ sich durch Zusätze wie *Ooze Shield* oder *Prime Pillar*, mit damit einhergehendem höheren Materialverbrauch, verbessern. Außerdem führte eine mechanische Nachbearbeitung zu einer optisch qualitativen Oberfläche.

Gerade im Bereich der Additiven Fertigung unterscheiden sich die Druckqualitäten stark, sodass für eine Validierung der Ergebnisse eine weitergehende Untersuchung mit einer Vielzahl an Proben notwendig ist.

Literaturverzeichnis

- 3Dn-22 3Dnatives SAS, *x500* - Ein robuster 3D-Drucker für den industriellen Gebrauch. **2022**. URL: <https://www.3dnatives.com/3D-compare/de/3d-drucker/x500/>, Stand: 27.07.2023.
- Abd-21 F. H. Abdalsadah et al., *Design and manufacture of a custom ankle-foot orthoses using traditional manufacturing and fused deposition modeling*. Progress in Additive Manufacturing, **2021**, 3/6, S. 555–570.
- Bar-20a J. Barrios-Muriel et al., *Advances in Orthotic and Prosthetic Manufacturing: A Technology Review*. Materials (Basel, Switzerland), **2020**, 2/13.
- Bar-20b J. Barrios-Muriel et al., *Advances in Orthotic and Prosthetic Manufacturing: A Technology Review*. Materials (Basel, Switzerland), **2020**, 2/13.
- Bra-21 E. Brancewicz-Steinmetz et al., *The Influence of 3D Printing Parameters on Adhesion between Polylactic Acid (PLA) and Thermoplastic Polyurethane (TPU)*. Materials (Basel, Switzerland), **2021**, 21/14.
- Bre-13 J. Breuninger et al., *Generative Fertigung mit Kunststoffen*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2013**, ISBN 978-3-642-24324-0.
- Che-16 R. K. Chen et al., *Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses - A review*. Additive Manufacturing, **2016**, 12, S. 77–89.
- DIN-98 *Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken* DIN EN ISO 14130, **1998**.
- Dit-19 H. Dittrich et al., *Orthopädische Biomechanik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2019**, ISBN 978-3-662-55332-9.
- Els-08 P. Elsner; H. Domininghaus (Hrsg.), *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen; mit 240 Tabellen*, Springer, Berlin, Heidelberg **2008**.
- Fas-12 P. Fastermann, *3D-Druck/Rapid Prototyping*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2012**, ISBN 978-3-642-29224-8.
- Fel-17 C. Feldmann & A. Gorj, *3D-Druck und Lean Production - Schlanke Produktionssysteme mit additiver Fertigung*, Springer Gabler, Wiesbaden **2017**, ISBN 978-3-658-18408-7.
- Fra-19 Fraunhofer IPA, *Schlussbericht zum Verbundvorhaben: Prothesen- und Orthesenherstellung aus naturfaserverstärkten Biokunststoffen (BioOrtho)*. **2019**.
- Fre-22 D. Frenkel et al., *The Mechanics of Bioinspired Stiff-to-Compliant Multi-Material 3D-Printed Interfaces*. Biomimetics (Basel, Switzerland), **2022**, 4/7.

- Geb-16 A. Gebhardt, *Additive Fertigungsverfahren - Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Hanser, München **2016**, ISBN 978-3-446-44401-0.
- Ger-23 German RepRap, *x500 3D Drucker Anleitung*. **2023**. URL: <https://pdf.directindustry.de/pdf/innovatiq/x500/182281-792979.html>, Stand: 27.07.2023.
- God-22 D. Godec et al. (Hrsg.), *A guide to additive manufacturing*, Springer, Cham **2022**.
- Gre-17 B. Greitemann; R. Baumgartner (Hrsg.), *Technische Orthopädie*, Thieme, Stuttgart **2017**.
- Hag-14 R. Hagl, *Das 3D-Druck-Kompandium - Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber*. 2nd ed., Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden **2014**, ISBN 978-3-658-07046-5.
- Heu-20 I. Heuzeroth et al. (Hrsg.), *Entwicklung einer Methodik zur Bewertung des Haftungsverhaltens von Hart-Weich-Verbindungen in additiven Fertigungsverfahren (Strangablegeverfahren)*, Shaker Verlag, Düren **2020**.
- Ilg-19 J. Ilg, *Systematische Eignungsanalyse zum Einsatz Additiver Fertigungsverfahren - Anwendung am Beispiel der Medizintechnik*, Gabler, Wiesbaden **2019**, ISBN 978-3-658-24631-0.
- Jin-15 Y. Jin et al., *Additive Manufacturing of Custom Orthoses and Prostheses – A Review*. Procedia CIRP, **2015**, 36, S. 199–204.
- Kre-21 S. Kreilaus, *Über den Fuß - Der Aufbau des Fußes*. **2021**. URL: <https://www.krankenhaus.de/fuss/>, Stand: 01.11.2021.
- Kum-18 M. Kumke, *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden **2018**, ISBN 978-3-658-22208-6.
- Liu-19 Z. Liu et al., *Additive manufacturing of specific ankle-foot orthoses for persons after stroke: A preliminary study based on gait analysis data*. Mathematical biosciences and engineering MBE, **2019**, 6/16, S. 8134–8143.
- Lop-18 L. R. Lopes et al., *Multi-material 3D printing: The relevance of materials affinity on the boundary interface performance*. Additive Manufacturing, **2018**, 23, S. 45–52.
- Pal-10 J. Pallari et al., *Design and Additive Fabrication of Foot and Ankle-Foot Orthoses*. 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, **2010**, S. 834–845.
- Ric-17 H. A. Richard et al., *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden **2017**, ISBN 978-3-658-17779-9.

- Ros-20 L. Rossing et al., *Bonding between silicones and thermoplastics using 3D printed mechanical interlocking*. Materials & Design, **2020**, 186, S. 108254.
- Sch-09 M. Schuck, *Kompatibilitätsprinzipien beim Montagespritzgießen*, LKT, Erlangen **2009**, ISBN 978-3-931864-44-6.
- Sup-11 B. Suppe, *FBL Functional Kinetics praktisch angewandt*, Springer, Dordrecht **2011**, ISBN 978-3-642-02245-6.
- VDI-16a VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., *Handlungsfelder- Additive Fertigungsverfahren*. **2016**.
- VDI-16b VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., *Prüfung der Haftung von thermoplastischen Elastomeren (TPE) an Substraten*. **2016**.
- Wan-21 V. Wank, *Biomechanik der Sportarten*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2021**, ISBN 978-3-662-60523-3.
- Wir-17 M. A. A. Wirth, *Additive Fertigung - Technologie, Markt und Innovation*. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität, Würzburg **2017**. Betreuung: Thiesse, Frederic; Friesike, Sascha.

Anhang I: Datenblatt Cheetah™- Filament von NinjaTek®



Cheetah™ 3D Printing Filament

Flexible Polyurethane Material for FDM Printers

Cheetah™ flexible filament is the fastest and easiest to print flexible filament on the market. The focus in development of this material was on optimizing the user experience. The result is a filament that is printable across all types of desktop 3D printers at ABS and PLA speeds, many times twice the speed of other flexible materials on the market.

General Properties	Test Method	Imperial	Metric
Specific Gravity	ASTM D792	1.22 g/cc	1.22 g/cc
Moisture Absorption - 24 hours	ASTM D570	0.18 %	0.18 %
Mechanical Properties			
Tensile Strength, Yield	ASTM D638	1,250 psi	9 Mpa
Tensile Strength, Ultimate	ASTM D638	5,650 psi	39 Mpa
Tensile Modulus	ASTM D638	3,800 psi	26 Mpa
Elongation at Yield	ASTM D638	55%	55%
Elongation at Break	ASTM D638	580%	580%
Toughness (integrated stress-strain curve; calculated stress x strain)	ASTM D638	17,000 in-lbF/in ³	117.2 m ³ N/m ³ x10 ⁶
Hardness	ASTM D2240	95 Shore A	95 Shore A
Impact Strength (notched Izod, 23C)	ASTM D256	9.1 ft.lbf/in ²	19.1 kJ/m ²
Abrasion Resistance (mass loss, 10,000 cycles)	ASTM D4080	0.06 g	0.06 g
Thermal Properties			
Melting Point (via Differential Scanning Calorimeter)	DSC	428° F	220° C
Glass Transition (Tg)	DSC	-11° F	-24° C
Heat Deflection Temperature (HDT) @ 10.75psi/ 0.07 MPa	ASTM D648	165° F	74° C
Heat Deflection Temperature (HDT) @ 66psi/ 0.45 MPa	ASTM D648	120° F	49° C

NinjaTek filament is capable of being printed by a variety of printers in a variety of configurations. This specification sheet gives results as they pertain to the defined test standard and specimen details. Different slicing and/or printing configurations, test conditions, ambient environments, etc. may result in different results.

Impact Strength and Heat Deflection Temperature results were both provided by an accredited university testing laboratory. Specific Gravity and Hardness are innate characteristics of the material. Moisture Absorption, values associated with the Tensile Strength tests, Melting Point and Glass Transition data were prepared by Filler Drives, Inc.

NinjaTek makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of fitness for a particular application.

Test Specimen Details (by ASTM Test Number)

All printed specimens were created using the TAZ5 printer 0.75mm nozzle. For ASTM D638 tests, the extrusion multiplier is 1.05.

Specific Gravity (D792): Results determined by nature of material.

Moisture (D570): 30g of filament tested in moisture analyzer evaluated at 125°C until the mass change is < 0.005% over 1 minute.

Tensile (D638): Dogbone Style IV, 100% fil, diagonal line fil. Dimensions: 5mm thick. See drawing for other dimensions.



Hardness (D2240): Solid testing block.



Impact (D256): Un-notched test specimen, notch added post print by testing facility.



Abrasion (D4080): Rectangular block sized to fit labor abradant.



HDT (D648): Bar shape.



NinjaTek.com

+1-717-664-8254

support@ninjatek.com

2018_04_NF_MSPEC

Abb. A 1 Cheetah™- Filament von NinjaTek® Materialeigenschaftsdaten.

Anhang II: Schälkurven Konfigurationen

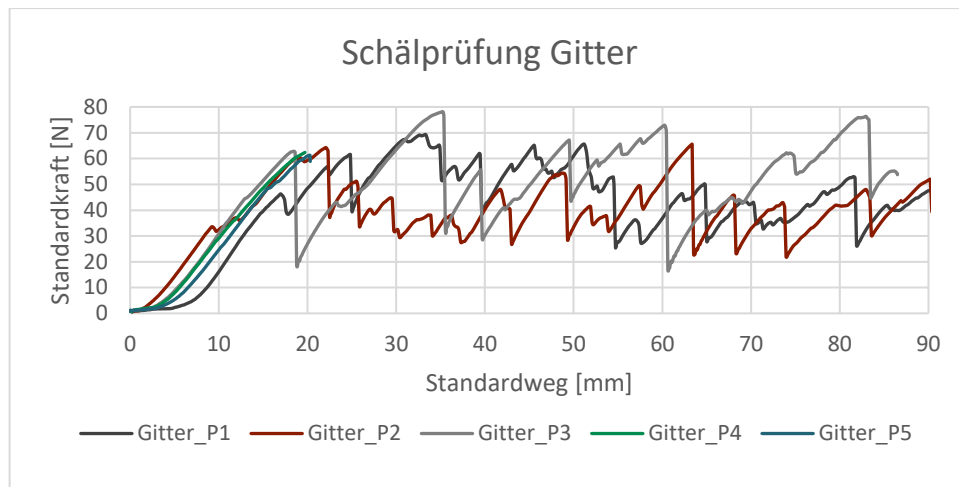


Abb. A 2 Schälkurven Gitter P1-P5.

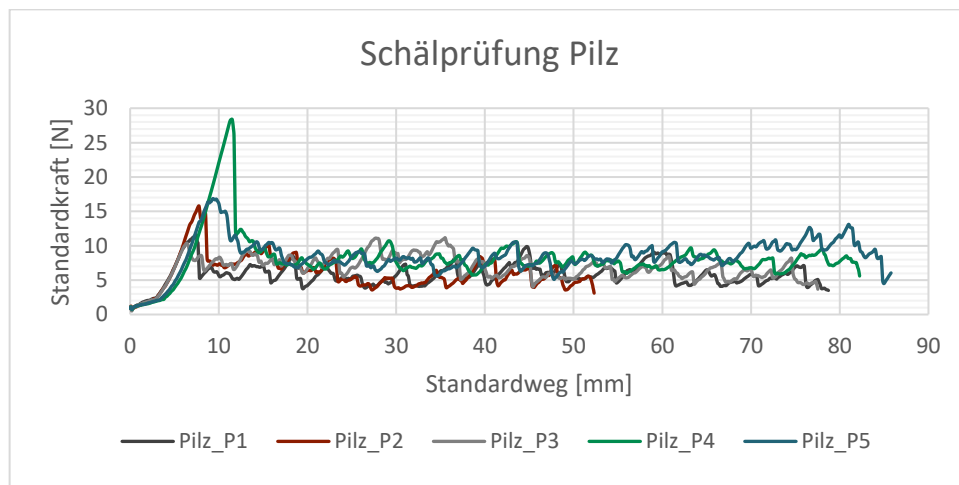


Abb. A 3 Schälkurven Pilz P1-P5.

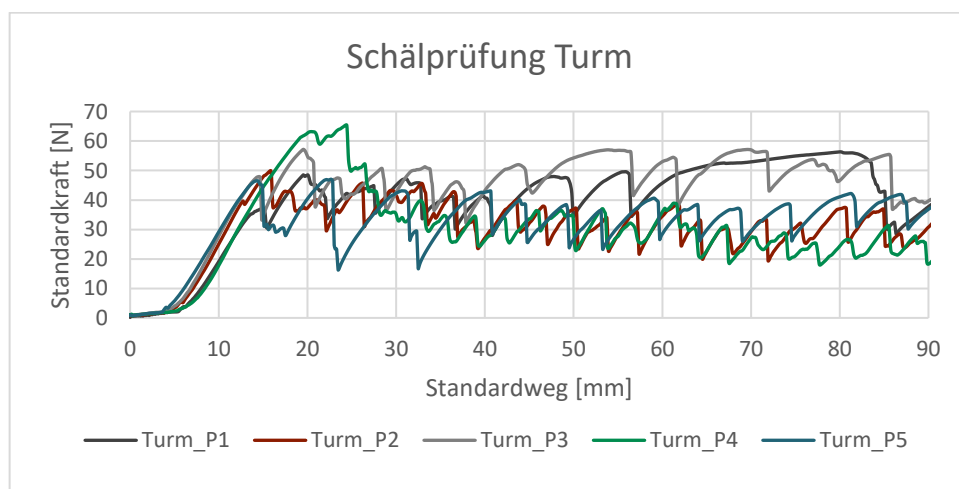


Abb. A 4 Schälkurven Turm P1-P5.

Anhang III: Probenfotos Schälprüfung



Abb. A 5 Probenfotos Schälprüfung.

Anhang IV: Schälkurven Gittervariationen

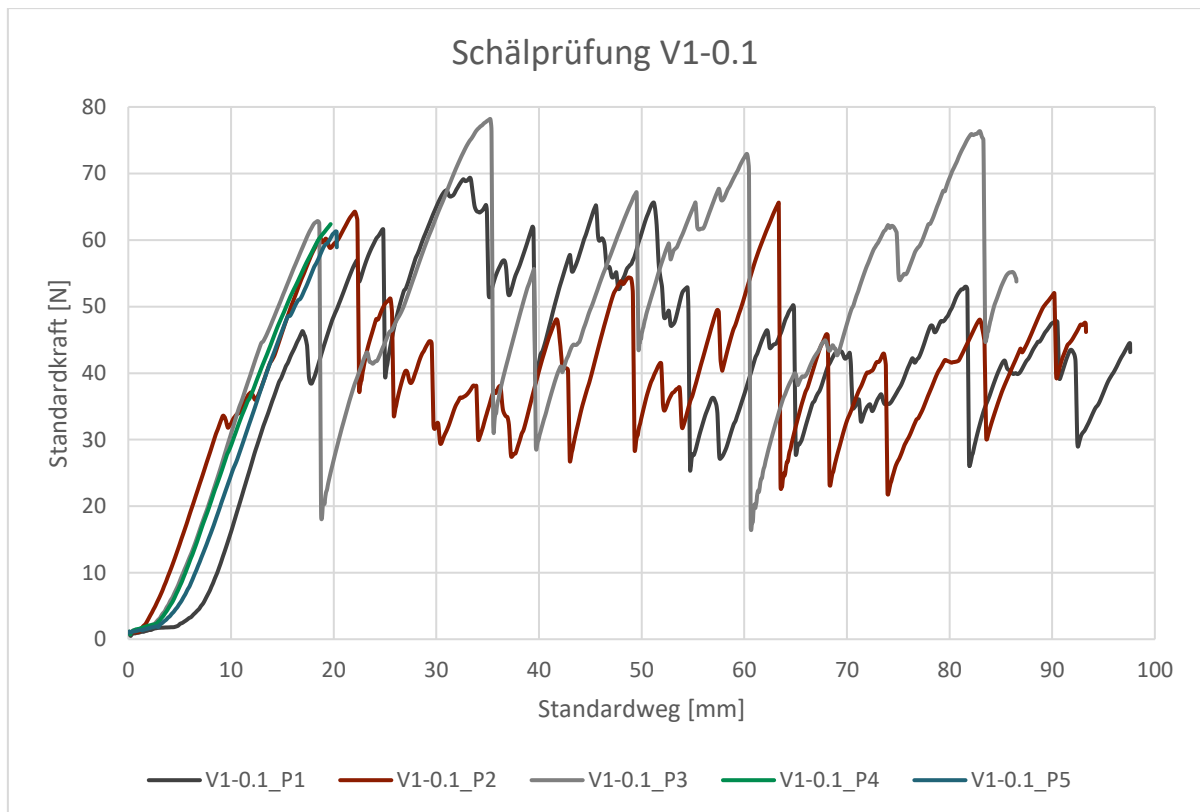


Abb. A 6 Schälkurven Gittervariation V1-0.1.

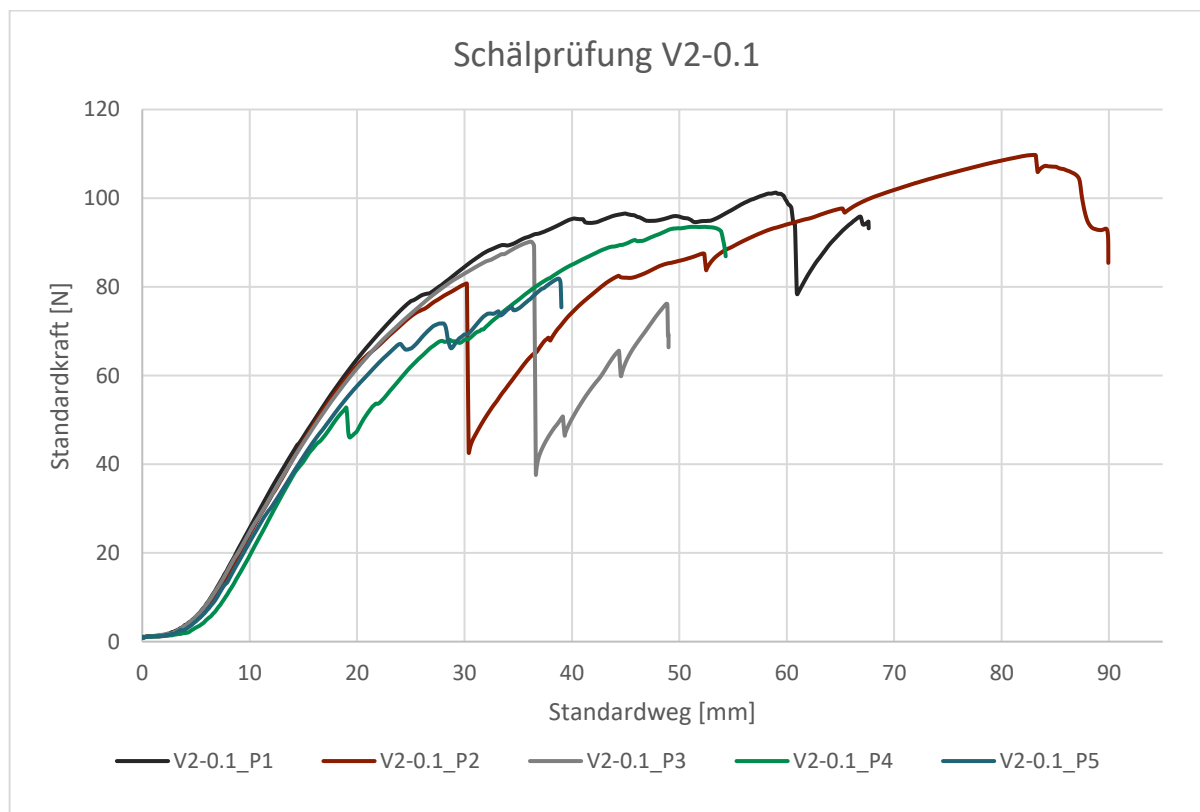


Abb. A 7 Schälkurven Gittervariation V2-0.1.

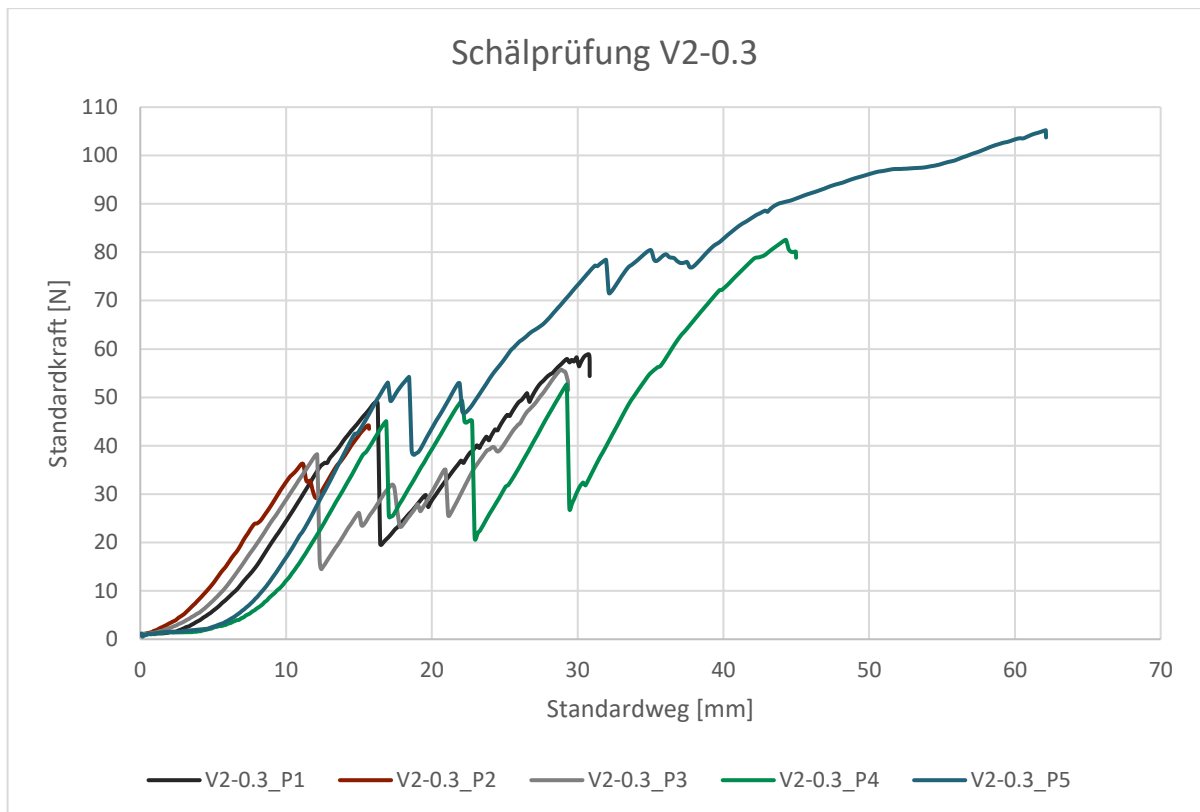


Abb. A 8 Schälkurven Gittervariation V2-0.3.

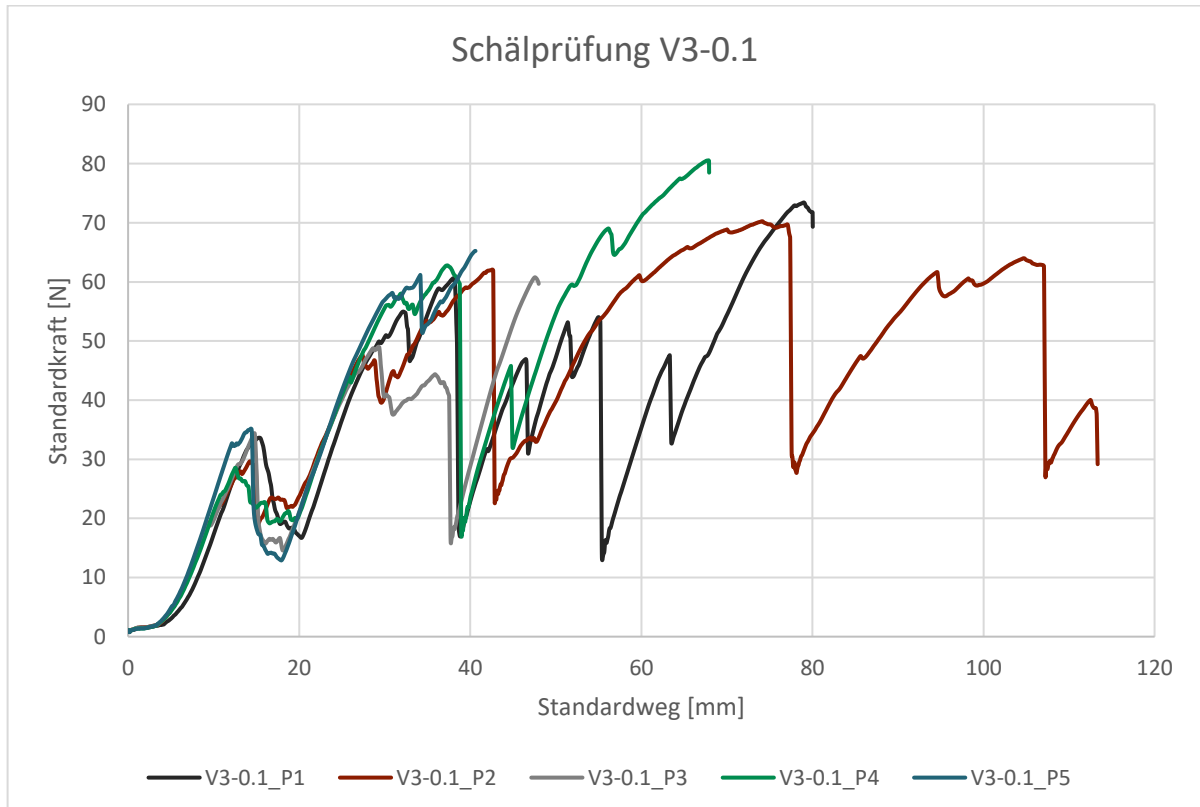


Abb. A 9 Schälkurven Gittervariation V3-0.1.

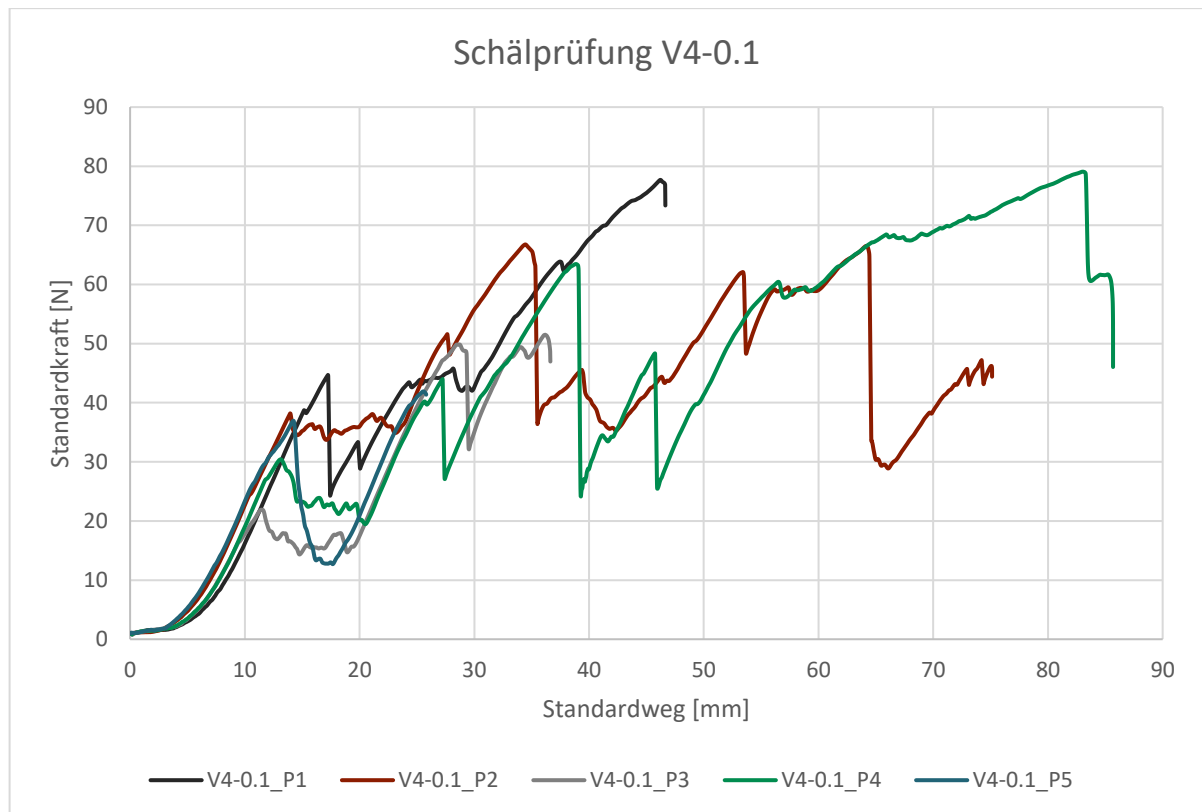


Abb. A 10 Schälkurven Gittervariation V4-0.1.

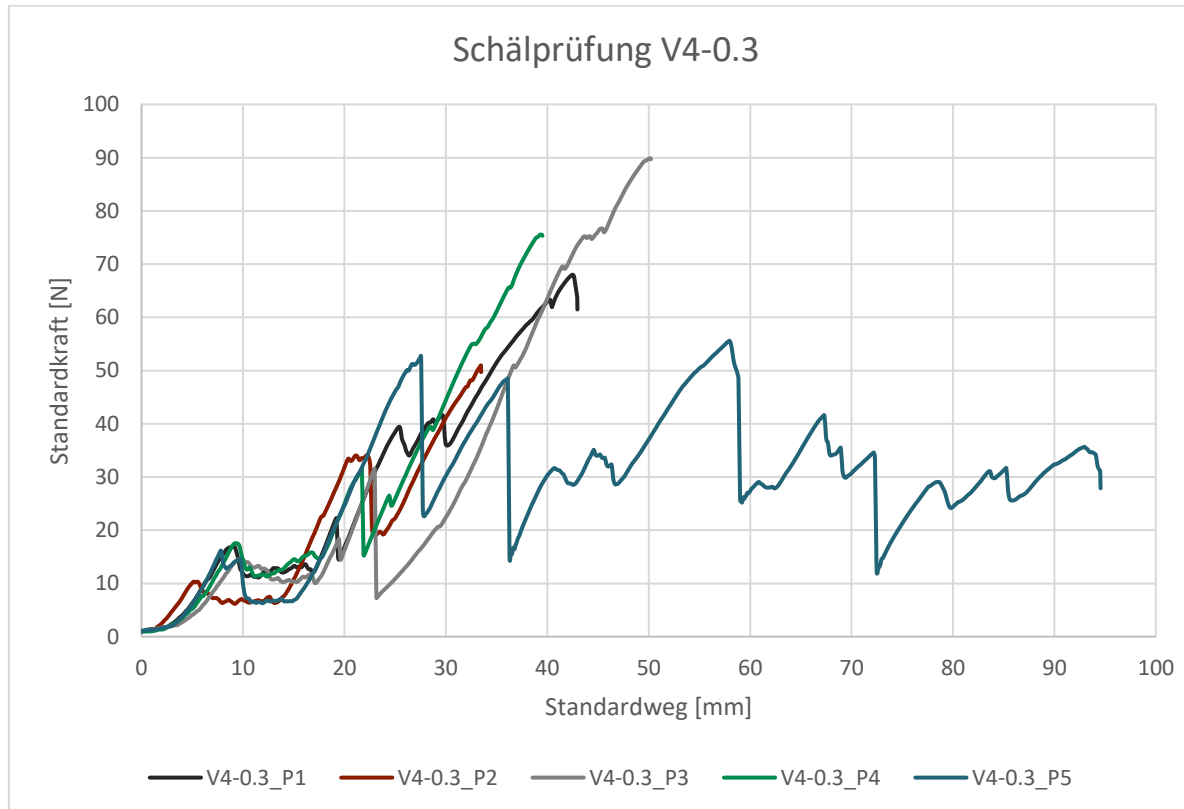


Abb. A 11 Schälkurven Gittervariation V4-0.3.

Erklärungen

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

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

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift

Einverständniserklärung zur Prüfung der Arbeit mit der Plagiaterkennungssoftware Turnitin

An der TU Clausthal können Studien- und Prüfungsleistungen auf Plagiate überprüft werden. Mit meiner Unterschrift erkläre ich, Kathrin Bünger (Matrikelnummer: 533690), mich damit einverstanden, dass die von mir im Rahmen der Erbringung von Studien- und Prüfungsleistungen zu fertigende Arbeit nach der Abgabe einer automatischen Plagiatsüberprüfung unterzogen werden kann.

Die Überprüfung der Arbeit erfolgt ausschließlich in anonymisierter Form, d.h. meine persönlichen Daten (Vorname, Name, studentische E-Mail) werden nicht verwendet.

Meine Arbeit wird zur Plagiatsüberprüfung nicht dauerhaft gespeichert, sondern nach Abschluss des Prüfvorgangs automatisch aus den Datenbanken von Turnitin gelöscht. Die Funktion der dauerhaften Speicherung von Arbeiten wurde für den Account der Universität bei Turnitin deaktiviert.

Sonstige Aufbewahrungspflichten seitens der Universität bleiben unberührt. Mir ist bekannt, dass eine Nutzung von fremden, nicht kenntlich gemachten Quellen einen Täuschungsversuch darstellt.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift