

Masterarbeit

PRODUKTIONSRICHTLINIE FÜR FUSED FILAMENT FABRICATION VERBINDUNGSTECHNIKEN

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Ing. Daniel Supanz, BSc

1610322009

betreut und begutachtet von

FH-Hon.Prof. Dipl.-Ing. (FH) Dr. techn. Vinzenz Sattinger

Graz, im Januar 2018

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....
Unterschrift

DANKSAGUNG

Ich möchte mich recht herzlich bei meinen Eltern Frau Lieselotte Supanz und Herrn Günther Supanz für die bedingungslose Unterstützung, nicht nur beim Verfassen dieser Arbeit, sondern auch durch das ganze Studium hinweg, von ganzem Herzen bedanken. Weiters möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn FH-Hon.Prof. Dipl.-Ing. (FH) Dr. techn. Vinzenz Sattinger bedanken, welcher mir auch in schwierigeren Phasen immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Ein weiterer Dank geht an meine Arbeitskollegen Herrn Dr. techn. Ali Abdallah und Herr. Dr. techn. Christian Gasser und an den Business Unit Manager der Firma HAGE Sondermaschinenbau Herrn Mag. Thomas Janics, die mich auch immer wieder mit ihrer konstruktiven und fachlichen Kompetenz unterstützt haben. Zu guter Letzt geht mein Dank an alle Sponsoren wie die Firma RAMPA, Schraubenking, Erich Slupetzky GesmbH und EJOT für die Zurverfügungstellung der benötigten Komponenten.

KURZFASSUNG

Die generative Fertigung, mit welcher Bauteile schichtweise aufgebaut werden, gewinnt anhand der kontinuierlichen Weiterentwicklung im Bereich der Materialwissenschaften, der besser werdenden Prozessqualität und des wachsenden Knowhows immer mehr an Bedeutung. Faktoren wie die zeiteffiziente Herstellung von Bauteilen und die rasche Verfügbarkeit sind nur wenige von vielen entscheidenden Vorteilen generativer Fertigungsverfahren. Eines der aufstrebenden Materialien für die generative Fertigungstechnologie Fused Filament Fabrication ist Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA). Bauteile aus ASA bestechen durch ihre hochwertige Oberfläche sowie gute Witterungs- und UV-Beständigkeit. Eigenschaften die besonders im Bereich industrieller Anwendungen von großer Bedeutung sind.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung einer Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken aus Acrylester-Styrol-Acrylnitril für die Unternehmungen HAGE Sondermaschinenbau und FH CAMPUS 02. Zusätzlich soll das prozessspezifische Knowhow weiter ausgebaut werden.

Im ersten Schritt wird eine mechanische Werkstoffprüfung im Sinne von Zugversuchen durchgeführt um auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse unterschiedliche Verbindungstechniken wie Schraub-, Steck- und Schnappverbindungen näher zu betrachten. Die Abfolge der Tätigkeiten wie Konstruktion, generative Fertigung und Prüfung der Bauteile werden im Sinne eines iterativen bzw. schrittweisen Verbesserungsprozesses durchgeführt. Sowohl die Probenkörper aus den Zugversuchen als auch die Probenkörper der unterschiedlichen Verbindungstechniken werden verschiedenen Prüfkriterien wie Maßhaltigkeit, Strukturaufbau, mechanische Beständigkeit und Funktionalität unterzogen.

Das Resultat dieser Arbeit ist eine Produktionsrichtlinie für KonstrukteurInnen auf Basis von Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken aus Acrylester-Styrol-Acrylnitril.

Auf Basis des optimalen Kosten-Nutzen-Verhältnisses der generativen Fertigungstechnologie Fused Filament Fabrication und dem Material Acrylester-Styrol-Acrylnitril, sind die Erkenntnisse dieser Arbeit ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung. Beide Unternehmungen können aufgrund der gesammelten Erfahrungen mit dem Material ASA und den überprüften Verbindungstechniken profitieren und somit auch in Zukunft konkurrenzfähig bleiben.

ABSTRACT

The additive manufacturing process, which is used to manufacture components layer by layer, is gaining more encouragement based on continuous further development in the area of material sciences, preferable process quality and growing knowhow in industrial applications. Factors like time-efficient production of components and rapid availability are only a few benefits of additive manufacturing processes. One of the ambitious materials of the additive manufacturing process Fused Filament Fabrication is Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA). ASA components offer impressively high-quality surfaces as well as good weather- and UV-resistance. Properties which are highly relevant for industrial applications.

The aim of this thesis is to develop a production guideline for Fused Filament Fabrication joining techniques of Acrylester-Styrol-Acrylnitril for the companies HAGE Sondermaschinenbau and University of Applied Sciences CAMPUS 02. Additionally process-specific knowledge should be further developed.

For this reason, a mechanical material testing method in terms of tensile tests was implemented first. Based on the findings of these tests, different joining techniques like screw-, plug-, and snap connections were analysed in detail. Activities such as construction, additive production and examination were chronologically implemented. Both, the test specimens of the tensile tests and the test specimens of the different joining connections were checked for size accuracy, structure, mechanical strength and functionality.

The result of the thesis is a production guideline for mechanical engineers for Fused Filament Fabrication joining techniques of Acrylester-Styrol-Acrylnitril.

Based on the optimal cost-use-ratio of the additive manufacturing process Fused Filament Fabrication and the material Acrylester-Styrol-Acrylnitril the findings of this thesis are an important step in the right direction. The gained experience is of mutual benefit for both companies and enables them to be competitive in the future.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation und Aufgabenstellung	1
1.2	Ziele	1
2	Unternehmensbeschreibung FH CAMPUS 02 GmbH	2
2.1	Entstehung und Wachstum.....	2
2.2	Aufbau der Organisation	2
2.3	Studienrichtungen	3
2.4	Vision	3
3	Grundlagen der generativen Fertigung	4
3.1	Besonderheiten und Eigenschaften.....	4
3.1.1	Allgemeingültige Randbedingungen	5
3.1.2	Maß-, Form-, und Lagegenauigkeiten	6
3.1.3	Datenqualität, Auflösung und Darstellung	6
3.2	Technologien, Einsatzgebiete, Vor- und Nachteile.....	7
3.3	Fused Filament Fabrication	9
3.3.1	Funktionsweise	9
3.3.2	Anlagentechnik	10
3.3.3	Vor- und Nachteile des HAGE 3D-72L-A 3D-Druckers	13
3.3.4	Entwicklungsprozess bzw. Prozessanalyse	13
3.3.5	Einsetzbare Materialien	14
3.3.6	Technologische Einschränkungen.....	17
3.3.7	Zukünftige technologische Möglichkeiten	21
3.4	Qualität, Kosten und Zeit	21
3.5	Flexibilisierte Massenproduktion.....	22
3.6	Änderung der Supply Chain.....	23
3.7	Anforderungen an Konstrukteure.....	24
3.8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	25
3.9	Chancen und Potenziale für die Produktentwicklung	26
4	Mechanische Werkstoffprüfung.....	27
4.1	Der Zugversuch	27
4.2	Aufbau einer servohydraulischen Zugprüfmaschine	27
4.3	Versuchsdurchführung praktische Umsetzung	28
4.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramm	28
4.4.1	Der elastische Bereich	29
4.4.2	Der plastische Bereich	29
5	Stand der Technik – Generative Konstruktion und Fertigung	31
5.1	Möglichkeiten generativer Fertigungsverfahren	31
5.2	Konstruktionsempfehlungen für Fused Filament Fabrication	31
5.2.1	Orientierung eines 3D-CAD-Modells im Bauraum.....	32

5.2.2	Wanddicke	35
5.2.3	Geschlossene Bodenschichten	36
5.2.4	Bohrungsdurchmesser ohne bzw. mit Stützstrukturen	37
5.2.5	Ecken	38
5.2.6	Inselhöhen	38
5.2.7	Oberflächenwinkel	39
5.2.8	Düsendurchmesser.....	39
5.2.9	Fadenbildung	40
6	Zugfestigkeit von FFF-Zugproben aus ASA ApolloX Natural.....	41
6.1	Zugversuchsproben nach EN ISO 527	41
6.2	Generative Fertigung und Versuchsbedingungen	42
6.3	Versuchsdurchführung.....	43
6.3.1	Basisfertigungsparametersatz	44
6.3.2	Fertigungsparametersatz 1	45
6.3.3	Fertigungsparametersatz 2	46
6.3.4	Fertigungsparametersatz 3	46
6.4	Prüfung und Bewertung	47
6.4.1	Maßhaltigkeit.....	47
6.4.2	Struktur	49
6.4.3	Mechanische Festigkeit	52
7	Praktische Umsetzung Verbindungstechnik	59
7.1	Schraubverbindung.....	59
7.1.1	Konstruktion	59
7.1.2	Generative Fertigung	60
7.1.3	Versuchsaufbau und Durchführung	61
7.1.4	Prüfung und Bewertung	61
7.2	Steckverbindung	66
7.2.1	Konstruktion	66
7.2.2	Generative Fertigung der Steckverbindungen	67
7.2.3	Versuchsaufbau und Durchführung	67
7.2.4	Prüfung und Bewertung	68
7.3	Schnappverbindung	73
7.3.1	Konstruktion bzw. Geometrie.....	73
7.3.2	Generative Fertigung der Schnappverbindungen.....	75
7.3.3	Prüfung und Bewertung	75
8	Produktionsrichtlinie für Verbindungstechniken	85
8.1	Grundlagen der Produktionsrichtlinie	85
8.2	Hauptbestandteile der Produktionsrichtlinie	86
9	Zusammenfassung und Ausblick	103
9.1	Zusammenfassung	103
9.2	Ausblick und nächste Schritte.....	104
	Literaturverzeichnis	105

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	108
Tabellenverzeichnis.....	113
Anhang 1: Normgeometrie der Schraubverbindungs-techniken	115
Anhang 2: Auszugsfestigkeit der Schraubverbindungs-techniken	118

1 EINLEITUNG

Grundsätzlich werden generative Fertigungsverfahren noch mit dem Begriff „Rapid Prototyping“ in Verbindung gebracht. Hauptgrund dafür ist die verstärkte Anwendung der Bauteile im Prototypenbau. Das Ziel für industrielle Anwendungen ist jedoch der dauerhafte Umstieg auf „Additive Manufacturing“. Hierunter versteht sich die Umsetzung von seriennahen Bauteilen mittels generativen Fertigungstechnologien wie z.B. Fused Filament Fabrication (FFF). Dieser entscheidende Schritt ist jedoch nur möglich, wenn es hierfür Richtlinien gibt, welche den Rahmen für eine erfolgreiche Umsetzung langfristig sicherstellen.

Aktuell ist sowohl die Fachhochschule CAMPUS 02 als auch das Unternehmen HAGE Sondermaschinenbau GmbH & Co KG in der Lage, 3D-Druckdienstleistungen effizient abzuwickeln. Aufgrund der jahrelangen Erfahrungswerte und Auseinandersetzung mit der 3D-Drucktechnologie FFF, wurde in diesem Bereich bereits prozessspezifisches Knowhow aufgebaut. Das aufgebaute Wissen basiert zum größten Teil auf der richtigen Parameterauswahl für das Basismaterial Polyactide (PLA). Die richtigen Parameter sind das Fundament für generative Fertigungstechnologien. Im direkten Vergleich mit anderen bereits etablierten Verfahren, bei welchen bereits Richtlinien als Nachschlagewerk dienen, stehen generative Fertigungstechnologien noch ganz am Anfang. Richtlinien sind für die Auslegung von Modellen durch den Konstrukteur von entscheidender Bedeutung.

1.1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Das aktuelle Problem liegt in der konkreten Umsetzung von FFF-Bauteilen. Aktuell gibt es technologiespezifisch keinen definierten Prozessablauf oder eine Richtlinie für die Auslegung von FFF-Verbindungstechniken für das industriell einsetzbare Material Acrylester-Styrol-Acrylnitril. Das Ergebnis der Konstruktion hängt gegenwärtig immer vom Gefühl und der persönlichen Erfahrung des Konstrukteurs ab. Weiters ähneln aktuelle Konstruktionsmodelle für FFF mehrheitlich Modellen von spanabhebenden Verfahren, sodass die wesentlichen Vorteile wie Geometriefreiheit, Überhänge, Radien, Fasen etc. nicht ausgenutzt bzw. berücksichtigt werden. Diese Arbeit beschäftigt sich aufgrund des wirtschaftlichen Bedarfs mit der Ermittlung und Darstellung von Konstruktionsempfehlungen für die fertigungsgerechte Gestaltung und Herstellung von FFF-Verbindungstechniken.

1.2 Ziele

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung einer Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken wie diverse Schraub-, Steck- und Schnappverbindungen. Diese soll im Speziellen KonstrukteurInnen in ihrer Denkweise unterstützen, da diese in der Vergangenheit Bauteile immer für etablierte subtraktive Verfahren ausgelegt haben. Weiters soll zum besseren Prozessverständnis die komplette Prozessanalyse dargestellt werden. Mithilfe der Richtlinie soll es möglich sein, definierte Verbindungsgeometriebereiche mit der generativen Technologie FFF umzusetzen. Zusätzlich soll mit dieser Richtlinie das spezifische Know-how sowohl im Unternehmen HAGE Sondermaschinenbau als auch der FH CAMPUS 02 gestärkt und weiter ausgebaut werden, um sich auch in Zukunft von der Konkurrenz abheben zu können.

2 UNTERNEHMENSDESCREIBUNG FH CAMPUS 02 GMBH

Diese Arbeit wurde sowohl in Zusammenarbeit mit der Unternehmung CAMPUS 02 Fachhochschule der Wirtschaft GmbH als auch mit HAGE Sondermaschinenbau GmbH & CoKG erstellt. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Entstehung und das Wachstum, den Aufbau der Organisation, die diversen Studienrichtungen und das Leitbild geboten.

2.1 Entstehung und Wachstum

1994 hat der damalige WIFI-Chef Herr Mag. Hohegger ein Konzept mit dem Ziel des „Life-Long-Learning“ erarbeitet. Die Fokussierung auf Kernprozesse der Wirtschaft wurde bereits damals festgelegt und gilt noch bis heute. 1996 wurden erstmalig im Gebäude des WIFI Steiermark die ersten beiden Fachhochschulstudiengänge Marketing und Automatisierungstechnik für Berufstätige ins Leben gerufen. Im Wintersemester 1996/1997 war der Start des offiziellen Lehrbetriebs für die ersten 96 Studierenden. Mittlerweile verfügt die FH CAMPUS 02 bereits über fünf unterschiedliche Studiengänge, welche alle gemeinsam die Kernfelder des unternehmerischen Erfolgs abdecken sollen. Seit dem Geschäftsjahr 2017 ist die FH CAMPUS 02 nach ÖNORM EN ISO 9001:2008 zertifiziert.¹

Der Leitspruch des Qualitätsmanagements der FH CAMPUS 02 lautet:

„Wir bieten Lehre und angewandte Forschung in hoher Qualität an. Unser Qualitätsmanagementsystem, das sowohl die eigentlichen Leistungserbringungs- als auch Führungs- und Unterstützungsprozesse permanent auf ihre Qualität hin weiterentwickelt, ist dafür die Grundlage.“¹

2.2 Aufbau der Organisation

Die Organisation der FH CAMPUS 02 verfügt als Gesellschaft mit beschränkter Haftung über folgende Organe und Organisationseinheiten, siehe Abb. 1:¹

- Generalversammlung und Gesellschafter
- Geschäftsführung
- FH-Kollegium und FH-Rektorin
- FH-Rektorat
- Studienrichtungen und Studiengangsleitungen
- Zentrale Services

¹ FH CAMPUS 02 GmbH (2016), Onlinequelle [21.07.2017].

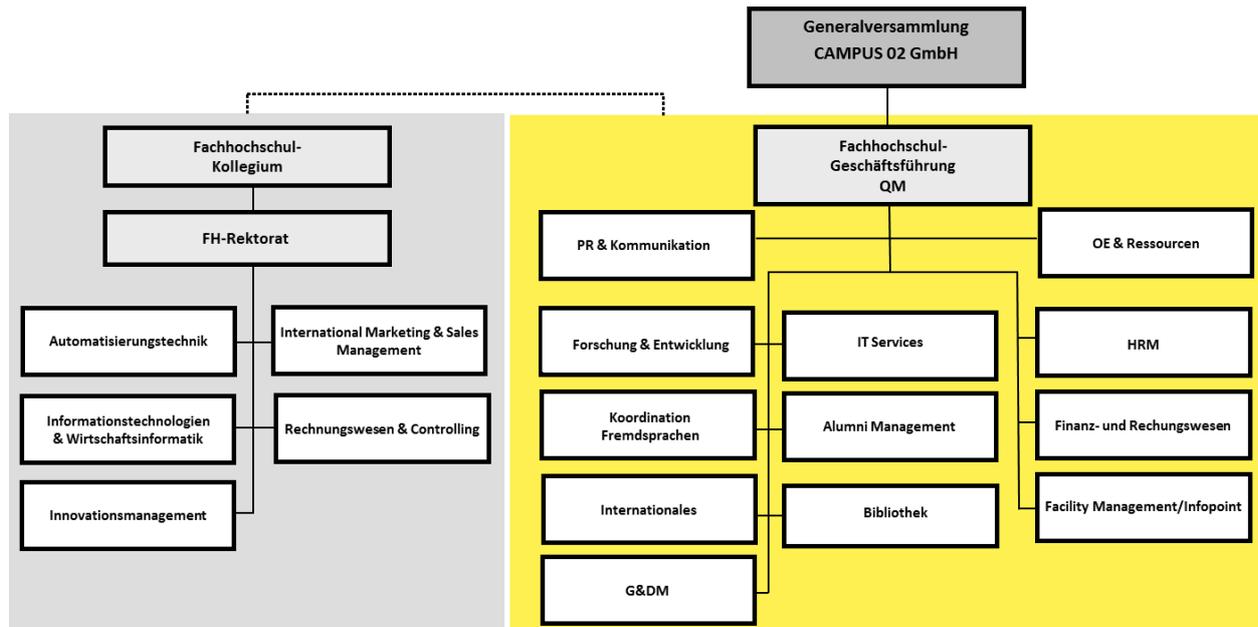


Abb. 1: Organigramm der FH CAMPUS 02 GmbH, Quelle: FH CAMPUS 02.

2.3 Studienrichtungen

Die FH CAMPUS 02 bietet fünf Studienrichtungen zur Auswahl an:²

- Automatisierungstechnik
- Innovationsmanagement
- Informationstechnologien & Wirtschaftsinformatik
- Rechnungswesen & Controlling
- International Marketing & Sales Management

2.4 Vision

„Die FH CAMPUS 02, die Fachhochschule für unternehmerisches Denken in Graz, orientiert sich am Bedarf der Unternehmen und bildet dies auch in der Organisationsstruktur ab. Alle Studiengänge zielen auf die Vorbereitung auf und die Weiterentwicklung in Schlüsselfunktionen in Unternehmen ab. Die FH CAMPUS 02 bildet als Fachhochschule der Wirtschaft akademische UnternehmerInnen sowie Fach- und Führungskräfte für die Wirtschaft aus.“²

² FH CAMPUS 02 GmbH (2016), Onlinequelle [21.07.2017].

3 GRUNDLAGEN DER GENERATIVEN FERTIGUNG

Der folgende Abschnitt beschreibt wichtige Grundlagen der generativen Fertigung, wobei der Fokus hierbei auf die Fused Filament Fabrication-Technologie gelegt wird. Kriterien wie Besonderheiten der generativen Fertigung, die Vor- und Nachteile bis hin zu den Anforderungen an einen / eine KonstrukteurIn stehen hierbei im Vordergrund. Darüber hinaus wird ein besonderes Augenmerk auf die Potenziale der Produktentwicklung und auf die grundlegenden Charakteristiken der Fused Filament Fabrication-Technologie mit speziellem Fokus auf Verbindungstechnik gelegt.

3.1 Besonderheiten und Eigenschaften

Unter generativen Fertigungsverfahren, auch Schichtbauverfahren genannt, werden jene Verfahren verstanden, welche Bauteile durch das schichtweise Aneinanderfügen von Volumenelementen herstellen, siehe Abb. 2. Das englische Pendant zum deutschen Begriff Generative Fertigung ist Additive Manufacturing, wobei beide Bezeichnungen genormt sind.³

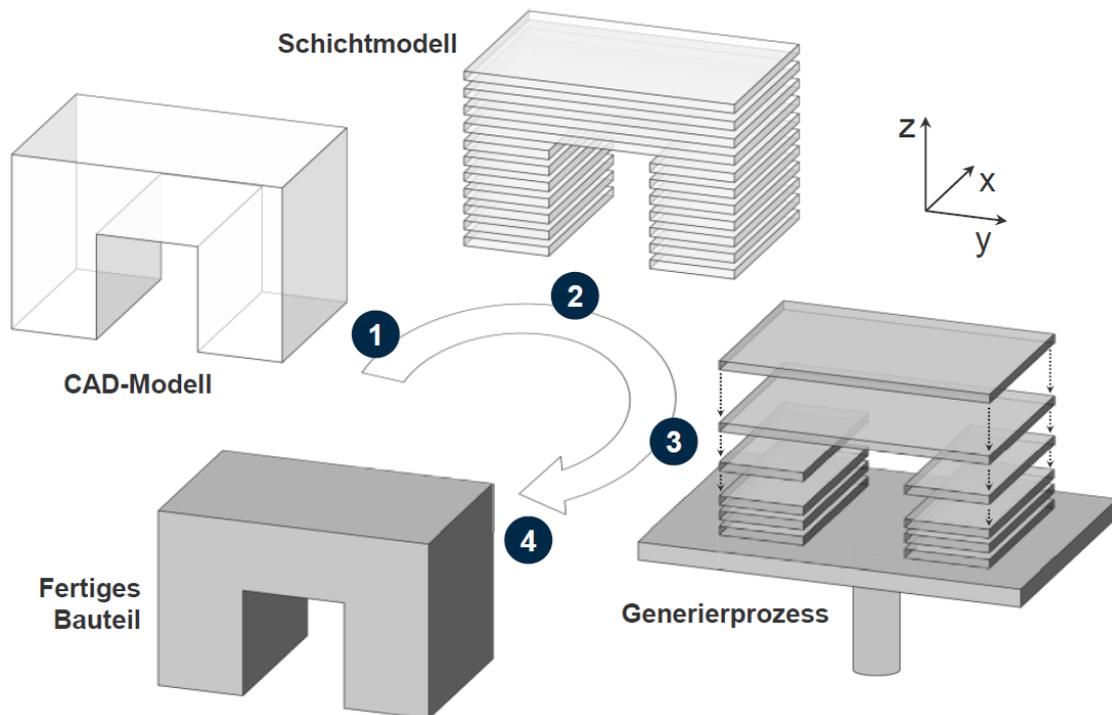


Abb. 2: Funktionsprinzip von generativen Fertigungsverfahren, Quelle: Schmidt (2016), S. 20.

Das Schichtbauprinzip beruht darauf, dass ein Volumenkörper durch den sogenannten „Slicingprozess“ welcher in der Prozesssoftware stattfindet, in Scheiben geschnitten wird. Ergebnis daraus ist ein Modell, welches Schicht für Schicht physisch aufgebaut wird. Charakteristisch für generative Fertigungsverfahren ist, dass während des Fertigungsprozesses nicht nur die Geometrie, sondern auch die Stoffeigenschaften entstehen.⁴

³ Vgl. Gebhardt (2013), S. 3.

⁴ Vgl. Gebhardt (2013), S. 1f.

Auf Basis des Schichtbauprinzips weisen generative Fertigungsverfahren besondere Eigenschaften auf:⁵

- Die Erzeugung der Schichten entsteht aus den 3D-CAD-Daten
- Die Generierung der Materialeigenschaften erfolgt während des eigentlichen Prozesses
- Die Bauteile können in jede beliebige Richtung gefertigt werden → Individuelle Positionierung des Bauteils im Raum, beeinflusst jedoch die Abbildungsgenauigkeit
- Das Dateiformat für die Prozesssoftware, in welcher die Oberfläche eines 3D-CAD-Modells durch Dreiecksfacetten beschrieben wird, wird als Standard Tessellation Language kurz STL bezeichnet

3.1.1 Allgemeingültige Randbedingungen

Angesichts der Fertigungsart kann es vorkommen, dass es geometrieabhängig zu einer mangelhaften Anbindung einzelner Bereiche eines Bauteils kommt:⁶

- **Insel, Überhang und Treppenstufeneffekt:** Eine Insel ist ein Element, welches erst zu einem späteren Zeitpunkt des Fertigungsprozesses zu einem Bauteil verbunden wird. Hierbei ist vor allem auf den Winkel zwischen Bauplattform und Bauteil zu achten, $38,60^\circ$ in Abb. 3. Aufgrund des Treppenstufeneffekts kann beim Fused Filament Fabrication-Verfahren das Bauteil ab einem Winkel von ungefähr 45 Grad nicht mehr ordnungsgemäß aufgebaut werden. Ab diesem Bereich sind Stützstrukturen vorzusehen. Ab wie viel Grad jedoch der Überhang tatsächlich gestützt werden muss, ist immer vom eingesetzten Material abhängig.

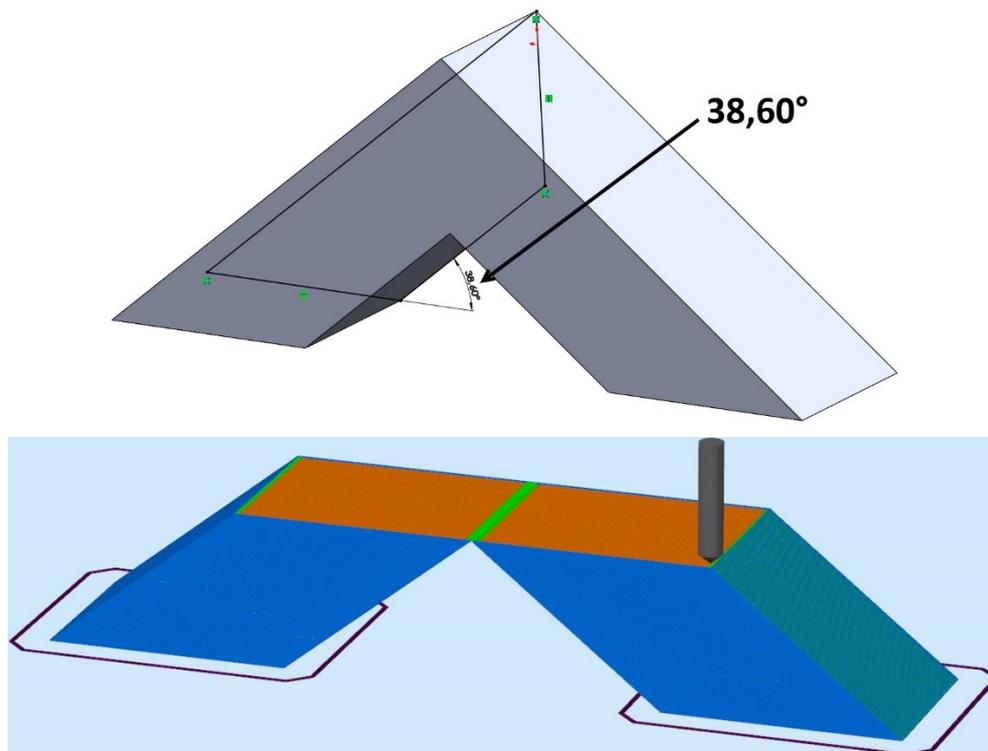


Abb. 3: 3D-CAD einer Insel (oben) und Slicingprozess (unten), Quelle: Eigene Darstellung, Vgl. VDI-Richtlinie 3405 (2015), S. 7.

⁵ Vgl. Gebhardt (2013), S. 4.

⁶ Vgl. VDI-Richtlinie 3405 (2015), S. 6f.

3.1.2 Maß-, Form-, und Lagegenauigkeiten

Abhängig vom eingesetzten Verfahren, des verwendeten Materials und den dazugehörigen Prozessparametern können Bauteile in unterschiedlicher Genauigkeit gefertigt werden. Ein Prozessparameter welcher hierbei eine große Bedeutung hat, ist die Schichtstärke (Layer Height). Je feiner diese gewählt wird, desto homogener wird die Oberfläche des Bauteils. Beim Fused Filament Fabrication-Verfahren spricht man hier auch vom Fingernageleffekt, der aufgrund der Kerben zwischen den einzelnen Schichten zur Geltung kommt. Weiters können je nach Bauteilorientierung unterschiedliche Genauigkeiten erreicht werden. Ein weiterer wichtiger Faktor ist, dass die Schrumpfung des Bauteils aufgrund des thermischen Prozesses nicht in alle Richtungen (x-, y- und z-Richtung) homogen ist.⁷

3.1.3 Datenqualität, Auflösung und Darstellung

Die Ausgangsbasis für generative Fertigungsverfahren sind 3D-CAD-Modelle. Das sich bereits als Quasi-Industriestandard durchgesetzte STL-Format (Surface Tesselation Language) fungiert dabei als Datenaustauschformat. Eine STL-Datei beschreibt im Wesentlichen die Oberfläche eines Bauteils mithilfe von Dreiecksfacetten. Auch gekrümmte Flächen werden mittels Dreiecksflächen angenähert, umso das Modell für die Prozesssoftware abzubilden. Dabei spielt die Größe dieser Flächen eine entscheidende Rolle. Je feiner die Dreiecke und somit die Auflösung gewählt wird, desto genauer kann das Modell abgebildet werden. Daraus folgt, dass bereits bei der Erstellung der STL-Datei auf die erforderliche Auflösung geachtet werden muss, den letztendlich bestimmt auch die Auflösung des Modells die Geometriequalität des zu fertigenden Bauteils. Eine zu hohe Auflösung des Modells beansprucht einerseits viel Speicherplatz, verlangsamt den Datentransfer und die Modellverarbeitung durch die Prozesssoftware, andererseits kann bei einer zu geringen Auflösung des Modells das Bauteil nicht mehr realitätstreu abgebildet bzw. gefertigt werden. Ein wichtiger Parameter bei der Erstellung einer STL-Datei ist die Sehnenhöhe. Diese bestimmt den maximalen Wert den ein Punkt auf der Bauteiloberfläche vom erzeugten Dreieck abweichen darf. Empfohlene Einstellungen sind im Bereich von einem bis zwei Hundertstel Millimeter. Da eine STL-Datei keine Information zu dem verwendeten Einheitensystem übergibt sollte darauf geachtet werden, dass die Maßeinheit jedes Modells, siehe Abb. 4, in Millimeter angegeben wird.⁸

⁷ Vgl. VDI-Richtlinie 3405 Blatt 3, S. 7f.

⁸ Vgl. VDI-Richtlinie 3405 Blatt 3, S. 8f.

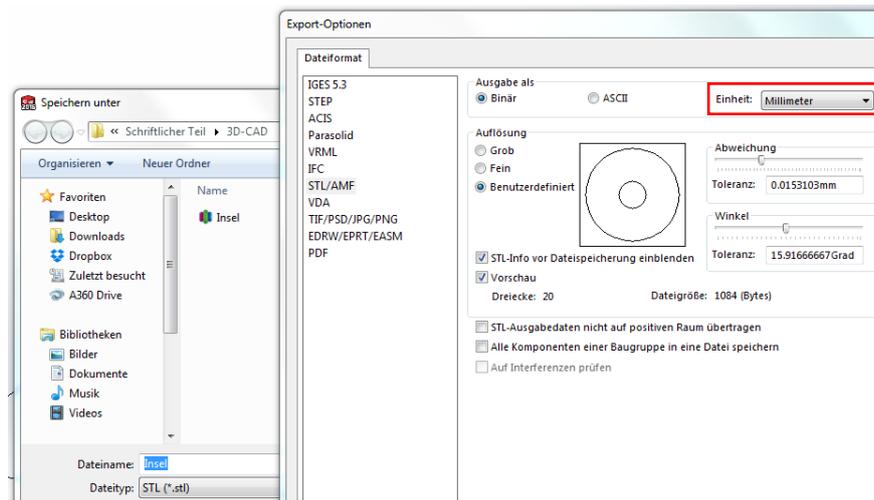


Abb. 4: STL-Datei Exportinformationen aus einer CAD-Software, Quelle: Eigene Darstellung.

3.2 Technologien, Einsatzgebiete, Vor- und Nachteile

Die erste 3D-Drucktechnologie war Stereolithografie, welche in den frühen 1980er Jahren entwickelt wurde. Damals stand die Technologie für Prototypenfertigung, um die Entwicklungsphase (time-to-market) wesentlich zu beschleunigen. Gegenwärtig werden generative Fertigungsverfahren sowohl für den Prototypenbau, den Werkzeug- bzw. Vorrichtungsbau als auch für die Fertigung von Komponenten für ein Endprodukt verwendet. Im Wesentlichen können generative Fertigungsverfahren in fünf Gruppen (Schmelzschiichtung, Aushärten, Aufschmelzen, Verkleben und Sonderformen), siehe Abb. 5, eingeteilt werden.⁹

Gruppe	Basis	Prinzip	Druckverfahren (Beispiele)	Materialien (Beispiele)
Schmelzschichtung	Geschmolzene Materialien	Schmelzschiichtung	Fused Deposition Modeling (FDM)	Kunststoffe (z. B. ABS, PLA, Nylon, PET, ASA, POM, PP) und Kunststoffmischungen (z. B. Holz, Stein, Karbon, Kupfer)
			Fused Filament Fabrication (FFF)	
Aushärten	Flüssige Materialien	Druckkopf	PolyJet (PJM)	Kunstharze, UV-sensitive Flüssigkunststoffe, Wachs
			Multi-Jet Modeling (MJM)	
			Wachsdruk (3DWP)	
Aushärten	Flüssige Materialien	Stereolithografie mit Laser	Stereolithografie (STL, SLA)	Kunstharze, lichtempfindliche Flüssigkunststoffe, Epoxidharze, Elastomere, Acrylate
			Digital Light Processing (DLP)	
Aushärten	Flüssige Materialien	Stereolithografie mit Maske	Film Transfer Imaging (FTI)	Kunstharze, lichtempfindliche Flüssigkunststoffe, Epoxidharze, Elastomere, Acrylate
Aufschmelzen	Pulver	Sintern	Selektives Lasersintern (SLS)	Kunststoffe, Metalle, Legierungen, Keramik
			Selective Heat Sintering (SHS)	
Aufschmelzen	Pulver	Schmelzen	Selektives Laserschmelzen (SLM)	Kunststoffe, Metalle, Legierungen, Keramik
			Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	
Verkleben	Pulver, Papier	Schichten Verkleben Cutting	Laminated Object Modeling (LOM)	Gips
Verkleben	Pulver, Papier	Schichten Verkleben Cutting	Layer Laminated Manufacturing (LLM) 3DP, PLT	Papier
Sonderformen	Div.	Diverse	Contour Crafting (CC) etc.	Beton, Wachs, Teig, Silikon, Schokolade, Weingummi

Abb. 5: Überblick über generative Technologien und deren Materialien, Quelle: Feldmann / Pumpe (2016), S. 6.

⁹ Vgl. Feldmann / Pumpe (2016), S. 5f.

Die Einsatzgebiete von generativen Fertigungsverfahren erstrecken sich von Präsentationsmodellen bis hin zur Kleinserienproduktion, abhängig vom jeweiligen Verfahren. Mit generativen Fertigungsverfahren ist es bereits jetzt möglich unterschiedlichste Materialien zu verarbeiten – Tendenz steigend. Großen Zuspruch erhält diese Technologie vor allem in der Medizin. Forschungsgebiet ist unter anderem ein 3D-Druck eines funktionsfähigen Herzens unter Verwendung eines organischen Materials.¹⁰

Die Generative Fertigung hat exakt dort ihre Stärken und Potenziale, wo konventionelle Fertigungsverfahren an ihre Grenzen stoßen. Auf Basis einer schnelleren Produktentwicklung und Wiederbeschaffung, bessere Produkteigenschaften und erhebliche Kostenersparnisse findet diese Technologie immer mehr Anklang in der Industrie. Diese sieht den Mehrwert der generativen Fertigung in der Herstellung komplexer Baugruppen, welche konstruktiv zu einem gemeinsamen Bauteil zusammengefasst werden können. Mittels Funktionsintegration und nur mehr einem Bauteil wird einerseits Entwicklungszeit gespart und andererseits Montage- und Produktionskosten verringert.¹¹

Verfahrenstypische Vorteile von generativen Fertigungsverfahren:¹²

- Werkzeuglose Fertigung der Bauteile in einem Prozessschritt.
- Hohe Anzahl an Freiheitsgraden bei der Gestaltung von Bauteilen z.B. Werkzeugzugänglichkeit, Hinterschnitte.
- Herstellung komplexer Geometrien leicht möglich z.B. Bionische Strukturen, topologisch optimierte Strukturen, filigrane Strukturen wie Waben- und Gitterstrukturen.
- Die Eigenschaften der Bauteile können lokal durch die Einstellung der Prozessparameter angepasst werden.
- Auf Basis der Gestaltungsfreiheit der Bauteile kann die Funktionalität erhöht werden.
- Der Grad der Bauteilkomplexität ist unabhängig von den Fertigungskosten.
- Durch Integralbauweise können Montage- und Fügevorgänge eingedämmt werden.

Verfahrenstypische Nachteile von generativen Fertigungsverfahren:¹³

- Durch lokale Temperaturunterschiede können Schrumpfungen, Eigenspannungen und Verformungen (Warping) am Bauteil auftreten, wobei diese Faktoren abhängig vom verwendeten Material sind.
- Resultierend aus der Aufbaurichtung sind alle generativ hergestellten Bauteile mit dem Treppenstufeneffekt, siehe Abb. 6 versehen → dieser kann jedoch durch die richtigen Prozessparameter, als auch durch diverse Nachbearbeitungsmöglichkeiten vermindert werden.

¹⁰ Vgl. Feldmann / Pumpe (2016), S. 7.

¹¹ Vgl. Keil (2016), S. 176.

¹² Vgl. VDI-Richtlinie 3405 Blatt 3, S. 5f.

¹³ Vgl. VDI-Richtlinie 3405 Blatt 3, S. 6.

- Die Abweichungen der Bauteilmaßhaltigkeit sind zu beachten → für Funktionsflächen muss ein Aufmaß zur Nachbearbeitung vorgesehen werden.
- Anisotrope Eigenschaften aufgrund des schichtweisen Aufbaus der Bauteile.
- Potential hinsichtlich Materialpalette für generative Fertigungsverfahren vorhanden bzw. noch teilweise in der Entwicklung.

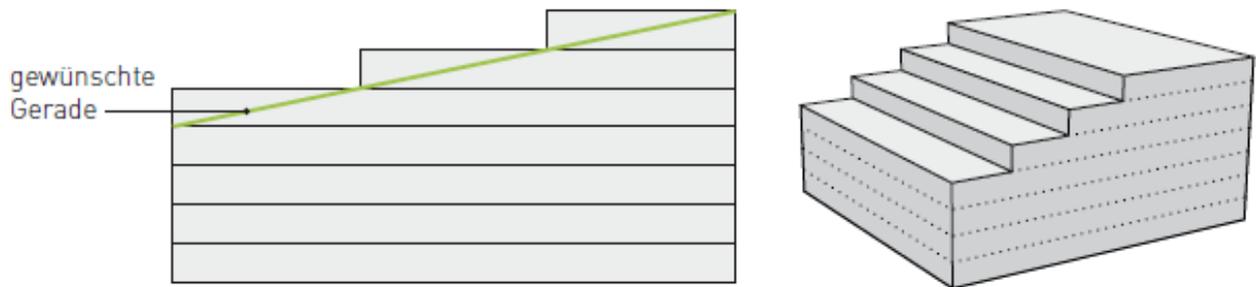


Abb. 6: Treppenstufeneffekt von generativen Fertigungsverfahren, Quelle: Breuninger u. a. (2013), S. 55.

3.3 Fused Filament Fabrication

In diesem Abschnitt wird beginnend mit der Funktionsweise, der Anlagentechnik und den Vor- bzw. Nachteilen der generativen Fertigungstechnologie Fused Filament Fabrication besonderer Fokus auf den Entwicklungsprozess, die technologischen Einschränkungen und auf die Anforderungen an die Konstrukteure gelegt.

3.3.1 Funktionsweise

Bei der Fused Filament Fabrication-Technologie wird ein drahtförmiges Kunststoffmaterial durch eine beheizte Düse gepresst und mittels Linearführungen in x- und y-Richtung auf einer ebenfalls beheizbaren Bauplattform (z-Richtung) geometrieabhängig aufgetragen. Durch den schichtweisen Auftrag des Materials wird das Bauteil gefertigt, siehe Abb. 7.¹⁴

¹⁴ Vgl. Breuninger u. a. (2013), S. 33.

Das auf einer Spule aufgewickelte Rohmaterial wird bis knapp unter die Schmelztemperatur erhitzt und in teiligem Zustand entweder auf die Bauplattform oder der vorherigen Schicht aufgetragen. Nach Fertigstellung des Schichtauftrags, wird die Bauplattform um genau eine Schichtstärke abgesenkt und der Prozess wiederholt. Die einzelnen Schichten erkalten und verfestigen sich aufgrund von Wärmetransport. Infolge des charakteristischen Aufbaus der Bauteile, sollte der Abstand von Düse zu Bauplattform immer richtig eingestellt sein, damit solide Strukturen mit relativ glatten Oberflächen realisiert werden können.¹⁵

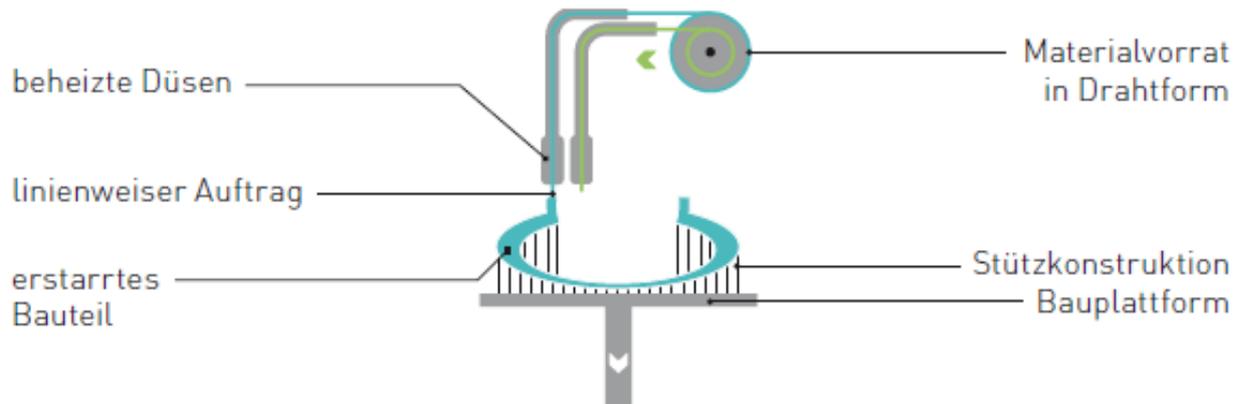


Abb. 7: Funktionsweise von Fused Filament Fabrication, Quelle: Breuninger u. a. (2013), S. 32.

3.3.2 Anlagentechnik

Für die Herstellung aller Bauteile, einerseits der Probenkörper für die Zugversuche und andererseits der Probenkörper für die unterschiedlichen Verbindungstechniken, wird der 3D-Drucker HAGE 3D-72L-A der Firma HAGE Sondermaschinenbau GmbH & Co KG aus Obdach verwendet. Als Fertigungssoftware wird die von HAGE Sondermaschinenbau mitgelieferte Software Simplify3D verwendet. Der 3D-Drucker verfügt unter anderem über ein justierbar vorgespanntes Druckbett, welches auf bis zu 110 °C erwärmt werden kann. Der Antrieb des 3D-Druckers wird durch Schrittmotoren gewährleistet. Diese bestechen durch Eigenschaften wie einer hochpräzisen Positionierung, glatte und präzise Bewegungen und geringe Erwärmung. Die Hauptbestandteile des HAGE 3D-72L-A sind in Abb. 8 dargestellt.¹⁶

¹⁵ Vgl. Gebhardt (2013), S. 251.

¹⁶ Vgl. HAGE (2016), S. 20.

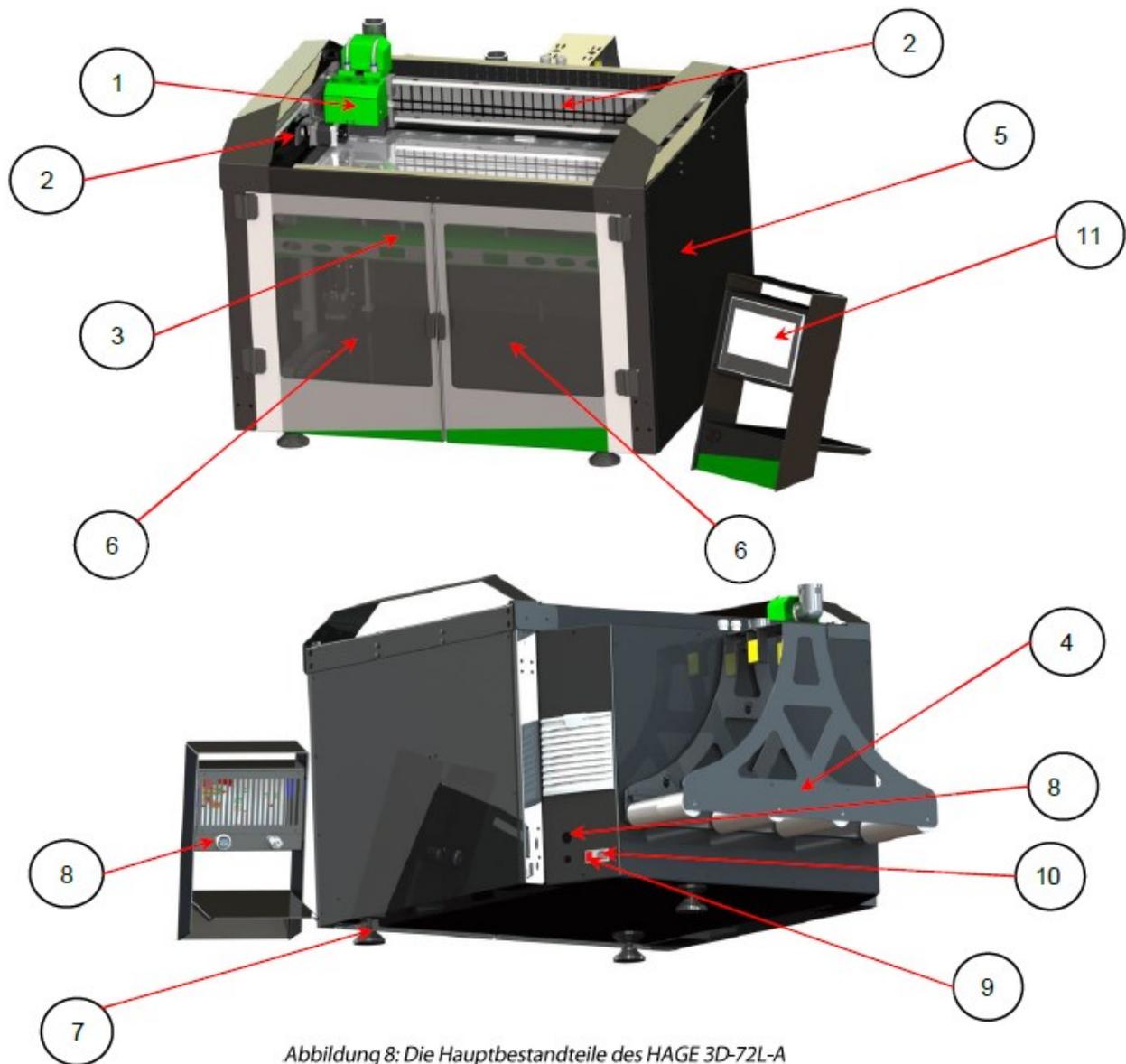


Abbildung 8: Die Hauptbestandteile des HAGE 3D-72L-A

- | | |
|--------------------------------------|-----------------|
| 1 Dual Druckkopf | 7 Stellfüße |
| 2 X-Y-Achssystem | 8 Schnittstelle |
| 3 Z-Achse Drucktisch inkl. Druckbett | 9 Hauptschalter |
| 4 Filamentabwicklung | 10 AC-Anschluss |
| 5 Grundgestell | 11 Bedienpult |
| 6 Fronttüren | |

Abb. 8: Hauptbestandteile des HAGE 3D-72L-A 3D-Druckers, Quelle: Betriebsanleitung HAGE 3D-72L-A (2016), S. 24.

Bevor ein Fertigungsprozess gestartet werden kann, müssen folgende Tätigkeiten durchgeführt werden:

1. Betätigung des Hauptschalters zum Einschalten des 3D-Druckers
2. Justierung aller Achsen (x-, y-, und z-Achse)
3. Anstecken des USB-Sticks, welcher den Maschinencode des zur fertigenden Bauteils enthält, an das Bedienpult
4. Auswahl der Druckdatei
5. Betätigung des Bedienfeldes Druck starten

Tab. 1 gibt eine Übersicht über allgemeine Informationen und technische Daten der verwendeten Anlage.¹⁷

Allgemeine Informationen und technische Daten	
Modell	HAGE 3D-72L-A
Drucktechnologie	FFF (Schmelzschicht)
Materialdurchmesser	1,75 mm
Druckfläche (L x B)	600 mm x 400 mm
Druckhöhe	maximal 285 mm
Druckvolumen	maximal 68400 cm ³
Länge	1450 mm
Breite	1250 mm
Höhe	ca. 1040 mm
Gewicht	ca. 100 kg
Maximale Druckkopftemperatur	260 °C
Maximale Plattformtemperatur	110 °C
Minimale Betriebstemperatur	+10 °C
Maximale Betriebstemperatur	+40 °C
AC-Eingang	100 – 240 V / 50 Hz
Anschluss	USB 2.1
Geschwindigkeit x- und y-Achse	maximal 250 mm / s
Geschwindigkeit z-Achse	maximal 150 mm / s
Positioniergenauigkeit xy-Ebene	< 0,1 mm

Tab. 1: Allgemeine Informationen und technische Daten des verwendeten 3D-Druckers, Quelle: Betriebsanleitung HAGE3D 72 L (2016), S. 20f.

¹⁷ Vgl. Betriebsanleitung HAGE 3D-72L-A (2016), S. 20f.

3.3.3 Vor- und Nachteile des HAGE 3D-72L-A 3D-Druckers

Vorteile:¹⁸

- Preiswerte Anlagentechnik
- Nutzung eines breiten Materialspektrums möglich
- Einfache Erzeugung einer teilgefüllten Innenstruktur
- Teile aus mehreren Komponenten möglich
- Großer Bauraum

Nachteile:¹⁹

- Anisotropie der mechanischen Eigenschaftswerte durch Schichtaufbau
- Je feiner die Schichtstärke des Modells, desto länger der Fertigungsprozess
- Begrenzte Detailauflösung aufgrund des Mindestquerschnitts des aus der Düse extrudierten Materialstranges

3.3.4 Entwicklungsprozess bzw. Prozessanalyse

Der Entwicklungsprozess lässt sich in folgende Phasen, siehe Abb. 9, unterteilen:²⁰

- Ausgangspunkt des Entwicklungsprozesses ist die Erstellung des digitalen 3D-CAD-Modells mittels entsprechender 3D-CAD-Konstruktionssoftware für das jeweilige generative Fertigungsverfahren. In diesem Stadium sollten bereits die dementsprechenden Konstruktionsempfehlungen, siehe Kapitel 8, vom Konstrukteur beachtet werden.
- Der zweite Schritt ist die Erstellung der STL-Datei aus dem digitalen 3D-Modell, siehe Kapitel 3.1.3.
- In der nächsten Phase erfolgt die Datenübertragung zur Fertigungsmaschine mittels entsprechender Software. Beim Fused Filament Fabrication-Verfahren und im Speziellen auch in dieser Arbeit wird die Software Simplify 3D verwendet.
- In der vierten Phase wird die Maschine gerüstet. Hierunter versteht sich das Extrudieren des richtigen Materials, das Sicherstellen der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit inklusive Reinigung der Bauplattform und Aufbringen einer Haftungshilfe (Tape) bzw. Sprühklebers auf die Bauplattform.
- Danach erfolgt die eigentliche schichtweise Fertigung des digitalen 3D-CAD-Modells als physisches Bauteil.
- Nach diesem Schritt findet die Produktentnahme bzw. Säuberung der Bauplattform für den nächsten Druckprozess statt.

¹⁸ Vgl. Gebhardt (2013), S. 249f.

¹⁹ Vgl. Popp (2017), Onlinequelle [04.08.2017].

²⁰ Vgl. Breuninger u. a. (2013), S. 41f.

- Die vorletzte Phase ist die Nachbereitung des gedruckten Modells. Materialabhängig können hier unterschiedlichste Möglichkeiten (bohren, schleifen, mit Aceton bedampfen zur Oberflächenglättung etc.) zur Anwendung kommen
- Als letzte Phase der Prozessanalyse steht die konkrete Anwendung des Bauteils

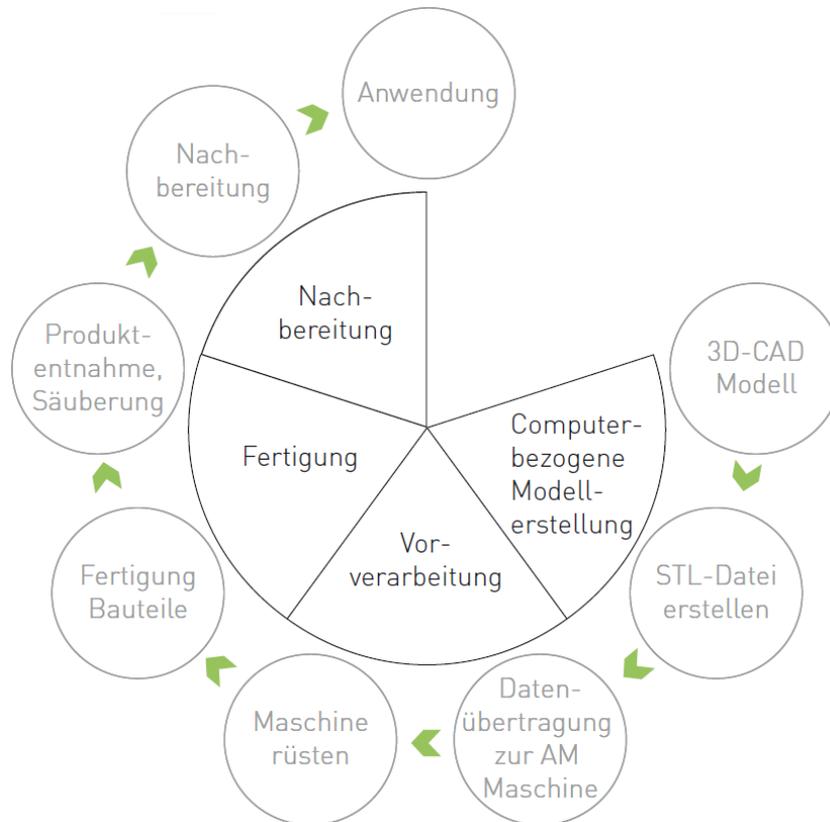


Abb. 9: Phasen der Prozessanalyse von generativen Fertigungsverfahren, Quelle: Breuninger u. a. (2013), S. 41.

3.3.5 Einsetzbare Materialien

Aufgrund der zahlreich verfügbaren Materialien für die Fused Filament Fabrication-Technologie, werden lediglich die drei am häufigsten verwendeten Materialien näher beschrieben.

Polyactide oder Polymilchsäure kurz PLA

Diese Kunststoffart besteht aus synthetischen Polymeren und gehört zu der Gruppe der Polyester. Um bestimmte Eigenschaften zu erreichen ist PLA, wie auch andere Kunststoffe, mit speziellen Additiven angereichert. PLA ist das mit Abstand am häufigste zum Einsatz kommende Material im Bereich des 3D-Drucks.²¹

²¹ Vgl. filamentworld (2017), Onlinequelle [08.08.2017].

Vorteile:²²

- Herstellung aus regenerativen Rohstoffen z.B. Maisstärke
- Schrumpfung beim Abkühlvorgang ist gering
- Relativ niedrige Schmelztemperatur
- Hohe Druckqualität
- Leichte Lösbarkeit des Bauteils von der Bauplattform
- Keine beheizte Bauplattform notwendig
- Schwere Entflammbarkeit
- Wasserabweisend
- Geringe Dichte → gut für Leichtbau geeignet
- Einsteigerfilament → leicht zu verarbeiten

Zahlen, Daten und Fakten:²²

- Drucktemperatur: 190 – 210 °C
- Erweichungstemperatur: 60 °C
- Maximale Druckgeschwindigkeit: 120 mm / s
- Dichte: 1,24 g / cm³
- Zugfestigkeit: 110 MPa
- Schlagzähigkeit: 6,5 kJ / m²
- E-Modul / Steifigkeit: ~ 3310 MPa
- Bruchdehnung: 160 %

Acrylnitril-Butadien-Styrol kurz ABS

ABS ist ein synthetisches Terpolymer und gehört zur Gruppe der amorphen Thermoplaste.²²

Vorteile:²²

- Gute Kratzfestigkeit
- Starke Hitzebeständigkeit (mehr als 85 ° C)
- Hohe Oberflächenhärte
- Gute Schlagfestigkeit
- Sehr zähes Material
- Hohe Flexibilität
- Nachbearbeitung möglich

²² Vgl. filamentworld (2017), Onlinequelle [08.08.2017].

- Starke mechanische Festigkeit und Steifigkeit
- Geringe Wasseraufnahme

Zahlen, Daten und Fakten:²³

- Drucktemperatur: 220 – 260 °C
- Erweichungstemperatur: 96 °C
- Maximale Druckgeschwindigkeit: 120 mm / s
- Dichte: 1,04 g / cm³
- Zugfestigkeit: 32 MPa
- Schlagzähigkeit: 25 kJ / m²
- E-Modul / Steifigkeit: ~ 2300 MPa²⁴
- Bruchdehnung: 20 %

Acrylester-Styrol-Acrylnitril kurz ASA

ASA ist ein sehr schlagzähes Terpolymer und hat ähnliche Eigenschaften wie ABS. Bauteile aus ASA bilden eine hochwertige und kratzfeste Oberfläche.²³

Vorteile:²³

- Witterungsbeständig
- Starke Schlagzähigkeit
- Hohe Belastbarkeit
- Hitzeformbeständiger als ABS
- Hochwertig, kratz- und abriebfest
- Beständigkeit gegen viele Chemikalien

Zahlen, Daten und Fakten:²³

- Drucktemperatur: 215 – 255 ° C
- Erweichungstemperatur: 96 ° C
- Maximale Druckgeschwindigkeit: keine Angabe
- Dichte: 1,07 g / cm³
- Zugfestigkeit: 42 MPa
- Schlagzähigkeit: 45 kJ / m²
- E-Modul / Steifigkeit: ~ 1800 MPa
- Bruchdehnung: 25 %

²³ Vgl. filamentworld (2017), Onlinequelle [08.08.2017].

²⁴ Vgl. Baumgärtner (2017), Onlinequelle [08.08.2017].

Da Verbindungselemente im Regelfall zwei Teile sicher und zuverlässig zusammenhalten soll, sind Eigenschaften wie Abriebfestigkeit, hohe Belastbarkeit, starke Hitzebeständigkeit sowie auch Chemikalienbeständigkeit etc., wichtige Parameter für die Langlebigkeit und Zuverlässigkeit des Verbindungselements. Aus diesem Grund werden für den praktischen Teil die Materialien Acrylester-Styrol-Acrylnitril bzw. Acrylnitril-Butadien-Styrol verwendet. Hauptfokus liegt auf der Verwendung des von der Firma Formfutura erzeugten Materials Acrylester-Styrol-Acrylnitril mit dem Produktnamen ApolloX in der Farbe Natural. Im Vergleich mit den oben genannten grundsätzlichen Zahlen, Daten und Fakten ist die Empfehlung der Firma Formfutura, das Material ASA ApolloX mit einer höheren Düsentemperatur von ungefähr 235 °C – 255 °C zu verarbeiten. Der große Mehrwert einer höheren Drucktemperatur ist die bessere Schichtverbindung der einzelnen Schichten untereinander, die sogenannte inter-layer adhesion. Diese ist neben der warpingfreien Verarbeitung, der thermischen Stabilität und der optimierten Fließeigenschaften eine Besonderheit des für den FFF-Druck optimierten Materials. In Bezug auf die praktische Umsetzung und die Fertigung der unterschiedlichen Verbindungstechniken hat ASA ApolloX somit entscheidende Vorteile. Die dritte Materialart Polyactide hat für die praktische Umsetzung industriell einsetzbarer Verbindungstechniken aufgrund der niedrigen Erweichungs- und Schmelztemperatur keine Relevanz und wird auch nicht weiter behandelt.²⁵

3.3.6 Technologische Einschränkungen

In diesem Abschnitt wird auf die am häufigsten auftretenden Einschränkungen der Fused Filament Fabrication-Technologie eingegangen:²⁶

- Haftung und Warping: Charakteristisch für eine fehlerfreie Fertigung ist die Qualität der ersten Schicht. Sind bereits bei der ersten Schicht Haftungsprobleme vorhanden, können sich dadurch Probleme im weiteren Druckverlauf ergeben. In Abb. 10 ist ein Vergleich eines schlechten Aufbaus (links) und eines optimalen Aufbaus (rechts) der ersten Schichten dargestellt.



Abb. 10: Schlechte Schichten (links) und optimale Schichten (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

²⁵ Vgl. Formfutura (2017), Onlinequelle [08.08.2017].

²⁶ Vgl. JUST3DP (2016), Onlinequelle [18.08.2017].

- Aufgrund des verfahrenstypischen thermischen Druckprozesses, kühlt jede einzelne aufgetragene Schicht sukzessive ab. Die Dauer des Abkühlungsvorgangs hängt in der Regel vom verwendeten Material ab. Dementsprechend ist auch die Schrumpfung und der damit verbundene Waringeffekt unterschiedlich stark ausgeprägt. Da die Bedingungen für die Abkühlung (geschlossener Raum, keine- bis minimale Zugluft, aktive Bauraumheizung etc.) schwer zu kontrollieren und immer etwas anders sein können, kann es aufgrund der offenen Druckerbauweise zu einem Ablösen bzw. Verschiebung des Bauteils kommen. Dieser unerwünschte Vorgang wird in der generativen Fertigung als Warping bezeichnet. Ganz besonders bei Materialien wie ABS und klassischem ASA bildet sich der Effekt sehr häufig aus, welcher je nach Ausprägung eine Verwendung des gefertigten Bauteils unmöglich macht. Weiters ist bei Feststellung dieses Effekts, welcher in Abb. 11 nochmals verdeutlicht wird, nur mehr ein Druckjobabbruch sinnvoll.

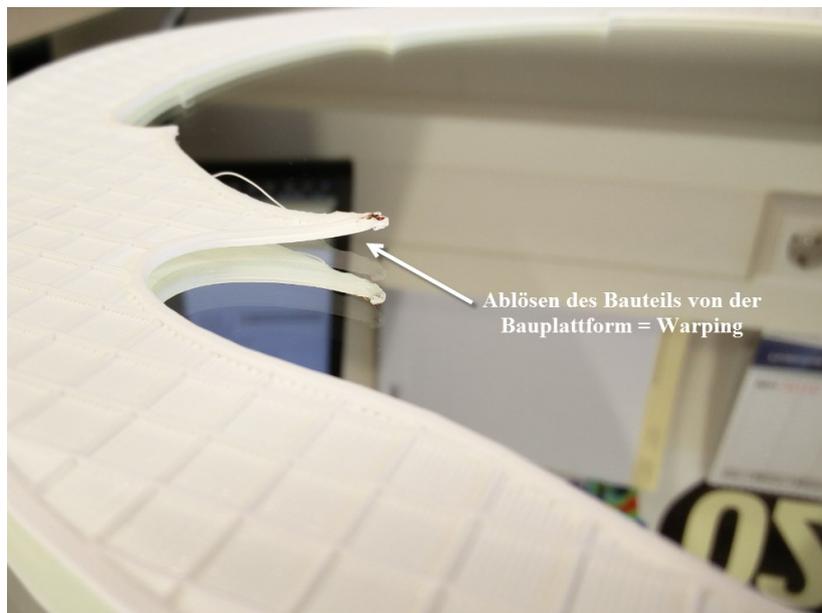


Abb. 11: Waringeffekt eines mittels weißem PLA nicht fertiggedruckten Bauteils, Quelle: Eigene Darstellung.

Abhilfe:

1. Verbesserung der Prozessparameter (z.B. erhöhte Plattformtemperatur von 70 °C bei ASA, Vergrößerung der Fläche unter Verwendung eines Brims, etc.). Ein Brim ist eine zusätzliche Schicht, welche um das zu fertigende Bauteil herum gedruckt wird.
2. Neuausrichtung der Bauplattform und Korrektur des richtigen Abstandes → bevorzugter Weise 0,1 mm von Bauplattform zu Düse.
3. Verringerung der Druckgeschwindigkeit → die erste Schicht wird zur besseren Haftung immer mit 50 % der eingestellten Standard-Geschwindigkeit gedruckt.
4. Erhöhung bzw. Verringerung der Drucktemperatur (materialabhängig) und der eingestellten Bauteilkühlung.
5. Verwendung von diversen Haftungshilfsmitteln wie Taps oder Sprühkleber.
6. Erhöhung der Bauteiloberfläche unter Verwendung eines Brims bzw. Rafts → bei einem Brim wird geometrieabhängig zusätzliches Material um das Bauteil herum mitgedruckt und als Raft wird eine stabile Bodenschicht bezeichnet, die noch vor der ersten Schicht auf die Bauplattform aufgetragen wird.

- Verzug bzw. Wölbung an der Basis: Dieser unerwünschte Effekt tritt auf, wenn das Gewicht des Bauteils auf die ersten Schichten lastet und diese noch nicht vollständig ausgehärtet sind.

Abhilfe:

1. Kalibrierung der Bauplatzform
 2. Minimale Erhöhung des Abstandes von Bauplatzform zur Düse
 3. Verringerung der Bauplatzformtemperatur
 4. Einfügen einer Fase an der Basis des digitalen Modells
- Fehlende Schichten: Da der Aufbau der Bauteile Schicht für Schicht erfolgt, ist eine kontinuierlich gleichbleibende Extrusion für einen stabilen Prozess zwingend notwendig. Sollten fehlende Schichten im Bauteil vorhanden sein, spricht man auch von Unter-Extrusion.

Abhilfe:

1. Reinigung der Düse bzw. des Antriebsrades des Schrittmotors
 2. Kontrolle der Abrollbarkeit der eingesetzten Spule → Material kann sich auch ineinander verhängt haben
- Über-Extrusion: Der Gegenpart zur Unter-Extrusion ist die Lieferung von zu viel Material. Dieser Materialüberschuss macht sich an der Außenseite des Bauteils bemerkbar.

Abhilfe:

1. Reduzierung der Flussrate
 2. Verminderung des Extrusion-Multipliers
- Löcher im Bauteil (Pillowing): Dieser Effekt tritt an der Oberfläche von gedruckten Bauteilen auf.

Abhilfe:

1. Erhöhung der Lüfterleistung beim Druck der letzten Schichten
 2. Erhöhung der geschlossenen Deckschichten
- Fädenbildung (Stringing): Die Entstehung von Materialfäden entsteht vorrangig, wenn sich der Druckkopf über eine freie Fläche bewegt an welcher kein Material aufgetragen wird. Dadurch kommt es zum Tropfen bzw. Herausquellen des Materials aus der Düse, welches am gedruckten Bauteil als Fädenbildung sichtbar ist.

Abhilfe:

1. Erhöhung der Rückzugsfunktion (Retraction-Distance)
- Schichtzusammenhalt: Aufgrund des Schichtbauprinzips spielt der Schichtzusammenhalt für die Stabilität eines Bauteils eine wesentliche Rolle. Was nicht passieren darf ist, dass sich einzelne Schichten voneinander ablösen und so keine Stabilität mehr vorhanden ist.

Abhilfe:

1. Materialabhängige Erhöhung der Druck- und Bauplatzformtemperatur

- Eckenabbildung: Die Außenseiten eines Bauteils sind aufgrund der kreisrunden Druckdüse automatisch immer mit einem Radius versehen, siehe Abb. 12. Lediglich die Innenkonturen können scharf abgebildet werden.²⁷

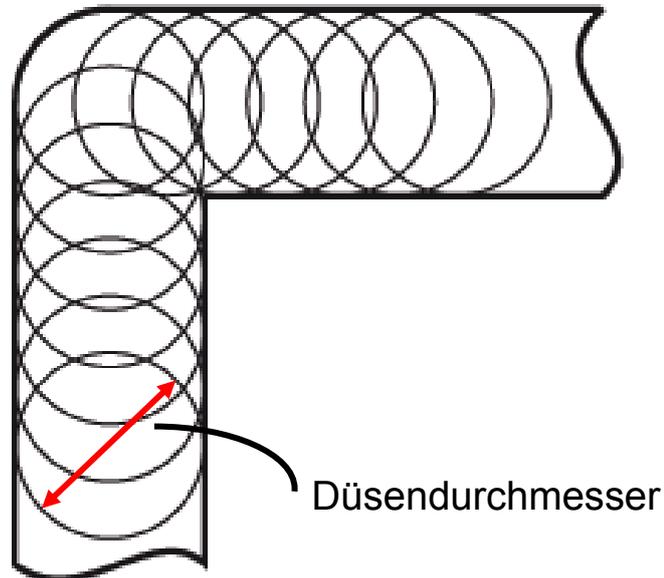


Abb. 12: Abbildung von Ecken, Quelle: Gebhardt (2013), S. 253.

- Filigrane Geometriedetails bzw. feine Stege: Die Abbildung filigraner Details bzw. feiner Stege, wie in Abb. 13 verdeutlicht, sind direkt von der verwendeten Düse und deren Durchmesser abhängig. Beispielsweise kann unter Verwendung einer 0,4 mm Düse keine Struktur die feiner als der Düsendurchmesser ist abgebildet werden.²⁷

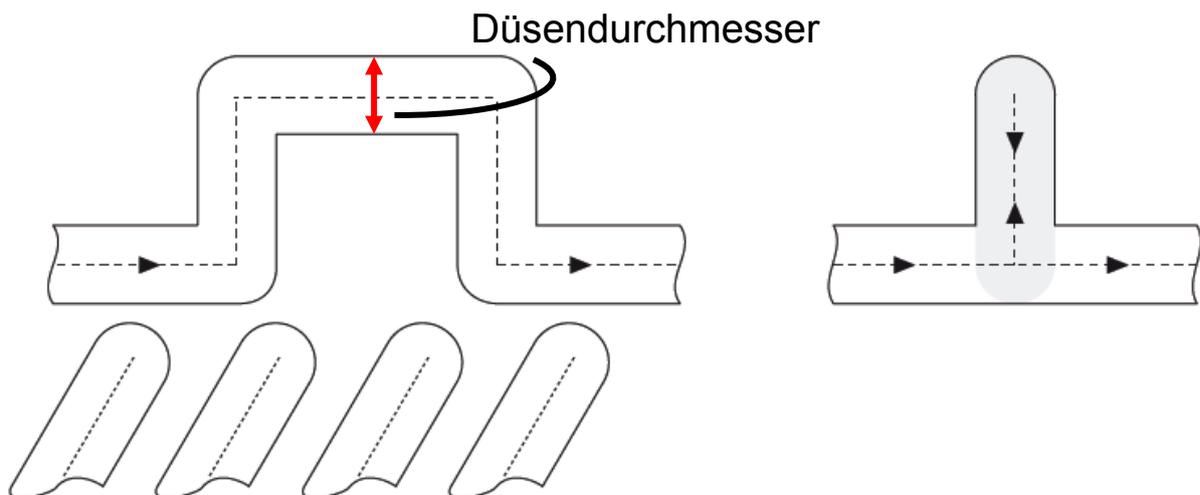


Abb. 13: Abbildung filigraner Geometriedetails bzw. feiner Stege, Quelle: Gebhardt (2013), S. 253.

²⁷ Vgl. Gebhardt (2013), S. 253.

3.3.7 Zukünftige technologische Möglichkeiten

Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung der verfügbaren Materialien, ergeben sich neue Einsatzgebiete für die generative Fertigungstechnologie Fused Filament Fabrication. Zukünftig sollen generativ gefertigte Bauteile sowohl in der Luft- und Raumfahrt als auch in der Automobilindustrie in Serie eingesetzt werden können. Grund dafür ist die Verarbeitung von Verbundmaterialien wie glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK), karbonfaserverstärkten Kunststoff (CFK) und Nylon-Filament, siehe Abb. 14. Diese werden Schicht für Schicht in die Kunststoffmatrix einbettet und verleihen dem fertigen Bauteil sowohl eine höhere Steifigkeit als auch eine höhere gewichtsspezifische Festigkeit. Ausgangsbasis dafür ist jedoch das Wissen über die Möglichkeiten der Konstruktion und Fertigung generativ gefertigter Bauteile. Wichtig ist die Kombination der eingesetzten Materialien und Materialkombinationen in Bauteilen als auch deren Verbindungsmöglichkeiten untereinander. Alle diese Faktoren, wie mechanische Belastbarkeit, material- und technologiespezifische Toleranzen, sowie auch die Maßhaltigkeit der gefertigten Bauteile sind die Basis für weitere zukünftige technologische Möglichkeiten im Bereich der Fused Filament Fabrication-Technologie.²⁸

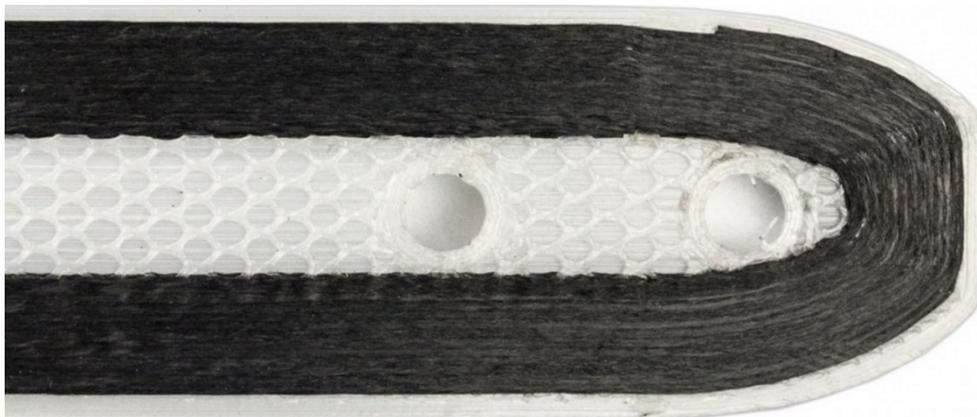


Abb. 14: Kohlefaserverstärkter Rennwagen-Flügel mit Nylonverkleidung und Wabenstruktur im Querschnitt, Quelle: Heise (2014), Onlinequelle [18.08.2017].

3.4 Qualität, Kosten und Zeit

Unter dem Spannungsdreieck zwischen Qualität, Kosten und Zeit, siehe Abb. 15, werden in Bezug auf generative Fertigungsverfahren folgende Faktoren verstanden:²⁹

- Durch erhöhte Qualitätsstandards werden Kosten für Fehlererkennung, Ausschuss, Gewährleistung, Kundendienst und Kundenverlust gesenkt.
- Auf Basis von längeren Entwicklungszeiten entsteht erhöhte Produktqualität und damit einhergehend geringe Fehlerfolgekosten.
- Aus höheren Qualitätsstandards resultieren steigende Produktkosten.
- Mittels einer hohen organisatorischen Prozessqualität bzw. Wertschöpfungseffizienz in der Unternehmung können Entwicklungszeiten reduziert werden.

²⁸ Vgl. INGENIEUR (2014), Onlinequelle [18.08.2017].

²⁹ Vgl. Grund (2015), S. 18f.

Mit der Produktionsrichtlinie ist es möglich exakt an den drei Säulen Qualität, Kosten und Zeit langfristig Verbesserungen vorzunehmen. Aufgrund der in der Richtlinie dargestellten Informationen wie beispielsweise der mechanischen Belastbarkeit einzelner Verbindungstechniken, können Bauteile bzw. komplette Baugruppen zukünftig effizienter und kostengünstiger konstruiert, hergestellt und deren Möglichkeiten besser eingeschätzt werden.

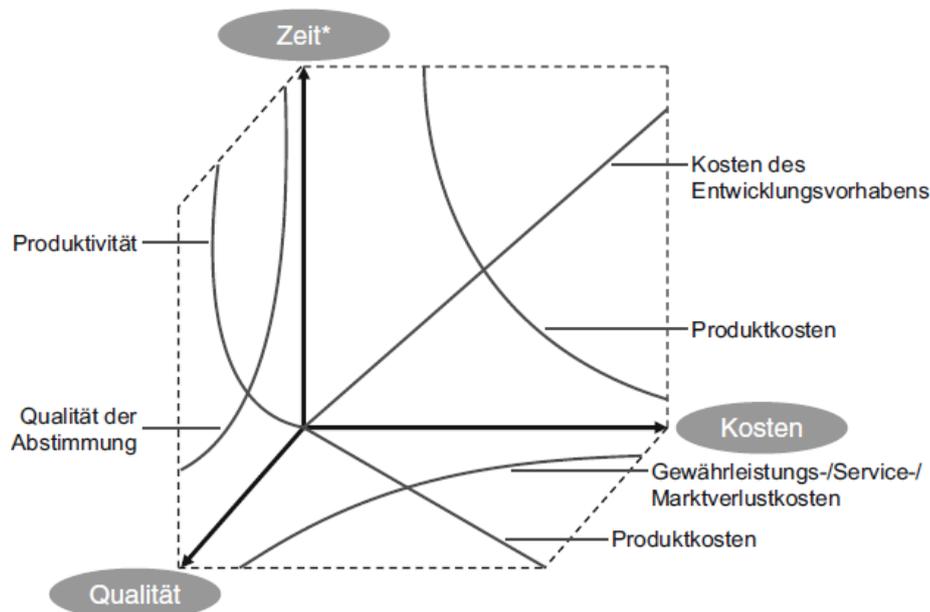


Abb. 15: Spannungsdreieck zwischen Qualität, Kosten und Zeit, Quelle: Grund (2015), S. 19.

3.5 Flexibilisierte Massenproduktion

Generative Fertigungsverfahren werden immer öfter mit dem Begriff „Flexibilisierte Massenproduktion bzw. Mass Customization“ in Verbindung gebracht. Darunter versteht man die gezielte Individualisierung von Produkten bzw. Funktionalitäten. Die maßgeschneiderte Produktion soll in den kommenden Jahrzehnten die gesamte industrielle Produktion verändern:³⁰

- Neue Materialien und verbesserte Verfahren ermöglichen eine kostengünstigere Fertigung.
- Generative Fertigungsverfahren eröffnen viele neue Möglichkeiten hinsichtlich „Personal Fabrication“ womit es in Zukunft möglich sein soll, sich zuhause intelligente Bauteile und Maschinen zu produzieren.
- Hersteller werden durch den Kostendruck des globalisierten Wettbewerbs gezwungen deren kompletten Entwicklungsprozess deutlich zu verkürzen. Primäre Industrien sind die Automobilindustrie, die Luft- und Raumfahrtindustrie, der Werkzeug- und Spezialmaschinenbau und die Medizintechnik.
- Abseits der oben genannten Industrien geht die Tendenz immer mehr in Richtung eines neuen Paradigmenwechsels. Bei „Self Customization“ übernimmt der Kunde die dezentrale Produktion in der Wertschöpfungskette, womit herkömmliche Geschäftsmodelle angepasst werden müssen.

³⁰ Vgl. Keil (2016), S. 172.

3.6 Änderung der Supply Chain

Mittels generativer Fertigung sind in der Supply-Chain (Lieferkette) radikale Strukturveränderungen möglich. Dabei ist die Umgehung von diversen Wertschöpfungsstufen denkbar. Beispielsweise würden Teillieferanten, Produktionsstufen, Transportdienstleister und der lokale Handel entfallen. Grund dafür ist das Handeln mit digitalen Daten und Rohstoffen für den eigentlichen Druckprozess und nicht mehr in konventioneller Art und Weise mit physischen Produkten.³¹

Chancen:³²

- Erstellung von maßgeschneiderten Produkten
- Gewichtersparnis durch effiziente Materialnutzung (Wabenstruktur, Hohlräume etc.)
- Kundenindividuelle Fertigung mittels effizienter Produktentwicklung
- Freiheitsgrade im Produktdesign
- Funktionsintegration in nur einem Bauteil
- Reshoring bzw. die Übertragung eines Geschäftsbereichs wieder in sein Ursprungsland kann wieder wirtschaftlich werden
- Geringe Rüstzeiten

Aktuelle Grenzen:³³

- Geschwindigkeit des Druckprozesses
- Nachbearbeitung der gedruckten Bauteile
- Maßhaltigkeitsprobleme in Abhängigkeit der verwendeten Drucktechnologie
- 3D-CAD-Programme sind aktuell für konventionelle Fertigungsverfahren ausgelegt
- Ökologische Nachhaltigkeit wird zurzeit noch in Frage gestellt

Welchen großen Einfluss die generative Fertigung in den kommenden Jahrzehnten auf die Supply Chain haben wird, ist in Abb. 16 schematisch dargestellt.



Abb. 16: Veränderung der Supply Chain in den kommenden Jahrzehnten, Quelle: Barkawi Management Consultants (2013), Onlinequelle [25.08.2017].

³¹ Vgl. Feldmann / Pumpe (2016), S. 8.

³² Vgl. Feldmann / Pumpe (2016), S. 8ff.

³³ Vgl. Feldmann / Pumpe (2016), S. 11.

3.7 Anforderungen an Konstrukteure

Unter Betrachtung des Entwicklungsprozesses aus Kapitel 3.3.4 ist erkennbar, dass generative Fertigungsverfahren über eigene einzuhaltende Prozessschritte verfügen und deren Anpassung bzw. Änderung spezifisches Know-how braucht. Um das Potenzial dieser Verfahren ausnutzen zu können, muss ein Umdenken bei Designer, Konstrukteuren und Fertigungsexperten stattfinden. Abb. 17 zeigt den Einsatz der generativen Fertigung in der direkten Produktion vom Jahr 2003 bis zum Jahr 2012. Insgesamt stieg der Einsatz von 2003 bis 2012 um exakt 15,3 %, wobei dieser aufgrund der Technologievielfältigkeit auch in den kommenden Jahren kontinuierlich ansteigen wird.³⁴

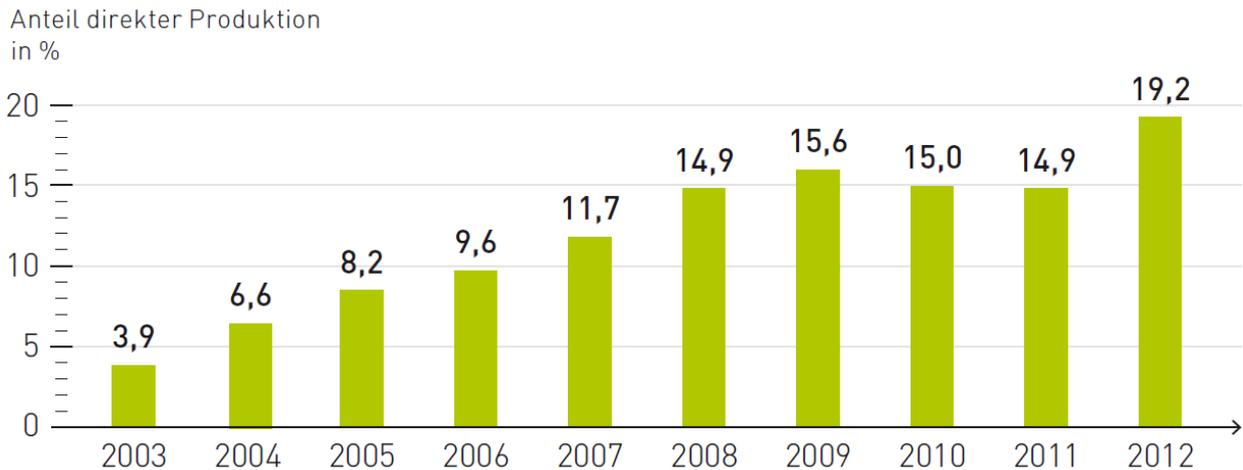


Abb. 17: Einsatz der generativen Fertigung in der direkten Produktion, Quelle: Breuninger u. a. (2013), S. 18.

In Zukunft wird es wichtig sein, dass Designer über technisches Verständnis, das Wissen über die Wirkung mechanischer Kräfte und grundlegende Erfahrung mit der Finiten Elemente Methode verfügen. Ingenieure hingegen sollten sich in die Richtung ergonomisches Wissen und bionischer Ideen weiterentwickeln bzw. für eine neue Art des Konstruierens offen sein.³⁵

Mit der Produktionsrichtlinie für Verbindungstechniken wird es jedem / jeder KonstrukteurIn der Firma HAGE Sondermaschinenbau bzw. jedem / jeder MitarbeiterIn der Fachhochschule CAMPUS 02 möglich sein, Bauteile für die generative Fertigungstechnologie Fused Filament Fabrication auszulegen und deren Verbindungsmöglichkeiten untereinander besser abschätzen zu können. Mit dem Wissen über unterschiedlichste Verbindungstechniken und deren Eigenschaften, wie die maximale Zugfestigkeit des Materials ASA ApolloX Natural unter Berücksichtigung unterschiedlicher Schichtaufbauwinkel, die mechanische Belastbarkeit jeder Verbindungsart, die Auslegung des Kernlochdurchmessers für unterschiedlichste Schraubverbindungen, Bauteiltoleranzen bzw. konstruktiver Ausgleich aufgrund der Schrumpfung, materialspezifische Parameter etc. haben Konstrukteure eine Richtlinie zur Verfügung und können sich somit auf die wesentlichen Anforderungen der Produktentwicklung konzentrieren.

³⁴ Vgl. Breuninger u. a. (2013), S. 42.

³⁵ Vgl. Breuninger u. a. (2013), S. 19.

3.8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Allgemeinen lässt sich die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in zwei Kategorien aufteilen:³⁶

- Qualitativer Ansatz: hierunter fallen Aspekte wie Machbarkeit, Geometriekomplexität, Abmessungen, Stückzahl und Einsatzzweck.
- Quantitativer Ansatz: Übersetzung der qualitativen Aspekte in entsprechende Business Cases bzw. Wirtschaftlichkeitsaussagen

Um ein Bauteil auf übergreifende Potenziale zu bewerten gibt es viele Methoden. In dieser Arbeit wird lediglich auf die Methodik zur Bauteilerauswahl von M. Bohlender eingegangen. Die Bewertung ist in vier Module eingeteilt:³⁷

- Bauteilpotenzial: darunter fallen Genauigkeiten, minimale Wandstärken und Materialeigenschaften
- Kostendifferenz: Kosten für die Herstellung im Vergleich zu konventionellen Verfahren
- Zeitersparnis: Zeit für die Herstellung im Vergleich zu konventionellen Verfahren
- Leichtbaupotenzial: Abschätzung des Bauteils auf Leichtbauweise über die Komponentenanzahl und die durchschnittliche Materialauslastung

Jedem Modul können unterschiedliche Kriterien, siehe Abb. 18, zur Wirtschaftlichkeit zugeordnet werden:

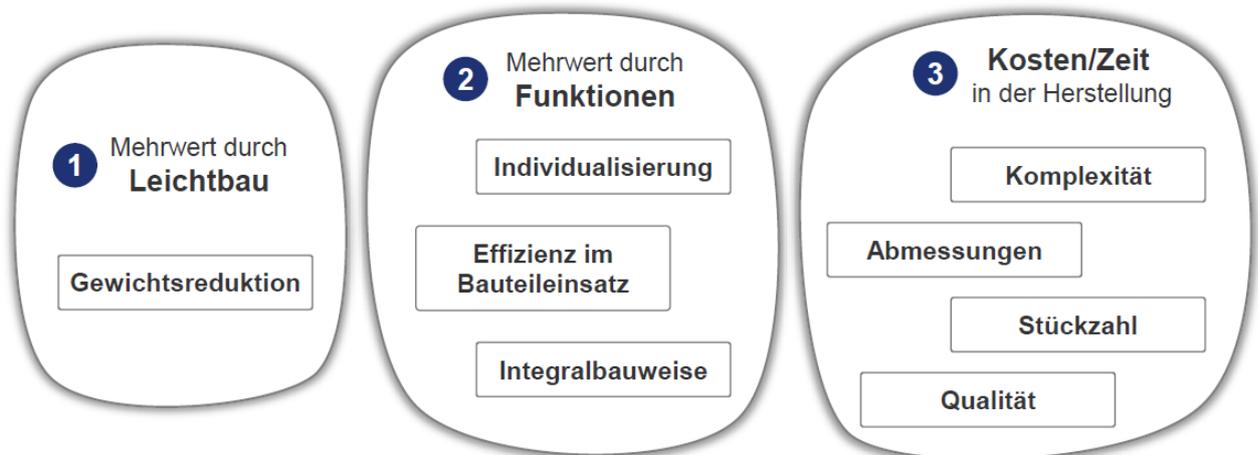


Abb. 18: Einteilung unterschiedlicher Wirtschaftskriterien in drei Bereiche, Quelle: Schmidt (2016), S. 85.

³⁶ Vgl. Schmidt (2016), S. 61.

³⁷ Vgl. Schmidt (2016), S. 63f.

3.9 Chancen und Potenziale für die Produktentwicklung

Durch die positiven Charakteristiken generativer Fertigungsverfahren, ergeben sich folgende Chancen und Potenziale für die Produktentwicklung:³⁸

- Gewichtsersparnis: Auslegung von Hohlräumen, Wabenstrukturen bzw. bionischen Strukturen
- Funktionsintegration und Vereinfachung: Vereinigt mehrere Funktionen in einem Bauteil
- Topologie-Optimierung: Ausgleich zwischen Kraftaufnahme und Gewicht des Bauteils
- Verkleinerung: Reduktion des Bauteils auf das Notwendigste
- Materialien: nahezu unbegrenzte Materialpalette mit unterschiedlichen Eigenschaften, abhängig vom eingesetzten Fertigungsverfahren
- 100% Werkstoffausnutzung: Bau- und Stützmaterial können im nächsten Druckprozess wiederverwendet werden

Je früher Fehler entdeckt und beseitigt werden können, desto niedriger sind die Kosten für die Behebung der Fehler. Hier hat die generative Fertigung aufgrund der zeit- und kostenminimierten Fertigung große Vorteile. Somit kann beispielsweise noch in der Planungs- und Entwicklungsphase dem Kunden bereits ein erster physischer Prototyp vorgestellt werden.³⁸

Mithilfe der Produktionsrichtlinie soll es bereits in der Planungs- und Entwicklungsphase der Produktentwicklung möglich sein, Bauteile bzw. ganze Bauteilgruppen effizient für die generative Fertigung auszulegen. Den wie Abb. 19 zeigt, steigen die Fehlerkosten pro Änderung von Phase zu Phase exponentiell um den Faktor 10 an. Um nun die aktuelle Anzahl der Änderungen zu reduzieren und näher zur gewünschten Anzahl der Änderungen zu kommen, müssen konkrete Richtlinien vorliegen. Eine Richtlinie für unterschiedliche Verbindungstechniken soll mit dieser Arbeit den Konstrukteuren zur Verfügung gestellt werden. Die Erkenntnisse dieser Arbeit finden sich, wie in Abb. 19 zu sehen, besonders in den Bereichen Planung, Entwicklung und Fertigung wieder.

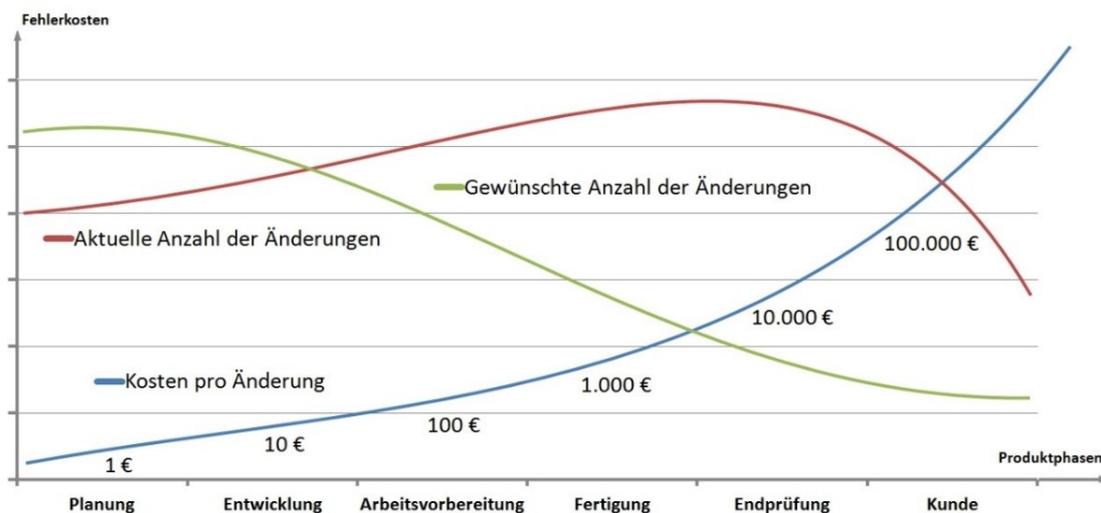


Abb. 19: Kostenvergleich über unterschiedliche Phasen der Produktentwicklung, Quelle: (Lutz 2015), Onlinequelle [31.07.2017].

³⁸ Vgl. Lutz (2015), Onlinequelle [31.07.2017].

4 MECHANISCHE WERKSTOFFPRÜFUNG

Der folgende Abschnitt beschreibt die Grundlagen der mechanischen Werkstoffprüfung. Ausgehend vom klassischen Zugversuch wird ein besonderer Fokus auf das Spannungs-Dehnungs-Diagramm und deren Werkstoffkennwerte gelegt. In der Arbeit wird die mechanische Werkstoffprüfung primär zur Charakterisierung des Materials Acrylester-Styrol-Acrylnitril eingesetzt. Weiters werden auch unterschiedliche Verbindungstechniken mit einem Zugversuch auf mechanische Beständigkeit bzw. Auszugsfestigkeit getestet und im Sinne einer Produktionsrichtlinie dokumentiert.

4.1 Der Zugversuch

Der Zugversuch ist ein genormtes, zerstörendes und quasistatisches Prüfverfahren der Werkstoffprüfung mit welchen Werkstoffkennwerte wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Streckgrenze ermittelt werden können. Hierbei werden Proben mit definierten Querschnittsflächen mittels gleichmäßiger Geschwindigkeit bis hin zum Bruch gedehnt. Während des Zugversuchs werden die Kraft F in N und die Längenänderung ΔL in mm, bezogen auf die Ausgangslänge L in mm, gemessen. Die Nennspannung σ in N/mm^2 errechnet sich aus der Kraft F in N und der Querschnittsfläche S_0 in mm^2 der nicht deformierten Probe. Die Berechnung ist folgendermaßen: σ in $N/mm^2 = F / S_0$.³⁹

4.2 Aufbau einer servohydraulischen Zugprüfmaschine

Eine Zugprüfmaschine, siehe Abb. 20, besteht aus folgenden Hauptkomponenten:⁴⁰

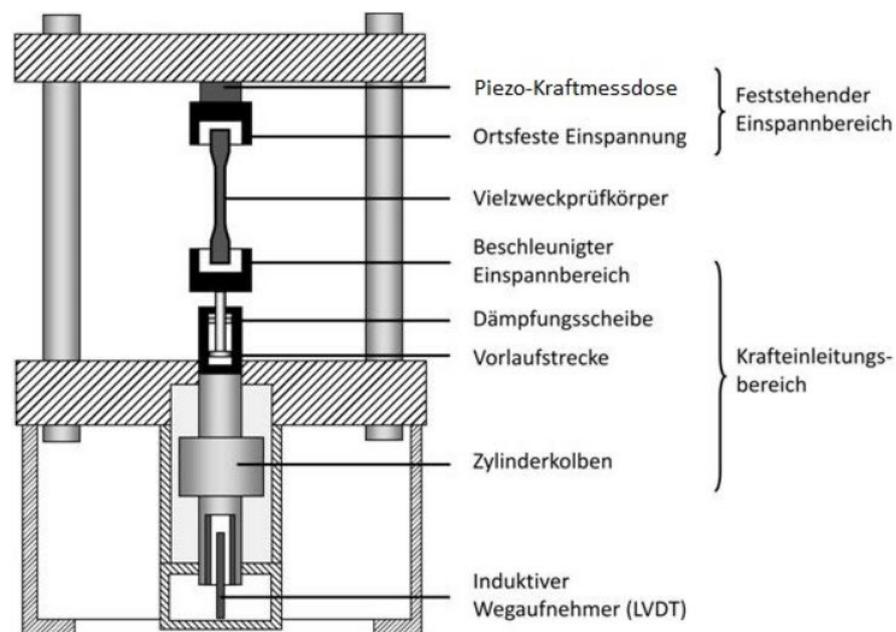


Abb. 20: Schematische Darstellung einer servohydraulischen Zugprüfmaschine, Quelle: Polymer Service GmbH Merseburg (2017), Onlinequelle [15.11.2017].

³⁹ Vgl. Maschinenbau-Wissen (2009), Onlinequelle [18.08.2017].

⁴⁰ Vgl. Polymer Service GmbH Merseburg (2017), Onlinequelle [15.11.2017].

4.3 Versuchsdurchführung praktische Umsetzung

Sowohl die Zugversuche der nach EN ISO 527 genormten Probenkörper als auch die Ermittlung der Zugfestigkeit unterschiedlicher Verbindungstechniken werden auf einem servohydraulischen Mehrkanalsystem der Fa. IST geprüft.⁴¹

4.4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Das Ergebnis des Zugversuchs ist ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm, siehe Abb. 21, welches der Charakterisierung eines Materials in Bezug auf Festigkeit, Plastizität und Elastizität, wie in dieser Arbeit des Materials Acrylester-Styrol-Acrylnitril, dient.⁴²

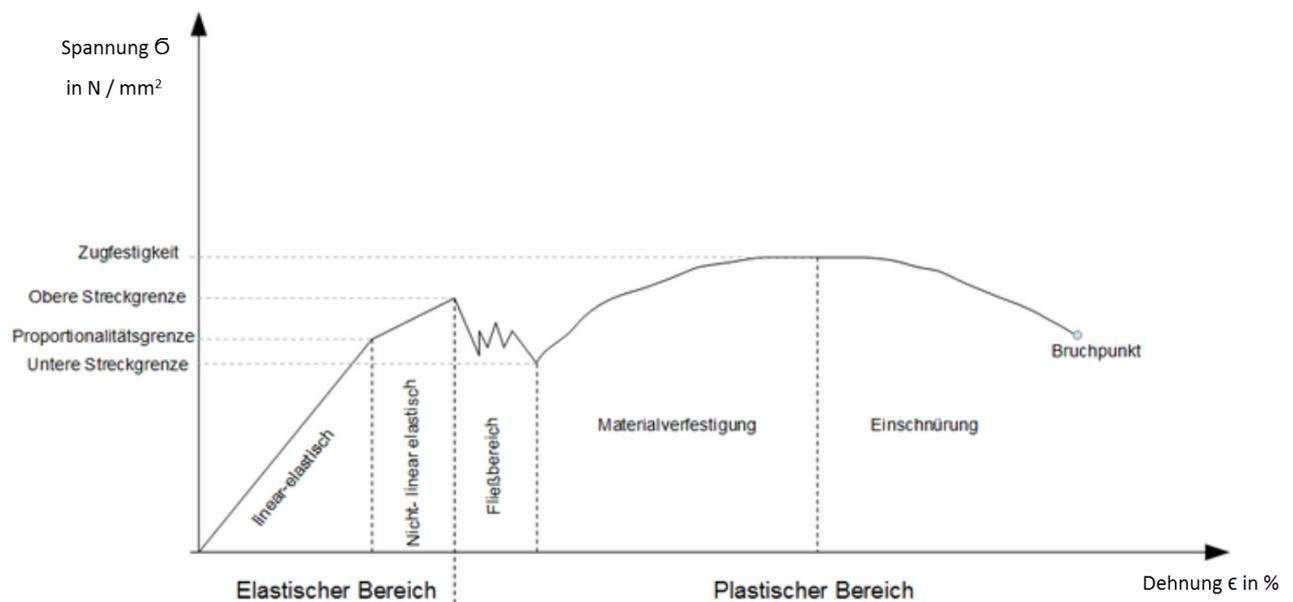


Abb. 21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm und deren Werkstoffkennwerte, Quelle: Ingenieurkurse (2017), Onlinequelle [15.11.2017] (leicht modifiziert).

Auf der Ordinate wird hierbei die aus der Kraft F in N und der Querschnittsfläche S_0 in mm errechnete Spannung σ in N/mm^2 und auf der Abszisse die technische Dehnung ϵ in % aufgetragen. Weiters ist zu erwähnen, dass es sich bei den Versuchen immer um die technische Spannungs-Dehnungs-Kurve handelt, da sich die wahre Spannung nicht direkt aus dem Zugversuch ermitteln lässt. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm unterteilt sich prinzipiell in drei Bereiche:⁴²

⁴¹ Vgl. Messemer u. a. (2016), Onlinequelle [15.11.2017].

⁴² Vgl. Ingenieurkurse (2017), Onlinequelle [15.11.2017].

- Linear-elastischer Bereich → Dehnung ist proportional zur Spannung und ist reversibel.
- Nichtlinear-elastischer Bereich → Dehnung verläuft nicht proportional zur Spannung, ist aber reversibel.
- Plastischer Bereich → Dehnung ist nicht reversibel und die Verformung bleibt auch nach der Entlastung bestehen.

4.4.1 Der elastische Bereich

In diesem Bereich verschwindet die Verformung des Probenkörpers wieder vollständig, wenn die Zugspannung nicht mehr auf ihn einwirkt. Bauteile sollten grundsätzlich nur bis zur elastischen Grenze eingesetzt werden, da es sonst zu ungewollten dauerhaften Verformung des Bauteils kommt. Der linear-elastische Bereich reicht hierbei bis zur Proportionalitätsgrenze (Spannungs- und Dehnungsverlauf ist proportional → Hookesche Gerade, siehe Abb. 21). Der sich daraus ergebende Faktor nennt sich Elastizitätsmodul E (MPa) und ist ein Maß für die Steigung der elastischen Geraden. Der nichtlinear-elastische Bereich reicht hingegen bis zur Streckgrenze R_e , wobei ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung nicht mehr gegeben ist. Ergebnis des nichtlinear-elastischen Bereichs ist z.B. eine elastische Verformung mit steigender Krafteinwirkung bei stärkerer Dehnung.⁴³

4.4.2 Der plastische Bereich

In diesem Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms ist die Dehnung nicht mehr reversibel, d.h. das Bauteil geht nicht mehr in seine Ursprungsform zurück. Wenn die Belastung zu groß ist, kann es sogar zum Bruch kommen. Dieser Bereich lässt sich zusätzlich in Fließbereich, Materialverfestigung und Einschnürung unterteilen. Wenn eine Überschreitung der Streckgrenze stattfindet, beginnt das Material zu fließen. Dies ist der Fall, wenn die Spannung mit zunehmender Dehnung gleichbleibt, steigt oder sogar sinkt. Dieser Bereich wird als Streckgrenze oder Fließgrenze bezeichnet, wobei sich bei Abfallen der Spannung eine untere- und obere Streck- bzw. Fließgrenze ergibt. Nach Überschreiten der Streckgrenze ist das Material nicht mehr reversibel. Wird die Spannung weiter erhöht, beginnt sich das Material z.B. Stahl kontinuierlich zu verfestigen. Ist das Kraftmaximum des Material erreicht, folgt der nächste Bereich die Einschnürung. Hierbei nimmt die Spannung immer weiter zu und der Querschnitt beginnt sich zu verjüngen, bis es letztendlich zum Bruch des Probenkörpers kommt. Materialspezifisch kann es der Fall sein, dass es keine ausgezeichnete Streckgrenze gibt. In diesem Fall spricht man von einem kontinuierlichen Übergang vom elastischen- in den plastischen Bereich.⁴³

⁴³ Vgl. Ingenieurkunde (2017), Onlinequelle [15.11.2017].

Festigkeitskennwerte

In diesem Unterpunkt sind zusammengefasst die wichtigsten Festigkeitskennwerte aus einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt:⁴⁴

- E-Modul (E): Entspricht der Steigung der Geraden im elastischen Bereich und ist ein Maß für die Steifigkeit des Werkstoffs $\rightarrow E \text{ in MPa} = \sigma / \epsilon = \text{konst.}$
- Streckgrenze (R_e): Spannung bei welcher ein Werkstoff unter einachsiger momentfreier Zugbeanspruchung keine plastische Verformung zeigt
- Obere Streckgrenze (R_{eH}): Diese ist durch den ersten deutlichen Spannungsabfall gekennzeichnet
- Untere Streckgrenze (R_{eL}): Ist die kleinste Spannung im Fließbereich
- 0,2 %-Dehngrenze ($R_{p0,2}$): Spannung bei der die plastische Dehnung 0,2 % beträgt. Dient zur Kennzeichnung des Überganges vom elastischen in den plastischen Bereich.
- Zugfestigkeit (R_m): Ist die maximale technische Spannung die bei der höchsten Zugkraft erreicht wird $\rightarrow R_m \text{ in N / mm}^2 = F_{\text{max}} / S_0$

Das für die praktische Umsetzung verwendete Material ASA ApolloX Natural hat laut dem Hersteller Formfutura folgende Festigkeitskennwerte:⁴⁵

- Zugfestigkeit: 35 MPa
- Zug-E-Modul: ~ 2600 MPa

Die Drucktemperatur zur Erreichung der Festigkeitskennwerte wird laut Hersteller zwischen 235 °C und 255 °C angegeben. Die vom Hersteller angegebenen Werkstoffkennwerte werden im praktischen Teil unter Berücksichtigung unterschiedlicher Schichtaufbauwinkel der Probenkörper mittels Zugversuche nach EN ISO 527 normgerecht überprüft und mit den Herstellerangaben verglichen.

⁴⁴ Vgl. Ingenieurkurse (2017), Onlinequelle [15.11.2017].

⁴⁵ Vgl. Kern (2017), Onlinequelle [08.11.2017].

5 STAND DER TECHNIK – GENERATIVE KONSTRUKTION UND FERTIGUNG

Dieser Abschnitt befasst sich im ersten Teil mit den Potenzialen der Konstruktion und Fertigung von generativen Fertigungsverfahren und im zweiten Abschnitt mit den aktuellen veröffentlichten Konstruktionsempfehlungen für die Fused Filament Fabrication-Technologie in Hinblick auf Verbindungstechnik. Schwerpunkt ist sowohl die generative Konstruktion als auch die Fertigung der digitalen 3D-CAD-Modelle.

5.1 Möglichkeiten generativer Fertigungsverfahren

Generative Fertigungsverfahren bieten aufgrund des schichtweisen Aufbaus folgende gestalterische Möglichkeiten für Konstrukteure:⁴⁶

- Funktionelle Integration: Hierunter versteht sich die Reduzierung der Teileanzahl einer Baugruppe durch die Möglichkeit mehrere Bauteile zu einem Bauteil zusammenzufassen. Angesichts der leichten Handhabung von komplexen Geometrien, können somit auch die Kosten gesenkt werden. Weiters bieten individuell designte innere Geometrien zusätzlichen Plagiatsschutz.
- Leichtbauweise: Hier werden diverse Strukturen an auftretende Belastungsfälle am Bauteil angepasst und somit eine Reduktion des Gesamtgewichts ermöglicht. Mithilfe von Strukturoptimierungsverfahren können dementsprechende Leichtbaustrukturen für ein Bauteil errechnet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Ausnutzung richtungsabhängiger Materialeigenschaften, welche durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile gegeben ist.
- Individualisierung: Der Grundsatz in der Industrie verfolgt einen Konsens zwischen variantenreicher Produktion und der Befriedigung individueller Kundenbedürfnisse. Mithilfe der hohen Flexibilität von generativen Fertigungsverfahren können individuelle Kundenwünsche wirtschaftlich zeitnah angepasst werden.
- Performance / Leistung: Aufgrund des schichtweisen Aufbaus können mittels generativen Fertigungsverfahren auch komplexe strömungsoptimierte Kanäle mitgedruckt werden. Durch integrierte Kühlrippen bzw. Kühlkanäle kann die Abführung von thermischer Energie in einem Bauteil wesentlich verbessert werden und die Leistungsfähigkeit von Produkten steigen.

5.2 Konstruktionsempfehlungen für Fused Filament Fabrication

In diesem Kapitel werden die aktuell vorhandenen Konstruktionsempfehlungen für die Fused Filament Fabrication-Technologie erläutert und mit der Praxiserfahrung beider beteiligter Unternehmen ergänzt. Besonderer Fokus liegt hierbei auf der Orientierung eines 3D-CAD Modells im Bauraum, der Wanddicke, den geschlossenen Bodenschichten, dem Bohrungsdurchmesser und der Eckenabbildung eines generativ gefertigten Bauteils.

⁴⁶ Vgl. Leutenecker / Lohmeyer / Meboldt (2013), S. 102.

5.2.1 Orientierung eines 3D-CAD-Modells im Bauraum

Aufgrund des schichtweisen Aufbaus hat die Orientierung im Bauraum (x-, y-, oder z-Richtung bzw. seitlich, flach oder stehend) große Auswirkungen auf die Fertigungszeit, den Schichtaufbau und die mechanische Beständigkeit des Bauteils. Wie in Abb. 22 und Abb. 23 zu sehen, kann ein 3D-CAD-Modell grundsätzlich in drei unterschiedliche Richtungen aufgebaut werden.⁴⁷

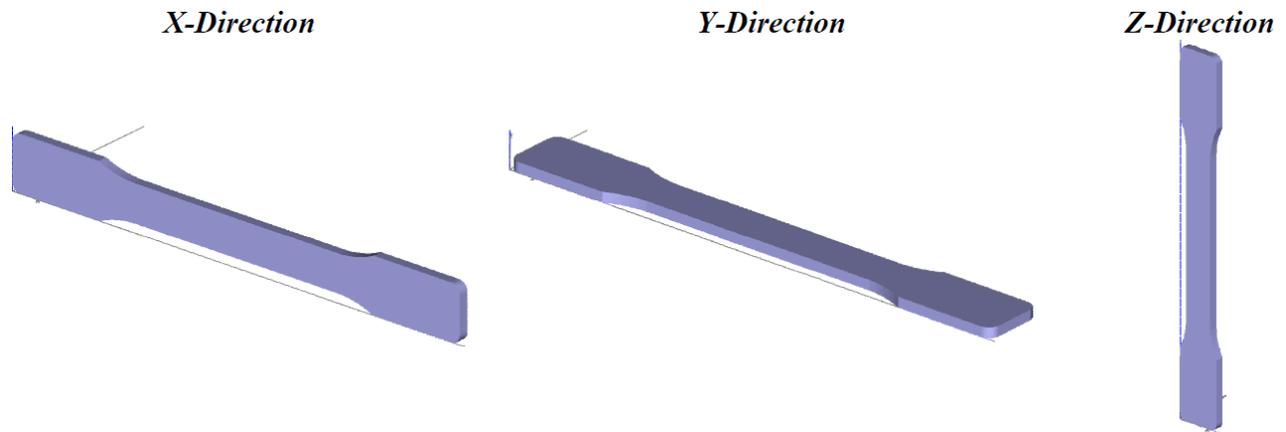


Abb. 22: Möglichkeiten zur Ausrichtung eines Prüfkörpers im Bauraum, Quelle Bagsik (2010), S. 3.

- Fertigungszeit bei unterschiedlicher Positionierung im Bauraum, siehe Abb. 23:
 - Fertigungszeit in x-Richtung: 58 Minuten
 - Fertigungszeit in y-Richtung: 51 Minuten
 - Fertigungszeit in z-Richtung: 3 Stunden und 33 Minuten

Aufgrund der im direkten Vergleich zu den anderen beiden Positionierungsrichtungen nicht wirtschaftlichen Fertigungszeit in z-Richtung, werden die Versuchsproben nur in x- und y-Richtung gefertigt und die mechanische Beständigkeit im Sinne eines Zugversuchs überprüft.

Im Hinblick auf die Fertigung mehrerer Bauteile, spielt die Positionierung der 3D-CAD-Modelle in Bezug auf das Spannungsdreieck aus Kapitel 3.4 eine große Rolle. Den mit steigender Anzahl an Bauteilen erhöhen sich auch die Fertigungskosten und damit ein relevanter wirtschaftlicher Faktor für das Unternehmen.

⁴⁷ Vgl. Bagsik (2010), S. 3.

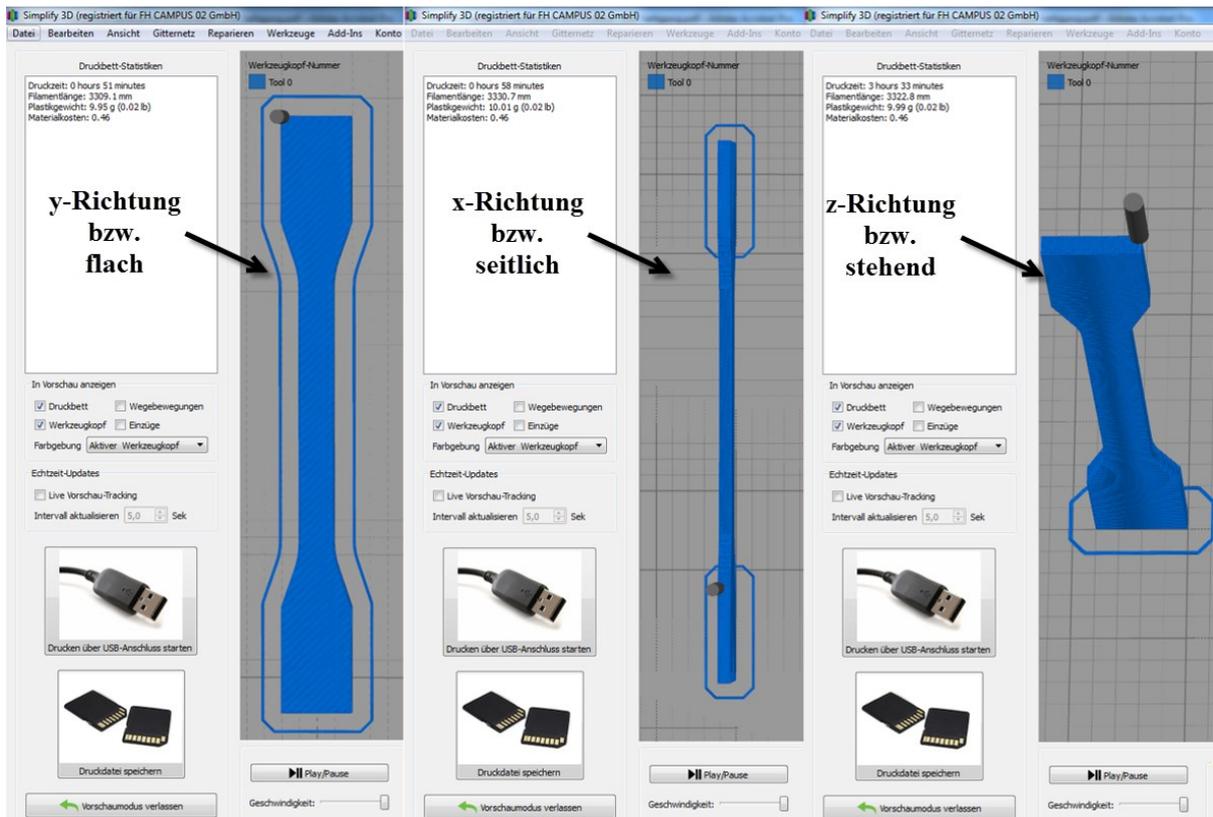


Abb. 23: Veränderung der Fertigungszeit aufgrund unterschiedlicher Positionierung, Quelle: Eigene Darstellung.

- Schichtaufbau aufgrund unterschiedlicher Positionierung: Je nach Orientierung des 3D-CAD-Modells wird das Bauteil verschiedenartig schichtweise aufgebaut. Abb. 24 zeigt ein 3D-CAD-Modell in unterschiedlicher Positionierung mit einem 45° Schichtaufbauwinkel.

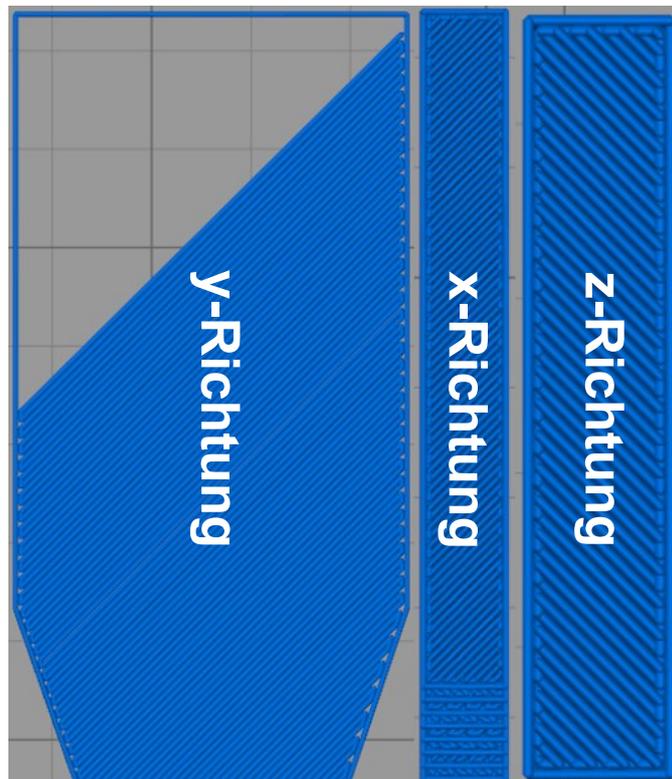


Abb. 24: Gegenüberstellung des Schichtaufbaus unterschiedlicher Bauteilpositionen, Quelle: Eigene Darstellung.

- Schichtaufbau aufgrund unterschiedlichem Aufbauwinkel: Je nach Anforderung kann ein 3D-CAD-Modell in verschiedene Richtungen aufgebaut werden. Charakteristisch für die Auswahl der Schichtaufbauorientierung ist, dass die Fertigungszeit wie in Abb. 25 zu sehen, bei allen drei Möglichkeiten ident ist. Im praktischen Teil der Arbeit werden Probenkörper mit unterschiedlichen Schichtaufbauwinkel gefertigt.

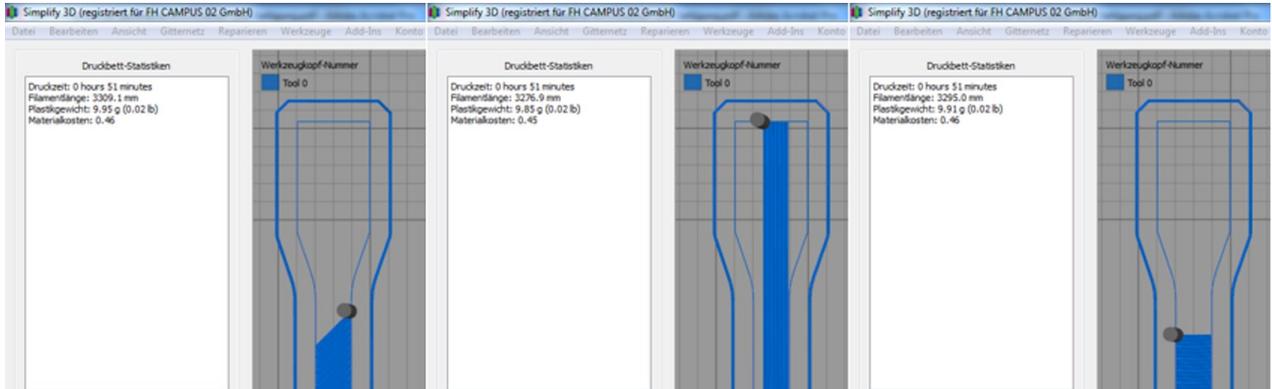


Abb. 25: Vergleich eines 3D-CAD-Modells mit unterschiedlichen Schichtaufbauwinkeln, Quelle: Eigene Darstellung.

- Mechanische Beständigkeit: Die Orientierung des 3D-CAD-Modells im Bauraum hat erhebliche Auswirkungen auf die mechanische Beständigkeit des gefertigten Bauteils. Abb. 26 zeigt ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm dreier Probenkörper die auf Zug bis hin zum Bruch belastet wurden. Alle Probenkörper wurden mit 100 % Füllichte und jeweils einer Außenkontur (Umrandung des 3D-CAD Modells) hergestellt, lediglich die Orientierung im Bauraum ist unterschiedlich. Die Prüfung wurde nach dem amerikanischen Standardprüfverfahren ASTM D 638 durchgeführt, wobei dieses technisch äquivalent mit der Norm EN ISO 527 ist. Diese unterscheiden sich lediglich in der Ausführung (Probenformen, Prüfgeschwindigkeit, Art der Ergebnisbestimmung etc.). Dabei liefern die Ausrichtungsvarianten x und y ein durchaus gutes Ergebnis, wobei der Spannungsunterschied zwischen der x- und y-Richtung mit ungefähr 15 MPa doch sehr deutlich ist. Auch die Dehnung liegt, im Vergleich mit der z-Richtung, bei beiden Richtungen in einem guten Bereich (5 % - 6,5 %). Das für diesen Test verwendete Material nennt sich Polyetherimid kurz PEI und gehört zur Gruppe der hochtemperaturbeständigen Kunststoffe.⁴⁸

⁴⁸ Vgl. Bagsik (2010), S. 2f.

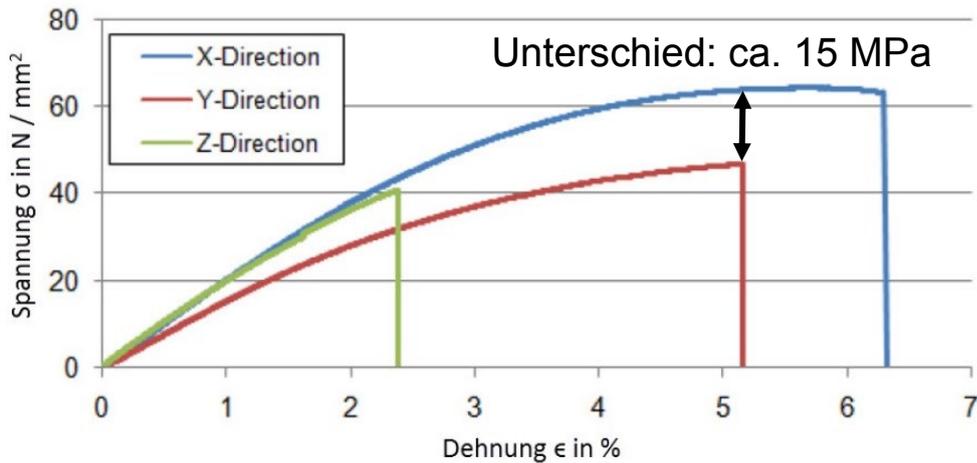


Abb. 26: Zugversuch nach dem Standardprüfverfahren ASTM D 638 dreier ident hergestellter Probenkörper in unterschiedlichen Ausrichtungen, Quelle: Bagsik (2010), S. 4 (leicht modifiziert).

5.2.2 Wanddicke

Bei der Fused Filament Fabrication-Technologie wird empfohlen, die Wanddicke eines 3D-CAD-Modells immer mit einer Kontur (Perimeter) und einem ausgefüllten Bereich (Infill) zu versehen.⁴⁹ Die erreichbare Wanddicke ist abhängig von der verwendeten Düse und deren Düsendurchmesser, siehe Abb. 27. Für den praktischen Teil der Arbeit spielt die minimale Wanddicke jedoch keine Rolle, da es um die Herstellung von stabilen Verbindungstechniken geht. Diese hängt ohnehin immer von der Größe verwendeten Düse ab. Beispielsweise ist unter Verwendung einer 0,4 mm Düse keine feinere Struktur als jene des Düsendurchmessers möglich. Da das verwendete Material ASA ApolloX Natural zur Gruppe der spröderen Materialien gehört, müssen die kritischen Bereiche der Verbindungstechniken sowieso stabiler ausgelegt werden. Die Ausreizung der minimalen Wanddicke ist besonders wichtig, wenn es um die Herstellung von filigranen Bauteilen, wenn z.B. die Wanddicken eines Bauteils lediglich über eine Schichtdicke verfügen, und deren Verwendbarkeit und Haltbarkeit geht.

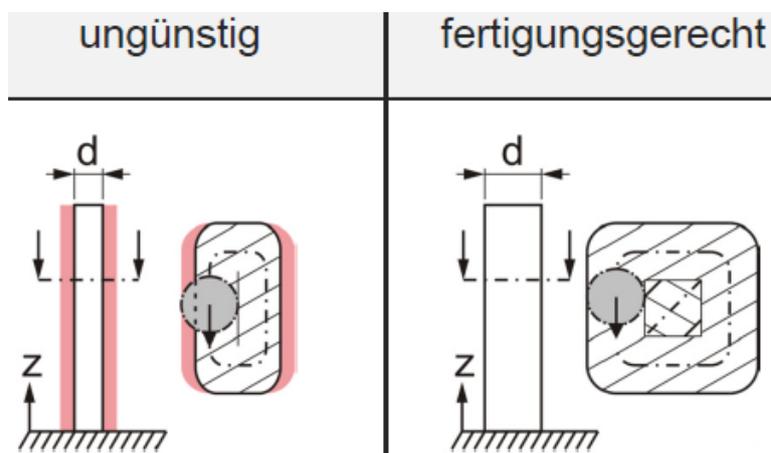


Abb. 27: Vergleich zweier unterschiedlich starker Wanddicken mit gleichem Düsendurchmesser, Quelle: Adam (2013), S. 5.

⁴⁹ Vgl. Adam (2013), Onlinequelle [04.09.2017].

5.2.3 Geschlossene Bodenschichten

Um die Dichtheit eines Bauteils zu gewährleisten, müssen genug Bodenschichten vorgesehen werden. Ein empfohlener Richtwert zur vollständigen Dichtheit eines Bauteils ist die Auswahl von mindestens drei Bodenschichten. Wie in Abb. 28 zu erkennen, gibt es bei der Fused Filament Fabrication-Technologie auch die Möglichkeit unterschiedliche Schichthöhen im Prozess einzustellen.⁴⁹ Für die Herstellung von Verbindungstechniken sind folgende Parameter von entscheidender Bedeutung:

- Die Fülldichte in %
- Die Anzahl der geschlossenen Boden- bzw. Deckschichten, wenn die Fülldichte nicht 100 % ist
- Die Anzahl der Kontur- bzw. Umfangshüllen
- Der Konturüberlappungsgrad in %
- Die Bauplattform- und Düsentemperatur zur ordnungsgemäßen Anbindung der einzelnen Schichten untereinander
- Die Druckgeschwindigkeit in kritischen Bereichen
- Die Länge der Einzugsdistanz und die Einzugs geschwindigkeit, um die Passfähigkeit der Verbindungen an den Verbindungsstellen zu gewährleisten

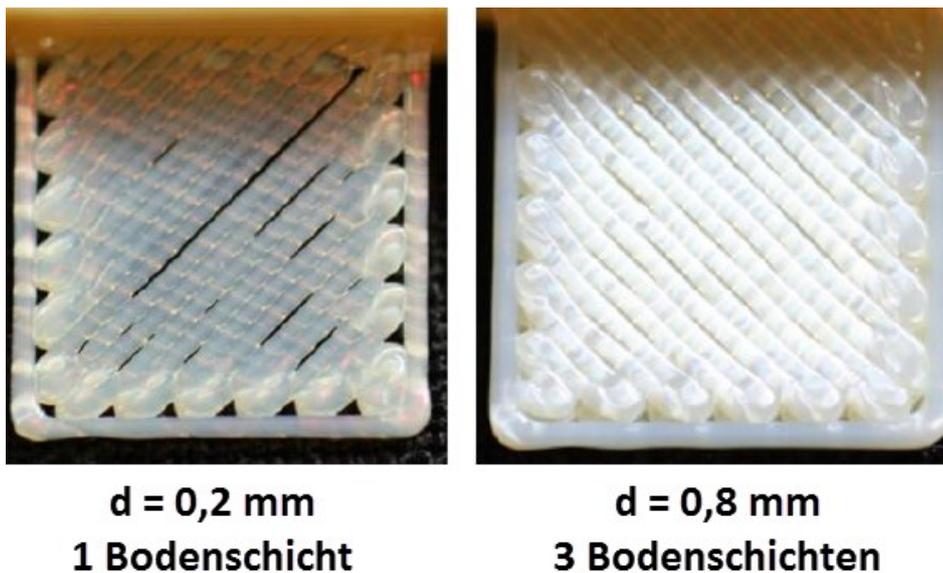


Abb. 28: Dichtheit eines Bauteils, Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [04.09.2017].

In der Slicingsoftware Simplify3D gibt es jedoch die Möglichkeit, nur mittels einer geschlossenen Bodenschicht die vollständige Dichtheit des Modells zu erreichen. Entscheidender Parameter ist hier die Breite der ersten Schicht. Wird diese anstatt der standardmäßig eingestellten 100 % auf beispielsweise wie in Abb. 29 zu sehen auf 150 % erhöht, kann die Dichtheit des Bauteils bereits mit der ersten Schicht erreicht werden.

In Hinblick auf sehr große und komplexe Bauteile resultiert auf der einen Seite eine Ersparung des erforderlichen Materials und auf der anderen Seite eine beachtliche Minimierung der Fertigungszeit. Durch die Optimierung beider Faktoren ergibt sich in Summe eine massive Einsparung der Gesamtkosten.

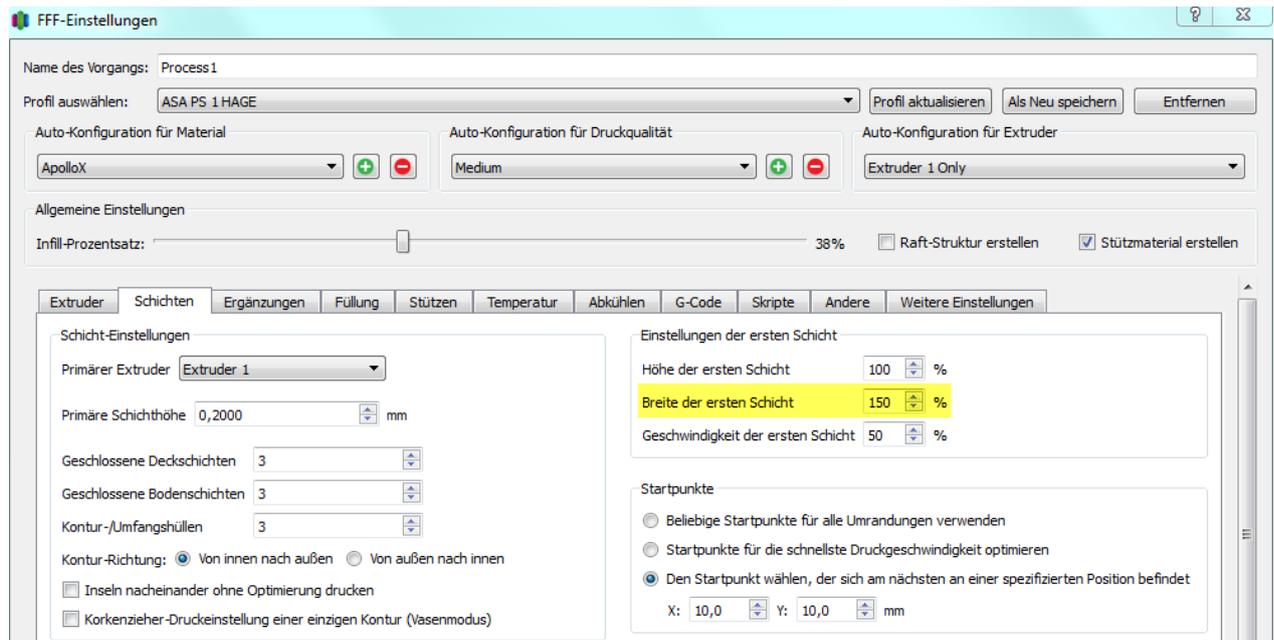


Abb. 29: Parameter zur Erhöhung der Breite der ersten Schicht von 100 % auf 150 %, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.4 Bohrungsdurchmesser ohne bzw. mit Stützstrukturen

Bei der Herstellung großer Kernlöcher mit geringer Restwanddicke, muss bereits in der Konstruktion die Dimensionierung und Umsetzbarkeit der Elemente in Hinblick auf das zu fertigende Bauteil berücksichtigt werden. Hierbei stellt die Fertigungsrichtung einen entscheidenden Faktor dar. Ist der Radius des Kernlochs zu groß dimensioniert, kann es beim fertig hergestellten Bauteil zu Oberflächenfehler kommen, siehe Abb. 30. Dieser Effekt kann jedoch mithilfe von zusätzlich vorgesehenen Stützstrukturen wesentlich verbessert werden. Die Stützstrukturen werden in diesem Fall exakt unter dem filigranen Bereich positioniert, um somit einerseits die Steifigkeit der Stränge als auch die Oberflächenqualität des gefertigten Bauteils zu verbessern.⁵⁰

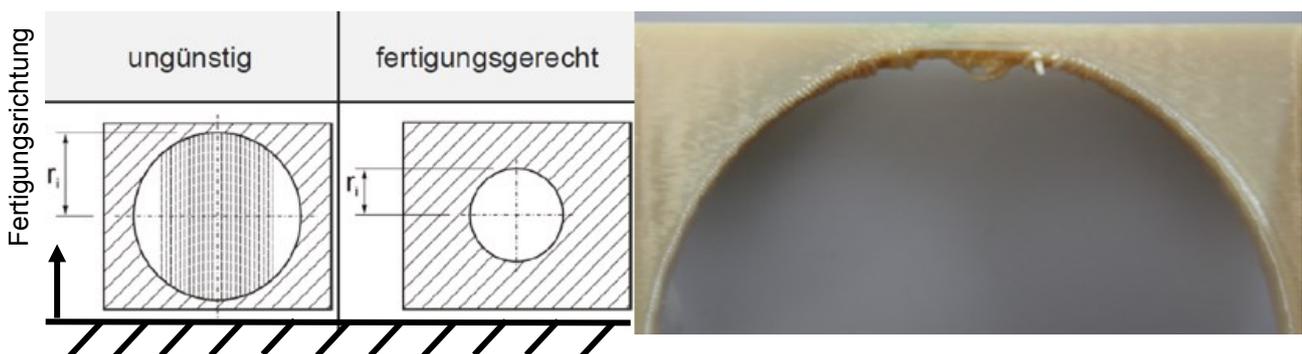


Abb. 30: Auslegung eines Kernlochs (links) und Oberflächenfehler (rechts), Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [08.09.2017].

⁵⁰ Vgl. Adam (2013), Onlinequelle [08.09.2017].

5.2.5 Ecken

Die Herstellung von Ecken bzw. spitzkantigen Elementen kann wie folgt unterteilt werden: einerseits die Herstellung parallel zur Bauplattform und andererseits in Aufbaurichtung. Um Verdickungen bzw. ungenaue Abbildungen bei der Herstellung von Bauteilen mit spitzen Elementen parallel zur Bauplattform zu vermeiden wird empfohlen, diese wie in Abb. 31 dargestellt mit einer Fase zu versehen. In Aufbaurichtung kann jedoch auf Fasenelemente verzichtet werden. Die Abbildungsgenauigkeit von Ecken ist jedoch aufgrund der technologischen Einschränkung ohnedies limitiert, siehe Kapitel 3.3.6 Eckenabbildung.⁵⁰

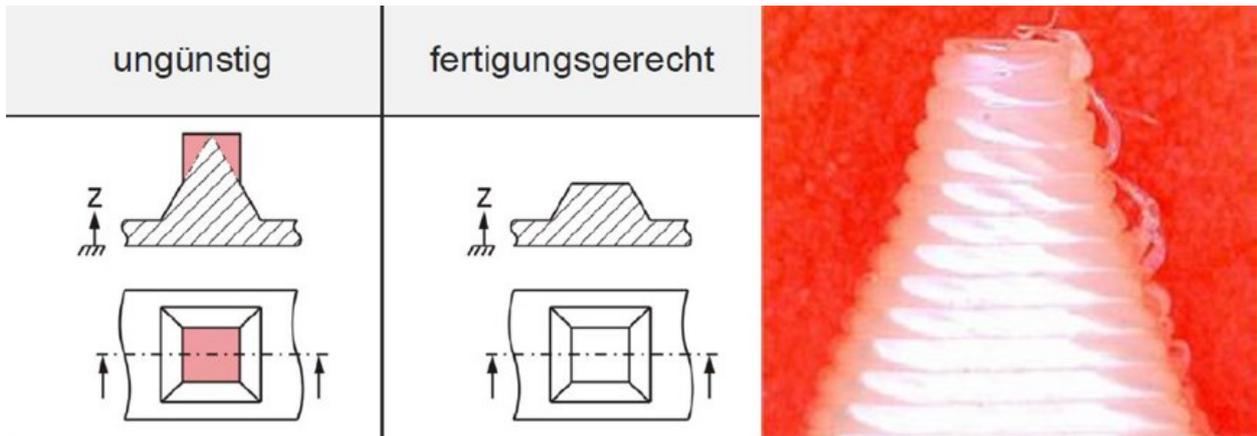


Abb. 31: Abbildung einer Ecke parallel zur Bauplattform (links) und gefertigtes Eckenelement (rechts), Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [08.09.2017].

5.2.6 Inselhöhen

Bauteile mit Inselhöhen sollten so gestaltet sein, dass die Höhe auf ein Minimum reduziert ist. Dies senkt einerseits die Fertigungszeit und andererseits den notwendigen Gebrauch von Stützmaterial unter der herausragenden Fläche. Wie in Abb. 32 zu sehen, stehen Fertigungszeit und Inselhöhe nahezu in einem linearen Verhältnis zueinander. Desto höher die Inselhöhe, desto länger auch die Fertigungszeit.⁵¹

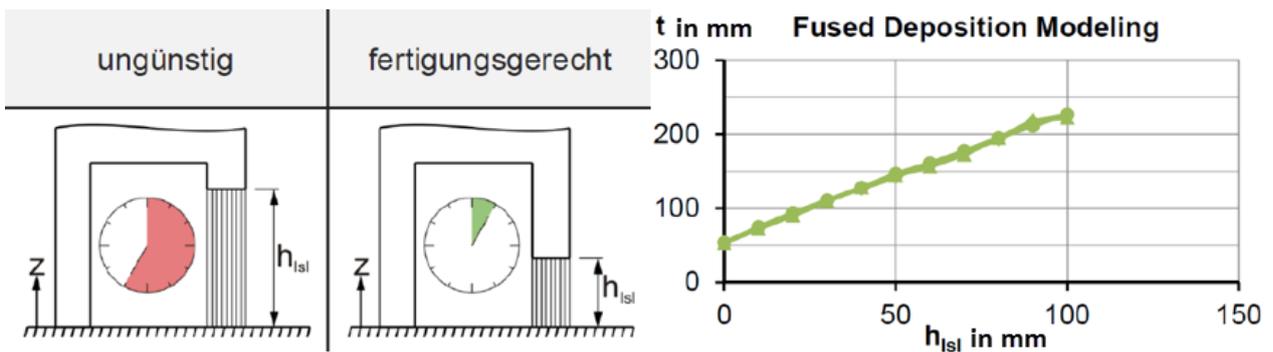


Abb. 32: Zusammenhang zwischen Inselhöhe und Fertigungszeit, Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [09.09.2017].

⁵¹ Vgl. Adam (2013), Onlinequelle [09.09.2017].

5.2.7 Oberflächenwinkel

Basierend auf dem schichtweisen Aufbau der Bauteile, ist es ab einem gewissen Oberflächenwinkel, wie in Abb. 33 zu sehen, unumgänglich auf Stützstrukturen zu verzichten. Ab welchem Winkel jedoch gestützt werden muss, hängt von vielen unterschiedlichen Parametern ab:⁵¹

- Überdeckungsmenge der abgelegten Stränge → ist diese Menge zu niedrig, fallen die Stränge aus der Nennposition heraus
- Das verwendete Material → Materialien lassen sich unterschiedlich gut verarbeiten
- Die eingestellte Temperatur → Aufgrund der Temperatur verändert sich der Fluss des Materials
- Verwendung einer Materialkühlung → verhindert ein Durchhängen der Materialstränge

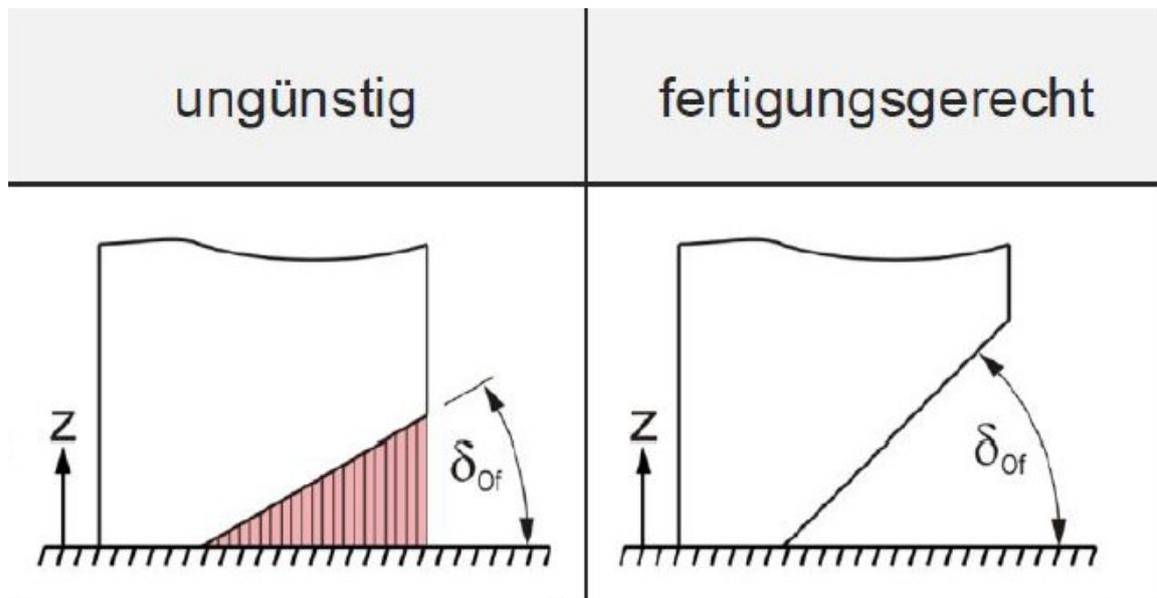


Abb. 33: Schematische Darstellung des Oberflächenwinkels mit und ohne Stützmaterial (roter Bereich), Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [09.09.2017].

5.2.8 Düsendurchmesser

Der Düsendurchmesser ist bei der Fused Filament Fabrication-Technologie eine limitierende Größe für die Herstellung filigraner Bauteile d.h. Geometriebereiche wie in Abb. 34 die kleiner als der Düsendurchmesser sind, können nicht abgebildet werden. Dies kann in weiterer Folge zum Abbruch des Druckjobs durch die Fertigung oder im schlimmsten Fall zur Reklamation des Kunden führen. Aus diesem Grund muss die verwendete Düse mit definierten Düsendurchmesser immer auf die jeweilige Anforderung angepasst werden. Der Durchmesser der verwendeten Düse sollte nicht nur dem Konstrukteur, sondern auch der Fertigung zu jedem Zeitpunkt bekannt sein.⁵²

⁵² Vgl. Schäfer (2008), Onlinequelle [09.09.2017].

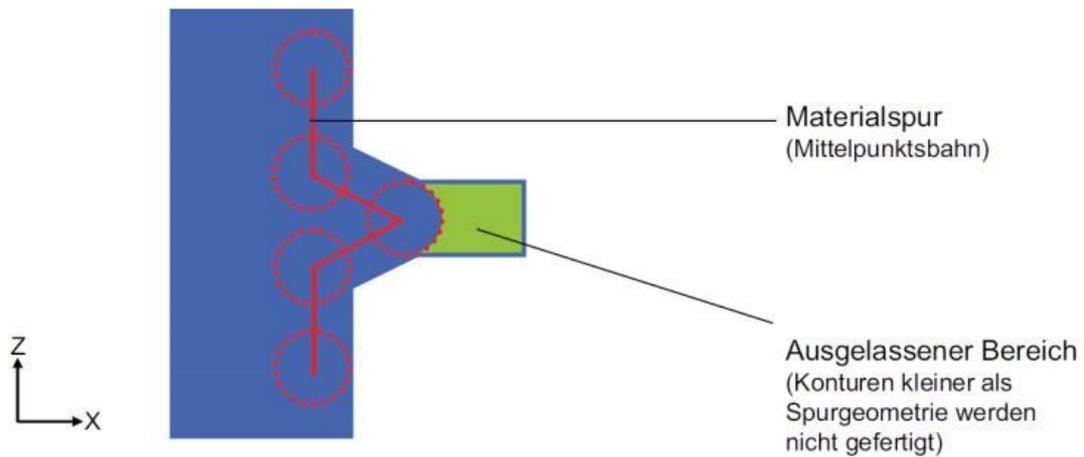


Abb. 34: Düsendurchmesser als limitierende Größe, Quelle: Schäfer (2008), Onlinequelle [09.09.2017].

5.2.9 Fadenbildung

Charakteristisch für die Fused Filament Fabrication-Technologie ist die Bildung von Fäden während des Fertigungsprozesses. Dieser Effekt tritt häufig beim Wechsel von Bau- zu Stützmaterial auf. Um diesen Effekt zu minimieren, muss unter Berücksichtigung des verwendeten Materials mit den Prozessparametern Einzugsdistanz und Einzugs geschwindigkeit entgegengewirkt werden. In den meisten Fällen hilft hier bereits die richtige Einstellung des Rückzuges während einer Reisebewegung des Druckkopfes. Dieser Parameter kann, wie in Abb. 35 zu sehen, erhöht bzw. erniedrigt werden. Weiters kann in Bezug auf die Einzugsdistanz auch die Einzugs-Geschwindigkeit angepasst werden.

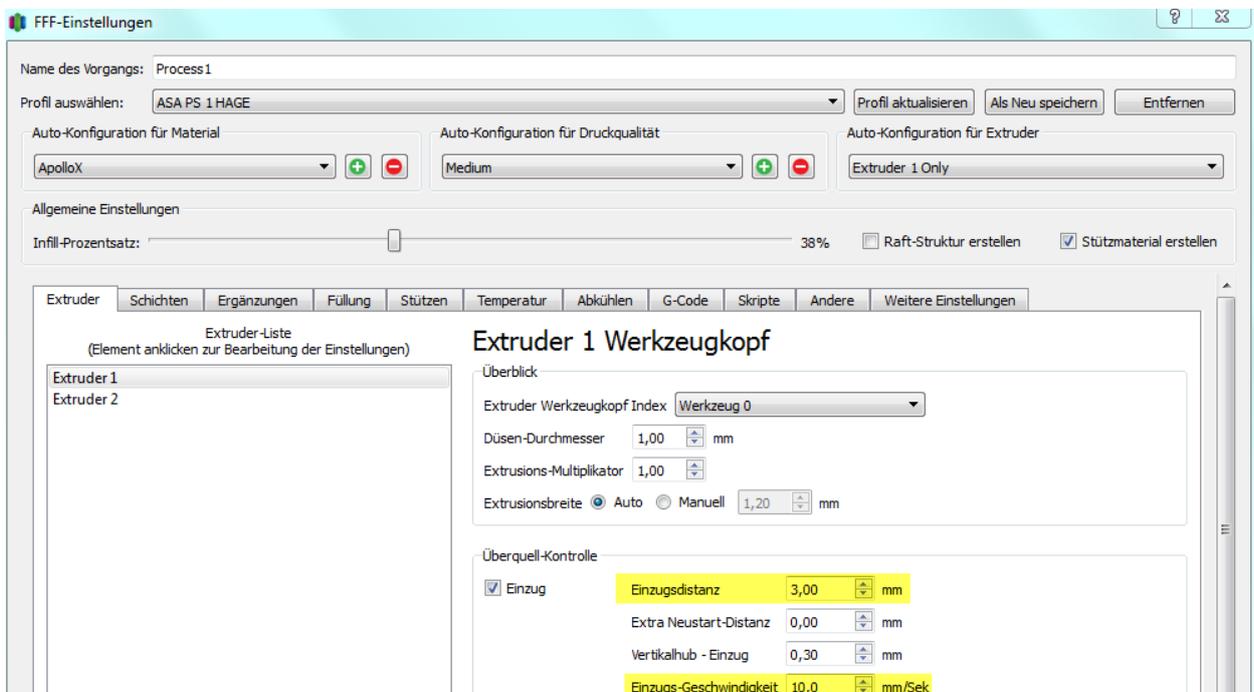


Abb. 35: Veränderung des Parameters Einzugsdistanz zur Minimierung der Fadenbildung, Quelle: Eigene Darstellung.

6 ZUGFESTIGKEIT VON FFF-ZUGPROBEN AUS ASA APOLLOX NATURAL

Dieses Kapitel befasst sich mit der Untersuchung der Zugfestigkeit unter Verwendung genormter Acrylester-Styrol-Acrylnitril-Probekörper. Da ASA als Baumaterial noch nicht sehr lange für die generative Fertigung zur Verfügung steht, soll mit den Zugversuchen spezifisches Material-Knowhow aufgebaut werden. Basierend auf der maximalen Kraft F in N, der Zugfestigkeit R_m in N/mm^2 , der Dehnung ϵ in %, dem Elastizitätsmodul E in MPa, der gewählten Positionierung des 3D-CAD-Modells im Bauraum bzw. des optimalen Schichtaufbauwinkels und der für ASA zu empfehlenden Fertigungstemperatur, können wichtige Materialkennwerte und zum anderen entscheidende Prozessparameter in Hinblick auf unterschiedliche Verbindungstechniken ermittelt werden. Beginnend mit der Konstruktion der Probekörper nach EN ISO 527 wird ein besonderes Augenmerk auf die Fertigungsparameter und deren Auswirkung auf die Zugfestigkeit gelegt. Unter die Gesamtbewertung der gefertigten Zugproben fallen Kriterien wie die Maßhaltigkeit, der strukturelle Aufbau und die mechanische Beständigkeit.

6.1 Zugversuchsproben nach EN ISO 527

Die Zugversuche werden normgerecht nach EN ISO 527 durchgeführt. In dieser Norm sind die Prüfbedingungen zur Ermittlung der Zugeigenschaften von Spritzguss-, Gussformmassen als auch von Extrusionsmassen festgelegt. Aus dem Prüfungsergebnis können Kennwerte wie die Spannung σ in N/mm^2 , die Dehnung ϵ in % und der Elastizitätsmodul E in MPa erfasst werden. In dieser sind unter anderem die Probengeometrie, siehe Abb. 36, die Prüfgeschwindigkeit und die Art der Ergebnisbestimmung festgelegt.⁵³

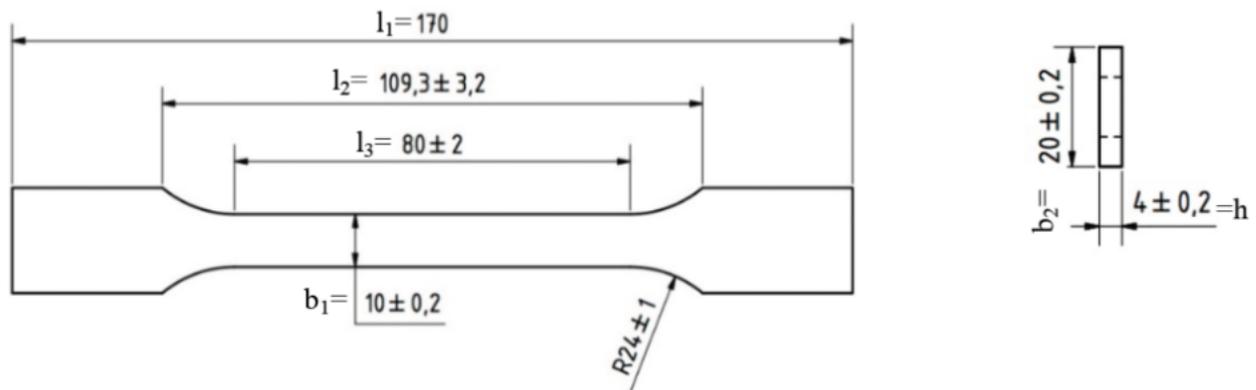


Abb. 36: Geometrie des Prüfkörpers in mm nach EN ISO 527, Quelle: RTeJournal (2016), Onlinequelle [20.08.2017].

⁵³ Vgl. Messemer u. a. (2016), Onlinequelle [04.11.2017].

6.2 Generative Fertigung und Versuchsbedingungen

Aufgrund der zahlreichen Parametervariationsmöglichkeiten der Fertigungssoftware Simplify3D, wird zu Beginn auf Basis der Standardeinstellungen der Fertigungssoftware und den Materialherstellerangaben der Firma Formfutura ein Basisparametersatz für Acrylester-Styrol-Acrylnitril ermittelt. Darauf aufbauend wird sukzessive jeweils ein Prozessparameter verändert und deren Auswirkung auf das Ergebnis dokumentiert. Zu untersuchende Prozessparameter sind unterschiedliche Startpositionen des Druckkopfs, verschiedene Schichtaufbauwinkel und zu guter Letzt die Einstellung der Fertigungstemperatur. Alle Probenkörper werden auf Basis der Erkenntnis aus der Literaturrecherche im theoretischen Teil flach bzw. in y-Richtung, siehe Unterkapitel 5.2.1, gefertigt.

Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, werden die restlichen Bauteile für die diversen Verbindungstechniken ebenfalls in y-Richtung hergestellt.

Da für ASA herstellerabhängig in Bezug auf die Fertigungstemperatur ein großer Streubereich, siehe Unterkapitel 3.3.5 angegeben wird, wird die Fertigung in zwei unterschiedlichen Temperaturzonen durchgeführt. In der ersten Temperaturzone wird die erste Schicht mit 240 °C und die restlichen Schichten des Bauteils mit 235 °C gefertigt. In der zweiten Temperaturzone wird die erste Schicht mit 250 °C und für die restlichen Schichten des Bauteils mit 245 °C gefertigt. Die minimale Temperaturerhöhung von 5 °C in der jeweils ersten Schicht, dient zur besseren Haftung des Materials auf der Bauplattform.

Die Temperaturerhöhung um 10 °C in der zweiten Temperaturzone, soll eine wesentliche Verbesserung des Schichtzusammenhalts und daraus resultierend ein besseres Ergebnis hinsichtlich des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs ergeben. Pro Fertigungsparametersatz werden 3 Probenkörper gefertigt, siehe Abb. 37, und deren Ergebnisse untereinander verglichen. Der eigentliche Zugversuch wird unter Raumtemperatur ~ 23 °C durchgeführt.



Abb. 37: Generative Fertigung mit dem 3D-Druckermodell HAGE 3D-72L-A, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche werden, wie in Abb. 38 zu sehen, auf einem servohydraulischen Mehrkanalsystem der Fa. IST geprüft. Die Steuerung erfolgt über eine FASTRACK 8800 der Fa. IST, wobei Zylinderweg, Zylinderkraft und Extensometerdehnung geregelt werden können. Der servohydraulische Zylinder der Fa. Winter Hydraulik verfügt über eine Nennkraft von $\pm 10\text{kN}$ und einen Nennweg von $\pm 50\text{mm}$. Das Prüfsystem ist auf einem pneumatisch gedämpften Schwingfundament aufgebaut. Während der Prüfung wird die Kraft mit einer dynamischen $\pm 10\text{ kN}$ HBM Kraftmessdose gemessen. Eingespannt werden die Proben über ein mechanisches Spannzeug der Fa. Instron. Die Dehnungsmessung erfolgt mit einem Instron-Extensometer Typ 2621 (Anfangsmesslänge: $l_0 = 62,5\text{mm}$; Messbereich: $\pm 5\text{mm}$). Die Zugversuche werden dehnungsgeregelt sowie normgerecht nach Prüfnorm EN ISO 527 mit einer Prüfungsgeschwindigkeit von 5 mm / min durchgeführt.⁵⁴

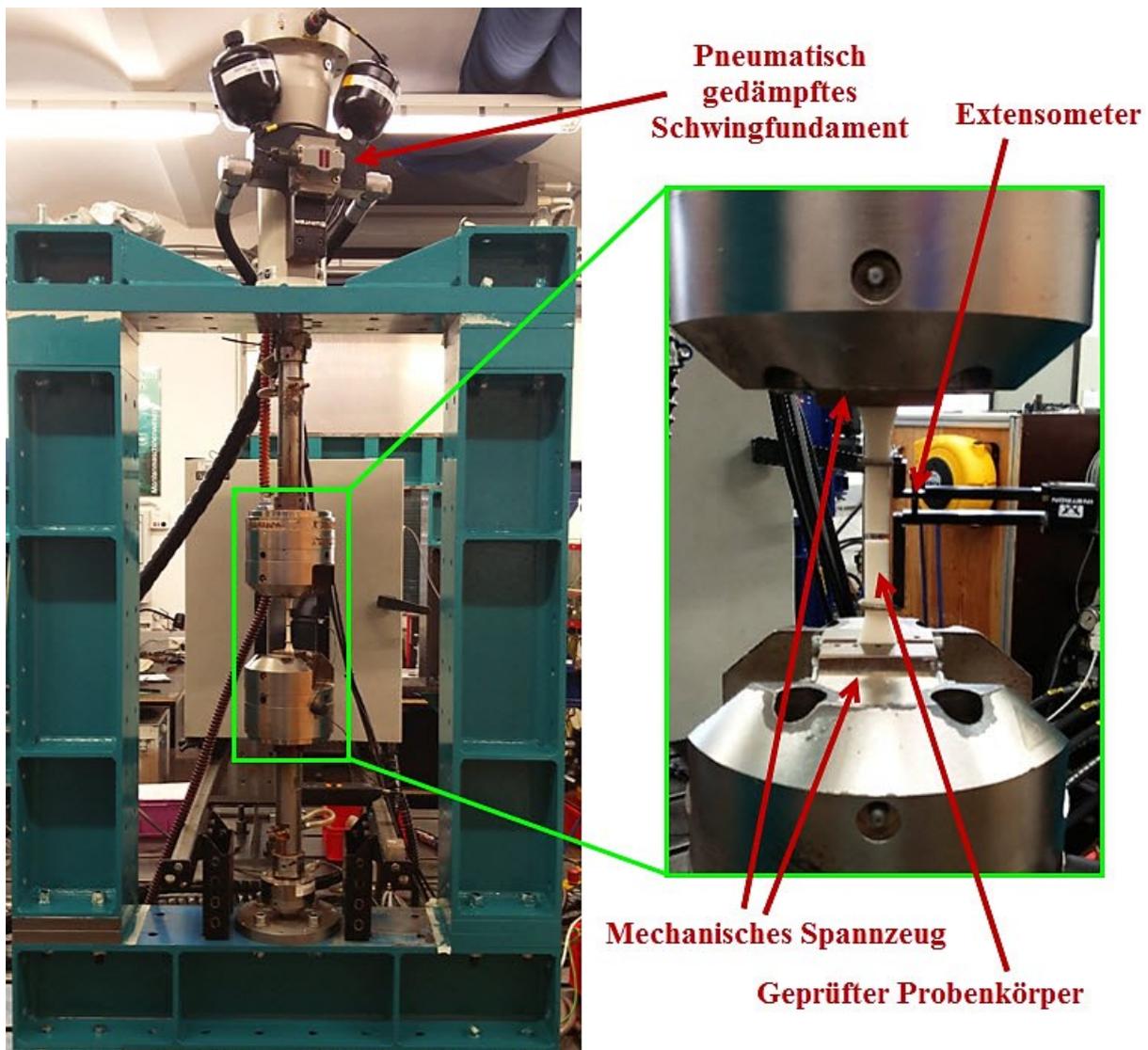


Abb. 38: Aufbau der verwendeten Zugprüfmaschine auf der Montanuniversität Leoben – Lehrstuhl allgemeiner Maschinenbau, Quelle: Eigene Darstellung.

⁵⁴ Vgl. Messemer u. a. (2016), Onlinequelle [13.11.2018].

6.3.1 Basisfertigungsparametersatz

Da die FFF-Technologie über sehr viele Einstellungsmöglichkeiten hinsichtlich Prozessparameter verfügt, werden in diesem Abschnitt nur die wichtigsten verwendeten Parameter, siehe auch Tab. 2, beschrieben:

- Extrusions-Multiplikator (Extrusion Multiplier): mit diesem Parameter wird die Fördermenge des Materials eingestellt.
- Extrusionsbreite (Extrusion-Width): Unterstützender Prozessparameter für die optimale Fördermenge.
- Schichthöhe (Layer Height): Höhe der einzelnen Schichten → bestimmt die Abbildungsgenauigkeit des gefertigten Bauteils.
- Einzugsdistanz (Retraction distance) bzw. Einzugsgeschwindigkeit (Retraction speed): gibt an, wie weit bzw. wie schnell das Material in die Düse zurückgezogen wird.
- Füllgrad (Fill Percentage): gibt an, wieviel Material zur Füllung des Bauteils verwendet wird.
- Füllart (Fill Patern): bestimmt die Innenstruktur des Bauteils.
- Außenhüllen (Perimeter Shells): legt die Anzahl der Umrandungen fest.
- Geschlossene Bodenschichten (Bottom Solid Layers): Anzahl der geschlossenen Bodenschichten.
- Geschlossene Deckschichten (Top Solid Layers): Anzahl der geschlossenen Deckschichten.
- Konturüberlappung (Outline Overlap): gibt an, wie weit die Innenstruktur über die Außenhüllen gedruckt wird.
- Druckgeschwindigkeit (Printing Speed): bestimmt die Fertigungsgeschwindigkeit des Fertigungsprozesses, wobei diese in bestimmten Bereichen (Außenhüllen, Innenstruktur, Stützstrukturen, Reisebewegung etc.) des Bauteils bereits im Vorhinein dementsprechend angepasst werden kann.

Extrusions-Multiplikator	0,8
Einzugsdistanz bzw. Einzugsgeschwindigkeit	3 mm bzw. 10 mm / s
Füllgrad	100 %
Füllart	Rectilinear
Außenhüllen	1
Geschlossene Bodenschichten	0
Geschlossene Deckschichten	0
Konturüberlappung	15 %
Schichthöhe	0,2 mm
Druckbetttemperatur	70 °C
Druckgeschwindigkeit	50 mm / s

Tab. 2: Darstellung der wichtigsten Parameter des Basisfertigungsparametersatzes, Quelle: Eigene Darstellung.

Aufbauend auf dem Basisfertigungsparametersatz, siehe Tab. 2, wird im Sinne des iterativen Verbesserungsprozesses pro Fertigungsparametersatz jeweils ein Prozessparameter optimiert. Anfangs wird unter Fertigungsparametersatz 1 die Basiseinstellung der Fertigungssoftware Simplify3D herangezogen. Darunter wird der Prozessparameter Startpunkt auf idente Startpunkte gesetzt. Idente Startpunkte bedeutet, dass der HAGE 3D-72L-A 3D-Drucker mit jeder einzelnen Schicht des Bauteils an der gleichen Stelle beginnt, siehe hierzu auch Abb. 39. In Fertigungsparametersatz 2 wird dieser Prozessparameter auf unterschiedliche Startpunkte verändert. Im letzten Fertigungsparametersatz 3 wird die Einstellung der unterschiedlichen Startpunkte übernommen und zusätzlich noch die Fertigungstemperatur auf 250 °C bzw. 245 °C erhöht.

6.3.2 Fertigungsparametersatz 1

Der Fertigungsparametersatz 1 enthält die in Tab. 3 festgelegten Einstellungen.

Parameter	Bemerkung
Schichthöhe	0,2 mm → Hälfte des Düsendurchmessers gilt als Optimum bei FFF
Positionierung des 3D-CAD-Modells im Bauraum	y-Richtung → flache Ausrichtung
Schichtaufbauwinkel	Überkreuzt → 45° bzw. -45°
Fertigungstemperatur	240 °C für die erste Schicht und 235 °C für die restlichen Schichten
Startpunkt	Basiseinstellung der Fertigungssoftware → idente Startpunkte
	Anwendung auf Zugproben 1 – 3

Tab. 3: Parameter des ersten Versuchs, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Basiseinstellung der Fertigungssoftware Simplify3D bestimmt immer aufgrund der Geometrie wo die Startpunkte, gesetzt werden. In Abb. 39 ist eine Korrelation zwischen Startpunkt und Bruchstelle der Probenkörper zu erkennen.

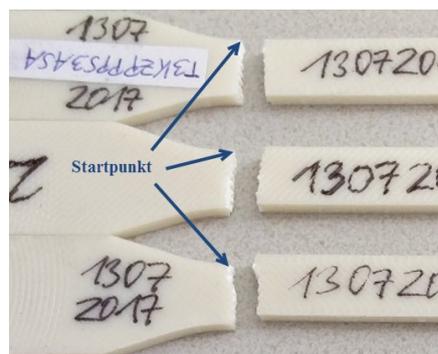


Abb. 39: Startpunkt der Zugproben 1 – 3, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3.3 Fertigungsparametersatz 2

Im Fertigungsparametersatz 2 werden anstatt identen Startpunkten unterschiedliche Startpunkte verwendet, siehe Tab. 4.

Parameter	Bemerkung
Schichthöhe	0,2 mm → Hälfte des Düsendurchmessers gilt als Optimum bei FFF
Positionierung des 3D-CAD-Modells im Bauraum	y-Richtung → flache Ausrichtung
Schichtaufbauwinkel	Überkreuzt → 45° bzw. -45°
Fertigungstemperatur	240 °C für die erste Schicht und 235 °C für die restlichen Schichten
Startpunkt	Unterschiedliche Startpunkte
	Anwendung auf Zugproben 4 – 6

Tab. 4: Parameter des zweiten Versuchs, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3.4 Fertigungsparametersatz 3

Im dritten und letzten Versuch in Tab. 5 wird noch die Fertigungstemperatur um jeweils 10 °C angehoben.

Parameter	Bemerkung
Schichthöhe	0,2 mm → Hälfte des Düsendurchmessers gilt als Optimum bei FFF
Positionierung des 3D-CAD-Modells im Bauraum	y-Richtung → flache Ausrichtung
Schichtaufbauwinkel	Überkreuzt → 45° bzw. -45°, 90° und 180°
Fertigungstemperatur	250 °C für die erste Schicht und 245 °C für die restlichen Schichten
Startpunkt	Unterschiedliche Startpunkte
	Anwendung auf Zugproben 1/1 – 3/1, 1/2 – 3/2, und 1/3 – 3/3

Tab. 5: Parameter des dritten Versuchs, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4 Prüfung und Bewertung

In diesem Unterkapitel werden die gefertigten Probenkörper unterschiedlichen Prüfungskriterien wie Maßhaltigkeit, Strukturaufbau und mechanische Beständigkeit unterzogen. Der wesentliche Unterschied der Zugproben liegt in der Verwendung des jeweiligen Fertigungsparametersatzes, siehe Abschnitt 6.3.

6.4.1 Maßhaltigkeit

Alle Probenkörper werden zur einheitlichen Vergleichbarkeit an derselben Stelle vermessen. Der Messpunkt für Breite und Höhe liegt jeweils in der Mitte des Probenkörpers. Charakteristisch ist, dass alle Zugproben besonders in der Ist-Breite im Übermaß liegen. Dies liegt grundsätzlich an der groben Fertigungsgenauigkeit der FFF- bzw. FDM-Technologie, siehe Abb. 40.

1. Kategorie m (mittel):	2. Kategorie c (grob):	3. Kategorie v (sehr grob):
<ul style="list-style-type: none"> • Stereolithografie (SLA) • Polygrafie / Photolithografie • Vakuumguss / Spritzguss • CNC Fräsen / Laserschneiden 	<ul style="list-style-type: none"> • Selektives Lasersintern (SLS) • Selektives Laserschmelzen (SLM) 	<ul style="list-style-type: none"> • Fused Deposition Modeling (FDM) • 3D Druck mit Polymergeprints (3DP)

Die folgende Toleranztafel zeigt einen Auszug aus der Norm ISO 2768, welche als DIN-Norm vorliegt:

Toleranzklasse	Grenzabmaße in mm für Nennmaßbereich in mm										
	bis	0,5	über 0,5 bis 3,0	über 3,0 bis 6,0	über 6,0 bis 30,0	über 30,0 bis 120,0	über 120,0 bis 400,0	über 400,0 bis 1000,0	über 1000,0 bis 2000,0	über 2000,0 bis 4000,0	über 4000,0 bis 8000,0
m (mittel)	k.A.	± 0,10	± 0,10	± 0,20	± 0,30	± 0,50	± 0,80	± 1,20	± 2,0	± 3,0	± 5,0
c (grob)	k.A.	± 0,15	± 0,20	± 0,50	± 0,80	± 1,20	± 2,0	± 3,0	± 4,0	± 5,0	± 8,0
v (sehr grob)	k.A.	k.A.	± 0,50	± 1,00	± 1,50	± 2,5	± 4,0	± 6,0	± 8,0	± 8,0	± 8,0

Weitere Informationen:

Da die Fertigung der Bauteile hauptsächlich durch additive Verfahren (d.h. Schichtaufbau) erfolgt, hängt die Definition des Längenmaßes von der Ausrichtung des Bauteiles im Bauraum ab. Betrachtet wird immer die Ausrichtung an der XY Ebene (liegend).

Abb. 40: Toleranztafel für unterschiedliche generative Fertigungsverfahren aus der Norm ISO 2768, Quelle: Rapidobject (2017), Onlinequelle [08.11.2017].

Für die Fertigung der Probenkörper kommen alle drei Fertigungsparametersätze zum Einsatz. Für die Zugproben 1 – 3 wird der Fertigungsparametersatz 1, für die Zugproben 4 – 6 der Fertigungsparametersatz 2 und für die restlichen Zugproben der Fertigungsparametersatz 3 verwendet. Alle überprüften Probenkörper der Zugversuche liegen, wie in Tab. 6 abgebildet, im festgelegten Toleranzbereich der Norm EN ISO 527.

	Ist-Breite nach Fertigung	b ₁	Ist-Höhe nach Fertigung	h	Soll-Breite laut Norm	b ₁	Soll-Höhe laut Norm	h
Zugprobe 1	10,16		3,94		10		4	
Zugprobe 2	10,10		3,99		10		4	
Zugprobe 3	10,12		3,93		10		4	
Zugprobe 4	10,10		3,99		10		4	
Zugprobe 5	10,08		3,98		10		4	
Zugprobe 6	10,15		4,05		10		4	

Zugprobe 1/1	10,19	4,08	10	4
Zugprobe 2/1	10,06	4,13	10	4
Zugprobe 3/1	10,18	4,07	10	4
Zugprobe 1/2	10,18	3,81	10	4
Zugprobe 2/2	10,05	3,84	10	4
Zugprobe 3/2	10,14	3,91	10	4
Zugprobe 1/3	10,18	3,90	10	4
Zugprobe 2/3	10,18	3,94	10	4
Zugprobe 3/3	10,16	4,14	10	4

Tab. 6: Maßhaltigkeitsvergleich 1 aller gefertigten Probenkörper, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Vervollständigung der Maßhaltigkeitsprüfung, werden die restlichen in der Norm dargestellten Maße der Probenkörper vermessen und in Tab. 7 dokumentiert. Auch hier liegen alle Probenkörper im Toleranzbereich der angewandten Norm.

	Aufbauwinkel	Lage	I1	I2	I3	b2
Zugprobe 1	45° und -45°	flach	170,19	109,24	81,04	20,15
Zugprobe 2	45° und -45°	flach	170,11	109,97	81,23	20,01
Zugprobe 3	45° und -45°	flach	170,15	109,76	81,07	20,04
Zugprobe 4	45° und -45°	flach	170,14	109,37	81,70	20,09
Zugprobe 5	45° und -45°	flach	170,12	109,85	81,37	20,07
Zugprobe 6	45° und -45°	flach	170,16	109,86	81,39	20,10
Zugprobe 1/1	45° und -45°	flach	170,13	110,82	80,37	20,20
Zugprobe 2/1	45° und -45°	flach	170,14	110,86	80,81	20,02
Zugprobe 3/1	45° und -45°	flach	170,18	110,66	80,77	20,07
Zugprobe 1/2	90°	flach	170,12	109,87	80,48	20,14
Zugprobe 2/2	90°	flach	170,16	109,39	80,24	20,03
Zugprobe 3/2	90°	flach	170,17	109,04	80,27	20,02
Zugprobe 1/3	180°	flach	170,11	109,25	80,24	20,16
Zugprobe 2/3	180°	flach	170,13	109,26	80,25	20,16
Zugprobe 3/3	180°	flach	170,16	109,12	80,26	20,01

Tab. 7: Maßhaltigkeitsvergleich 2 aller gefertigten Probenkörper, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4.2 Struktur

Unter dieses optische Bewertungskriterium fallen Qualitätsmerkmale wie der Schichtaufbau (sauberes Aufeinanderlegen der einzelnen Schichten), Dichtheit (geschlossene Schichten und keine Fehlerstellen, besonders beim Übergang von Füllung zu Außenhülle) und der sichtbare Verzug des Bauteils (Warping-Effekt). Aufbauend auf den aufgezählten Qualitätsmerkmalen, ist das Bewertungssystem für den strukturellen Aufbau folgendermaßen aufgebaut, siehe Tab. 8.

Qualitätsmerkmal	Beispielbauteil Zylinder
Schichtaufbau	Gut
Dichtheit	Mittel
Verzug	Schlecht

Tab. 8: Beispieldarstellung des Bewertungskriteriums Struktur, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abhängigkeit der Qualitätsmerkmale, sind in Tab. 9 die Ergebnisse der Zugproben mit dem Fertigungsparametersatz 1 dargestellt.

Qualitätsmerkmal	Zugprobe 1	Zugprobe 2	Zugprobe 3
Schichtaufbau	Gut	Gut	Gut
Dichtheit	Gut	Gut	Gut
Verzug	Mittel	Mittel	Mittel

Tab. 9: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Ein guter Schichtaufbau bedeutet, dass die einzelnen Schichten ordnungsgemäß übereinandergelegt sind. Die Dichtheit eines Bauteils ist dann gewährleistet, wenn zwischen der Füllung und der Außenhülle keine Fehlerstellen in Form von Lücken sichtbar sind. Der Verzug von generativ gefertigten Bauteilen wird beim FFF-Verfahren durch den Warping-Effekt, siehe Abb. 11, beschrieben.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Bewertung sind die geprüften Zugproben in Abb. 41 dargestellt. Die Zugproben 1 – 3 weisen einen guten Schichtaufbau und eine zufriedenstellende Dichtheit auf. Bei allen drei Probenkörpern ist jedoch ein leichter Verzug sichtbar.

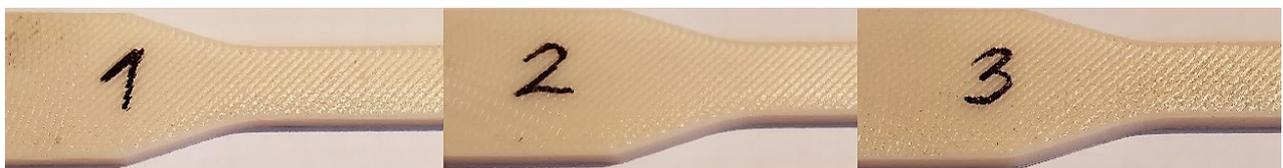


Abb. 41: Struktur der gefertigten Zugproben – 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Tab. 10 veranschaulicht die Qualitätsmerkmale der Zugproben mit dem Fertigungsparametersatz 2.

Qualitätsmerkmal	Zugprobe 4	Zugprobe 5	Zugprobe 6
Schichtaufbau	Gut	Gut	Gut
Dichtheit	Gut	Gut	Gut
Verzug	Mittel	Mittel	Mittel

Tab. 10: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 2, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Bewertung sind die geprüften Zugproben in Abb. 42 dargestellt. Die Zugproben 4 – 6 weisen ebenfalls einen guten Schichtaufbau und eine zufriedenstellende Dichtheit auf. Bei allen drei Probenkörpern ist jedoch wieder ein leichter Verzug zu erkennen.



Abb. 42: Struktur der gefertigten Zugproben – 2, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei den geprüften Zugproben 1 – 6 sind auf Basis der Strukturbewertung keine Unterschiede zu vermerken.

Tab. 11 veranschaulicht die Qualitätsmerkmale der Zugproben hergestellt mit dem Fertigungsparametersatz 3 und einem Schichtaufbauwinkel 45° und -45°.

Qualitätsmerkmal	Zugprobe 1/1	Zugprobe 2/1	Zugprobe 3/1
Schichtaufbau	Gut	Gut	Gut
Dichtheit	Gut	Gut	Gut
Verzug	Mittel	Mittel	Mittel

Tab. 11: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 3, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Bewertung sind die geprüften Zugproben in Abb. 43 dargestellt. Die Zugproben 1/1 – 3/1 weisen wie die Probenkörper zuvor einen guten Schichtaufbau und eine zufriedenstellende Dichtheit auf. Ein leichter Verzug ist jedoch auch hier sichtbar.



Abb. 43: Struktur der gefertigten Zugproben – 3, Quelle: Eigene Darstellung.

In Tab. 12 sind die Qualitätsmerkmale der Zugproben hergestellt mit dem Fertigungsparametersatz 3 und einem Schichtaufbauwinkel von 90° zu sehen.

Qualitätsmerkmal	Zugprobe 1/2	Zugprobe 2/2	Zugprobe 3/2
Schichtaufbau	Mittel	Mittel	Mittel
Dichtheit	Gut	Mittel	Mittel
Verzug	Mittel	Mittel	Mittel

Tab. 12: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 4, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Bewertung sind die geprüften Zugproben in Abb. 44 dargestellt. Die Zugproben 1/2 – 3/2 weisen einen nicht so guten Schichtaufbau bzw. Dichtheit auf. Auch ein leichter Verzug ist ersichtlich.



Abb. 44: Struktur der gefertigten Zugproben – 4, Quelle: Eigene Darstellung.

Tab. 13 veranschaulicht die Qualitätsmerkmale der Zugproben hergestellt mit dem Fertigungsparametersatz 3 und einem Schichtaufbauwinkel 180°.

Qualitätsmerkmal	Zugprobe 1/3	Zugprobe 2/3	Zugprobe 3/3
Schichtaufbau	Gut	Mittel	Mittel
Dichtheit	Gut	Gut	Gut
Verzug	Mittel	Mittel	Mittel

Tab. 13: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 5, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Bewertung sind die geprüften Zugproben in Abb. 45 dargestellt. Die Zugproben 1/3 – 3/3 weisen einen ebenfalls nicht so guten Schichtaufbau, dafür eine gute Dichtheit auf. Der Verzug der Probenkörper hat sich auch bei diesen Zugproben nicht verändert.



Abb. 45: Struktur der gefertigten Zugproben – 5, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4.3 Mechanische Festigkeit

Alle Ergebnisse dieses Bewertungskriteriums werden in Form von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen dargestellt. Auf Basis dieser Visualisierung können die wesentlichen Verbesserungen anhand unterschiedlicher Fertigungsparametersätze veranschaulicht werden.

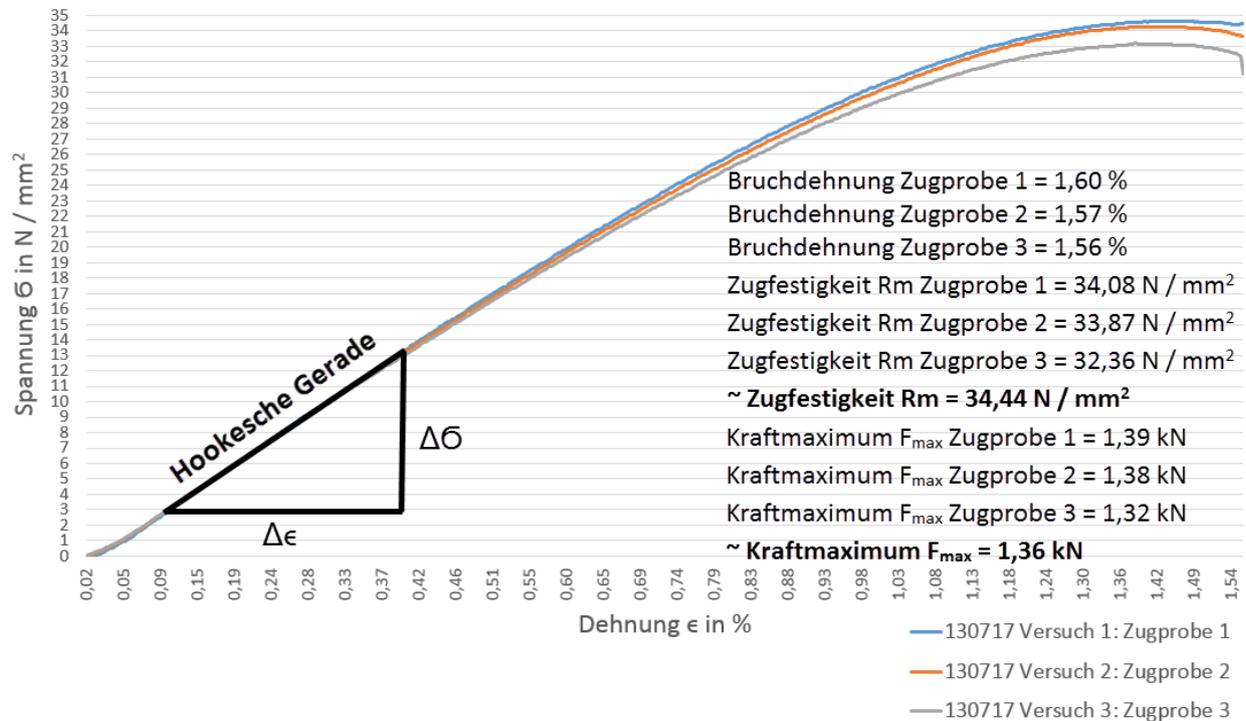


Abb. 46: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Abb. 46 zeigt den Verlauf der Spannung über die Dehnung der Zugproben 1 – 3 gefertigt mit dem Fertigungsparametersatz 1. Die Bruchdehnung der Probenkörper befindet sich zwischen 1,56% und 1,6%. Die Hookesche Gerade veranschaulicht hierbei den linear-elastischen Bereich. In diesem Fall ist die Dehnung proportional zur Spannung und ist reversibel. Der linear-elastische Bereich reicht bei den Zugproben 1 – 3 bis zu einer Dehnung von 0,7%. Der nächste Bereich ist der nichtlinear-elastische Bereich, wobei die Dehnung nicht proportional zur Spannung verläuft, die Verformung dennoch reversibel ist. Dieser reicht bis zu einer optisch bestimmten Dehnung von ca. 1%. Der letzte Bereich > 1% Dehnung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist der plastische Bereich, in welchem die Verformung auch nach Entlastung bestehen bleibt. Dieser befindet sich in diesem Fall zwischen 1% und des Bruchdehnungswertes der jeweiligen Zugprobe.

Aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm ist zu erkennen, dass es keine ausgezeichnete Streckgrenze gibt. Es liegt somit ein kontinuierlicher Übergang vom elastischen- in den plastischen Bereich vor.

In Tab. 14 sind zusammenfassend die wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen dargestellt.

Kenngröße	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert
Maximale Kraft F_{max} in N	1390	1380	1320	1360
Zugfestigkeit R_m in N / mm ²	34,08	33,87	32,36	33,44
Bruchdehnung ϵ in %	1,60	1,57	1,56	1,57
Elastizitätsmodul E in MPa	2650	2857	2850	2736

Tab. 14: Gegenüberstellung der wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen – 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf Basis des durch die Fertigungssoftware Simplify3D standardmäßig eingestellten Prozessparameters der identen Startpunkte, sind in Abb. 47 der geprüften Probenkörper ebenfalls idente Bruchstellen zu erkennen. Es kann somit eine Korrelation zwischen Startpunkt und Bruchstelle des Probenkörpers festgestellt werden. Daraus folgend sollen in den nächsten Versuchen unterschiedliche Startpositionen verwendet werden.

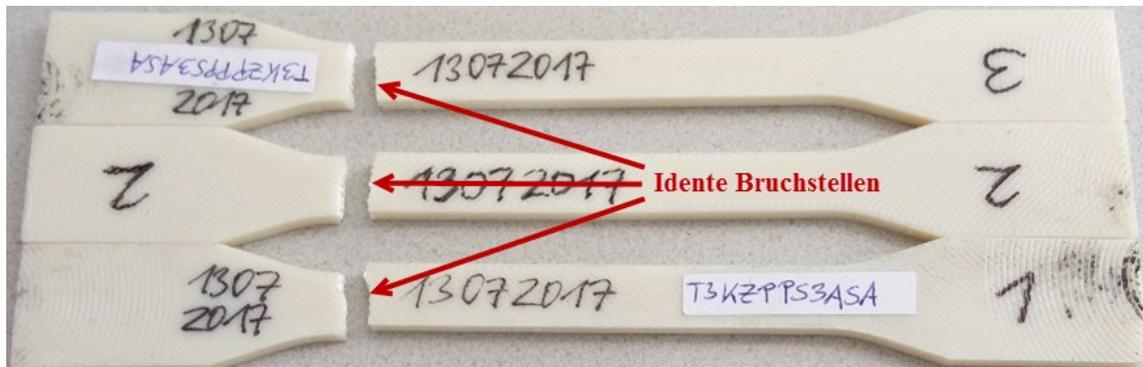


Abb. 47: Korrelation zwischen Startpunkt und Bruchstelle an den geprüften Probenkörpern, Quelle: Eigene Darstellung.

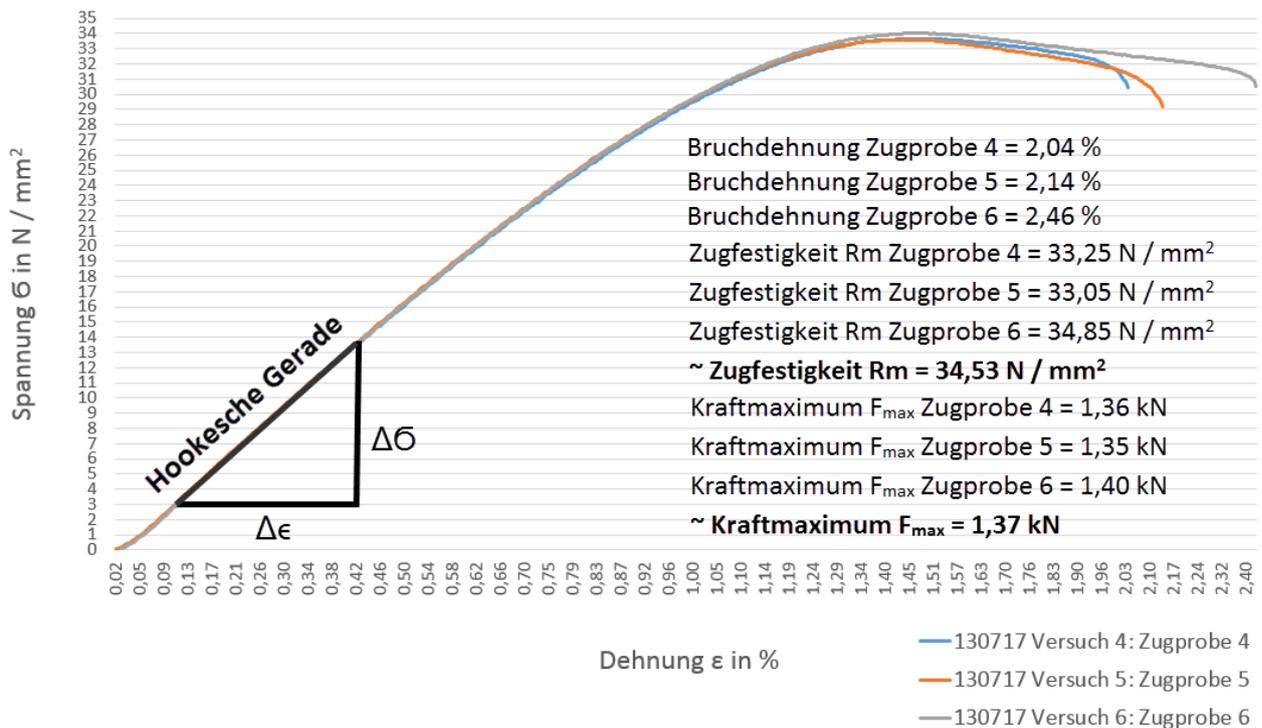


Abb. 48: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – 2, Quelle: Eigene Darstellung.

Abb. 48 zeigt den Verlauf der Spannung über die Dehnung der Zugproben 4 – 6 gefertigt mit dem Fertigungsparametersatz 2. Die Bruchdehnung der Probenkörper befindet sich zwischen 2,04% und 2,46%. Die Hookesche Gerade veranschaulicht hierbei den linear-elastischen Bereich. In diesem Fall ist die Dehnung proportional zur Spannung und ist reversibel. Der linear-elastische Bereich reicht bei den Zugproben 4 – 6 bis zu einer Dehnung von 0,8%. Der nächste Bereich ist der nichtlinear-elastische Bereich, wobei die Dehnung nicht proportional zur Spannung verläuft, die Verformung dennoch reversibel ist. Dieser reicht bis zu einer optisch bestimmten Dehnung von ca.1,1%. Der letzte Bereich > 1,1% Dehnung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist der plastische Bereich, in welchem die Verformung auch nach Entlastung bestehen bleibt. Dieser befindet sich in diesem Fall zwischen 1,1% und des Bruchdehnungswertes der jeweiligen Zugprobe.

Aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm ist zu erkennen, dass es keine ausgezeichnete Streckgrenze gibt. Es liegt somit ein kontinuierlicher Übergang vom elastischen- in den plastischen Bereich vor.

In Tab. 15 sind zusammenfassend die wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen dargestellt.

Kenngröße	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Mittelwert
Maximale Kraft F_{\max} in N	1360	1350	1400	1370
Zugfestigkeit R_m in N / mm ²	33,25	33,05	34,28	33,53
Bruchdehnung ϵ in %	2,12	2,41	2,46	2,33
Elastizitätsmodul E in MPa	2666	2850	2857	2791

Tab. 15: Gegenüberstellung der wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen – 2, Quelle: Eigene Darstellung.

Aufgrund des Fertigungsparametersatzes 2 mit unterschiedlichen Startpunkten, sind nun auch die Bruchstellen an den Probenkörpern, wie in Abb. 49 abgebildet, immer an unterschiedlichen Stellen.

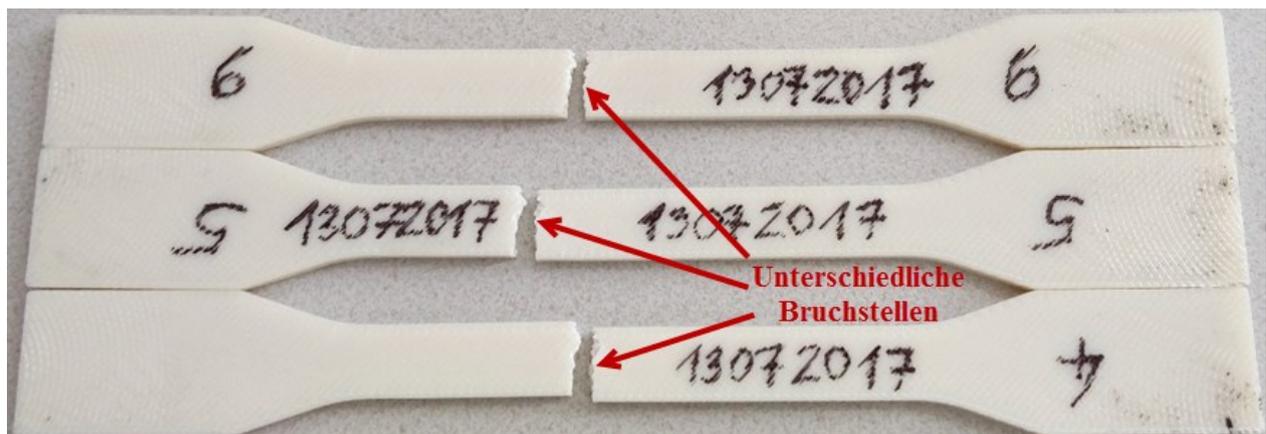


Abb. 49: Veränderung der Bruchstellen aufgrund unterschiedlicher Startpunkte, Quelle: Eigene Darstellung.

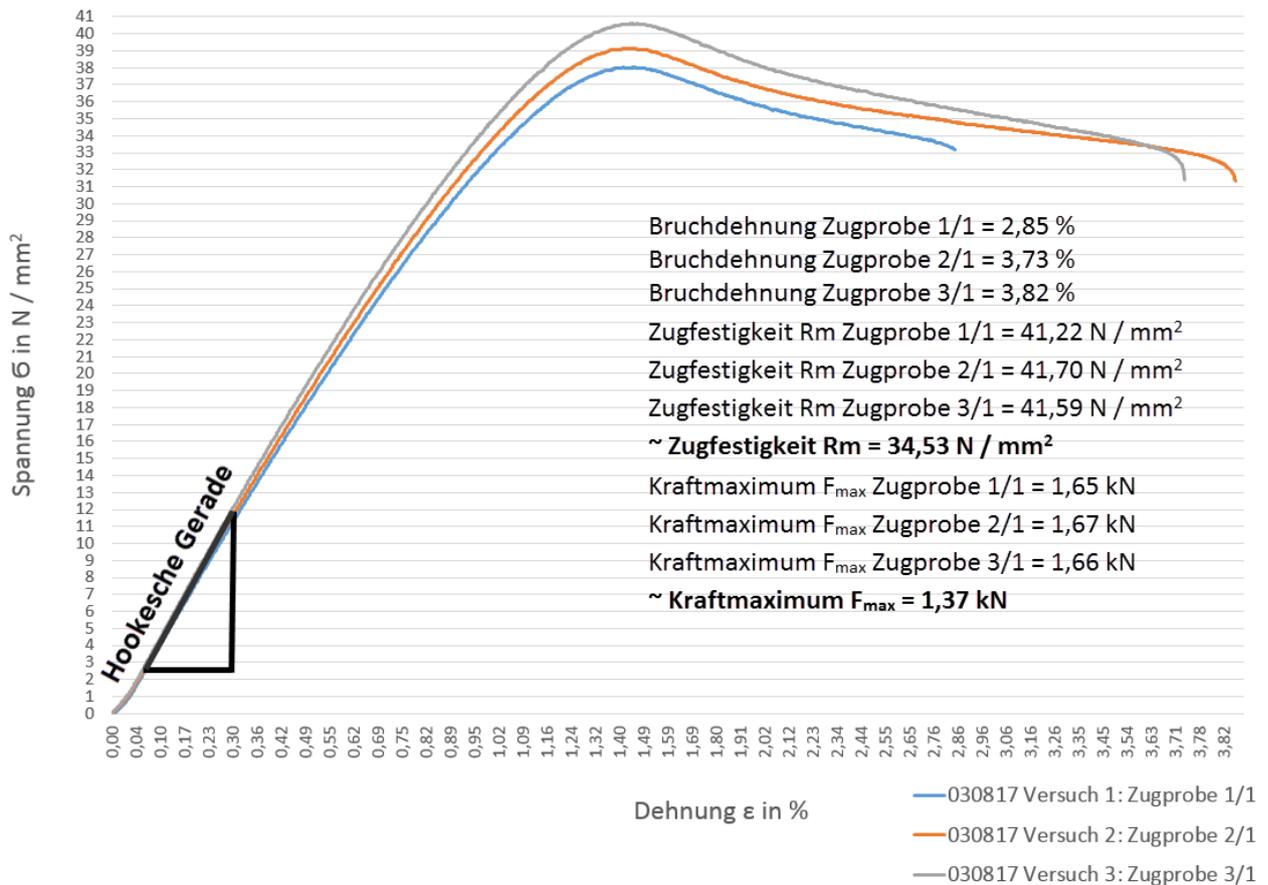


Abb. 50: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – 3, Quelle: Eigene Darstellung.

Abb. 50 zeigt den Verlauf der Spannung über die Dehnung der Zugproben 1/1 – 3/1 gefertigt mit dem Fertigungsparametersatz 3. Die Bruchdehnung der Probenkörper befindet sich zwischen 2,85% und 3,82%. Die Hookesche Gerade veranschaulicht hierbei den linear-elastischen Bereich. In diesem Fall ist die Dehnung proportional zur Spannung und ist reversibel. Der linear-elastische Bereich reicht bei den Zugproben 1/1 – 3/1 bis zu einer Dehnung von 0,8%. Der nächste Bereich ist der nichtlinear-elastische Bereich, wobei die Dehnung nicht proportional zur Spannung verläuft, die Verformung dennoch reversibel ist. Dieser reicht bis zu einer optisch bestimmten Dehnung von ca. 1,2%. Der letzte Bereich > 1,2% Dehnung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist der plastische Bereich, in welchem die Verformung auch nach Entlastung bestehen bleibt. Dieser befindet sich in diesem Fall zwischen 1,2% und des Bruchdehnungswertes der jeweiligen Zugprobe.

Aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm ist zu erkennen, dass es keine ausgezeichnete Streckgrenze gibt. Es liegt somit ein kontinuierlicher Übergang vom elastischen- in den plastischen Bereich vor.

In Tab. 16 sind zusammenfassend die wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen dargestellt.

Kenngröße	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert
Maximale Kraft F_{\max} in N	1650	1670	1660	1660
Zugfestigkeit R_m in N / mm²	41,22	41,70	41,59	41,50
Bruchdehnung ϵ in %	3,20	3,79	3,63	3,54
Elastizitätsmodul E in MPa	3333	3636	3861	3610

Tab. 16: Gegenüberstellung der wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen – 3, Quelle: Eigene Darstellung.

Aufgrund der Temperaturerhöhung in Fertigungsparametersatz 3 können, wie in Tab. 16 abgebildet, alle Kenngrößen des Zugversuchs wesentlich verbessert werden. Auf Basis der höheren Fertigungstemperatur von 250 °C für die erste Schicht bzw. 245 °C für die restlichen Schichten, konnte der Schichtzusammenhalt wesentlich verbessert werden. Optisch ist dies auch an den Dehnungstreifen auf den Probenkörpern in Abb. 51 ersichtlich.

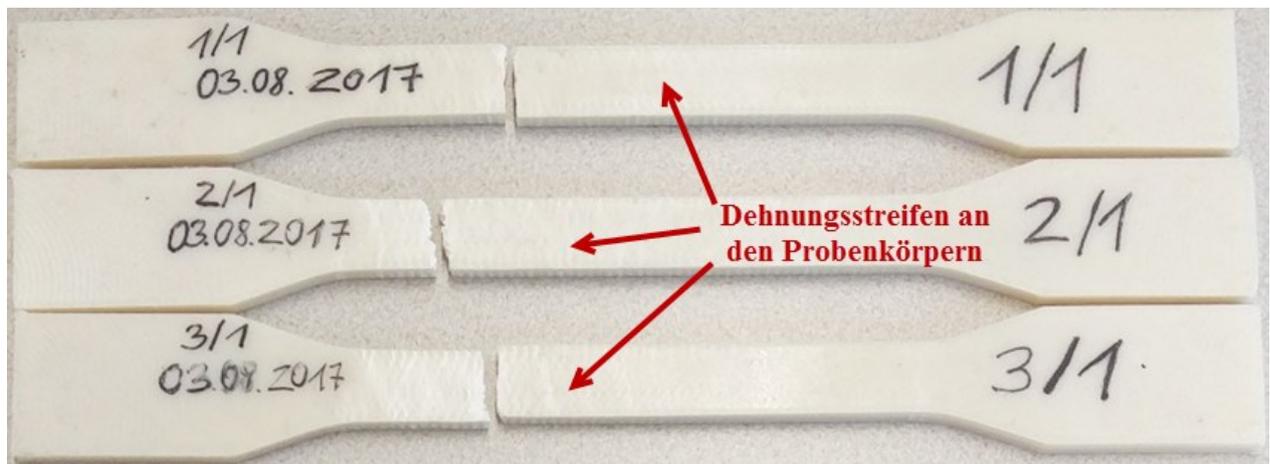


Abb. 51: Geprüfte Probenkörper mit dem Fertigungsparametersatz 3, Quelle: Eigene Darstellung.

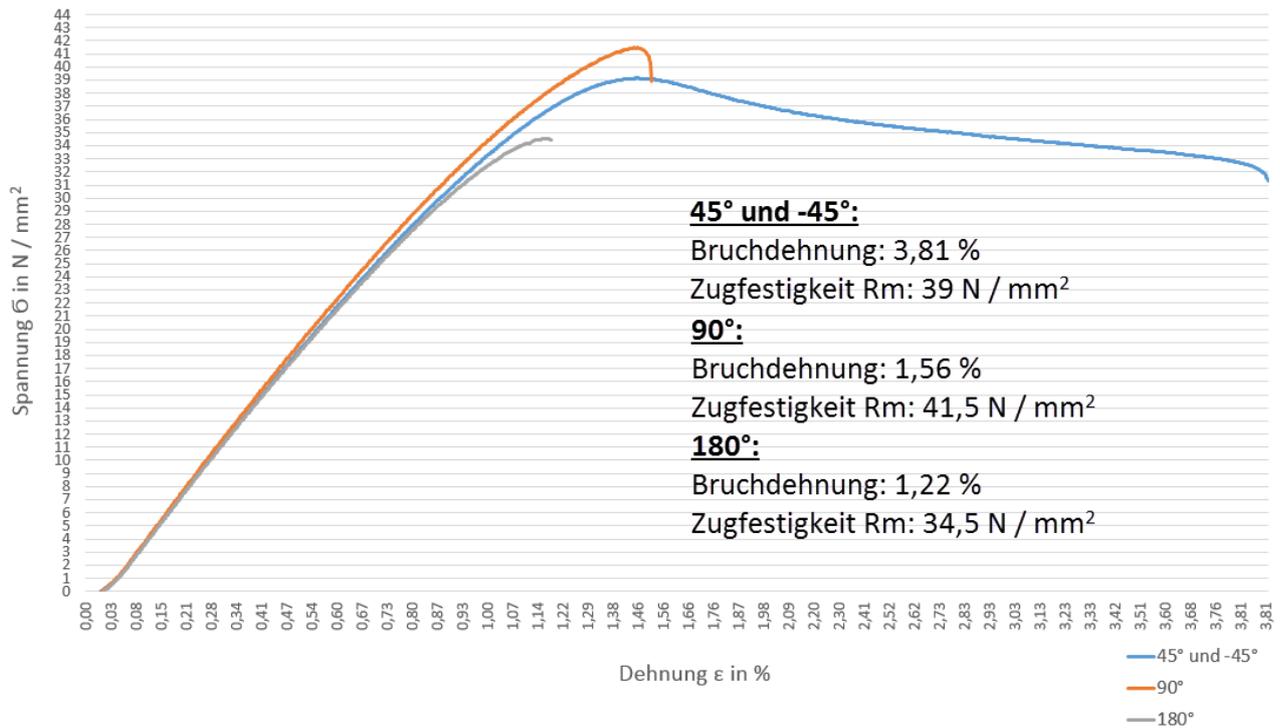


Abb. 52: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Diagramme dreier Probenkörper mit unterschiedlichen Schichtaufbauwinkeln unter Verwendung des Fertigungsparametersatzes 3, Quelle: Eigene Darstellung.

Abb. 52 und Abb. 53 zeigen den Vergleich dreier Probenkörper mit unterschiedlichen Schichtaufbauwinkeln. Charakteristisch für die Variante mit einem Schichtaufbauwinkel von 45° und -45° ist, dass diese alle Bereiche eines Zugversuchs (linear elastischer Bereich, nichtlinear-elastischer Bereich, Materialverfestigung und Einschnürung), siehe dafür auch Abb. 51, beinhaltet. Bei den anderen beiden Schichtaufbauwinkeln von 90° und 180° kommt es gar nicht erst zu einer Materialverfestigung, da vorher bereits der Bruch des Probenkörpers eintritt. Dies ist besonders in Abb. 52 ersichtlich. Sobald die maximale Zugfestigkeit der Probenkörper erreicht ist, brechen die Proben (Bruchdehnung zwischen 1,22% und 1,56 %) anstatt in die nächste Phase der Materialverfestigung zu gelangen.



Abb. 53: Darstellung der geprüften Probenkörper mit unterschiedlichen Schichtaufbauwinkeln, Quelle: Eigene Darstellung.

Alle Probenkörper werden mit dem Fertigungsparametersatz 3 gefertigt. In Tab. 17 werden die wichtigsten Kenngrößen in Form einer Tabelle miteinander verglichen.

Kenngröße	45° und -45°	90°	180°
Maximale Kraft F_{max} in N	1670	1642	1406
Zugfestigkeit R_m in N / mm²	41,70	41,04	35,14
Bruchdehnung ϵ in %	3,79	1,35	1,24
Elastizitätsmodul E in MPa	3846	3861	3820

Tab. 17: Vergleich der wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen mit unterschiedlichem Aufbauwinkel, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus Tab. 17 ist zu erkennen, dass der E-Modul keinen direkten Zusammenhang mit dem Schichtaufbauwinkel aufweist.

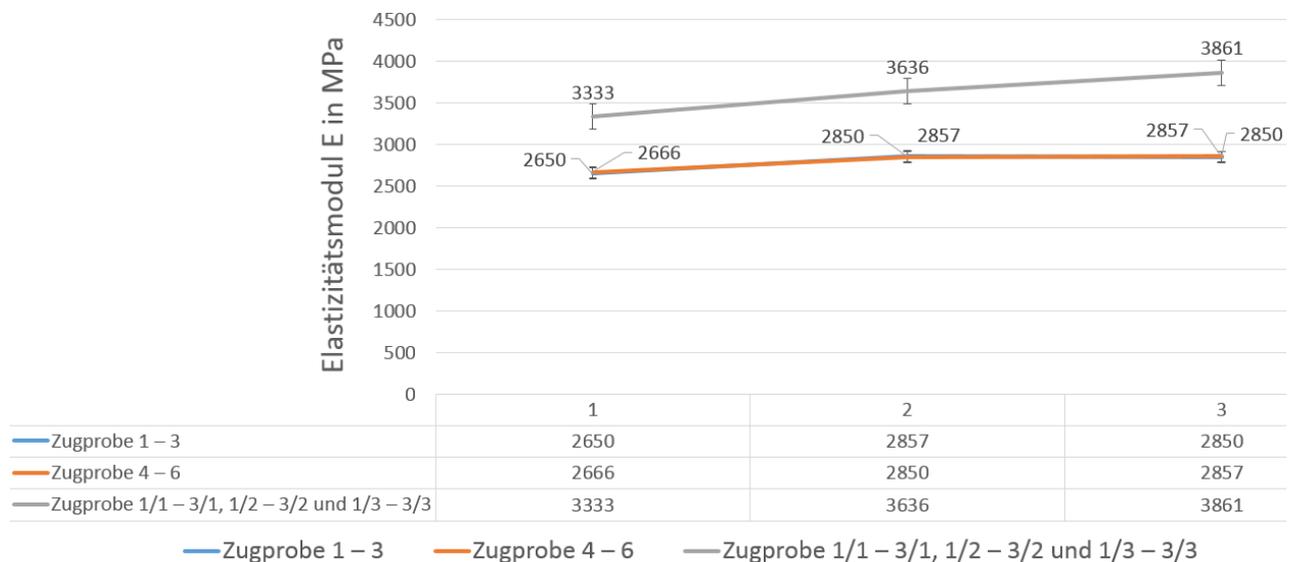


Abb. 54: Vergleich der unterschiedlichen Werte des Elastizitätsmoduls, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abb. 54 ist nochmals der Elastizitätsvergleich der mit unterschiedlichen Parametern gefertigten Probenkörper dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Fertigungstemperatur einen erheblichen Einfluss auf den Elastizitätsmodul E hat. Mit einer Erhöhung von nur 10 °C konnten über 1000 MPa Verbesserung erreicht werden. Basierend auf dem Gesamtergebnis dieses Kapitels wird für die weitere Vorgehensweise bzw. der Herstellung unterschiedlicher Verbindungstechniken der Fertigungsparametersatz 3 mit einem Schichtaufbauwinkel von 45° und -45° verwendet.

7 PRAKTISCHE UMSETZUNG VERBINDUNGSTECHNIK

Dieses Kapitel befasst sich mit der Umsetzung der ausgewählten Verbindungstechniken. Beginnend mit der Konstruktion bis hin zur generativen Fertigung wird besonderer Fokus auf die Prüfung und Bewertung der unterschiedlichen Schraub-, Steck- und Schnappverbindungstechniken gelegt. Die Erkenntnisse aus der Umsetzung sind Hauptbestandteil der zu erstellenden Produktionsrichtlinie für Fused Fabrication Filament Verbindungstechniken.

7.1 Schraubverbindung

Um die große Auswahl unterschiedlicher Schraubverbindungstechniken einzugrenzen, wird in diesem Kapitel auf die ausgewählten Schraubverbindungen in Anhang 1 verwiesen. Diese reichen von klassischen Einschraubmuffen, Schrauben für Kunststoff, metrischen Schrauben, Einschlagmutter bis hin zur Spreizmuffe.

7.1.1 Konstruktion

Für die Überprüfung der Auszugsfestigkeit unterschiedlicher Schraubverbindungen, wird ein Probenkörper unter Beachtung folgender Kriterien konstruiert:

- Für alle Schraubverbindungen wird ein in der Geometrie identer Probenkörper mit den Abmaßen von $L \times B \times H = 15 \times 15 \times 15$ (mm), siehe Abb. 55, verwendet.

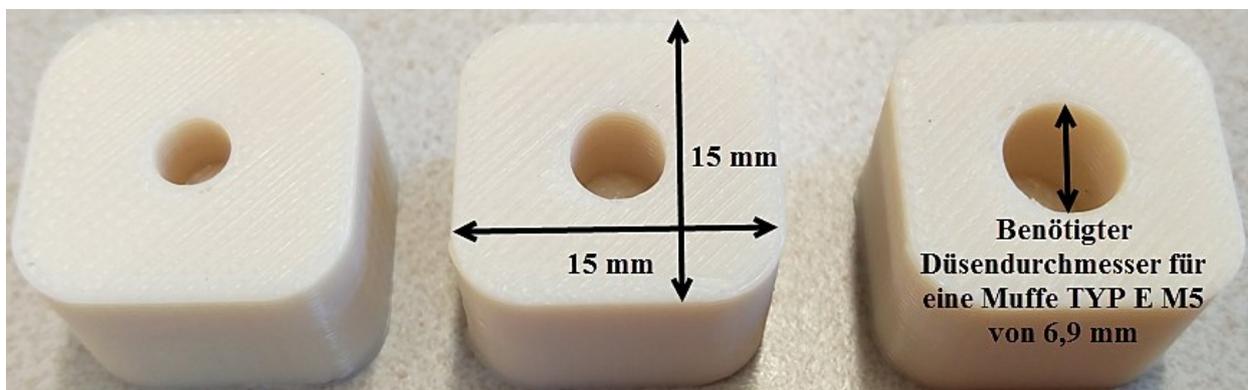


Abb. 55: Probenkörper für eine Muffe TYP E in der Größe M3, M4 und M5 (von links nach rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

- Die Wandstärke jedes Probenkörpers, siehe Abb. 56, liegt zwischen 5,15 mm für die Größe M3 und 3,95 für die Größe M5. Der Grund für die gewählten Abstände stammt aus der bereits vorhandenen Erfahrung mit der Fused Filament Fabrication-Technologie.

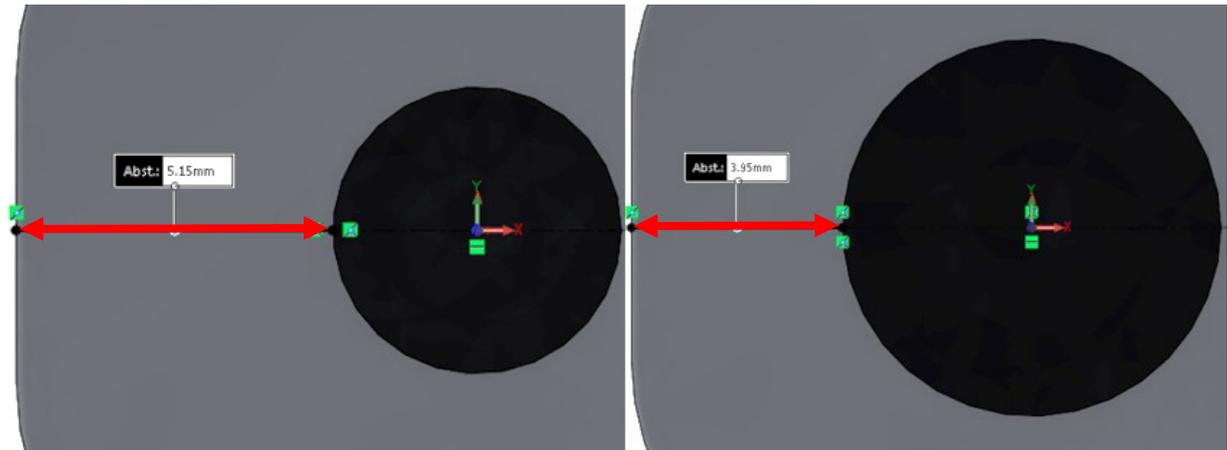


Abb. 56: Unterschiedliche Wandstärken der Schraubverbindungsart Muffe TYP M3 in der Größe M3 (links) und Größe M5 (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

- Jede Schraubverbindung verfügt über einen Kernlochdurchmesser, welcher in \varnothing benötigt (Fertigmaß) und \varnothing konstruiert unterschieden wird.

7.1.2 Generative Fertigung

Für die generative Fertigung der Probenkörper aus Acrylester-Styrol-Acrylnitril wird der Fertigungsparametersatz 3 mit einem Schichtaufbauwinkel von 45° und -45° und einer Fertigungstemperatur von 250°C bzw. 245°C herangezogen. Alle für die Fertigung relevanten Prozessparameter sind in Abb. 57 nochmals tabellarisch dargestellt.

Prozessparameter	Wert	Bemerkung / Erklärung
Schichthöhe	0,2 mm	Bestimmt die Abbildungsgenauigkeit des gefertigten Bauteils
Extrusions-Multiplikator	0,8	Dieser Prozessparameter stellt die Fördermenge des Materials ein
Extrusionsbreite	0,3	Unterstützender Prozessparameter für die optimale Fördermenge
Füllmenge	100 %	Gibt an, wieviel Material zur Füllung des Bauteils verwendet wird
Füllart	Rectilinear / $\pm 45^\circ$	Bestimmt die Innenstruktur des Bauteils
Außenhüllen	1	Legt die Anzahl der Umrandungen fest
Geschlossene Bodenschichten	0	Anzahl der geschlossenen Bodenschichten
Geschlossene Deckschichten	0	Anzahl der geschlossenen Deckschichten
Konturüberlappung	15 %	Gibt an, wie weit die Innenstruktur über die Außenhüllen gedruckt wird
Druckgeschwindigkeit	50 mm / s	Bestimmt die Fertigungsgeschwindigkeit des Bauteils

Abb. 57: Für die Fertigung der Probenkörper verwendeten Prozessparameter des Fertigungsparametersatzes 3, Quelle: Eigene Darstellung.

7.1.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau lässt sich in folgende Komponenten, siehe Abb. 58, untergliedern:

- Spannbacken der Zugprüfmaschine
- Abstandshalter für Auszugsversuch
- Verbindungselement zwischen Schraubverbindung und unterem Abstandshalter
- Probenkörper mit eingesetzter Schraubverbindung



Abb. 58: Versuchsaufbau inklusive Erklärung (links) und ausgezogene Muffen aus Probenkörper (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

Die Durchführung der Auszugsversuche erfolgt ebenfalls auf einer Zugprüfmaschine der Fa. IST. Die Maschine hat eine Nenn-Kraft von $\pm 10\text{kN}$ und einen Nenn-Weg von $\pm 50\text{mm}$. Während der Prüfung wird die Kraft mit einer dynamischen $\pm 10\text{ kN}$ HBM Kraftmessdose gemessen. Für die Prüfgeschwindigkeit wird der Wert 5 mm / min nach EN ISO 527 (Norm zur Bestimmung der Zugeigenschaften von Kunststoffen) herangezogen. Jede Schraubenart wird nach der generativen Fertigung des Probenkörpers manuell eingesetzt. Pro Schraubverbindung werden jeweils drei Versuche durchgeführt und anschließend der Mittelwert gebildet. Dieser repräsentiert in der Produktionsrichtlinie dann den Richtwert für die gemittelte maximale Auszugskraft ($\sim F_{\text{max}}$ in N).

7.1.4 Prüfung und Bewertung

In diesem Abschnitt werden die generativ gefertigten Probenkörper unterschiedlichen Prüfungskriterien wie Maßhaltigkeit, Strukturaufbau und mechanische Beständigkeit unterzogen.

Maßhaltigkeit

Alle Probenkörper werden zur einheitlichen Vergleichbarkeit an derselben Stelle vermessen. Der Messpunkt für Breite und Höhe liegt jeweils in der Mitte des Probenkörpers, siehe Abb. 59.



Abb. 59: Messpunkt der Probenkörper in x- und y-Richtung, Quelle: Eigene Darstellung.

Für jede Schraubverbindung werden drei Probenkörper angefertigt, wobei alle Probenkörper auf Maßhaltigkeit überprüft und deren Ergebnisse dokumentiert wurden. Aufgrund der großen Anzahl der gefertigten Probenkörper (60 Probenkörper) für die unterschiedlichen Schraubverbindungen, wird in Tab. 18 die Abweichung vom konstruierten Wert in den drei Hauptrichtungen dargestellt.

Richtung	Gemessener Wert in mm	Konstruierter Wert in mm
x	14,82 ± 3	15,0
y	14,92 ± 3	15,0
z	14,98 ± 2	15,0

Tab. 18: Maßhaltigkeitsvergleich unterschiedlicher Richtungen der gefertigten Probenkörper, Quelle: Eigene Darstellung.

Struktur

Die optischen Qualitätsmerkmale dieses Bewertungskriteriums erfolgen gleich wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben. Alle Probenkörper werden auf Qualitätsmerkmale wie Schichtaufbau (sauberes Aufeinanderlegen der einzelnen Schichten), Dichtheit (geschlossene Schichten und keine Fehlerstellen, besonders beim Übergang von Füllung zu Außenhülle) und der sichtbare Verzug des Bauteils (Warping-Effekt) überprüft. Trotz der hohen Anzahl an gefertigten Probenkörpern, im Rahmen von Tab. 19 alle Probenkörper gleich gut zu bewerten. Alle Probenkörper weisen einen passablen Schichtaufbau und eine gute Dichtheit bzw. keinen Verzug

Qualitätsmerkmal	Probenkörper für Schraubverbindungen
Schichtaufbau	Mittel
Dichtheit	Gut
Verzug	Gut

Tab. 19: Strukturelle Bewertung Probenkörper für Schraubverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Abb. 60 zeigt jedoch, dass alle Probenkörper einen identischen Strukturaufbau aufweisen.

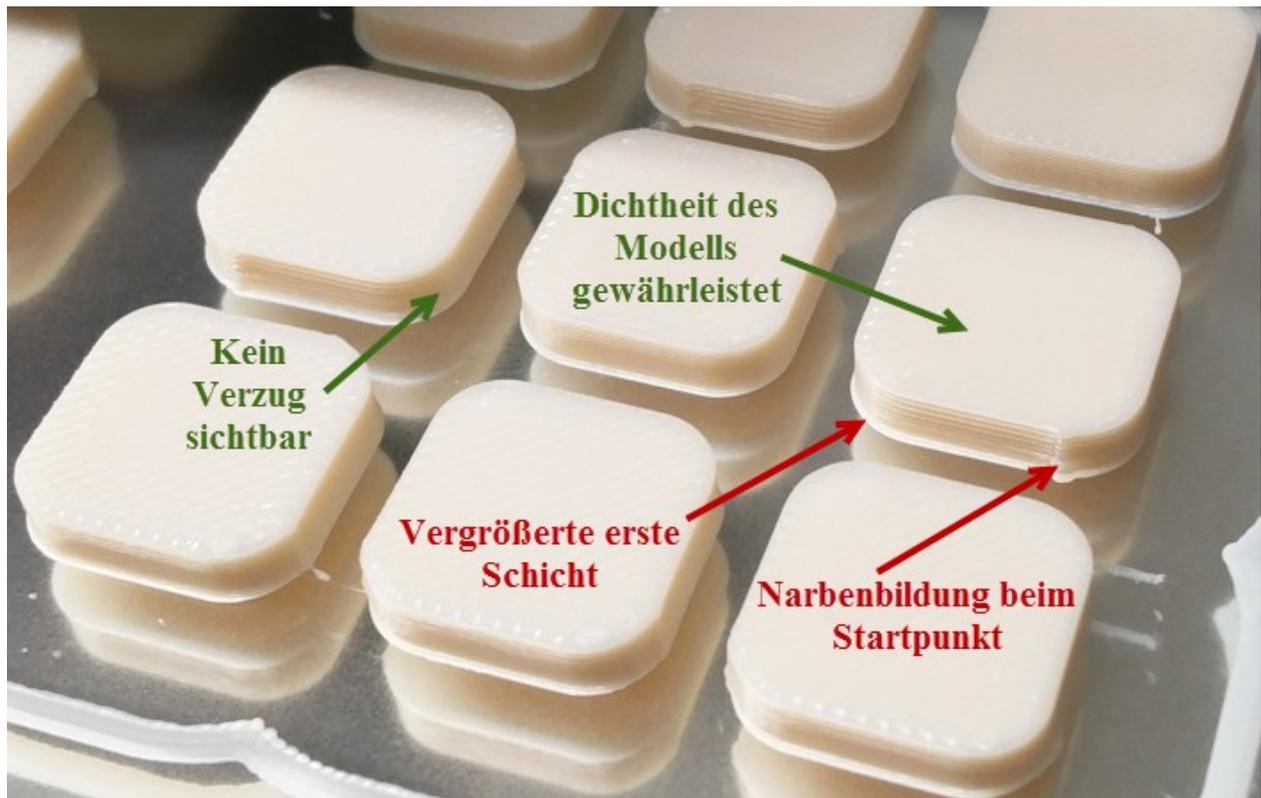


Abb. 60: Generative Fertigung der konstruierten Probenkörper für die unterschiedlichen Schraubverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Die sichtbaren Probleme in Abb. 60 wie die vergrößerte erste Schicht und die Narbenbildung beim Startpunkt, müssen für die weitere Herstellung von Steck- und Schnappverbindungen mittels optimierten Prozessparametern wie beispielsweise einer auf das Material ASA besser abgestimmten Einzugs geschwindigkeit bzw. Einzugsdistanz verbessert werden. Ansonsten kann es in weiterer Folge im Sinne der Passfähigkeit zu Problemen kommen, d.h. die Steckverbindungen wären nicht funktionsfähig da das Ineinanderfügen nicht möglich wäre und bei den Schnappverbindungen würden ebenfalls Probleme bei der Funktionsfähigkeit auftreten.

Mechanische Festigkeit gegen Auszug

Die Ergebnisse dieses Bewertungskriteriums werden in Form einer Ausführungsempfehlung veranschaulicht. Anhand dieser Darstellung können die wesentlichen Unterschiede hinsichtlich Auszugsfestigkeit unterschiedlicher Schraubverbindungen für Acrylester-Styrol-Acrylnitril dargestellt werden. Im Anhang 2 werden jeweils der benötigte Durchmesser, der konstruierte Durchmesser, der Schraubverbindungsdialogmesser, die Einschraubtiefe, die effektive Gewindetiefe und die gemittelt maximale Kraft in N dargestellt.

Die Einschraubtiefe hängt bei den Muffen, Einschlagmuttern und der Spreizmuffe von der Gesamtlänge L in mm der jeweiligen Schraubverbindungsart ab. Da für die Prüfung der mechanischen Festigkeit der Schraube für Kunststoff und der metrischen Schraube längere Schrauben verwendet wurden, wurde die Einschraubtiefe beider Schraubenarten auf 7 mm festgelegt, siehe Abb. 61.

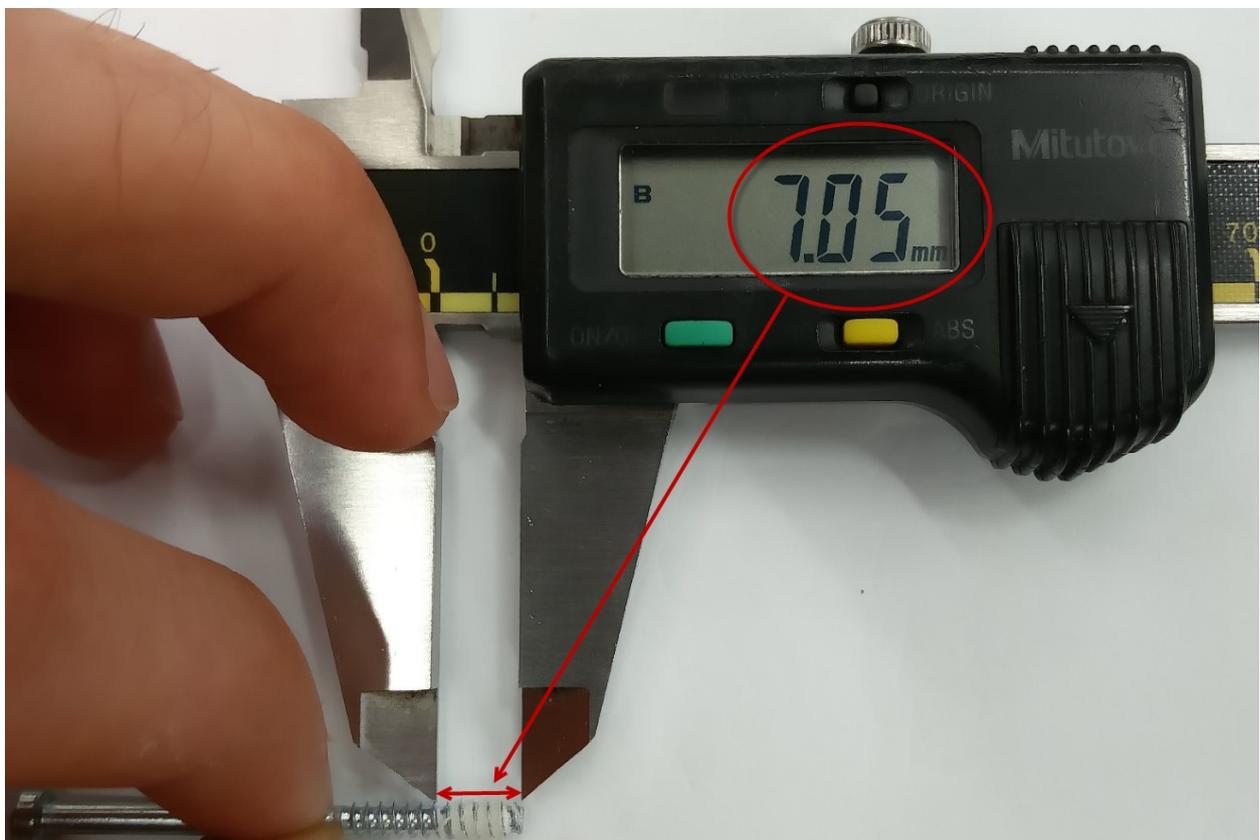


Abb. 61: Einschraubtiefe der beiden Schraubenarten für die Prüfung der mechanischen Festigkeit, Quelle: Eigene Darstellung.

Die effektive Gewindetiefe (wie tief das Gewinde der jeweiligen Schraubverbindung in den Probenkörper geschnitten wird) errechnet sich folgendermaßen: Effektive Gewindetiefe = \varnothing Schraubverbindung - \varnothing benötigt.

Alle Werte der Festigkeit gegen Auszug werden in Anhang 2 dargestellt.

Abschließend wird unter Verwendung der besten Schraubverbindung hinsichtlich Auszugsfestigkeit (Muffe TYP CV M4) noch ein direkter Vergleich zwischen einem generativ hergestellten Acrylnitril-Butadien-Styrol-Probekörper und einem Stangenware-Probekörper aus Acrylnitril-Butadien-Styrol durchgeführt. Da sich Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) in ihren Fertigungstemperaturen sehr ähnlich sind, wird für die generative Fertigung der Probekörper der Fertigungsparametersatz 3 verwendet. Für diese Testung werden ebenfalls jeweils drei Versuche durchgeführt, deren Ergebnisse gemittelt und miteinander verglichen, siehe Tab. 20.

Probekörper	ABS generativ gefertigt	ABS Stangenmaterial
Ø benötigt in mm	5,5	5,5
Ø konstruiert in mm	5,7	5,7
Ø Schraubverbindung in mm	6,51	6,51
Einschraubtiefe in mm	10	10
Effektive Gewindetiefe in mm	1,01	1,01
~ F _{max} in N (Auszugskraft)	3150	3330
Abbildung		

Tab. 20: Vergleich der beiden ABS-Varianten, Quelle: Eigene Darstellung.

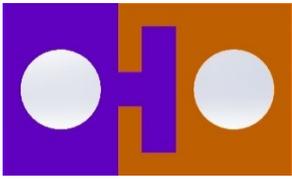
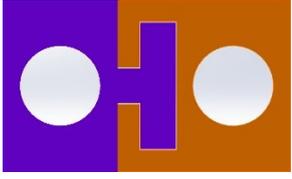
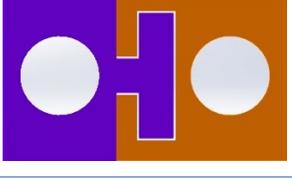
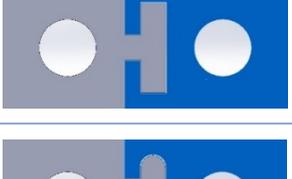
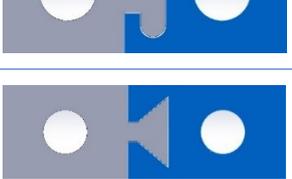
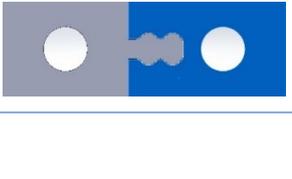
Die wesentlichen Kriterien für den Vergleich sind in Tab. 20 abgebildet. Das Ergebnis aus dem Versuch zeigt, dass die Prozessparameter aus dem Fertigungsparametersatz 3 für den generativ hergestellten Prüfkörper aus Acrylnitril-Butadien-Styrol bereits sehr gute Ergebnisse liefern. Es konnte mit der generativ hergestellten Variante nahezu die gleiche Auszugskraft wie beim Probekörper aus Stangenmaterial erreicht werden.

7.2 Steckverbindung

Als Alternative zur klassischen Schraubverbindung wurden in der Geometrie unterschiedliche Steckverbindungen konstruiert, mit dem Fertigungsparametersatz 3 generativ gefertigt, geprüft und den Bewertungskriterien Maßhaltigkeit, Struktur und mechanische Festigkeit unterzogen.

7.2.1 Konstruktion

Die Konstruktion der Steckverbindungen, wie in Tab. 21 zu sehen, unterteilt sich grundsätzlich in sechs unterschiedliche Varianten. Jede Variante besteht aus einem weiblichen- und einem männlichen Bauteil.

Name	Geometrie	Spaltmaß (mm)	Abbildung
T-Steckverbindung 1	T-Form klassisch	0	
T-Steckverbindung 1	T-Form klassisch	0,1	
T-Steckverbindung 1	T-Form klassisch	0,15	
T-Steckverbindung 1	T-Form klassisch	0,2	
T-Steckverbindung 2	T-Form einseitig steckfähig	0,1	
T-Steckverbindung 3	T-Form verrundet	0,1	
Schwalbenschwanzverbindung	Schwalbenschwanzform	0,1	
Wellensteckverbindung	Doppelwellenform	0,1	

Tropfensteckverbindung	Tropfenform	0,1	
-------------------------------	-------------	-----	---

Tab. 21: Auflistung der unterschiedlichen Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

7.2.2 Generative Fertigung der Steckverbindungen

Für die generative Fertigung der unterschiedlichen Steckverbindungen aus Acrylester-Styrol-Acrylnitril wird wie bereits bei den Probenkörpern für die Schraubverbindungen der Fertigungsparametersatz 3 mit einem Schichtaufbauwinkel von 45° und -45° und einer Fertigungstemperatur von 250°C bzw. 245°C verwendet. Zusätzlich wird überprüft, ob die Erhöhung des Prozessparameters „Außenhülle“ von einer Schicht auf drei Schichten ein besseres Ergebnis liefert. Die Darstellung aller Prozessparameter ist in Abb. 57 tabellarisch dargestellt.

7.2.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Prüfbedingungen für die unterschiedlichen sind dieselben wie in Abschnitt 7.1.3 beschrieben. Der Versuchsaufbau wird zur Prüfung der Steckverbindungen etwas verändert, siehe Abb. 62.

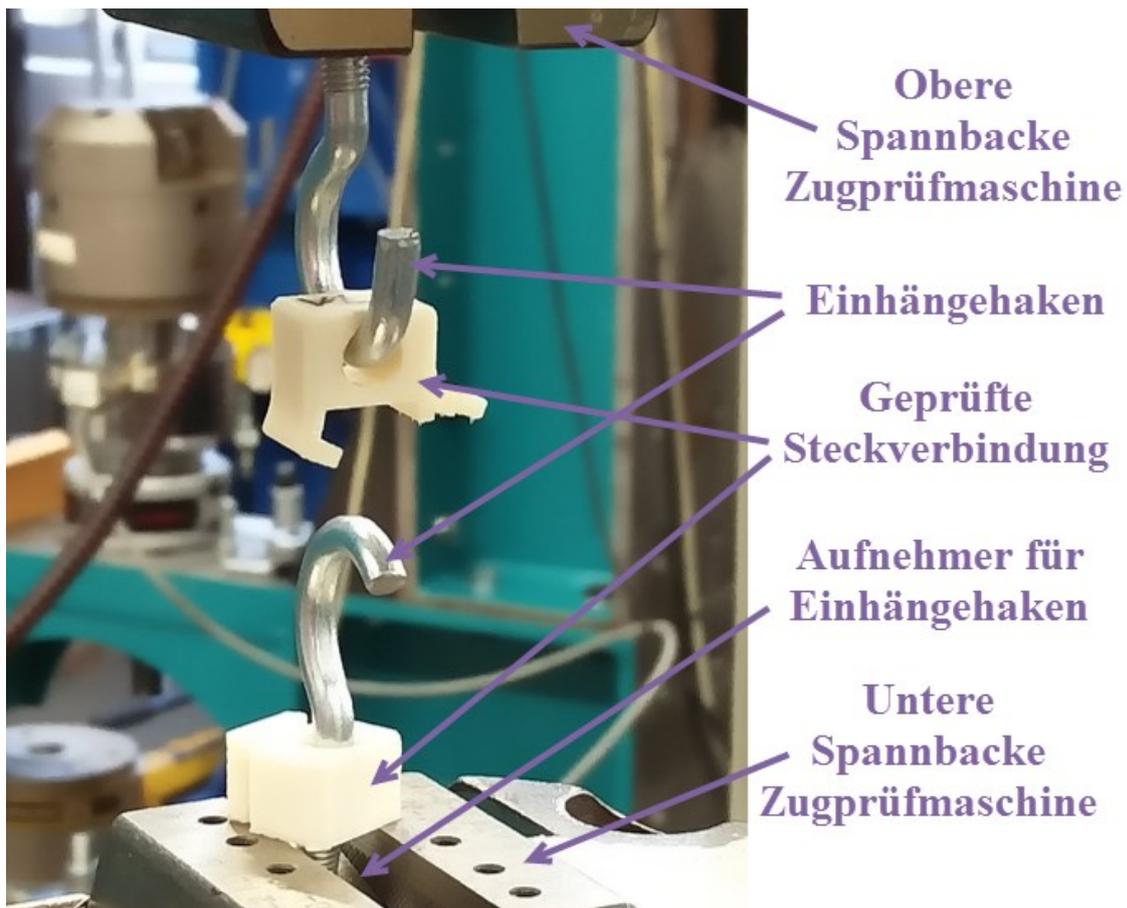


Abb. 62: Versuchsaufbau zum Testen der Auszugsfestigkeit unterschiedlicher Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

7.2.4 Prüfung und Bewertung

In diesem Abschnitt werden die generativ gefertigten Probenkörper der unterschiedlichen Steckverbindungen unterschiedlichen Prüfungskriterien wie Maßhaltigkeit, Struktur, mechanische Festigkeit und Funktionsfähigkeit unterzogen.

Maßhaltigkeit

Der Grundkörper der unterschiedlichen Steckverbindungen wird nicht noch einmal vermessen, da hier die gleichen Ergebnisse wie bei den Probenkörpern für die Schraubverbindungen, siehe Abb. 59, zu erwarten sind. Wichtig jedoch zu überprüfen sind die Anbindungsflächen der Steckverbindungen, siehe Abb. 63, da hier eine exakte Fertigung die Basis für die Funktionsfähigkeit der Steckverbindung darstellt.

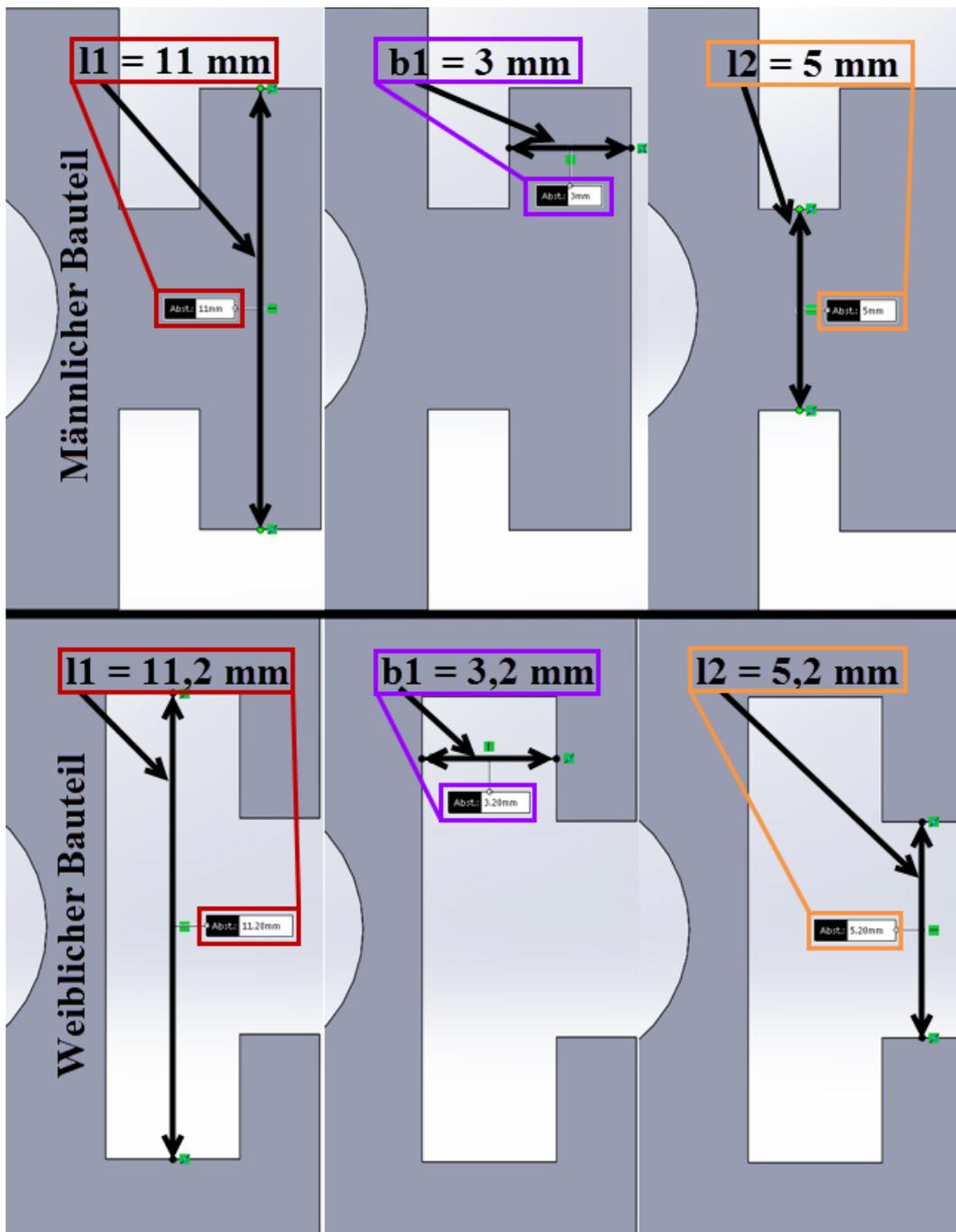


Abb. 63: Messpunkte anhand der Steckverbindung 1 zur Prüfung der Maßhaltigkeit, Quelle: Eigene Darstellung.

Pro Steckverbindungsart werden jeweils drei Probenkörper angefertigt, wobei alle Anbindungsflächen auf Maßhaltigkeit überprüft und deren Ergebnisse dokumentiert werden. In Tab. 22 ist die Abweichung der Anbindungsfläche vom konstruierten Wert dargestellt.

Maße	l1 (mm)	b1 (mm)	l2 (mm)
T-Steckverbindung 1 männlich konstruiert	11	3	5
T-Steckverbindung 1 männlich nach Fertigung	10,96 ± 0,2	2,98 ± 0,1	4,9 ± 0,1
T-Steckverbindung 1 weiblich konstruiert	11,2	3,2	5,2
T-Steckverbindung 1 weiblich nach Fertigung	11,2 ± 0,1	3,2 ± 0,1	5,2 ± 0,15
T-Steckverbindung 2 männlich konstruiert	11	3	5
T-Steckverbindung 2 männlich nach Fertigung	10,96 ± 0,1	2,96 ± 0,1	4,9 ± 0,1
T-Steckverbindung 2 weiblich konstruiert	11,2	3,2	5,2
T-Steckverbindung 2 weiblich nach Fertigung	11,2 ± 0,1	3,2 ± 0,1	5,2 ± 0,1
T-Steckverbindung 3 männlich konstruiert	11	3	5
T-Steckverbindung 3 männlich nach Fertigung	10,98 ± 0,1	2,97 ± 0,1	4,9 ± 0,1
T-Steckverbindung 3 weiblich konstruiert	11,2	3,2	5,2
T-Steckverbindung 3 weiblich nach Fertigung	11,2 ± 0,1	3,2 ± 0,2	5,2 ± 0,1
Schwalbenschwanzverbindung männlich konstruiert	11	4,7	3
Schwalbenschwanzverbindung männlich nach Fertigung	10,9 ± 0,1	4,7 ± 0,1	3 ± 0,1
Schwalbenschwanzverbindung weiblich konstruiert	11,2	4,9	3,2

Schwalbenschwanzverbindung weiblich nach Fertigung	11,1 ± 0,1	4,8 ± 0,1	3,3 ± 0,1
Wellensteckverbindung männlich konstruiert	5	7,4	3
Wellensteckverbindung männlich nach Fertigung	4,8 ± 0,1	7,3 ± 0,1	2,9 ± 0,1
Wellensteckverbindung weiblich konstruiert	5,2	7,6	3,2
Wellensteckverbindung weiblich nach Fertigung	5,1 ± 0,1	7,6 ± 0,1	3,3 ± 0,1
Tropfensteckverbindung männlich konstruiert	6,9	6,4	3
Tropfensteckverbindung männlich nach Fertigung	6,8 ± 0,1	6,3 ± 0,1	2,9 ± 0,1
Tropfensteckverbindung weiblich konstruiert	7,1	6,6	3,2
Tropfensteckverbindung weiblich nach Fertigung	7 ± 0,1	6,7 ± 0,1	3,3 ± 0,1

Tab. 22: Maßhaltigkeitsvergleich unterschiedlicher Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Struktur

Die Qualitätsmerkmale dieses Bewertungskriteriums erfolgen gleich wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben. Alle Probenkörper werden auf Qualitätsmerkmale wie Schichtaufbau, (sauberes Aufeinanderlegen der einzelnen Schichten), Dichtheit (geschlossene Schichten und keine Fehlerstellen, besonders beim Übergang von Füllung zu Außenhülle) und der sichtbare Verzug des Bauteils (Warping-Effekt) überprüft, siehe Abb. 64.

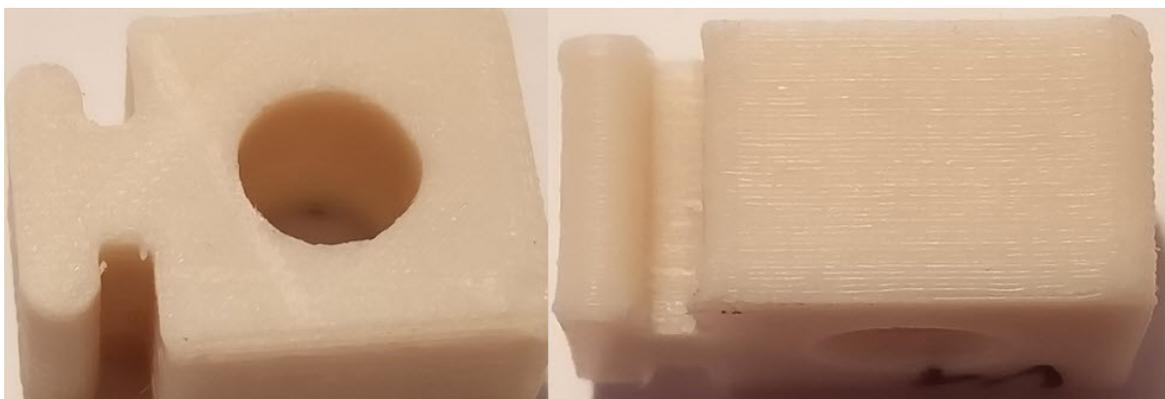


Abb. 64: Struktur der T-Steckverbindung 3, Quelle: Eigene Darstellung.

Die strukturelle Bewertung der Steckverbindungen ist in Tab. 23 abgebildet. Alle gefertigten Steckverbindungen werden wie auch alle zuvor gefertigten Probenkörper auf deren Schichtaufbau, Dichtheit und Verzug überprüft. Die Dichtheit der Steckverbindungen ist in diesem Fall besonders von Bedeutung, da auch ein mehrmaliges Ineinanderrücken und Öffnen der Verbindung gewährleistet werden muss. Alle gefertigten Probenkörper weisen einen sauberen Schichtaufbau sowie eine gute Dichtheit bzw. keinen Verzug auf.

Qualitätsmerkmal	Steckverbindungen
Schichtaufbau	Gut
Dichtheit	Gut
Verzug	Gut

Tab. 23: Strukturelle Bewertung Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Mechanische Festigkeit gegen Bruch der Steckverbindung

Die Ergebnisse dieses Bewertungskriteriums werden in Form einer Tabelle dargestellt. Anhand dieser Darstellung können die wesentlichen Unterschiede hinsichtlich Auszugsfestigkeit unterschiedlicher Steckverbindungen für Acrylester-Styrol-Acrylnitril dargestellt werden. In Tab. 24 werden alle überprüften Steckverbindungen über deren Auszugsfestigkeit $\sim F_{\max}$ in N dargestellt. Unter Außenhülle versteht sich die Anzahl der Umrundungen beim Druck des Bauteils, bevor die Füllung gedrückt wird.

Steckverbindung	Auszugsfestigkeit $\sim F_{\max}$ in N
T-Steckverbindung 1 mit 1 Außenhülle	270
T-Steckverbindung 1 mit 3 Außenhüllen	300
T-Steckverbindung 2 mit 1 Außenhülle	280
T-Steckverbindung 2 mit 3 Außenhüllen	330
T-Steckverbindung 3 mit 1 Außenhülle	250
T-Steckverbindung 3 mit 3 Außenhüllen	250
Schwalbenschwanzverbindung mit 1 Außenhülle	210
Schwalbenschwanzverbindung mit 3 Außenhüllen	180
Wellensteckverbindung mit 1 Außenhülle	420
Wellensteckverbindung mit 3 Außenhüllen	450
Tropfensteckverbindung mit 1 Außenhülle	330
Tropfensteckverbindung mit 3 Außenhüllen	340

Tab. 24: Auszugsfestigkeit unterschiedlicher Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

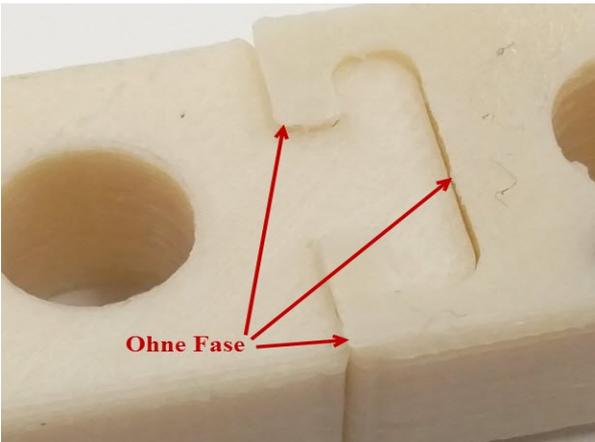
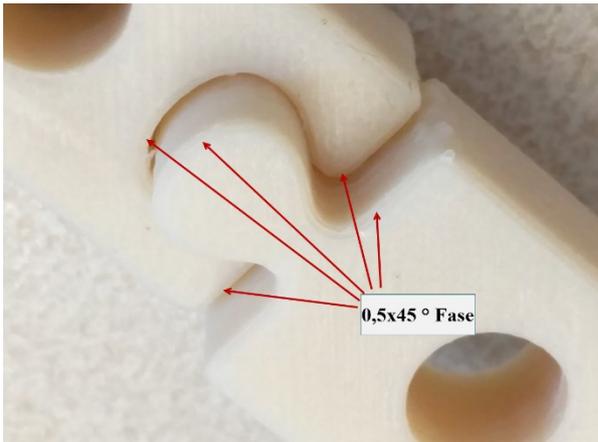
Das Ergebnis der mechanischen Belastbarkeit zeigt, dass sich anhand der Geometrie doch wesentliche Unterschiede erkennen lassen. Beispielsweise konnte die Auszugsfestigkeit alleine aufgrund der Geometrie von der Schwalbenschwanzverbindung zur Wellensteckverbindung mehr als verdoppelt werden. Weiters macht es jedoch keinen erheblichen Unterschied den Prozessparameter Außenhülle, welcher prinzipiell für die Festigkeit eines Bauteils verantwortlich ist, zu erhöhen. Die Werte bleiben hierbei in einem Bereich von 0 – 50 N.

Funktionsfähigkeit

Aufgrund der ersten vier Versuche mit unterschiedlichen Spaltmaßen anhand der T-Steckverbindung 1 konnte festgestellt werden, dass die Variante mit 0,1 mm Spaltmaß die beste Wahl hinsichtlich Pass- und Funktionsfähigkeit der Verbindung darstellt. Die restlichen in der Geometrie unterschiedlichen Steckverbindungen werden anschließend ebenfalls mit dem optimalen Spaltmaß von 0,1 mm versehen. Dennoch gibt es Restprobleme mit der Steckbarkeit, da wie in Abb. 60 gezeigt, auch hier die erste Schicht verbreitert war. Um dieses Problem zu beseitigen, werden an allen Steckverbindungen folgende Verbesserungen vorgenommen:

- Anbringen einer 0,5x45° Fase an den jeweils ersten und letzten Schichten des Bauteils
- Verbesserung der Prozessparameter Einzugsdistanz- und Geschwindigkeit

Das Endergebnis der Verbesserungen ist in Tab. 25 dargestellt.

Steckverbindung vor Verbesserung	Steckverbindung nach Verbesserung
Ohne Fase	Mit 0,5 mm langen Fase und einem 45° Winkel
Einzugsdistanz 3 mm und Einzugsgeschwindigkeit 10 mm / s	Einzugsdistanz 1 mm und Einzugsgeschwindigkeit 30 mm / s
Steckfähigkeit nicht gewährleistet	Steckfähigkeit gewährleistet
	

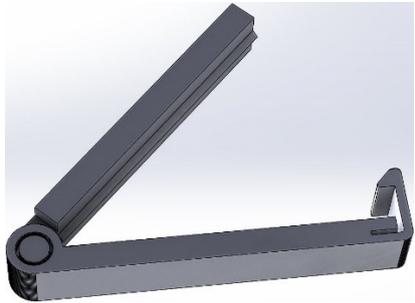
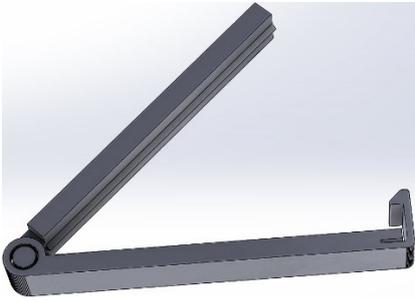
Tab. 25: Vorher- und Nachher-Vergleich der Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

7.3 Schnappverbindung

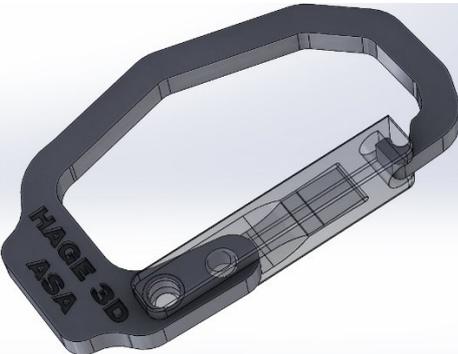
Da es auch im Bereich der Schnappverbindungen sehr viele Ausführungsvarianten gibt, fokussiert sich dieser Teil der Arbeit auf drei wesentliche Verbindungsarten, der Clip-, Klemm-, und Karabinerverbindung. Für die Clip-, und Klemmverbindung werden bereits vorhandene Geometrien herangezogen und mittels Acrylester-Styrol-Acrylnitril und dem Fertigungsparametersatz 3 gefertigt. Beide Verbindungsarten werden mittels verbesserten Prozessparametern hinsichtlich Funktionsfähigkeit optimiert. Für die Herstellung der Karabinerverbindung wird ausgehend von einer ebenfalls bereits vorhandenen Geometrie eine eigene Karabinerverbindung konstruiert und mit demselben Fertigungsparametersatz, nach Tab. 5, gefertigt. Zusätzlich werden für diese Verbindung sukzessive Verbesserungen im Sinne der Konstruktion und generativen Fertigung vorgenommen. Der Hauptfokus liegt bei allen Schnappverbindungen auf der Funktionsfähigkeit. Überprüft wird diese, ob mit dem jeweiligen Verbindungselement der gewollte Bewegungsablauf vorhanden ist bzw. die Schnappverbindung ihre Funktion gewährleistet.

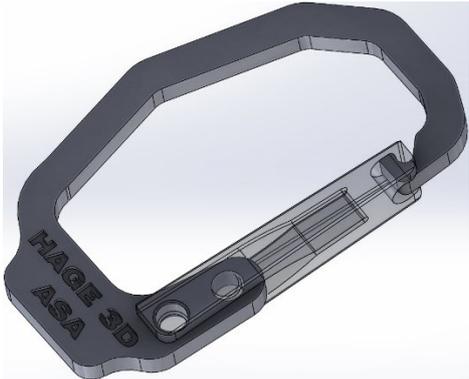
7.3.1 Konstruktion bzw. Geometrie

Die Konstruktion der Schnappverbindungen unterteilt sich generell in drei unterschiedliche Varianten, siehe Tab. 26. Jede Variante ist hinsichtlich ihrer Geometrie bereits vorhanden bzw. werden von der Webseite Thingiverse.com bezogen. Auf dieser Plattform können alle Mitglieder ihre Ideen bzw. Umsetzungen diverser Bauteile für die breite Öffentlichkeit zur Verfügung stellen.⁵⁵

Name	Geometrie	Abbildung
Clipverbindung klein	65 mm langer Clip	
Clipverbindung groß	85 mm langer Clip	

⁵⁵ Vgl. Thingiverse (2017), Onlinequelle [16.11.2017].

<p>Klemmverbindung</p>	<p>Krokoklemme</p>	
<p>Karabinerverbindung Version 1</p>	<p>Karabiner</p>	
<p>Karabinerverbindung Version 2</p>	<p>Karabiner</p>	
<p>Karabinerverbindung Version 3</p>	<p>Karabiner</p>	

<p>Karabinerverbindung Version 4</p>	<p>Karabiner</p>	
--	------------------	--

Tab. 26: Geometrische Darstellung unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

7.3.2 Generative Fertigung der Schnappverbindungen

Für die generative Fertigung der unterschiedlichen Schnappverbindungen aus Acrylester-Styrol-Acrylnitril, wird wie bei allen anderen Probenkörpern der Fertigungsparametersatz 3 unter Verwendung eines Schichtaufbauwinkels von 45° und – 45° und einer Fertigungstemperatur von 250 °C bzw. 245 °C verwendet. Pro Schnappverbindungsart wird ein Probenkörper gefertigt.

7.3.3 Prüfung und Bewertung

Im Abschnitt Prüfung und Bewertung werden die generativ gefertigten Schnappverbindungen, wie auch die Probenkörper für die Schraubverbindungen als auch den Steckverbindungen, den Prüfungskriterien Maßhaltigkeit, Struktur und Funktionsfähigkeit unterzogen.

Maßhaltigkeit

Unter den Abschnitt Maßhaltigkeit werden alle Schnappverbindungen hinsichtlich ihrer Länge, Breite und Höhe vermessen. Als Messpunkt wird immer die längste Stelle der Verbindung, wie in Abb. 65 gezeigt, verwendet.



Abb. 65: Messpunkt am Beispiel der Klemmverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.

Zusätzlich wird das Verbindungselement selbst vermessen und mit den Werten aus der Konstruktion verglichen, siehe Tab. 27.

Maße	Länge x- Richtung (mm)	Breite y- Richtung (mm)	Höhe z- Richtung (mm)	Verbindungs- element innen (mm)	Verbindungs- element außen (mm)
Clipverbindung geschlossen klein konstruiert	67,10	13,75	10	5	6
Clipverbindung geschlossen klein nach Fertigung	66,6	13,72	10	5	6

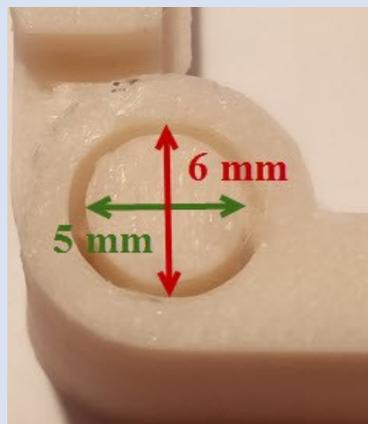


Abbildung Verbindungselement Clipverbindung

Clipverbindung geschlossen groß konstruiert	87,10	13,75	10	5	6
Clipverbindung geschlossen groß nach Fertigung	86,94	13,73	10,05	5	6

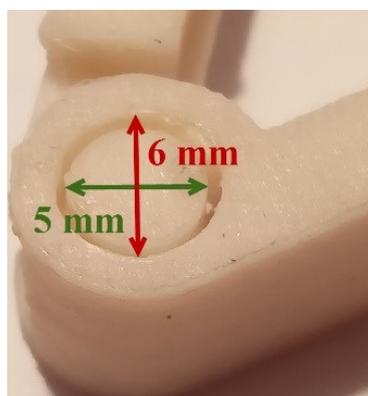


Abbildung Verbindungselement Clipverbindung

Klemmverbindung geschlossen konstruiert	44,70	79,50	10,50	0,7	
Klemmverbindung geschlossen nach Fertigung	44,20	79,40	10,39	0,5	

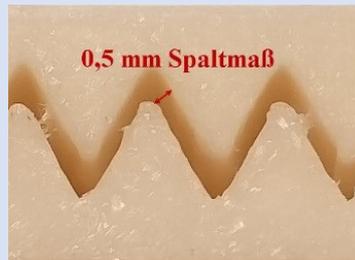


Abbildung Verbindungselement Klemmverbindung

Karabinerverbindung Hauptkörper Version 1 konstruiert	59,55	121	7	7,7	7
Karabinerverbindung Hauptkörper Version 1 nach Fertigung	57,80	120,74	7	7,6	7



Abbildung Verbindungselement Karabiner Version 1

Karabinerverbindung Zusatzkörper Version 1 konstruiert	69	14	7	7,6	8
Karabinerverbindung Zusatzkörper Version 1 nach Fertigung	68,77	13,90	7	7,4	7,77



Abbildung Verbindungselement Karabiner Version 1

Karabinerverbindung Hauptkörper Version 2 konstruiert	106,04	62,31	7	7,2	7
Karabinerverbindung Hauptkörper Version 2 nach Fertigung	105,70	62,28	7	6,95	6,97



Abbildung Verbindungselement Karabiner Version 2

Karabinerverbindung Zusatzkörper Version 2 konstruiert	69	11	7	7	7,2
Karabinerverbindung Zusatzkörper Version 2 nach Fertigung	68,95	11	7	6,95	7,2

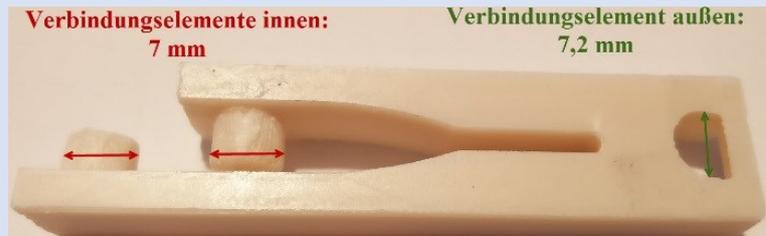


Abbildung Verbindungselement Karabiner Version 2

Karabinerverbindung Hauptkörper Version 3 konstruiert	106,04	62,31	7	7,2	7
Karabinerverbindung Version 3 nach Fertigung	105,80	62,30	7	6,94	6,98



Abbildung Verbindungselement Karabiner Version 3

Karabinerverbindung Zusatzkörper Version 3 konstruiert	69	15	11	7,08	7,2
Karabinerverbindung Zusatzkörper Version 3 nach Fertigung	68,70	14,99	10,99	6,98	7,28
 <p>Verbindungselemente innen: 6,28 mm Verbindungselement außen: 7,28 mm</p>					
Abbildung Verbindungselement Karabiner Version 3					
Karabinerverbindung Version 4 konstruiert	106,04	62,31	7	7,2	7
Karabinerverbindung Version 4 nach Fertigung	105,75	62,35	7	6,95	6,99
 <p>Verbindungselemente innen: 6,95 mm Verbindungselement außen: 6,99 mm</p>					
Abbildung Verbindungselement Karabiner Version 4					
Karabinerverbindung Zusatzkörper Version 4 konstruiert	69,26	15	10,86	7,08	7,2
Karabinerverbindung Zusatzkörper Version 4 nach Fertigung	68,71	14,96	10,68	7	7,2
 <p>Verbindungselemente innen: 7 mm Verbindungselement außen: 7,2 mm</p>					
Abbildung Verbindungselement Karabiner Version 4					

Tab. 27: Maßhaltigkeitsvergleich unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei allen gefertigten Schnappverbindungen ist in x-Richtung eine wesentlich größere Maßhaltigkeitsabweichung ($> 1 \text{ mm}$) zu vermerken, als in y-Richtung (Abweichung zwischen einem und zwei Zehntelmillimeter). Bei den Verbindungselementen selbst weicht das Maß nach Fertigung vom Maß nach Konstruktion nur einmal mit $0,2 \text{ mm}$ ab, ansonsten beträgt die Abweichung lediglich ein paar Zehntelmillimeter.

Struktur

Die Qualitätsmerkmale dieses Bewertungskriteriums erfolgen ebenfalls gleich wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben. Alle Probenkörper werden auf Qualitätsmerkmale wie Schichtaufbau, Dichtheit (sauberes Aufeinanderlegen der einzelnen Schichten), Dichtheit (geschlossene Schichten und keine Fehlerstellen, besonders beim Übergang von Füllung zu Außenhülle) und der sichtbare Verzug des Bauteils (Warping-Effekt) überprüft, siehe Abb. 66.



Abb. 66: Struktur der Karabiner-Schnappverbindung Version 4, Quelle: Eigene Darstellung.

Tab. 28 veranschaulicht die Ergebnisse des Bewertungskriteriums Struktur für die Schnappverbindungen. Wie Abb. 66 zu sehen, wird beim Zusatzkörper der verfahrensbedingte Treppenstufeneffekt ganz bewusst zur Erhöhung der Funktionsfähigkeit bzw. Haptik verwendet. Alle gefertigten Schnappverbindungen weisen einen sauberen Schichtaufbau sowie eine gute Dichtheit bzw. keinen Verzug auf. Beim selbstdesignten Karabiner wurde besonders darauf geachtet, dass die Aufschrift „HAGE 3D ASA“ auch nach der Fertigung noch gut lesbar ist und die Strukturen gut dargestellt sind.

Qualitätsmerkmal	Schnappverbindungen
Schichtaufbau	Gut
Dichtheit	Gut
Verzug	Gut

Tab. 28: Strukturelle Bewertung Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Funktionsfähigkeit

Auf Basis der ersten Ergebnisse werden iterativ Verbesserungen an den jeweiligen Schnappverbindungen mithilfe von verbesserten Prozessparametern wie der Einzugsdistanz und Einzugs geschwindigkeit vorgenommen. Die Clipverbindungen waren zu Beginn direkt nach der Fertigung aufgrund der Haftung von unnötigem Material im Bereich des Verbindungselements nicht funktionsfähig, siehe Abb. 67.



Abb. 67: Nichtgewollte Materialanhäufung direkt am Verbindungselement der Clipverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.

Weiters sind beide Clipverbindungen, sowohl die große- als auch die kleine Variante, mit erheblichen Verzug bzw. Warping versehen, siehe Abb. 68.



Abb. 68: Sichtbares Warping entlang der langen Auflagefläche an der Clipverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.

Beide Probleme werden mittels optimierten Prozessparametern gelöst. Zum einen wird, wie auch bereits bei den Steckverbindungen, die Einzugsdistanz und die Einzugs geschwindigkeit des Materials verbessert und zum anderen wird zur Verhinderung des Warpings ein Brim direkt an der Clipverbindung mitgedruckt. Konkret wird die Einzugsdistanz von 3 mm auf 1 mm verringert und gleichzeitig die Einzugs geschwindigkeit von 10 mm / s auf 30 mm / s erhöht. Ein Brim sind eine gewisse Anzahl von Schichten, welche direkt angrenzend zur Fläche des Bauteils mitgedruckt werden, siehe Abb. 69. Somit wird eine Flächenvergrößerung des Bauteils und gleichzeitig eine bessere Haftung erreicht. Das Brim lässt sich direkt nach dem Fertigungsprozess ganz leicht von der eigentlichen Fläche des Bauteils trennen.

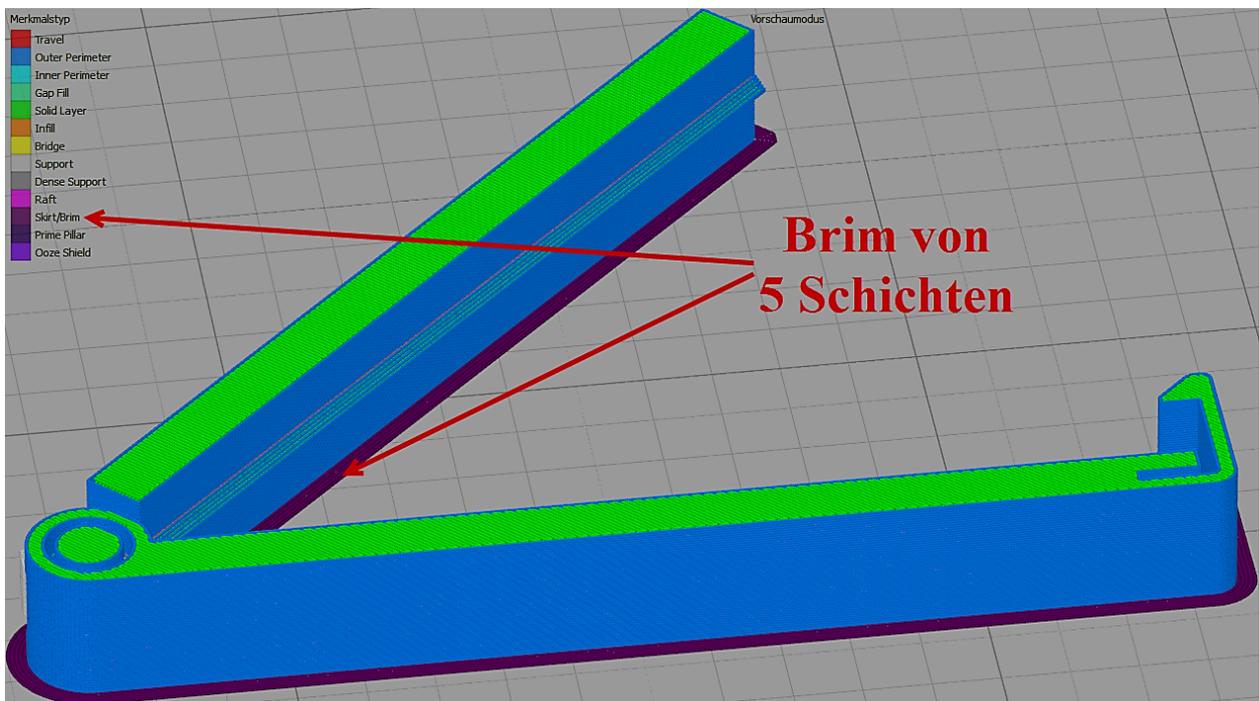


Abb. 69: Brim-Funktion der Fertigungssoftware Simplify3D zur Verhinderung von Warping, Quelle: Eigene Darstellung.

Alle anfänglichen Probleme, sowohl die Materialanhäufung an der Verbindungsstelle als auch das Warping, wurden durch Parameteränderungen gelöst, siehe Abb. 70.



Abb. 70: Optimierte Clipverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der Klemmverbindung ist direkt nach der Fertigung ein Verschmelzen der Verbindungselemente aufgrund zu geringer Spaltmaße zu verzeichnen. Hierbei gibt es zwei Lösungsmöglichkeiten:

- Entweder Vergrößerung der Spaltmaße in der Konstruktion
- Oder manuelle Entfernung der Verschmelzungspunkte nach dem Fertigungsprozess

Beide Varianten führen zur vollen Funktionsfähigkeit der Klemmverbindung. Die manuelle Entfernung der Verschmelzungspunkte ist in Abb. 71 dargestellt.

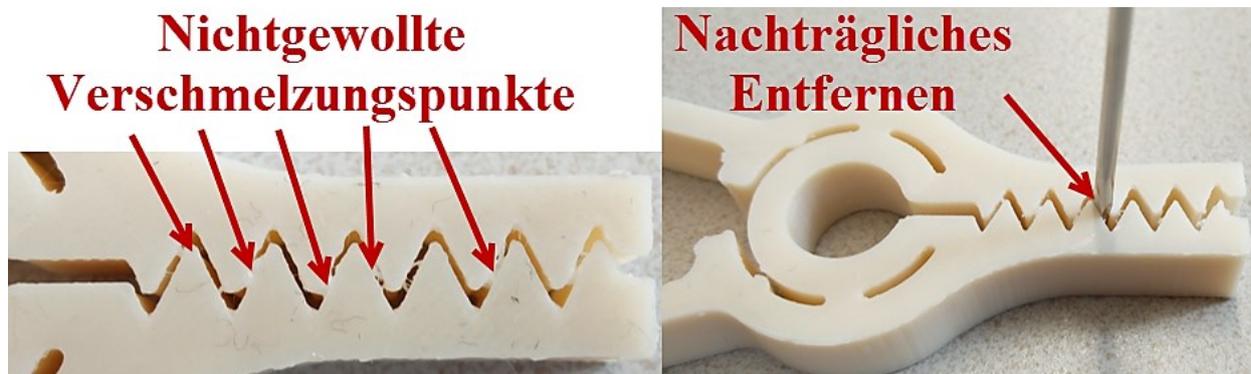


Abb. 71: Nachträgliches Entfernen der Verschmelzungspunkte, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der selbst-designten Karabiner-Schnappverbindung werden zur Maximierung der Funktionsfähigkeit folgende Verbesserungen vorgenommen, siehe Abb. 72 und Abb. 73:

- Spaltmaßoptimierung für optimale Funktionsfähigkeit
- Fertigungstechnische Optimierung des Zusatzteils für eine bessere Haptik des Karabiners
- Erweiterung des Ausschnitts-Elements des Zusatzkörpers für mehr Flexibilität und leichteren Zusammenbau der Verbindung
- Optimierung der Einhängengeometrie für einen besseren Halt der Verbindung
- Vorsehung von Radien zur optimalen Passfähigkeit von Zusatzteil auf Hauptkörper

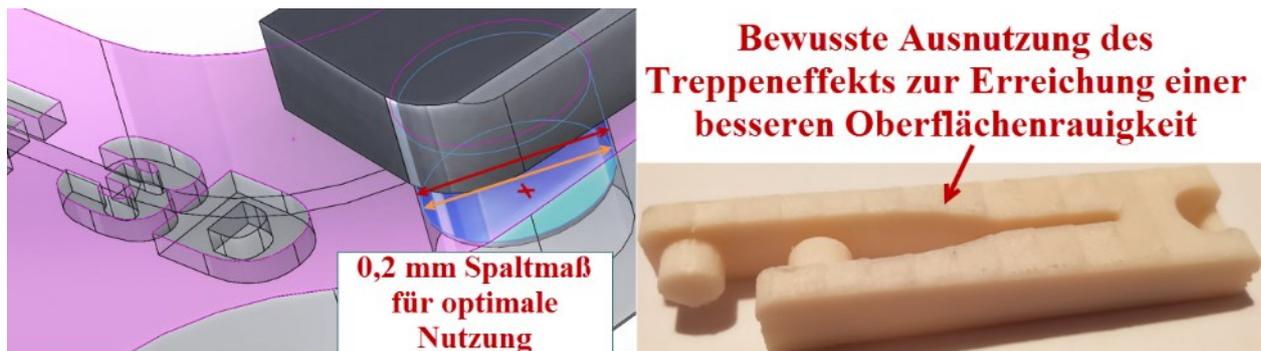


Abb. 72: Spaltmaßoptimierung (links) und Ausnutzung des Treppenstufeneffekts (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

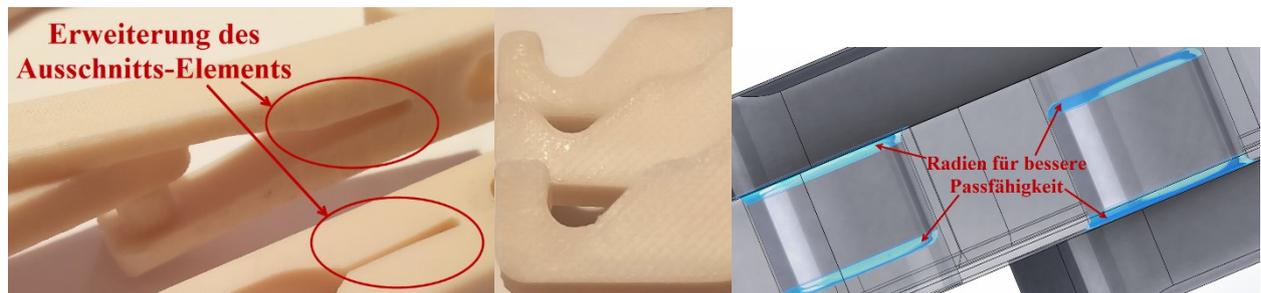


Abb. 73: Erweiterung des Ausschnitts-Elements (links), Optimierung der Einhängengeometrie (mittig) und Radien für bessere Passfähigkeit (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

8 PRODUKTIONSRICHTLINIE FÜR VERBINDUNGSTECHNIKEN

Die Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken auf Basis des Materials Acrylester-Styrol-Acrylnitril stellt eine Zusammenfassung aller gesammelten Erkenntnisse und Ergebnisse der vorherigen theoretischen- als auch praktischen Kapitel dar.

8.1 Grundlagen der Produktionsrichtlinie

Die nachfolgende Produktionsrichtlinie wird anhand des generativen Fertigungsverfahrens Fused Filament Fabrication speziell für den HAGE 3D-72L-A 3D-Drucker entwickelt. Basierend auf den prozessspezifischen Eigenheiten, wird in der Richtlinie vor allem auf die Eigenheiten des HAGE 3D-72L-A 3D-Druckers Rücksicht genommen. Die Rahmenbedingungen für die Produktionsrichtlinie sind folgendermaßen unterteilt:

- **Genauigkeit:** Die Positioniergenauigkeit in xy-Ebene beträgt ca. 0,1 mm. Mit der eingebauten 0,4 mm Düse können Schichthöhen zwischen 50 µm und 400 µm in z-Richtung realisiert werden. Für diese Richtlinie wurde die Hälfte des Düsendurchmessers verwendet. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass abhängig von der Lage (x- und y-Richtung) der Bauteile unterschiedliche Maßhaltigkeiten erreicht werden können. In x-Richtung sind die Bauteile immer wesentlich kleiner als jene, die in y-Richtung gefertigt werden.
- **Oberfläche:** Da der HAGE 3D-72L-A die Bauteile schichtweise aufbaut, ist abhängig von der gewählten Schichthöhe immer ein Treppenstufeneffekt sichtbar.
- **Orientierung:** Die ermittelten Auszugsfestigkeiten dieser Produktionsrichtlinie gelten nur für Bauteile, die in y-Richtung bzw. flach im Bauraum orientiert werden.
- **Schichtaufbauwinkel:** Als Schichtaufbauwinkel wird auf Basis der durchgeführten Zugversuche und deren Erkenntnisse die 45° und -45° Variante empfohlen.
- **Einschränkungen:** Für die Werte aller Prozessschritte bzw. Bewertung-Kriterien wurde bereits die Schrumpfung des Materials während des Fertigungsprozesses miteinbezogen.

Die komplette Produktionsrichtlinie ist mit Microsoft® PowerPoint® umgesetzt, sodass Änderungen bzw. Optimierungen zu einem späteren Zeitpunkt unkompliziert eingefügt werden können.

8.2 Hauptbestandteile der Produktionsrichtlinie

In diesem Abschnitt wird die erarbeitete Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken auf Basis des Materials Acrylester-Styrol-Acrylnitril als Ganzes dargestellt.

	
<p>Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA</p>	
<p><u>Inhalt:</u></p> <p>1. Rahmenbedingungen: S. 1</p> <p>2. Produktionsrichtlinie: S. 2 – S. 14</p> <p>3. Anhang: S. 15 – S. 16</p>	
© FH CAMPUS 02 und HAGE Sondermaschinenbau	1. Auflage

Abb. 74: Übersicht der Produktionsrichtlinie, Quelle: Eigene Darstellung.

 <p>Automatisch im Vorteil</p>	 <p>FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT</p>	
<p>Rahmenbedingungen der Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA</p>		
	<p>Genauigkeit: Die Positioniergenauigkeit in xy-Ebene beträgt ca. 0,1 mm. Mit der eingebauten 0,4 mm Düse können Schichthöhen zwischen 50 µm und 400 µm in z-Richtung realisiert werden. Für diese Richtlinie wurde die Hälfte des Düsendurchmessers verwendet (Optimum für FFF). Zusätzlich ist zu erwähnen, dass abhängig von der Lage (x- und y-Richtung) der Bauteile unterschiedliche Maßhaltigkeiten erreicht werden können. In x-Richtung sind die Bauteile immer wesentlich kleiner als jene, die in y-Richtung gefertigt werden.</p>	
	<p>Oberfläche: Da der HAGE 3D-72L-A die Bauteile schichtweise aufbaut, ist abhängig von der gewählten Schichthöhe immer ein Treppenstufeneffekt sichtbar.</p>	
	<p>Orientierung: Diese Produktionsrichtlinie gilt nur für Bauteile, die in y-Richtung bzw. flach im Bauraum orientiert werden.</p>	
	<p>Schichtaufbauwinkel: Als Schichtaufbauwinkel wird auf Basis der durchgeführten Zugversuche und deren Erkenntnisse die 45° und -45° Variante empfohlen.</p>	
	<p>Einschränkungen: Für die Einstellungen aller Prozessschritte bzw. Bewertungs-Kriterien wurde bereits das Schwindmaß des Materials während des Fertigungsprozesses miteinbezogen.</p>	
<p>© FH CAMPUS 02 und HAGE Sondermaschinenbau</p>	<p>1. Auflage</p>	<p>S. 1</p>

Abb. 75: Rahmenbedingungen der Produktionsrichtlinie, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung	
1. Konstruktion	1.1 Schraubverbindung	Muffe TYP E M3: Ø benötigt* in mm: 4,5 Ø konstruiert* in mm: 4,7 Ø Schraubverbindung* in mm: 4,92 Einschraubtiefe in mm: 6 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,42		
		Muffe TYP E M4: Ø benötigt* in mm: 5,7 Ø konstruiert* in mm: 5,9 Ø Schraubverbindung* in mm: 6,44 Einschraubtiefe in mm: 8 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,74		
		Muffe TYP E M5: Ø benötigt* in mm: 6,9 Ø konstruiert* in mm: 7,1 Ø Schraubverbindung* in mm: 7,88 Einschraubtiefe in mm: 10 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,98		
		Muffe TYP ES M4: Ø benötigt* in mm: 6 Ø konstruiert* in mm: 6,2 Ø Schraubverbindung* in mm: 6,4 Einschraubtiefe in mm: 8 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,4		
		Muffe TYP ESD M4: Ø benötigt* in mm: 5,8 Ø konstruiert* in mm: 6 Ø Schraubverbindung* in mm: 6,37 Einschraubtiefe in mm: 9 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,57		
		* Ø benötigt in mm = erforderlich gewähltes Maß um mechanische Festigkeit zu erreichen Ø konstruiert in mm = vom / von KonstrukteurIn gewähltes Maß aufgrund der Schrumpfung von ASA während des Fertigungsprozesses Ø Schraubverbindung in mm = Durchmesser der jeweiligen Schraubverbindung laut Hersteller		
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau			1. Auflage	S. 2

Abb. 76: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 1, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung	
1. Konstruktion	1.1 Schraubverbindung	Muffe TYP ESK M4: Ø benötigt* in mm: 7,5 Ø konstruiert* in mm: 7,7 Ø Schraubverbindung* in mm: 7,97 Einschraubtiefe in mm: 10 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,47		
		Muffe TYP BAN M4: Ø benötigt* in mm: 6,1 Ø konstruiert* in mm: 6,3 Ø Schraubverbindung* in mm: 6,44 Einschraubtiefe in mm: 8 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,34		
		Muffe TYP BAS M4: Ø benötigt* in mm: 6,1 Ø konstruiert* in mm: 6,3 Ø Schraubverbindung* in mm: 6,48 Einschraubtiefe in mm: 8 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,38		
		Muffe TYP BAV M4: Ø benötigt* in mm: 6,1 Ø konstruiert* in mm: 6,3 Ø Schraubverbindung* in mm: 6,45 Einschraubtiefe in mm: 6 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,35		
		Muffe TYP BV M4: Ø benötigt* in mm: 7,5 Ø konstruiert* in mm: 7,7 Ø Schraubverbindung* in mm: 8 Einschraubtiefe in mm: 10 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,5		
		* Ø benötigt in mm = erforderlich gewähltes Maß um mechanische Festigkeit zu erreichen Ø konstruiert in mm = vom / von KonstrukteurIn gewähltes Maß aufgrund der Schrumpfung von ASA während des Fertigungsprozesses Ø Schraubverbindung in mm = Durchmesser der jeweiligen Schraubverbindung laut Hersteller		
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau			1. Auflage	S. 3

Abb. 77: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 2, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung	
1. Konstruktion	1.1 Schraubverbindung	Muffe TYP C M4: Ø benötigt* in mm: 5,5 Ø konstruiert* in mm: 5,7 Ø Schraubverbindung* in mm: 6,52 Einschraubtiefe in mm: 8 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 1,02		
		Muffe TYP CV M4: Ø benötigt* in mm: 5,5 Ø konstruiert* in mm: 5,7 Ø Schraubverbindung* in mm: 6,51 Einschraubtiefe in mm: 10 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 1,01		
		Schraube für Kunststoff M3: Ø benötigt* in mm: 2,4 Ø konstruiert* in mm: 2,6 Ø Schraubverbindung* in mm: 3,08 Einschraubtiefe in mm: 7 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,68		
		Schraube für Kunststoff M4: Ø benötigt* in mm: 3,2 Ø konstruiert* in mm: 3,4 Ø Schraubverbindung* in mm: 4,07 Einschraubtiefe in mm: 7 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,87		
		Schraube für Kunststoff M5: Ø benötigt* in mm: 4 Ø konstruiert* in mm: 4,2 Ø Schraubverbindung* in mm: 5,02 Einschraubtiefe in mm: 7 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 1,02		
		* Ø benötigt in mm = erforderlich gewähltes Maß um mechanische Festigkeit zu erreichen Ø konstruiert in mm = vom / von KonstrukteurIn gewähltes Maß aufgrund der Schrumpfung von ASA während des Fertigungsprozesses Ø Schraubverbindung in mm = Durchmesser der jeweiligen Schraubverbindung laut Hersteller		
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau			1. Auflage	S. 4

Abb. 78: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 3, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung	
1. Konstruktion	1.1 Schraubverbindung	Metrische Schraube M3: Ø benötigt* in mm: 2,5 Ø konstruiert* in mm: 2,7 Ø Schraubverbindung* in mm: 2,96 Einschraubtiefe in mm: 7 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,46		
		Metrische Schraube M4: Ø benötigt* in mm: 3,3 Ø konstruiert* in mm: 3,5 Ø Schraubverbindung* in mm: 3,9 Einschraubtiefe in mm: 7 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,6		
		Metrische Schraube M5: Ø benötigt* in mm: 4,2 Ø konstruiert* in mm: 4,4 Ø Schraubverbindung* in mm: 4,92 Einschraubtiefe in mm: 7 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,72		
		Einschlagmutter TYP SBZ M4: Ø benötigt* in mm: 6,3 Ø konstruiert* in mm: 6,5 Ø Schraubverbindung* in mm: 8 Einschraubtiefe in mm: 10 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 1,7		
		Einschlagmutter TYP TSBZ M4: Ø benötigt* in mm: 6,4 Ø konstruiert* in mm: 6,6 Ø Schraubverbindung* in mm: 8 Einschraubtiefe in mm: 10 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 1,6		
		* Ø benötigt in mm = erforderlich gewähltes Maß um mechanische Festigkeit zu erreichen Ø konstruiert in mm = vom / von KonstrukteurIn gewähltes Maß aufgrund der Schrumpfung von ASA während des Fertigungsprozesses Ø Schraubverbindung in mm = Durchmesser der jeweiligen Schraubverbindung laut Hersteller		
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau			1. Auflage	S. 5

Abb. 79: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 4, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung
1. Konstruktion	1.1 Schraubverbindung	<p><u>Einschlagmutter TYP TS M4:</u> Ø benötigt* in mm: 5 Ø konstruiert* in mm: 5,2 Ø Schraubverbindung* in mm: 5,66 Einschraubtiefe in mm: 8 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,66</p>	
		<p><u>Spreizmuffe TYP SE M4:</u> Ø benötigt* in mm: 5,5 Ø konstruiert* in mm: 5,7 Ø Schraubverbindung* in mm: 5,53 Einschraubtiefe in mm: 10 Effektive Gewindetiefe bzw. Flankenüberdeckung in mm: 0,03</p>	
		<p>* Ø benötigt in mm = erforderlich gewähltes Maß um mechanische Festigkeit zu erreichen Ø konstruiert in mm = vom / von KonstrukteurIn gewähltes Maß aufgrund der Schrumpfung von ASA während des Fertigungsprozesses Ø Schraubverbindung in mm = Durchmesser der jeweiligen Schraubverbindung laut Hersteller</p>	
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau			1. Auflage
			S. 6

Abb. 80: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 5, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung
1. Konstruktion	1.2 Steckverbindung	<p><u>T-Steckverbindung 1 (l.) und 2 (r.):</u> Spaltmaß (mm): 0,1 → gelber Bereich Die ersten und letzten Schichten des Bauteils mit einer 0,5x45° Fase für Passfähigkeit versehen</p>	
		<p><u>T-Steckverbindung 3:</u> Spaltmaß (mm): 0,1 → gelber Bereich Die ersten und letzten Schichten des Bauteils mit einer 0,5x45° Fase für Passfähigkeit versehen</p>	
		<p><u>Schwalbenschwanzverbindung:</u> Spaltmaß (mm): 0,1 → gelber Bereich Die ersten und letzten Schichten des Bauteils mit einer 0,5x45° Fase für Passfähigkeit versehen</p>	
		<p><u>Wellensteckverbindung:</u> Spaltmaß (mm): 0,1 → gelber Bereich Die ersten und letzten Schichten des Bauteils mit einer 0,5x45° Fase für Passfähigkeit versehen</p>	
		<p><u>Tropfensteckverbindung:</u> Spaltmaß (mm): 0,1 → gelber Bereich Die ersten und letzten Schichten des Bauteils mit einer 0,5x45° Fase für Passfähigkeit versehen</p>	

Abb. 81: Konstruktion unterschiedlicher Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung
1. Konstruktion	1.3 Schnappverbindung	<p>Clipverbindung klein (l.) groß 2 (r.): Verbindungselement innen (mm): 5 Verbindungselement außen (mm): 6 Spaltmaß für Funktionsfähigkeit (mm): 1 → gelber Bereich</p>	
		<p>Klemmverbindung: Spaltmaß für Funktionsfähigkeit (mm): 1 → gelber Bereich</p>	
		<p>Karabiner-Verbindung 4: Verbindungselement innen (mm): 7,2 Verbindungselement außen (mm): 7 Spaltmaß für Funktionsfähigkeit (mm): 0,2 → gelber Bereich innen → grüner Bereich außen</p>	

Abb. 82: Konstruktion unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung
2. Generative Fertigung	2.1 Schraubverbindung	<p>Schraubverbindung: <u>Schichthöhe:</u> 0,2 mm <u>Positionierung:</u> y-Richtung / flach <u>Schichtaufbauwinkel:</u> 45° und -45° <u>Startpunkt:</u> unterschiedlich <u>Fertigungstemperatur:</u> 250 °C für erste- und 245 °C für restliche Schichten <u>Einzugsdistanz:</u> 1 mm <u>Einzugsgeschwindigkeit:</u> 30 mm / s <u>Füllart:</u> Rectilinear <u>Außenhüllen:</u> 1 <u>Geschlossene Bodenschichten:</u> 0 <u>Geschlossene Deckschichten:</u> 0 <u>Konturüberlappung:</u> 15 % <u>Druckbetttemperatur:</u> 70 °C <u>Druckgeschwindigkeit:</u> 50 mm / s</p>	
	2.2 Steckverbindung	<p>T-Steckverbindung 1, 2 und 3: <u>Schichthöhe:</u> 0,2 mm <u>Positionierung:</u> y-Richtung / flach <u>Schichtaufbauwinkel:</u> 45° und -45° <u>Startpunkt:</u> unterschiedlich <u>Fertigungstemperatur:</u> 250 °C für erste- und 245 °C für restliche Schichten <u>Einzugsdistanz:</u> 1 mm <u>Einzugsgeschwindigkeit:</u> 30 mm / s <u>Füllart:</u> Rectilinear <u>Außenhüllen:</u> 1 <u>Geschlossene Bodenschichten:</u> 0 <u>Geschlossene Deckschichten:</u> 0 <u>Konturüberlappung:</u> 15 % <u>Druckbetttemperatur:</u> 70 °C <u>Druckgeschwindigkeit:</u> 50 mm / s <u>Fertigungsart:</u> getrennt</p>	
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau		1. Auflage	S. 9

Abb. 83: Generative Fertigung unterschiedlicher Schraub- und Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung
2. Generative Fertigung	2.2 Steckverbindung	<p><u>Schwalbenschwanz-, Wellensteck-, und Tropfensteckverbindung:</u> <u>Schichthöhe:</u> 0,2 mm <u>Positionierung:</u> y-Richtung / flach <u>Schichtaufbauwinkel:</u> 45° und -45° <u>Startpunkt:</u> unterschiedlich <u>Fertigungstemperatur:</u> 250 °C für e.- und 245 °C für restliche Schichten <u>Einzugsdistanz:</u> 1 mm <u>Einzugsgeschwindigkeit:</u> 30 mm / s <u>Füllart:</u> Rectilinear <u>Außenhüllen:</u> 1 <u>Geschlossene Bodenschichten:</u> 0 <u>Geschlossene Deckschichten:</u> 0 <u>Konturüberlappung:</u> 15 % <u>Druckbetttemperatur:</u> 70 °C <u>Druckgeschwindigkeit:</u> 50 mm / s <u>Fertigungsart:</u> getrennt</p>	
	2.3 Schnappverbindung	<p><u>Clipverbindung:</u> <u>Schichthöhe:</u> 0,2 mm <u>Positionierung:</u> y-Richtung / flach <u>Schichtaufbauwinkel:</u> 45° und -45° <u>Startpunkt:</u> unterschiedlich <u>Fertigungstemperatur:</u> 250 °C für e.- und 245 °C für restliche Schichten <u>Einzugsdistanz:</u> 1 mm <u>Einzugsgeschwindigkeit:</u> 30 mm / s <u>Füllart:</u> Rectilinear <u>Außenhüllen:</u> 1 <u>Geschlossene Bodenschichten:</u> 0 <u>Geschlossene Deckschichten:</u> 0 <u>Konturüberlappung:</u> 15 % <u>Druckbetttemperatur:</u> 70 °C <u>Druckgeschwindigkeit:</u> 50 mm / s <u>Fertigungsart:</u> geschlossen <u>Zus. Parameter:</u> Brim 3-5 Schichten</p>	
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau		1. Auflage	S. 10

Abb. 84: Generative Fertigung unterschiedlicher Steckverbindungen und einer Schnappverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Voraussetzung	Abbildung
2. Generative Fertigung	2.3 Schnappverbindung	<p><u>Clipverbindung:</u> <u>Schichthöhe:</u> 0,2 mm <u>Positionierung:</u> y-Richtung / flach <u>Schichtaufbauwinkel:</u> 45° und -45° <u>Startpunkt:</u> unterschiedlich <u>Fertigungstemperatur:</u> 250 °C für e.- und 245 °C für restliche Schichten <u>Einzugsdistanz:</u> 1 mm <u>Einzugs geschwindigkeit:</u> 30 mm / s <u>Füllart:</u> Rectilinear <u>Außenhüllen:</u> 1 <u>Geschlossene Bodenschichten:</u> 0 <u>Geschlossene Deckschichten:</u> 0 <u>Konturüberlappung:</u> 15 % <u>Druckbetttemperatur:</u> 70 °C <u>Druckgeschwindigkeit:</u> 50 mm / s <u>Fertigungsart:</u> geschlossen</p>	
	2.3 Schnappverbindung	<p><u>Clipverbindung:</u> <u>Schichthöhe:</u> 0,2 mm <u>Positionierung:</u> y-Richtung / flach <u>Schichtaufbauwinkel:</u> 45° und -45° <u>Startpunkt:</u> unterschiedlich <u>Fertigungstemperatur:</u> 250 °C für e.- und 245 °C für restliche Schichten <u>Einzugsdistanz:</u> 1 mm <u>Einzugs geschwindigkeit:</u> 30 mm / s <u>Füllart:</u> Rectilinear <u>Außenhüllen:</u> 1 <u>Geschlossene Bodenschichten:</u> 0 <u>Geschlossene Deckschichten:</u> 0 <u>Konturüberlappung:</u> 15 % <u>Druckbetttemperatur:</u> 70 °C <u>Druckgeschwindigkeit:</u> 50 mm / s <u>Fertigungsart:</u> getrennt</p>	
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau			1. Auflage S. 11

Abb. 85: Generative Fertigung unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken
unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Art	Auszugsfestigkeit	
3. Prüfung und Bewertung	3.1 Schraubverbindung	Muffe TYP E M3	730 N	
		Muffe TYP E M4	1780 N	
		Muffe TYP E M5	2160 N	
		Muffe TYP ES M4	1220 N	
		Muffe TYP ESD M4	1390 N	
		Muffe TYP ESK M4	1580 N	
		Muffe TYP BAN M4	1310 N	
		Muffe TYP BAS M4	1490 N	
		Muffe TYP BAV M4	810 N	
		Muffe TYP BV M4	1770 N	
		Muffe TYP C M4	1750 N	
		Muffe TYP CV M4	2630 N	
		Schraube für Kunststoff M3	1040 N	
		Schraube für Kunststoff M4	1160 N	
		Schraube für Kunststoff M5	1130 N	
		Metrische Schraube M3	790 N	
		Metrische Schraube M4	1410 N	
		Metrische Schraube M5	1400 N	
		Einschlagmutter TYP SBZ M4	640 N	
		Einschlagmutter TYP TSBZ M4	610 N	
	Einschlagmutter TYP TS M4	820 N		
	Spreizmuffe TYP SE M4	200 N		
	Funktion als fixes Verbindungselement			
	3.2 Steckverbindung	T-Steckverbindung 1 mit 1 Außenh.	270 N	
		T-Steckverbindung 1 mit 3 Außenh.	300 N	
		T-Steckverbindung 2 mit 1 Außenh.	280 N	
		T-Steckverbindung 2 mit 3 Außenh.	330 N	
		T-Steckverbindung 3 mit 1 Außenh.	250 N	
		T-Steckverbindung 3 mit 3 Außenh.	250 N	
		Schwalbenschw. mit 1 Außenhülle	210 N	
		Schwalbenschw. mit 3 Außenhüllen	180 N	
		Wellensteckver. mit 1 Außenhülle	420 N	
		Wellensteckver. mit 3 Außenhüllen	450 N	
Tropfensteckver. mit 1 Außenhülle		330 N		
Tropfensteckver. mit 3 Außenhüllen		340 N		
Funktion als lösbares Verbindungselement				
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau			1. Auflage	S. 12

Abb. 86: Prüfung und Bewertung unterschiedlicher Schraub- und Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Art	Funktionsfähigkeit
3. Prüfung und Bewertung	3.3 Schnappverbindung	<p><u>Clipverbindung:</u> Funktion als Begrenzungselement für 90° Drehbewegung</p>	
		<p><u>Klemmverbindung:</u> Funktion als Halte- bzw. Fixierungselement</p>	
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau			1. Auflage
			S. 13

Abb. 87: Prüfung und Bewertung unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.



Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt		Art	Funktionsfähigkeit
3. Prüfung und Bewertung	3.3 Schnappverbindung	<p><u>Karabinerverbindung:</u> Funktion als Befestigungselement</p>	 <ul style="list-style-type: none"> -) Höchste Flexibilität -) Hohe Funktionsfähigkeit -) Spezielles Design
© FH CAMPUS 02 / HAGE Sondermaschinenbau			<p>1. Auflage</p> <p>S. 14</p>

Abb. 88: Prüfung und Bewertung einer Schnappverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.



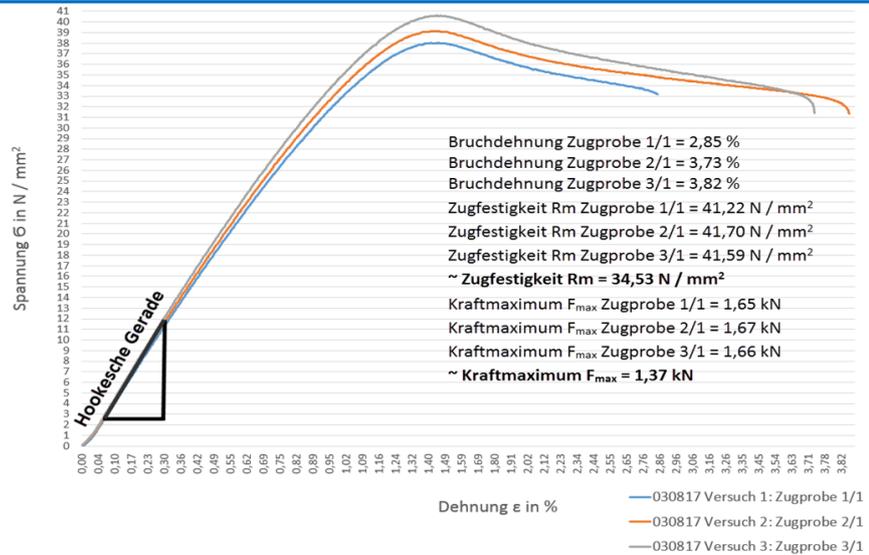
Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt

Zugfestigkeit

4. Anhang

4.1 Festigkeitswerte von ASA ApolloX Natural mit optimierten Prozessparametern



Kenngröße	45° und -45°	90°	180°
Maximale Kraft F_{max} in N	1670	1642	1406
Zugfestigkeit R_m in $\frac{N}{mm^2}$	41,70	41,04	35,14
Bruchdehnung ϵ in %	3,79	1,35	1,24
Elastizitätsmodul E in MPa	3846	3861	3820

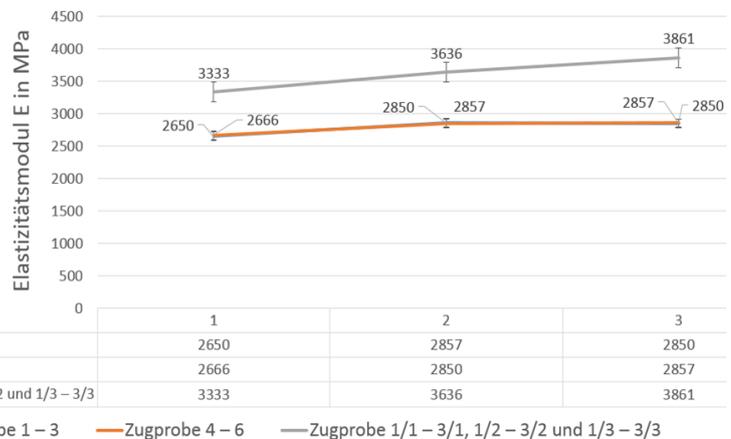


Abb. 89: Anhang – 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication Verbindungstechniken unter Verwendung des HAGE 3D-72L-A und ASA

Prozessschritt

Zugfestigkeit

4. Anhang

4.2 Zugfestigkeit von ASA ApolloX Natural auf Basis unters. Schichtaufbauwinkel

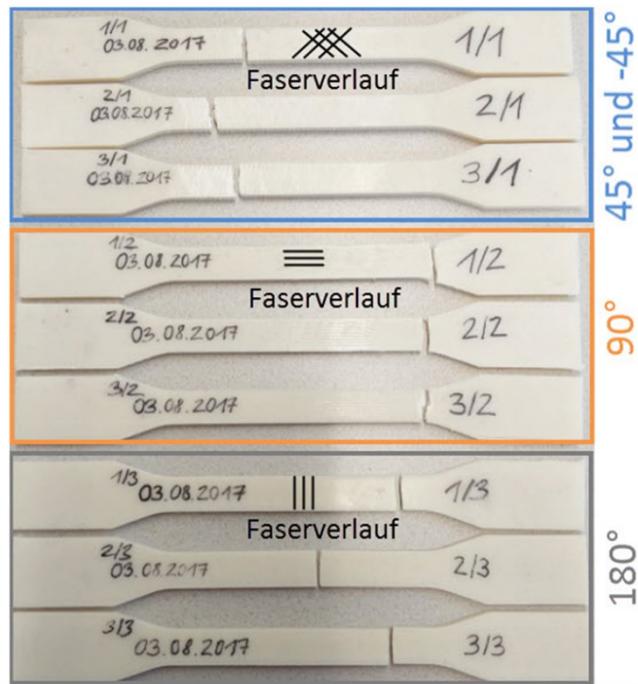
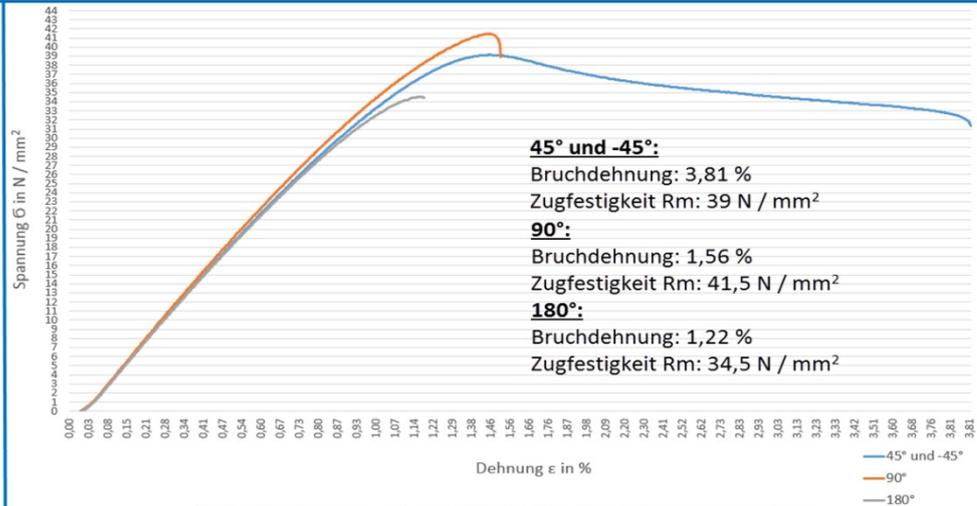


Abb. 90: Anhang – 2, Quelle: Eigene Darstellung.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dieses Kapitel beinhaltet sowohl eine Zusammenfassung über die durchgeführte Arbeit bzw. dem Themenbereich selbst, als auch einen Ausblick für generative Fertigungsverfahren. Weiters wird der fertige Projektplan der Arbeit dargestellt.

9.1 Zusammenfassung

Um sich einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Unternehmungen zu verschaffen, ist es grundsätzlich unumgänglich spezifisches Knowhow zu besitzen und dieses kontinuierlich auszubauen. Speziell im Bereich der generativen Fertigung ist dies umso wichtiger, da sich diese gegenüber subtraktiven Fertigungstechnologien doch noch in gewissen Bereichen in der Entwicklungsphase befinden. Dies bezieht sich zum einen auf die Möglichkeiten und Einschränkung der jeweiligen Technologie selbst und zum anderen auf die neuen Möglichkeiten im Bereich fertigungsgerechte Konstruktion und deren Anwendungsgebiete etc. All diese Punkte tragen letztendlich wesentlich zum Erfolg des Unternehmens bei.

Mit dieser Arbeit wurde auf Basis des zusammengetragenen Wissens anhand einer ausführlichen Literaturrecherche weiteres spezifisches Knowhow aufgebaut. Das Knowhow der Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication-Verbindungstechniken erstreckt sich im Sinne der Prozessanalyse von der Konstruktion bis hin zu diversen Bewertungskriterien wie mechanische Festigkeit, Maßhaltigkeit, Struktur und Funktionalität. All diese Bewertungskriterien wurden vom Auftraggeber in Hinblick auf die Produktentwicklung durch die KonstrukteurInnen für wichtig empfunden, da diese somit eine Richtlinie zur Verfügung gestellt bekommen.

Das aufgebaute Wissen beruht im Speziellen auf dem Material Acrylester-Styrol-Acrylnitril, welches aufgrund seiner besonderen Eigenschaften wie Witterungsbeständigkeit, hohe Belastbarkeit und Beständigkeit gegen viele Chemikalien immer öfters für industrielle Zwecke zum Einsatz kommt.

Die erarbeitete Produktionsrichtlinie bietet für KonstrukteurInnen somit die Möglichkeit von der Konstruktion, der generativen Fertigung bis hin zu diversen Bewertungskriterien einen Einblick in die Möglichkeiten des Materials selbst als auch der Vorgangsweise der Produktentwicklung zu bekommen und soll vor allem einen Anstoß zum langfristigen Umdenken in den Entwicklungstätigkeiten führen. Ein konkretes Beispiel wäre die Fertigung eines Bauteils, welches in unterschiedlichen Bereichen unterschiedliche Eigenschaften besitzen soll. Dies ist mit der aktuellen Software Simplify3D nur schichtweise und nicht in der Ebene möglich. Mithilfe der Produktionsrichtlinie werden unterschiedliche Möglichkeiten aufgezeigt, um zwei Teile mit unterschiedlichen Eigenschaften direkt nach der Fertigung wieder zum einem Bauteil mit unterschiedlichen Eigenschaften zu verbinden.

Die Gesamtheit dieser Arbeit macht es möglich, den KonstrukteurInnen eine wesentliche Hilfestellung in Form einer Produktionsrichtlinie zu bieten und bereits die Produktentwicklung wirtschaftlicher zu gestalten.

9.2 Ausblick und nächste Schritte

Generative Fertigungstechnologien haben in Zukunft das Potenzial neue Wertschöpfungsmöglichkeiten sowohl für wissenschaftliche Einrichtungen als auch Industriebetriebe zu schaffen und langfristig sicherzustellen. Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung und Verbesserung in diversen Bereichen wie die Materialauswahl bzw.- Kombination, die optimierte Prozessstabilität und des wachsenden Knowhows, wird dieses Fertigungsprinzip besonders für die Umsetzung von unterschiedlichen Zukunftsprojekten im Bereich Industrie 4.0 unverzichtbar werden. Stichwörter wie Digitalisierung und vor allem Flexibilisierung werden zukünftig unter anderem durch generative Fertigungstechnologien geprägt und wesentlich beeinflusst werden.

Im Sinne der erarbeiteten Produktionsrichtlinie für Fused Filament Fabrication-Verbindungstechniken wurde eines dieser mit Potenzial versehenen Materialien mit dem Namen Acrylester-Styrol-Acrylnitril genauer untersucht und deren Ergebnisse auf Basis unterschiedlicher Prozessparameter ausführlich dokumentiert. Des Weiteren soll diese Richtlinie den KonstrukteurInnen als Basis für zukünftige Produktentwicklungsprozesse zur Verfügung stehen und besonders im Bereich der Realisierung von verschiedenen Verbindungstechniken behilflich sein. Hierbei soll das bereits erarbeitete Wissen einerseits für verschiedenste industrielle Anwendungszwecke zum Einsatz kommen und andererseits aufgrund der in Zukunft gewonnenen Erkenntnisse laufend erweitert werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (6)

Breuninger, Jannis; Becker, Ralf; Wolf, Andreas; Rommel, Steve; Verl, Alexander (2013): *Generative Fertigung mit Kunststoffen Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Feldmann, Carsten; Andreas, Pumpe (2016): *3D-Druck - Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit Entscheidungsunterstützung für Unternehmen*, Springer Gabler, Münster, Deutschland

Gebhardt, Andreas (2013): *Generative Fertigungsverfahren Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*, 4 Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Deutschland

Grund, Maike (2015): *Implementierung von schichtadditiven Fertigungsverfahren*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

HAGE Sondermaschinenbau (Hrsg.) (2016): *Betriebsanleitung HAGE 3D-72L-A*, 1 Auflage, Obdach

Schmidt, Tobias (2016): *Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Konferenzbeiträge (4)

Bagsik, A.; Schöppner, V.; Klemp, E. (2010): *FDM Part Quality Manufactured with Ultem*9085*, in: , Halle, S. 8

Keil, Heinz (2016): *Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik*, in: Stelzer, Ralph (Hrsg.): *Entwickeln - Entwerfen - Erleben 2016*, w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel, Dresden, S. 32

Leutenecker, Bastian; Quentin, Lohmeyer; Mirko, Meboldt (2013): *Konstruieren mit generativen Fertigungsverfahren - Gestalterische Lösungen für die Substitution von Serienbauteilen*, in: Krause, Dieter; Paetzold, Kristin; Wartzack, Sandro (Hrsg.): *Design for X*, TuTech Verlag, Deutschland, S. 240

Messemer, Joachim; Kaufmann, Thomas; Martin, Christian; Neises, Malte; Schmidt, Andre; Te Heesen, Henrik (2016): *Untersuchung der Zugfestigkeit von FLM-Zugproben aus PLA bei Variation von Schichtdicke und Füllgrad*, in: *RTeJournal - Fachforum für Rapid Technologie*, Vol. 2016

Online-Quellen (21)

Adam, Guido (2013): *Konstruktionsregeln für additive Fertigungsverfahren*

http://spectronet.de/story_docs/vortraege_2013/131106_optonet_workshop/131106_03_adam_dmrc.pdf
[Stand: 4.September.2017]

Barkawi Management Consultants (2017): *Barkawi Management Consultants*

<http://www.barkawi.com/fuer-kunden/supply-chain-management.html> [Stand: 12.Januar.2018]

Baumgärtner, Sebastian (2017): *M3D Online Portal rund ums Thema 3D-Druck*

<http://www.magazin-3d-druck.de/fdm-3d-druck-abs-oder-pla/> [Stand: 8.August.2017]

FH CAMPUS 02 (2016): *FH CAMPUS 02*

<https://www.campus02.at/> [Stand: 21.Juli.2017]

filamentworld (2017): *Produkte: filamentworld*

<https://www.filamentworld.de/> [Stand: 8.August.2017]

Formfutura (2017): *Formfutura*

<https://www.formfutura.com/page/products> [Stand: 8.August.2017]

Göllner, Olaf (2014): *Heise online*

<https://www.heise.de/make/meldung/3D-Druck-mit-Glasfaser-und-Carbon-2100067.html> [Stand: 12.Januar.2018]

Ingenieurkurse (2017): *Ingenieurkurse*

<https://www.ingenieurkurse.de/technische-mechanik-elastostatik/stabbeanspruchungen/materialgesetz/spannungs-dehnungs-diagramm.html> [Stand: 15.11.2017]

JUST3DP (2016): *JUST3DP*

<https://www.just3dp.com/blog/post/probleme-beim-3d-druck/> [Stand: 18.August.2017]

Kaune, Vanessa; Schuster, Jennifer; Janda, Daniel; Schlicker, Lukas; Gang, Florian; Seemüller, Christoph (o. J.): *Praktikum Massivwerkstoffe*

http://www.mawi.tu-darmstadt.de/media/phm/3semester/zugversuch_sem31.pdf [Stand: 20.August.2017]

Kern GmbH (2017): *Kern GmbH*

https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/acrylnitril-styrol-acrylester-asa?n=2131_1 [Stand: 8.11.2017]

Lutz, Johannes (2015): *Johannes Lutz*

http://johannes-lutz.de/home/wp-content/uploads/2015/04/3D_Druck_Profi-Wissen-v1.pdf [Stand: 31.Juli.2017]

Maschinenbau-Wissen (2009): *Maschinenbau-Wissen*

<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/metall/24-zugversuch> [Stand: 18.August.2017]

Polymer Service GmbH Merseburg (2017): *wiki.polymerservice-merseburg*

http://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Servohydraulische_Pr%C3%BCfmaschine [Stand: 15.11.2017]

Popp, Manfred (o. J.): *SKZ Das Kunststoff-Zentrum GmbH*

<https://www.skz.de/de/forschung/geschaeftsfelder/additivefertigungsverfahren/verfahren1/fdm1/index.html> [Stand: 4.August.2017]

RAMPA (2017): *RAMPA Muffen - Schrauben*

<https://www.rampa.com/shopde.html> [Stand: 12.11.2017]

Rapidobject (2015): *Rapidobject*

https://www.rapidobject.com/csdata/download/1/de/toleranzen_din_iso_2768-1_11.pdf [Stand: 13.Januar.2018]

Schäfer, Robert (2008): *Staats- und Universitätsbibliothek Bremen*

<http://elib.suub.uni-bremen.de/dipl/docs/00000108.pdf> [Stand: 9.September.2017]

Thingiverse (2017): *Thingiverse*

<https://www.thingiverse.com/> [Stand: 16.11.2017]

Universität Stuttgart (o. J.): *Zugversuch*

http://www.uni-stuttgart.de/mawi/aktuelles_lehrangebot/documents/LS1/SoSe16/ZV.pdf [Stand: 20.August.2017]

Ziech, Andrea (2014): *INGENIEUR*

<http://www.ingenieur.de/Themen/IT-Hardware/Ersatzteile-fuer-Rennwagen-Flugzeuge-3D-Drucker> [Stand: 18.August.2017]

Normen (1)

VDI (Hrsg.) (2015): *Additive Fertigungsverfahren: Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen*

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Organigramm der FH CAMPUS 02 GmbH, Quelle: FH CAMPUS 02.	3
Abb. 2: Funktionsprinzip von generativen Fertigungsverfahren, Quelle: Schmidt (2016), S. 20.	4
Abb. 3: 3D-CAD einer Insel (oben) und Slicingprozess (unten), Quelle: Eigene Darstellung, Vgl. VDI-Richtlinie 3405 (2015), S. 7.	5
Abb. 4: STL-Datei Exportinformationen aus einer CAD-Software, Quelle: Eigene Darstellung.	7
Abb. 5: Überblick über generative Technologien und deren Materialien, Quelle: Feldmann / Pumpe (2016), S. 6.	7
Abb. 6: Treppenstufeneffekt von generativen Fertigungsverfahren, Quelle: Breuninger u. a. (2013), S. 55.	9
Abb. 7: Funktionsweise von Fused Filament Fabrication, Quelle: Breuninger u. a. (2013), S. 32.	10
Abb. 8: Hauptbestandteile des HAGE 3D-72L-A 3D-Druckers, Quelle: Betriebsanleitung HAGE 3D-72L-A (2016), S. 24.	11
Abb. 9: Phasen der Prozessanalyse von generativen Fertigungsverfahren, Quelle: Breuninger u. a. (2013), S. 41.	14
Abb. 10: Schlechte Schichten (links) und optimale Schichten (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	17
Abb. 11: Warpingeffekt eines mittels weißem PLA nicht fertiggedruckten Bauteils, Quelle: Eigene Darstellung.	18
Abb. 12: Abbildung von Ecken, Quelle: Gebhardt (2013), S. 253.	20
Abb. 13: Abbildung filigraner Geometriedetails bzw. feiner Stege, Quelle: Gebhardt (2013), S. 253.	20
Abb. 14: Kohlefaserverstärkter Rennwagen-Flügel mit Nylonverkleidung und Wabenstruktur im Querschnitt, Quelle: Heise (2014), Onlinequelle [18.08.2017].	21
Abb. 15: Spannungsdreieck zwischen Qualität, Kosten und Zeit, Quelle: Grund (2015), S. 19.	22
Abb. 16: Veränderung der Supply Chain in den kommenden Jahrzehnten, Quelle: Barkawi Management Consultants (2013), Onlinequelle [25.08.2017].	23
Abb. 17: Einsatz der generativen Fertigung in der direkten Produktion, Quelle: Breuninger u. a. (2013), S. 18.	24
Abb. 18: Einteilung unterschiedlicher Wirtschaftskriterien in drei Bereiche, Quelle: Schmidt (2016), S. 85.	25
Abb. 19: Kostenvergleich über unterschiedliche Phasen der Produktentwicklung, Quelle: (Lutz 2015), Onlinequelle [31.07.2017].	26
Abb. 20: Schematische Darstellung einer servohydraulischen Zugprüfmaschine, Quelle: Polymer Service GmbH Merseburg (2017), Onlinequelle [15.11.2017].	27

Abb. 21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm und deren Werkstoffkennwerte, Quelle: Ingenieurkurse (2017), Onlinequelle [15.11.2017] (leicht modifiziert).....	28
Abb. 22: Möglichkeiten zur Ausrichtung eines Prüfkörpers im Bauraum, Quelle Bagsik (2010), S. 3.....	32
Abb. 23: Veränderung der Fertigungszeit aufgrund unterschiedlicher Positionierung, Quelle: Eigene Darstellung.	33
Abb. 24: Gegenüberstellung des Schichtaufbaus unterschiedlicher Bauteilpositionen, Quelle: Eigene Darstellung.	33
Abb. 25: Vergleich eines 3D-CAD-Modells mit unterschiedlichen Schichtaufbauwinkeln, Quelle: Eigene Darstellung.	34
Abb. 26: Zugversuch nach dem Standardprüfverfahren ASTM D 638 dreier ident hergestellter Probenkörper in unterschiedlichen Ausrichtungen, Quelle: Bagsik (2010), S. 4 (leicht modifiziert).	35
Abb. 27: Vergleich zweier unterschiedlich starker Wanddicken mit gleichem Düsendurchmesser, Quelle: Adam (2013), S. 5.	35
Abb. 28: Dichtheit eines Bauteils, Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [04.09.2017].	36
Abb. 29: Parameter zur Erhöhung der Breite der ersten Schicht von 100 % auf 150 %, Quelle: Eigene Darstellung.	37
Abb. 30: Auslegung eines Kernlochs (links) und Oberflächenfehler (rechts), Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [08.09.2017].....	37
Abb. 31: Abbildung einer Ecke parallel zur Bauplattform (links) und gefertigtes Eckenelement (rechts), Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [08.09.2017].	38
Abb. 32: Zusammenhang zwischen Inselhöhe und Fertigungszeit, Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [09.09.2017].....	38
Abb. 33: Schematische Darstellung des Oberflächenwinkels mit und ohne Stützmaterial (roter Bereich), Quelle: Adam (2013), Onlinequelle [09.09.2017].	39
Abb. 34: Düsendurchmesser als limitierende Größe, Quelle: Schäfer (2008), Onlinequelle [09.09.2017].	40
Abb. 35: Veränderung des Parameters Einzugsdistanz zur Minimierung der Fadenbildung, Quelle: Eigene Darstellung.	40
Abb. 36: Geometrie des Prüfkörpers in mm nach EN ISO 527, Quelle: RTeJournal (2016), Onlinequelle [20.08.2017].	41
Abb. 37: Generative Fertigung mit dem 3D-Druckermodell HAGE 3D-72L-A, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Abb. 38: Aufbau der verwendeten Zugprüfmaschine auf der Montanuniversität Leoben – Lehrstuhl allgemeiner Maschinenbau, Quelle: Eigene Darstellung.	43
Abb. 39: Startpunkt der Zugproben 1 – 3, Quelle: Eigene Darstellung.	45

Abb. 40: Toleranztabelle für unterschiedliche generative Fertigungsverfahren aus der Norm ISO 2768, Quelle: Rapidobject (2017), Onlinequelle [08.11.2017].	47
Abb. 41: Struktur der gefertigten Zugproben – 1, Quelle: Eigene Darstellung.	49
Abb. 42: Struktur der gefertigten Zugproben – 2, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Abb. 43: Struktur der gefertigten Zugproben – 3, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Abb. 44: Struktur der gefertigten Zugproben – 4, Quelle: Eigene Darstellung.	51
Abb. 45: Struktur der gefertigten Zugproben – 5, Quelle: Eigene Darstellung.	51
Abb. 46: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – 1, Quelle: Eigene Darstellung.	52
Abb. 47: Korrelation zwischen Startpunkt und Bruchstelle an den geprüften Probenkörpern, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Abb. 48: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – 2, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Abb. 49: Veränderung der Bruchstellen aufgrund unterschiedlicher Startpunkte, Quelle: Eigene Darstellung.	54
Abb. 50: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – 3, Quelle: Eigene Darstellung.	55
Abb. 51: Geprüfte Probenkörper mit dem Fertigungsparametersatz 3, Quelle: Eigene Darstellung.	56
Abb. 52: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Diagramme dreier Probenkörper mit unterschiedlichen Schichtaufbauwinkeln unter Verwendung des Fertigungsparametersatzes 3, Quelle: Eigene Darstellung.	57
Abb. 53: Darstellung der geprüften Probenkörper mit unterschiedlichen Schichtaufbauwinkeln, Quelle: Eigene Darstellung.	57
Abb. 54: Vergleich der unterschiedlichen Werte des Elastizitätsmoduls, Quelle: Eigene Darstellung.	58
Abb. 55: Probenkörper für eine Muffe TYP E in der Größe M3, M4 und M5 (von links nach rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	59
Abb. 56: Unterschiedliche Wandstärken der Schraubverbindungsart Muffe TYP M3 in der Größe M3 (links) und Größe M5 (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	60
Abb. 57: Für die Fertigung der Probenkörper verwendeten Prozessparameter des Fertigungsparametersatzes 3, Quelle: Eigene Darstellung.	60
Abb. 58: Versuchsaufbau inklusive Erklärung (links) und ausgezogene Muffen aus Probenkörper (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	61
Abb. 59: Messpunkt der Probenkörper in x- und y-Richtung, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Abb. 60: Generative Fertigung der konstruierten Probenkörper für die unterschiedlichen Schraubverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	63
Abb. 61: Einschraubtiefe der beiden Schraubenarten für die Prüfung der mechanischen Festigkeit, Quelle: Eigene Darstellung.	64

Abb. 62: Versuchsaufbau zum Testen der Auszugsfestigkeit unterschiedlicher Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	67
Abb. 63: Messpunkte anhand der Steckverbindung 1 zur Prüfung der Maßhaltigkeit, Quelle: Eigene Darstellung.	68
Abb. 64: Struktur der T-Steckverbindung 3, Quelle: Eigene Darstellung.....	70
Abb. 65: Messpunkt am Beispiel der Klemmverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.	75
Abb. 66: Struktur der Karabiner-Schnappverbindung Version 4, Quelle: Eigene Darstellung.....	80
Abb. 67: Nichtgewollte Materialanhäufung direkt am Verbindungselement der Clipverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.	81
Abb. 68: Sichtbares Warping entlang der langen Auflagefläche an der Clipverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.	82
Abb. 69: Brim-Funktion der Fertigungssoftware Simplify3D zur Verhinderung von Warping, Quelle: Eigene Darstellung.	82
Abb. 70: Optimierte Clipverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.	83
Abb. 71: Nachträgliches Entfernen der Verschmelzungspunkte, Quelle: Eigene Darstellung.....	83
Abb. 72: Spaltmaßoptimierung (links) und Ausnutzung des Treppenstufeneffekts (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	84
Abb. 73: Erweiterung des Ausschnitts-Elements (links), Optimierung der Einhängegeometrie (mittig) und Radien für bessere Passfähigkeit (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	84
Abb. 74: Übersicht der Produktionsrichtlinie, Quelle: Eigene Darstellung.	86
Abb. 75: Rahmenbedingungen der Produktionsrichtlinie, Quelle: Eigene Darstellung.	87
Abb. 76: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 1, Quelle: Eigene Darstellung.	88
Abb. 77: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 2, Quelle: Eigene Darstellung.	89
Abb. 78: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 3, Quelle: Eigene Darstellung.	90
Abb. 79: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 4, Quelle: Eigene Darstellung.	91
Abb. 80: Konstruktion unterschiedlicher Schraubverbindungen – 5, Quelle: Eigene Darstellung.	92
Abb. 81: Konstruktion unterschiedlicher Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	93
Abb. 82: Konstruktion unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	94
Abb. 83: Generative Fertigung unterschiedlicher Schraub- und Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	95
Abb. 84: Generative Fertigung unterschiedlicher Steckverbindungen und einer Schnappverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.....	96
Abb. 85: Generative Fertigung unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	97

Abb. 86: Prüfung und Bewertung unterschiedlicher Schraub- und Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	98
Abb. 87: Prüfung und Bewertung unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	99
Abb. 88: Prüfung und Bewertung einer Schnappverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.	100
Abb. 89: Anhang – 1, Quelle: Eigene Darstellung.	101
Abb. 90: Anhang – 2, Quelle: Eigene Darstellung.	102

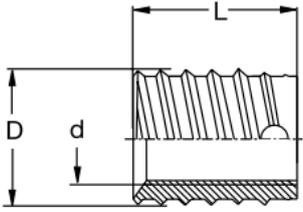
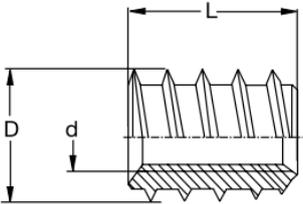
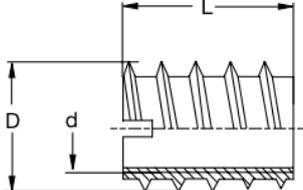
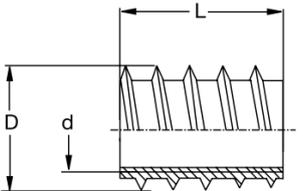
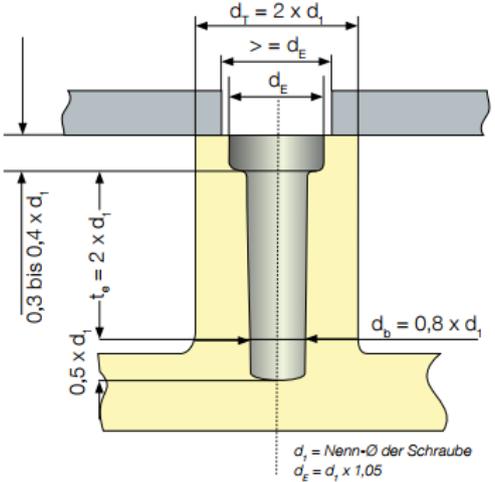
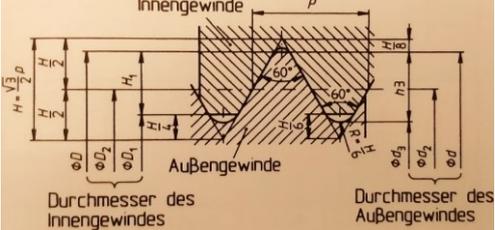
TABELLENVERZEICHNIS

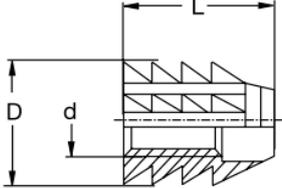
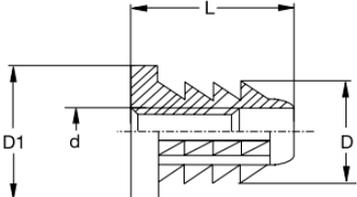
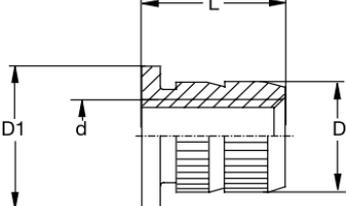
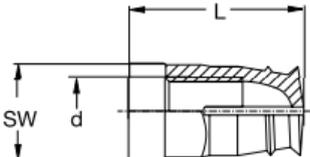
Tab. 1: Allgemeine Informationen und technische Daten des verwendeten 3D-Druckers, Quelle: Betriebsanleitung HAGE3D 72 L (2016), S. 20f.	12
Tab. 2: Darstellung der wichtigsten Parameter des Basisfertigungsparametersatzes, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Tab. 3: Parameter des ersten Versuchs, Quelle: Eigene Darstellung.	45
Tab. 4: Parameter des zweiten Versuchs, Quelle: Eigene Darstellung.	46
Tab. 5: Parameter des dritten Versuchs, Quelle: Eigene Darstellung.	46
Tab. 6: Maßhaltigkeitsvergleich 1 aller gefertigten Probenkörper, Quelle: Eigene Darstellung.....	48
Tab. 7: Maßhaltigkeitsvergleich 2 aller gefertigten Probenkörper, Quelle: Eigene Darstellung.....	48
Tab. 8: Beispieldarstellung des Bewertungskriteriums Struktur, Quelle: Eigene Darstellung.....	49
Tab. 9: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 1, Quelle: Eigene Darstellung.	49
Tab. 10: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 2, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Tab. 11: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 3, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Tab. 12: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 4, Quelle: Eigene Darstellung.	51
Tab. 13: Strukturelle Bewertung der Zugproben – 5, Quelle: Eigene Darstellung.	51
Tab. 14: Gegenüberstellung der wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen – 1, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Tab. 15: Gegenüberstellung der wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen – 2, Quelle: Eigene Darstellung.	54
Tab. 16: Gegenüberstellung der wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen – 3, Quelle: Eigene Darstellung.	56
Tab. 17: Vergleich der wichtigsten Kenngrößen aus den Zugversuchen mit unterschiedlichem Aufbauwinkel, Quelle: Eigene Darstellung.	58
Tab. 18: Maßhaltigkeitsvergleich unterschiedlicher Richtungen der gefertigten Probenkörper, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Tab. 19: Strukturelle Bewertung Probenkörper für Schraubverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung. ...	62
Tab. 20: Vergleich der beiden ABS-Varianten, Quelle: Eigene Darstellung.	65
Tab. 21: Auflistung der unterschiedlichen Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	67
Tab. 22: Maßhaltigkeitsvergleich unterschiedlicher Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	70
Tab. 23: Strukturelle Bewertung Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	71
Tab. 24: Auszugsfestigkeit unterschiedlicher Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	71

Tab. 25: Vorher- und Nachher-Vergleich der Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	72
Tab. 26: Geometrische Darstellung unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	75
Tab. 27: Maßhaltigkeitsvergleich unterschiedlicher Schnappverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	79
Tab. 28: Strukturelle Bewertung Steckverbindungen, Quelle: Eigene Darstellung.	81

ANHANG 1: NORMGEOMETRIE DER SCHRAUBVERBINDUNGS-TECHNIKEN

Schraubverbindungstechnik	Besonderheit	Abbildung laut Datenblatt
Muffe TYP E	Metrisches Außengewinde; Einsatz in härtere Materialien	
Muffe TYP ES	Konischer Ansatz mit breitem Schneidschlitz erleichtert Einschrauben; metrisches Außengewinde	
Muffe TYP ESD	Selbstschneidende Muffe mit Kopf für spannungsarme Montage in harte Materialien	
Muffe TYP ESK	Selbstschneidende Muffe für extrem harte Materialien mit Innensechskantantrieb	
Muffe TYP BAN	Drei Schneidbohrungen im Außengewinde unterstützen das Einschrauben in härtere Materialien	
Muffe TYP BAS	Selbstschneidende Muffe für extrem harte Materialien mit Spänekammern	

<p>Muffe TYP BAV</p>	<p>Drei Schneidbohrungen im Außengewinde unterstützen das Einschrauben in härtere Materialien</p>	
<p>Muffe TYP BV</p>	<p>Gut geeignet für automatisches Zuführung</p>	
<p>Muffe TYP C</p>	<p>Dünnwandig mit Schlitz</p>	
<p>Muffe TYP CV</p>	<p>Entsprechen maßlich TYP C</p>	
<p>Schraube für Kunststoff DELTA PT</p>	<p>Direktverschraubung in Kunststoff, hohe Dauerschwingfestigkeit, hohe Zugfestigkeit</p>	
<p>Metrische Schraube</p>	<p>Standardisiertes Gewinde mit metrischen Abmessungen und 60° Flankenwinkel</p>	

Einschlagmutter TYP SBZ	Starke Zacken verhindern ein Verdrehen der Mutter	
Einschlagmutter TYP TSBZ	Starke Zacken verhindern ein Verdrehen der Mutter	
Einschlagmutter TYP TS	Mit Bund und gerändeltem Schaft	
Spreizmuffe TYP SE	Ohne Kugel	

ANHANG 2: AUSZUGSFESTIGKEIT DER SCHRAUBVERBINDUNGS-TECHNIKEN

Schraub- verbindungsart	Ø benötigt (mm)	Ø konstruiert (mm)	Ø Schraub- verbindung (mm)	Ein- schraub- tiefe (mm)	Effektive Gewinde- tiefe (mm)	~ F _{max} (N)	
Muffe TYP E M3	4,5	4,7	4,92	6	0,42	730	
Muffe TYP E M4	5,7	5,9	6,44	8	0,74	1780	
Muffe TYP E M5	6,9	7,1	7,88	10	0,98	2160	
Muffe TYP ES M4	6	6,2	6,4	8	0,4	1220	
Muffe TYP ESD M4	5,8	6	6,37	9	0,57	1390	
Muffe TYP ESK M4	7,5	7,7	7,97	10	0,47	1580	
Muffe TYP BAN M4	6,1	6,3	6,44	8	0,34	1310	
Muffe TYP BAS M4	6,1	6,3	6,48	8	0,38	1490	

Anhang 2: Auszugsfestigkeit der Schraubverbindungs-techniken

Muffe TYP BAV M4	6,1	6,3	6,45	6	0,35	810	
Muffe TYP BV M4	7,5	7,7	8	10	0,5	1770	
Muffe TYP C M4	5,5	5,7	6,52	8	1,02	1750	
Muffe TYP CV M4	5,5	5,7	6,51	10	1,01	2630	
Schraube für Kunststoff M3	2,4	2,6	3,08	7	0,68	1040	
Schraube für Kunststoff M4	3,2	3,4	4,07	7	0,87	1160	
Schraube für Kunststoff M5	4	4,2	5,02	7	1,02	1130	
Metrische Schraube M3	2,5	2,7	2,96	7	0,46	790	

Anhang 2: Auszugsfestigkeit der Schraubverbindungs-techniken

Metrische Schraube M4	3,3	3,5	3,9	7	0,6	1410	
Metrische Schraube M5	4,2	4,4	4,92	7	0,72	1400	
Einschlagmutter TYP SBZ M4	6,3	6,5	8	10	1,7	640	
Einschlagmutter TYP TSBZ M4	6,4	6,6	8	10	1,6	610	
Einschlagmutter TYP TS M4	5	5,2	5,66	8	0,66	820	
Spreizmuffe TYP SE M4	5,5	5,7	5,53	10	0,03	200	